

Pascal Heinz, Michael Herrmann, Werner Sobek

# **Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen**

F 2811

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- 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

2012

ISBN 978-3-8167-8658-0

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

---

## **Forschungsprojekt**

Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen

## **Förderstelle**

Forschungsinitiative Zukunft Bau

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

Deichmanns Aue 31-37

53179 Bonn (Germany)

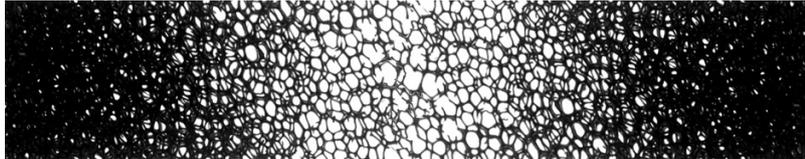
## **Förderkennzeichen**

Z 6 – 10.08.18.7- 08.37/ II 2 – F20-08-1-198

---

## Abschlussbericht

### Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

Verfasser:

Dipl.-Ing. Pascal Heinz  
Dipl.-Ing. Michael Herrmann  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

Stuttgart, Februar 2011

Dieser Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

(Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7- 08.37/ II 2 – F20-08-1-198)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

## **Forschungsprojekt**

Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen

### **Förderstelle**

Forschungsinitiative Zukunft Bau  
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
Deichmanns Aue 31-37  
53179 Bonn (Germany)

### **Förderkennzeichen**

Z 6 – 10.08.18.7- 08.37/ II 2 – F20-08-1-198

### **Bearbeitung**

Dipl.-Ing. Pascal Heinz  
Dipl.-Ing. Michael Herrmann

### **Bearbeitungszeitraum**

März 2009 - Oktober 2010  
Kostenneutral verlängert bis 28.02.2011

### **Bearbeitungsstelle**

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Werner Sobek  
Pfaffenwaldring 7 + 14  
70569 Stuttgart  
Telefon 0711 / 685 63599  
Telefax 0711 / 685 66968

## Danksagung

Die Förderung des Projekts erfolgte durch Mittel der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung.

(Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7- 08.37/ II 2 – F20-08-1-198)

Dank gilt insbesondere den Mitgliedern der Arbeitsgruppe:

Dr.-Ing. Michael Brüggemann  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen  
Dr.-Ing. Jens Uwe Pott  
Dr.-Ing. Philip Elsner

Besonderer Dank gilt auch den Industriepartnern:

Sika Deutschland GmbH  
Putzmeister Holding GmbH  
HeidelbergCement AG  
RoomStone GmbH  
BetonMarketing Süd  
Mayser GmbH & Co. KG

Nicht zuletzt sei den studentischen Hilfskräften und Diplomanden für ihr Engagement herzlich gedankt:

Julian Baun  
Pola Dietrich  
Roland Falk  
Christian Noack  
Raphael Marro  
Sören Sippel

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	2
2.1	Motivation	2
2.2	Projektziele	2
2.3	Sitzung der Arbeitsgruppe	3
2.4	Gliederung	4
3	Gradientenwerkstoffe	5
3.1	Begriff	5
3.2	Vorbilder in der Natur	5
3.3	Stand der Forschung	6
3.4	Konzepte	8
3.5	Gradientenwerkstoffe und Architektur	9
4	Beton	10
4.1	Einführung	10
4.2	Grundlagen	11
4.2.1	Beton als variables 5-Stoff-System	11
4.2.2	Leichtbeton	25
4.2.3	Faserbeton, Textilbeton	29
4.3	Mischungsentwürfe für Gradientenbetone	32
4.3.1	Einführung	32
4.3.2	Verwendete Materialien	32
4.3.3	Versuchsdurchführungen	41
4.3.4	Vorversuche und Ergebnisse	48
4.3.5	Mischungsentwürfe	52
4.3.6	Versuchsergebnisse der Gradientenbetonmischungen	67
4.3.7	Diskussion der Ergebnisse	77
4.4	Herstellungsverfahren	81
4.4.1	Schichtweises Gießen	81
4.4.2	Kontrolliertes Entmischen	82
4.4.3	Einbringen und Herauslösen reversibler Platzhalter	85
4.4.4	Alkalisch lösliche Trennlagen	86
4.4.5	Infiltration	87
4.4.6	Gradiertes Mischen	87
4.4.7	Beton Drucken	88
4.4.8	Schichtweises Sprühen	89
4.4.9	Gradiertes Sprühen	90
4.5	Anwendungsbereiche	97

4.5.1	Außenwand	97
4.5.2	Geschossdecke	101
5	Polymere	115
5.1	Grundlagen	115
5.1.1	Rohstoff	115
5.2	Herstellung	116
5.2.1	Zuschnitt	116
5.2.2	Komprimieren	118
5.2.3	Konsolidieren	119
5.3	Anwendungsbereiche	125
5.3.1	Optimierte Kernschichten von Sandwichbauteilen	125
5.3.2	Gestaltung	126
5.3.3	Schallschutz	129
5.3.4	Massenersparnis	129
5.3.5	Bewehrung	129
5.3.6	Verbindungstechnik	130
6	Textilien und Faserverbundwerkstoffe	131
6.1	Einführung	131
6.2	Textilien	132
6.2.1	Herstellungsverfahren	132
6.2.2	Anwendungsbereiche	134
6.3	Faserverbundwerkstoffe	137
6.3.1	Voruntersuchungen	137
6.3.2	Herstellungsverfahren	139
6.4	Zusammenfassung	142
7	Fließende Materialübergänge	143
7.1	Einführung	143
7.2	Werkstoff Holz	143
7.3	Herstellungsansatz	144
7.4	Chemisches Freilegen der Fasern	144
7.4.1	Lösungsmittel	145
7.4.2	Holzarten	145
7.4.3	Versuchsdurchführung	145
7.4.4	Versuchsergebnisse	146
7.5	Mechanisches Freilegen der Fasern	148
7.5.1	Verwendete Materialien	148
7.5.2	Versuchsdurchführung	148
7.6	Einbinden in eine zweite Phase	150

7.7 Zusammenfassung	151
7.8 Weitere Materialien	152
8 Ausblick	153
9 Literatur	154
10 Abbildungen	157
11 Tabellen	164
Anhang	
1 Vorversuche funktional gradierte Deckenelemente	1
2 Hauptversuche funktional gradierte Deckenelemente	3
2.1 Versuchsserie SV3	3
2.2 Versuchsserie SV4	5
2.3 Versuchsserie SV5	8
2.4 Versuchsserie SV6	10
3 Versuchsergebnisse Versuche gradiertes Sprühen	13

## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen untersucht.

Funktional gradierte Bauteile sind durch eine ortsabhängige kontinuierliche Eigenschaftsänderung in bis zu drei Raumrichtungen charakterisiert. Die Variation der Eigenschaften kann durch die Gradierung der Dichte bzw. der Porosität eines Werkstoffes oder durch die Änderung des Verhältnisses verschiedener Werkstoffe zueinander erreicht werden.

Dieser Ansatz wurde für die Materialklassen Beton, Polymere, Metalle, Textilien, Faserverbundwerkstoffe und Holz untersucht. Zunächst wurden die theoretischen Grundlagen erarbeitet und, nach Definition vielversprechender Anwendungsbereiche, Methoden zur Herstellung entwickelt und erprobt. Hierbei wurden Probekörper und Musterbauteile hergestellt, die hinsichtlich statischer und bauphysikalischer Eigenschaften geprüft wurden.

Der Schwerpunkt lag auf Untersuchungen im Bereich Beton, da in dieser Materialklasse die größten Optimierungspotentiale für die Baubranche zu erwarten sind. Dabei wurden zwei Hauptziele verfolgt: zum einen die Einsparung von Masse und Material durch eine anforderungsgemäße Dichtegradierung biegebeanspruchter Bauteile und zum anderen die Herstellung multifunktionaler und sortenreiner Bauteile mit Anwendungen in der Gebäudehülle. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Anpassung der inneren Bauteilstruktur an die tatsächlich auftretenden Beanspruchungen Masseneinsparungen von bis zu 50 % zu realisieren sind. Außerdem wurde die Machbarkeit rein mineralischer Außenwandbauteile mit geringeren Wandstärken als bei vergleichbar leistungsfähigen Wärmedämmverbundsystemen nachgewiesen.

Im Bereich Polymere konnten fließende Porositätsverläufe in Polyurethanschäumen angelegt werden, mit vielversprechenden Anwendungen bei optimierten Sandwichbauteilen, im Bereich Schallschutz und im Möbeldesign. Auf Basis dieser Schaumstoffe können Metallschäume mit identischer Struktur hergestellt werden, die als gradierte Bewehrungselemente oder in der Verbindungstechnik neue Lösungen ermöglichen.

Im Bereich Textilien wurden die Möglichkeiten zur Gradierung der Beschichtung untersucht. Hierdurch konnten die Permeabilität ebenso wie die Steifigkeit nahtlos variiert werden. Bei Faserverbundwerkstoffen konnte durch den fließenden Matrixübergang von Polymerharz zu Metall ein Ansatz für die materialgerechte Fügung von Faserverbundwerkstoffprofilen geboten werden. Materialgradierungen im Sinne eines fließenden Übergangs von einem Werkstoff zum anderen wurden exemplarisch für den Werkstoff Holz untersucht.

Die vorliegende Arbeit stellt die erste Vertiefung des Themas der Bauteilgradierung für das Bauwesen dar. Dabei konnten die gesteckten Projektziele erreicht werden: das Aufzeigen vielversprechender Anwendungsbereiche, die Formulierung und Erprobung diesbezüglicher Herstellungsansätze und der Nachweis der Vorteilhaftigkeit funktional gradierter Bauteile.

## 2 Einleitung

Die Arbeiten und die erreichten Ziele des Forschungsprojekts „Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen“ werden nachfolgend dargestellt.

### 2.1 Motivation

Es wird das für die Bautechnik neue Themengebiet der Gradientenwerkstoffe behandelt. Durch die funktionale Gradierung der inneren Struktur von Bauteilen sind signifikante Einsparungen an Masse, Material und der in Bauteilen gebundenen (embodied) Energie zu erwarten. Dies entspricht den Kernzielen des Leichtbaus, wie sie von Sobek in [1] beschrieben werden. Neben den genannten ökologischen Vorteilen bieten sich vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Verbindungstechnik, Bauphysik und Gestaltung. Die konzeptionellen Grundlagen für Anwendung und Herstellung funktional gradierter Bauteile im Bauwesen wurden am ILEK entwickelt [2].

Die Arbeit ist bewusst materialübergreifend angelegt, um einen umfassenden Zugang zu diesem neuen Themengebiet zu ermöglichen. Die Identifikation von bautechnisch relevanten Anwendungsbereichen als Resultat der durchgeführten Untersuchungen schafft eine Ausgangsbasis für die fokussierte Weiterbearbeitung des Themas.

### 2.2 Projektziele

Die Projektziele im Wortlaut der Beantragung:

“Es sollen für verschiedene Baustoffklassen (Polymere, Betone, Metalle) mögliche Herstellungsverfahren (Gießen, Schichten, Drucken etc.) und Anwendungsfelder (Tragstruktur, Raumabschluss, Innenausbau, Möbelbau) für funktional gradierte Bauteile untersucht und bewertet werden.

Dieses Ziel soll erreicht werden, indem überprüft wird, ob Materialien und Verfahren, mit denen im Kleinmaßstäblichen bereits gradierte Bauteile für den Maschinenbau und die Luft- und Raumfahrt hergestellt werden, auf größere Maßstäbe übertragbar sind. Außerdem werden die grundlegenden Materialbedingungen für die Herstellung von Gradientenwerkstoffen ermittelt und mit den Möglichkeiten gängiger Herstellungsverfahren abgeglichen.

Der Bewertung potentieller und zu untersuchender Herstellungsverfahren sowie deren Einsetzbarkeit im Bauwesen folgen praktische Versuche zur Fertigung von Proben und Mustern. Die Proben werden in Hinblick auf ihre baurelevanten Eigenschaften getestet. Hierbei werden sowohl statische als auch bauphysikalische Prüfungen durchgeführt (Festigkeiten, U-Wert, Wärmeleitfähigkeit etc.).

---

Ziel des Vorhabens ist ebenfalls, von architektonischer Seite die neuen gestalterischen Möglichkeiten der Gradientenwerkstoffe zu bewerten und Vorschläge für deren Einsatzbereiche zu erarbeiten.“

### 2.3 Sitzung der Arbeitsgruppe

Am 16.03.2010 fand die erste Arbeitsgruppensitzung am ILEK statt.

Es folgen Auszüge aus dem Protokoll dieser Zusammenkunft:

#### Teilnehmer

Anwesend: Dr.-Ing. Michael Brüggemann (BBSR)  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen (TU München)  
Dr.-Ing. Jens Uwe Pott (Güteschutz Nord)  
Dipl.-Ing. Pascal Heinz, Dipl.-Ing. Michael Herrmann (ILEK)

Abwesend: Dr.-Ing. Philip Elsner (Berlin Heart) (kurzfristig erkrankt)

#### Inhalte

Es wurde ein Zwischenstand des Projektes präsentiert. Hierbei wurden folgende Arbeitspakete vorgestellt: Theoretische Grundlagen, Betontechnologie, Herstellungsverfahren, Faserverbundwerkstoffe, Textilien, Polymerschäume.

Es folgte eine Diskussion zur Definition der weiteren Arbeitsschwerpunkte. Als Schwerpunkt wurde der Werkstoff Beton und die Entwicklung von Mischtechniken zur Herstellung von Gradientenbetonen mit kontinuierlichen Eigenschaftsverläufen festgelegt. Weitergehende Untersuchungen hinsichtlich Schallschutz, Kriechverhalten und Dauerhaftigkeit wurden zu diesem Zeitpunkt als nicht sinnvoll erachtet und sollten auf ein notwendiges Minimum reduziert werden. Die Anwendungsbereiche Wand- und Deckenbauteile wurden als vielversprechend erachtet und sollten in weitergehenden Forschungsprojekten zur Serienreife ausgearbeitet werden.

Die Entwicklung des Materialübergangs von harzgebundenen zu metallgebundenen Faserverbundwerkstoffen zur materialgerechten Fügung von Faserverbundwerkstoffprofilen wurde von den Gutachtern als sehr interessant eingestuft und sollte in einem anschließenden Forschungsprojekt weiterverfolgt werden.

## **2.4 Gliederung**

Nach einer Einführung in den Forschungsbereich der Gradientenwerkstoffe werden die untersuchten Materialklassen nacheinander thematisiert. Hierbei werden jeweils die Grundlagen dargestellt, Herstellungsverfahren beschrieben, Bauteilversuche dokumentiert und Anwendungsbereiche aufgezeigt. Abschließend wird ein Ausblick geboten, in welchen Bereichen und mit welchen Schwerpunkten eine Weiterbeforschung des Themenfeldes aus Sicht der Verfasser besonders vielversprechend erscheint.

### 3 Gradientenwerkstoffe

#### 3.1 Begriff

Das Konzept der funktionalen Gradierung von Bauteilen stammt aus den Materialwissenschaften. Die Forschung in diesem Bereich wird unter der Bezeichnung „Gradientenwerkstoffe“ zusammengefasst. Hierbei handelt es sich weniger um eine neue Werkstoffklasse als um Methoden zur gezielten Strukturierung oder Kombination von Materialien.

Eine allgemein verbindliche Definition des Begriffs konnte im Rahmen der Recherche zu diesem Projekt nicht gefunden werden. Die Definition im Folgenden bezieht sich auf Rödel [3]:

„Als Gradientenwerkstoffe werden solche Materialien bezeichnet, bei denen sich eine oder mehrere Eigenschaften, beispielsweise die Härte, die Dichte, die Porosität oder die chemische Zusammensetzung, zumindest in einer Raumrichtung über eine bestimmte Länge kontinuierlich ändern [...].“

#### 3.2 Vorbilder in der Natur

Das Konzept der Gradierung von Materialien hat zahlreiche Vorbilder in der Natur wie beispielsweise der innere Aufbau von Knochen mit anschaulich gradierter Spongiosa oder die gradierte Faserverteilung im Querschnitt des Bambusrohrs [4],[5],[6] (Abbildung 1) zeigen.

Die tragstrukturelle Optimierung wird hierbei durch Anforderungen aus weiteren Parametern überlagert. So dienen die Hohlräume im Inneren von Knochen auch der Aufnahme des Knochenmarks und die Fasern des Bambusrohrs gewährleisten die Nährstoffversorgung. Nicht zuletzt folgt die tatsächliche Ausbildung der Struktur biologischen Wachstumsprinzipien.

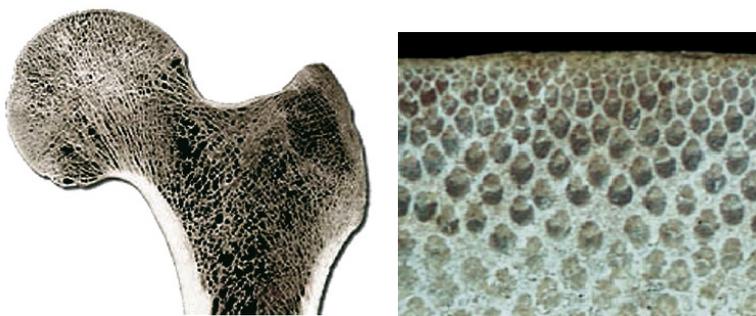


Abbildung 1: Längsschnitt Oberschenkelhalsknochen (links) [4], Querschnitt Bambusrohr (rechts) [5]

Funktionale Gradierungen sind darüber hinaus auf zellulärer Ebene zu beobachten. Beispiele hierfür sind fließende Übergänge im Aufbau von Blättern oder der menschlichen Haut (Abbildung 2). Die Gradierung hat hier weniger eine Effizienzsteigerung im Sinne der Material-

ersparnis zum Ziel als die Verbindung funktionaler Zonen. Diese gehen bei den genannten Beispielen nahtlos ineinander über und werden dadurch verbunden.

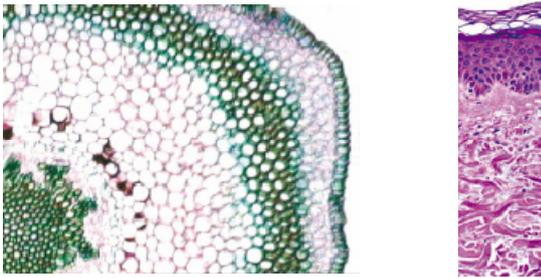


Abbildung 2: Gradiertes Übergang von Zellen, Bärlappgewächs (links), menschliche Haut (rechts) [6]

Das Ziel der Forschung kann es hierbei nicht sein, die natürlichen Strukturen ihrer Erscheinung nach zu kopieren, sondern die in der Natur vorkommenden Optimierungsprinzipien aufzugreifen und in Bezug auf die spezifischen Anforderungen, die sich aus der bautechnischen Anwendung ergeben, zu adaptieren.

### 3.3 Stand der Forschung

Der Forschungsbereich der Gradientenwerkstoffe wurde 1971 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) durch die englische Bezeichnung „Functionally Graded Materials“ (FGM) eingeführt. Erste Anwendungen erfolgten 1984 in Japan, wobei die Temperaturbeständigkeit der Hitzeschildkacheln von Raumfahrzeugen durch den fließenden Übergang von Keramik zu Metall verbessert werden konnte. Hierbei wurden pulverförmiges Metall und pulverförmige Keramik über ein Sedimentationsverfahren in nahtlosen Übergang gebracht, verpresst und durch Sintern konsolidiert [7].

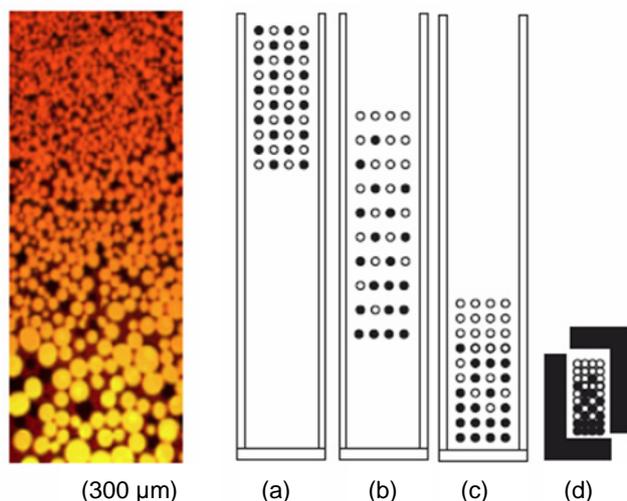


Abbildung 3: Sedimentationsverfahren, Detail Korngrößenverteilung (links) [7], Prinzipskizze Sedimentation (rechts)

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 733 „Gradientenwerkstoffe“ (1995 bis 2003) [8] wurden insbesondere Gradierungen zwischen Keramiken und Metallen, Metallen und Metallen

sowie Keramiken und Polymeren untersucht. Diese Gradierungen haben meist eine Ausdehnung von einigen hundert Mikrometern bis zu mehreren Millimetern. Untersuchungen hinsichtlich Verfahren zur Herstellung, Simulation und Materialprüfung wurden hierbei durchgeführt.

Aktuell konzentriert sich die Forschung im Bereich der Gradientenwerkstoffe vorzugsweise auf die Bereiche 3D-Drucktechnik, Beschichtungstechnologie, Pulvermetallurgie und Medizintechnik [9],[10]. Hierbei steht die Optimierung der thermischen und tribologischen Eigenschaften von hoch beanspruchten Bauteilen im Vordergrund. Anwendungen sind beispielsweise hochtemperaturbeständige Innenhüllen von Kernfusionsreaktoren, die Optimierung von Motorenkomponenten oder medizinische Implantate. Bei Implantaten soll die Gradierung der äußeren Porosität das Einwachsen des umgebenden Gewebes in das Implantat erleichtern.

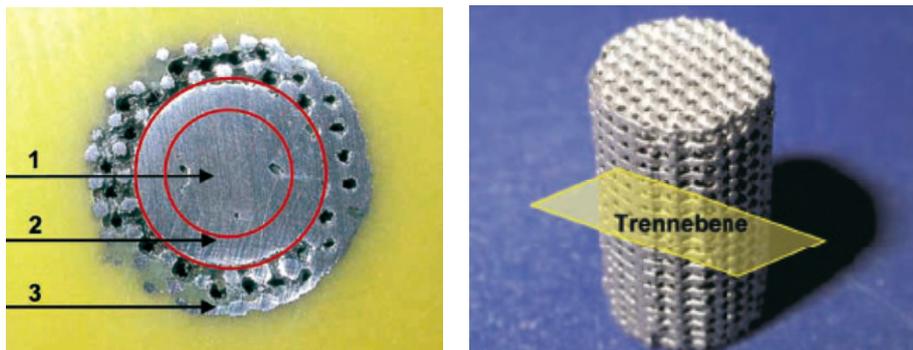


Abbildung 4: Medizinisches Implantat mit gradierter Porosität [8]

Die ersten Arbeiten im Bereich der Gradientenwerkstoffe mit Bezug auf Architektur und Bautechnik erfolgten 2006, am ILEK durch Heinz [2]. Hierbei wurde ein Überblick über das Forschungsgebiet der Gradientenwerkstoffe erarbeitet und prinzipielle Anwendungsbereiche für das Bauwesen definiert.

Das hier dargestellte Forschungsprojekt führt diese Vorarbeiten fort und stellt die erste vertiefte Untersuchung zur Anwendung und Herstellung von funktional gradierten Bauteilen im Bauwesen dar. Neben den Vorarbeiten am ILEK sind den Verfassern keine Arbeiten anderer Stellen in den bearbeiteten Bereichen bekannt.

### 3.4 Konzepte

Die Konzepte zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

1. Herstellungsverfahren ausgehend von einem Werkstoff
  - a. Die anforderungsgemäße Strukturierung eines Werkstoffes (Strukturgradient) wird durch Variation der Porosität erreicht. Die anwendungsbezogenen Ziele hierbei sind: Material- und Massenreduktion (Vorbild: Knochenstrukturen), Verbesserung der Wärme-/Schalldämmeigenschaften, Hohlräume zur Medienspeicherung oder Bauteilaktivierung.
  - b. Die Veränderung der Eigenschaften eines Materials wird durch lokale Temperaturbehandlung (Beispiel: Vorspannen von Glas) oder durch Bestrahlung mit UV- oder Laserstrahlen herbeigeführt.
  
2. Herstellungsverfahren auf Basis von mindestens zwei verschiedenen Werkstoffen
  - a. Ein fließender Materialübergang soll erreicht werden (Stoffgradient). Der fließende Materialübergang ist vor allem ein Konzept der Verbindungstechnik, wenn unterschiedliche Anforderungen an verschiedene Bereiche eines Bauteils gestellt werden oder wenn eine kraftschlüssige Verbindung zweier Materialien auf keinem anderen Weg zu erreichen ist.
  - b. Die Variation des Verhältnisses verschiedener Materialien zueinander innerhalb eines Bauteils ermöglicht die Abbildung von Eigenschaftsgradienten (Verhältnisgradient). Zum Beispiel kann bei Faserverbundwerkstoffen durch Auswahl verschiedener Faser- und Matrixmaterialien sowie deren Ausrichtung, Anzahl der Schichten und Mengenverhältnisse eine gezielte Steuerung der Bauteileigenschaften erfolgen.

---

### 3.5 Gradientenwerkstoffe und Architektur

Die Übertragung der genannten Konzepte der Bauteilgradierung auf das Bauwesen eröffnet vielversprechende Perspektiven für verschiedene Anwendungsbereiche:

#### 1. Material- und Massenersparnis

Die beanspruchungsgemäße Gradierung der Porosität (Strukturgradient) im Inneren tragender Bauteile („Fully Stressed Design“) verspricht signifikante Einsparungen an Masse, Material und damit an im Bauteil gebundener Energie.

#### 2. Rezyklierbarkeit

Multifunktionale Bauteile aus einem einzigen Werkstoff stellen einen Alternativansatz zu Mehrschichtbauteilen wie etwa Wärmedämmverbundsystemen dar. Durch die fließende Variation der Porosität kann ein Eigenschaftsspektrum von hochfest und dicht bis hin zu wärmedämmend und porös abgebildet werden (Strukturgradient).

#### 3. Verbindungstechnik

Durch den fließenden Übergang von einem Werkstoff zu einem anderen können Spannungsspitzen, wie sie aus punktuellen Verbindungstechniken resultieren, ebenso vermieden werden wie Schäden infolge unterschiedlicher thermischer Ausdehnung verschiedener Werkstoffe, die stumpf gestoßen werden (Stoffgradient / Verhältnisgradient).

#### 4. Gestaltung

Durch die innere Optimierung von Bauteilen kann, durch Variation von Materialstruktur oder -zusammensetzung, eine formunabhängige Bauteiloptimierung erfolgen („Formgerechte Materialgebung“). Im Umkehrschluss können Bauteile mit formkonträren Eigenschaften realisiert werden.

## 4 Beton

### 4.1 Einführung

Untersuchungen zur funktionalen Gradierung von Betonbauteilen bilden den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Das Hauptziel hierbei ist die kontrollierte Variation der Porosität im Bauteilinneren. Es stehen zwei Anwendungsbereiche im Vordergrund:

1. Die Optimierung tragender Bauteile durch gezielte Porosierung geringbeanspruchter Bereiche in biegebeanspruchten Bauteilen wie Trägern und Geschossdecken mit dem Ziel der Material- und Massenreduktion. Zieht man in Betracht, dass aus der Zementherstellung 5 bis 7 % des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes resultieren und dass Geschossdecken ca. 70 % der Masse eines herkömmlichen Gebäudes ausmachen, wird die Bedeutung dieses Anwendungsbereiches deutlich.
2. Die Herstellung multifunktionaler, rein mineralischer Bauteile, die ein einfacheres Rezyklieren ermöglichen und eine verringerte Bauteilabmessung aufweisen. Im Gegensatz zu anderen Industriezweigen wie der Automobilindustrie wird der Rezyklierbarkeit von Gebäuden bislang wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Bauabfälle bilden jedoch den dominierenden Anteil des Massenmüllaufkommens [11]. Die Verklebung unterschiedlicher Werkstoffe, wie bei Wärmedämmverbundsystemen, macht eine stoffliche Trennung nahezu unmöglich. Durch die Variation der Porosität im Bauteilquerschnitt können die Eigenschaften Tragfähigkeit, Dichtigkeit und Wärmedämmung in Beton abgebildet werden. Ein derartiges Monostoffbauteil verspricht deutliche Einsparungen an Masse, Material und Wandstärke sowie eine verbesserte Rezyklierbarkeit.

Für beide Anwendungsbereiche stellen sich die zwei grundlegenden Fragen, wie Betone porosiert werden können und wie sich die Porosität räumlich variieren lässt. Zur Beantwortung dieser Fragen wurden zunächst die Möglichkeiten zur Porosierung von Betonen untersucht. Hierfür wurden gradiert abgestufte Mischungsentwürfe auf Basis von Porenbildnern (Aluminiumpulver), Protein- und Tensidschäumen, verschiedenartigen Leichtzuschlägen, Mikrohohlkugeln und superabsorbierenden Polymeren erarbeitet und hinsichtlich Festigkeiten, E-Modul, Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit charakterisiert.

Auf Grundlage dieses Materialrepertoires konnten Musterbauteile hergestellt und Bauteilversuche durchgeführt werden. Parallel dazu wurden verschiedene Herstellungsansätze für ein-, zwei- und dreiachsige Gradierungen der Porosität entwickelt und erprobt. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind im Folgenden dargestellt.

## 4.2 Grundlagen

### 4.2.1 Beton als variables 5-Stoff-System

Beton ist ein Baustoff, der durch Mischen von Zement, Wasser sowie Gesteinskörnung bzw. Zuschlag und eventueller Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen entsteht. Der Zementleim, die Gesteinskörnung sowie die Haftung zwischen diesen beiden Bestandteilen ergeben die wesentlichen Einflussgrößen für die Eigenschaften des Betons. Die vielfältigen Variationsmöglichkeiten der fünf Ausgangsstoffe für Beton ermöglichen die Erfüllung der grundlegenden technischen und wirtschaftlichen Anforderungen der Bauausführung. Jedoch müssen schon im Frischbeton alle später verlangten Gebrauchseigenschaften angelegt sein, da nach der Erhärtung außer der oberflächlichen Bearbeitung keine weiteren Veränderungen mehr möglich sind [12].

Tabelle 1: Beton als 5-Stoff-System

Stoff	Beispiele für die Varianten
Zement	Zementart, -festigkeitsklasse Zementgehalt besondere Eigenschaften (LH, HS etc.)
Gesteinskörnung	Rohdichte (normal, leicht, schwer) natürlich, künstlich Kornaufbau, Sieblinie Herkunft
Wasser	Begrenzung betonschädlicher Inhaltstoffe
Zusatzstoffe	Flugasche, Trass, Silicastaub Gesteinsmehl Pigmente, Kunststoff (-dispersion) Fasern (Stahl, Glas, Kunststoff)
Zusatzmittel	BV, FM, LP, DM, VZ, BE, ST, CR, RH

Außerdem beeinflusst das Porensystem des Zementsteins die Festigkeit und Dichtheit. Wasserzementwert und Hydratationsgrad als betontechnologische Parameter bestimmen die Porosität [12].

Beton lässt sich je nach Zusammensetzung, besonderen Eigenschaften, Erhärtungsgrad etc. in verschiedene Betonarten unterteilen.

#### 4.2.1.1 Hydratation und Festigkeitsentwicklung

Aus der Reaktion zwischen den Zementbestandteilen und dem Anmachwasser entstehen wasserhaltige Verbindungen, auf denen das Erstarren und spätere Erhärten beruhen. Diese Reaktion wird als Hydratation bezeichnet. Ursache dafür ist die Bildung eines starren Gefüges aus

Hydratationsprodukten, welches nach und nach die wassergefüllten Zwischenräume zwischen den Feststoffpartikeln ausfüllt. Der zeitliche Verlauf hängt dadurch von der Größe des Zwischenraumes ab, welche vom Wasserzementwert (w/z-Wert) abhängt. Dieser w/z-Wert liegt bei einem verhältnismäßig wasserarmen, plastischen Gemisch zwischen 0,30 und 0,60. Wichtig für die Hydratationsreaktionen ist ebenfalls der hohe pH-Wert der Porenlösung.

Bei den Reaktionen wird Reaktionswärme frei. Infolge dieser Wärmeentwicklung kommt es bei größeren Bauteilen zu einem Temperaturgefälle zwischen Bauteilinnerem und Bauteiläußerem. Zugspannungen, die Risse verursachen, können die Folge sein [13].

#### 4.2.1.2 Wasserzementwert

Neben den bei der Hydratation entstandenen Strukturen ist das Verhältnis von Wasser und Zement (w/z-Wert) entscheidend für den Aufbau des Zementsteins. Eine dünne Wasserschicht von wenigen  $\mu\text{m}$  umgibt nach dem Anmischen von Wasser und Zement die noch nicht hydratisierten Zementkörner. Je höher der Wasserzementwert gewählt wird, desto dicker ist dieser Wasserfilm. Bei einem w/z-Wert von etwa 0,40 füllen die mit fortschreitender Hydratation wachsenden Hydratationsprodukte den zunächst vom Wasser eingenommenen Zwischenraum nahezu vollständig aus. Bei Wasserzementwerten unter 0,40 sind ebenfalls alle Zwischenräume ausgefüllt, jedoch reicht das beim Mischen des Betons vorhandene Wasser nicht aus, um den Zement vollständig zu hydratisieren. Folglich bleiben nichthydratisierte Kerne der Zementpartikel als ‚hochfester Zuschlag‘ im Gefüge. Steigt der w/z-Wert über 0,40 an, enthält der Zementstein auch nach vollständiger Hydratation wassergefüllte Hohlräume, die sich bei der Austrocknung jedoch entleeren. Zurück bleiben sogenannte Kapillarporen mit Radien zwischen  $10^{-5}$  bis  $10^{-1}$  mm. Wasserzementwert ( $\omega$ ) und Hydratationsgrad ( $m$ ) beeinflussen also die volumenmäßigen Anteile an Kapillarporen  $V_k$ , Zementgel  $V_g$  und nicht hydratisiertem Beton  $V_{nh}$  während der Hydratation. Dieser Einfluss ist in Abbildung 5 dargestellt. Bei Wasserzementwerten größer als 0,60 verbleiben die wassergefüllten Hohlräume nach vollständiger Hydratation als durchgehendes Kapillarporensystem im ausgehärteten Beton und erleichtern somit das Eindringen von Flüssigkeiten oder Gasen in den Beton [13].

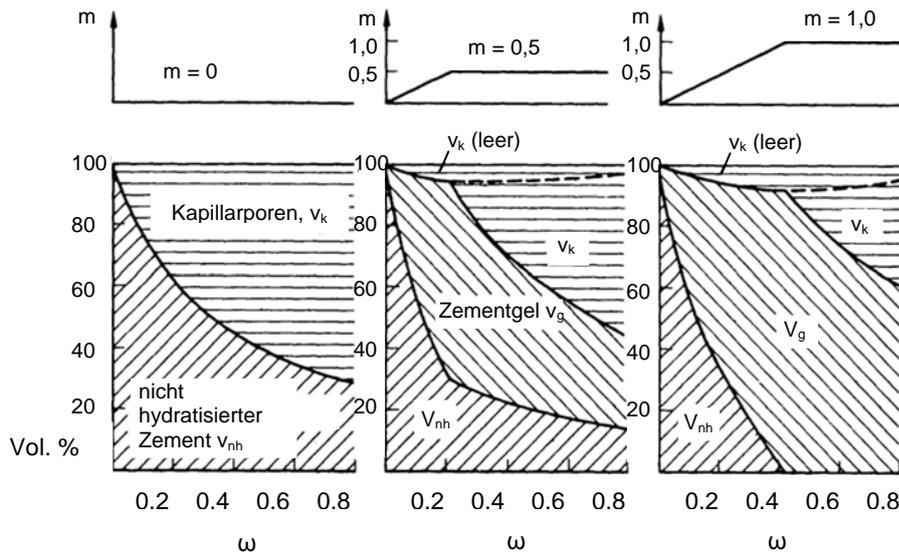


Abbildung 5: Einfluss des Wasserzementwerts und des Hydratationsgrades auf die Volumenanteile in Zementleim bzw. -stein [12]

Der Wasserzementwert beeinflusst nicht nur den Aufbau des Zementsteins, sondern ist auch entscheidend für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Mit steigendem Wassergehalt wird die Konsistenz des Betons weicher. Die Konsistenz ist über den Wasserzementwert so zu wählen, dass sich der Beton vollständig verdichten lässt.

#### 4.2.1.3 Poren im Beton

Außer den Kapillarporen gibt es noch weitere Arten von Poren im Beton, die auf unterschiedliche Weise entstehen, verschiedene Durchmesser haben und sich damit auch unterschiedlich auf die Festigkeit auswirken. Der Größe nach aufgelistet sind dies:

- Gelporen (Ø ca. 0,1 bis 10 nm)
- Kapillarporen (Ø 10 nm bis 100 µm)
- Luftporen (Ø 1 µm bis 1 mm)
- Verdichtungsporen (Ø > 1 mm)

Verdichtungsporen entstehen bei schlechter Verdichtung des Betons und haben aufgrund ihrer Größe einen hohen Einfluss auf die Festigkeit. Gezielt beeinflusst und teilweise erwünscht sind hingegen beim Mischvorgang entstehende Luftporen. Sie sorgen für einen Ausweichraum für gefrierendes Wasser und erhöhen dadurch die Frostbeständigkeit. Da die Ausgangsstoffe Wasser und Zement ein größeres Volumen einnehmen als die hydratisierten Reaktionsprodukte, kommt es zu Schrumpfvorgängen und damit zu unvermeidbaren Gelporen [12].

Um die richtigen Luftporenbildner und Leichtzuschläge für eine Optimierung der Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit wählen zu können, müssen zuerst Untersuchungen zur Porenstruktur

und ihrer Einwirkung auf die oben genannten Eigenschaften durchgeführt werden. Hierzu wurde eine umfassende Literaturrecherche betrieben.

#### Einfluss der Porengröße auf die Wärmeleitfähigkeit

In [14] wurde der Einfluss der Rohdichte und der Porengröße auf die Wärmeleitfähigkeit von hitzebeständigem Gasbeton untersucht. Es wurden 20 Proben mit Trockenrohddichten zwischen 0,28 bis 0,72 g/cm<sup>3</sup> und Gesamtporositäten von 72 bis 89 % betrachtet. Die Trocknung der Proben erfolgte bei 105 °C bis zur Massenkonstanz. Die Luftporen entstanden durch einen Gas-treibeprozess und lagen im Durchmesserbereich von 10<sup>-4</sup> m mit wenigen Mikroporen mit einem Durchmesser von ca. 10<sup>-7</sup> m.

Die Untersuchungen unterschiedlicher Rohddichten bei Temperaturen bis zu 900 °C ergaben die in Abbildung 6 dargestellten Verläufe der Wärmeleitfähigkeit.

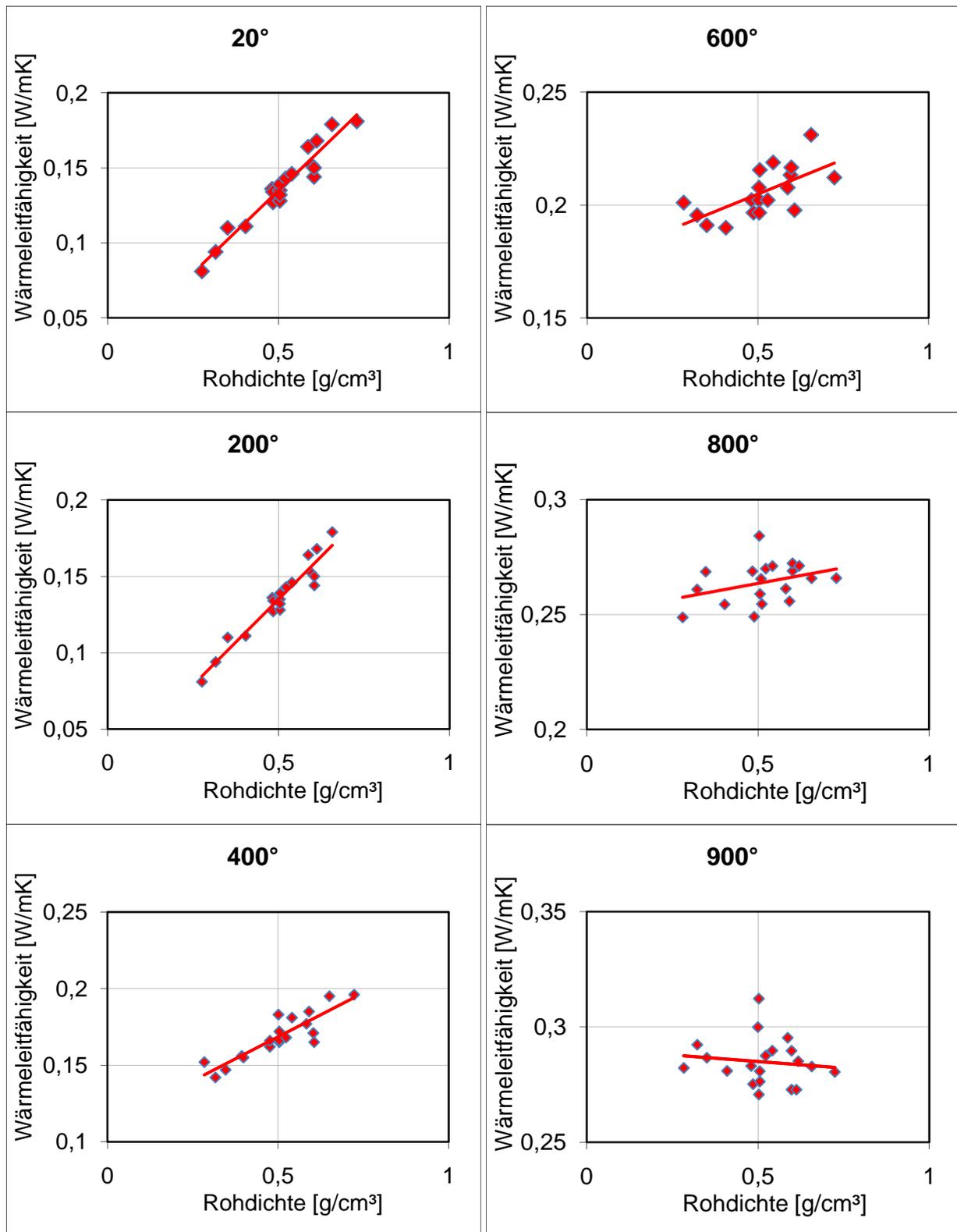


Abbildung 6: Wärmeleitfähigkeit der hitzebeständigen Gasbetone in Abhängigkeit von der Rohdichte bei 20, 200, 400, 600, 800 und 900 °C [14]

Hieraus wird ersichtlich, dass in den für die Gradientenbetone relevanten Temperaturbereichen (Raumtemperatur) die Wärmeleitfähigkeit linear von der Rohdichte abhängt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Rohdichte mit steigender Temperatur einen sinkenden Einfluss auf die

Wärmeleitfähigkeit hat. Dies ist auf den Wärmetransportanteil durch Strahlung zurückzuführen. Die Poren werden bei höheren Temperaturen durch die Wärmestrahlung kurzgeschlossen.

In einem zweiten Schritt wurde der Einfluss der Porengrößenverteilung auf die Wärmeleitfähigkeit untersucht. Es wurden Proben mit einer konstanten Rohdichte von  $0,3 \text{ g/cm}^3$  und unterschiedlichen Porendurchmessern betrachtet. Während die Porengröße im Raumtemperaturbereich die Wärmeleitfähigkeit wenig beeinträchtigt, steigern große Poren die Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen beachtlich. Die Erklärung des Porengrößeneinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit liefert wiederum der Strahlungswärmetransport bei höheren Temperaturen.

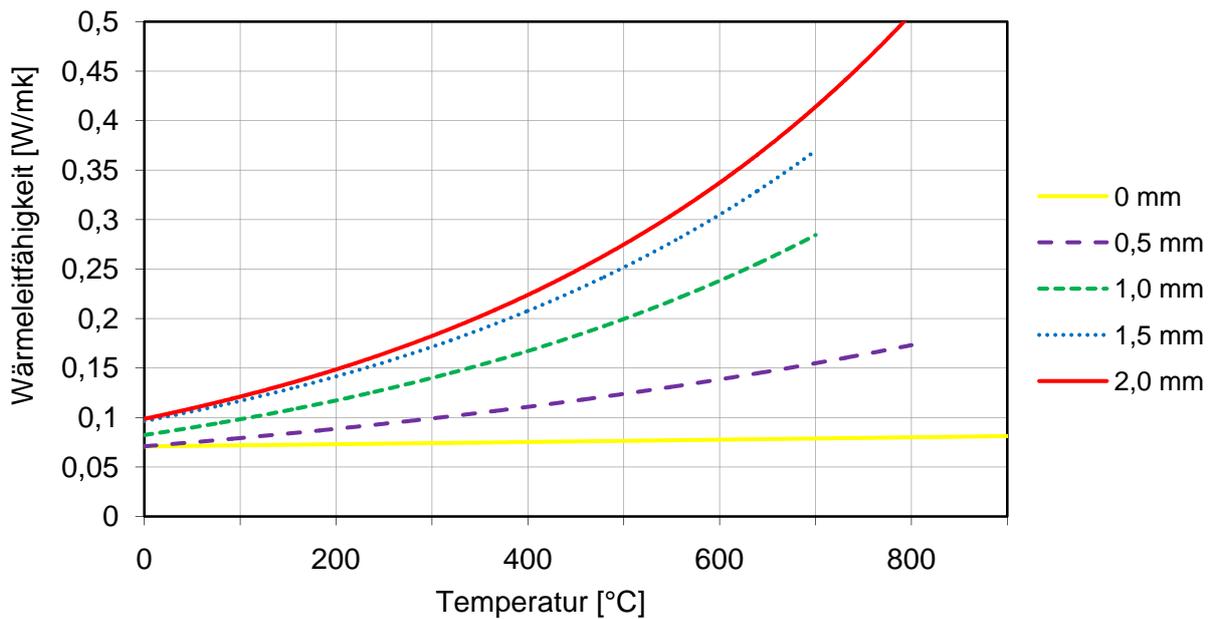


Abbildung 7: Wärmeleitfähigkeit der hitzebeständigen Gasbetone in Abhängigkeit von der Temperatur bei unterschiedlicher Porengröße [14]

#### Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom mittleren Porendurchmesser

In [15] wurde der Einfluss der Porengrößenverteilung bei gleichem Porenvolumenanteil auf die Wärmeleitfähigkeit und die Festigkeit untersucht. Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass bei feuerbeständigen Wärmedämmstoffen neben dem Gesamtporenvolumenanteil auch die Porengrößenverteilung die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur beeinflusst. Um ein Porengefüge mit gezielter, eng begrenzter Porengrößenverteilung zu erzeugen, wurden definierte klassierte Schaumpolyesterolgranalien zugesetzt. Ein Ausbrennen dieser Platzhalter erfolgte bei  $1400 \text{ °C}$ . Für alle Proben wurde eine Trockenrohichte von ca.  $0,5 \text{ g/cm}^3$  eingestellt (Abbildung 8).

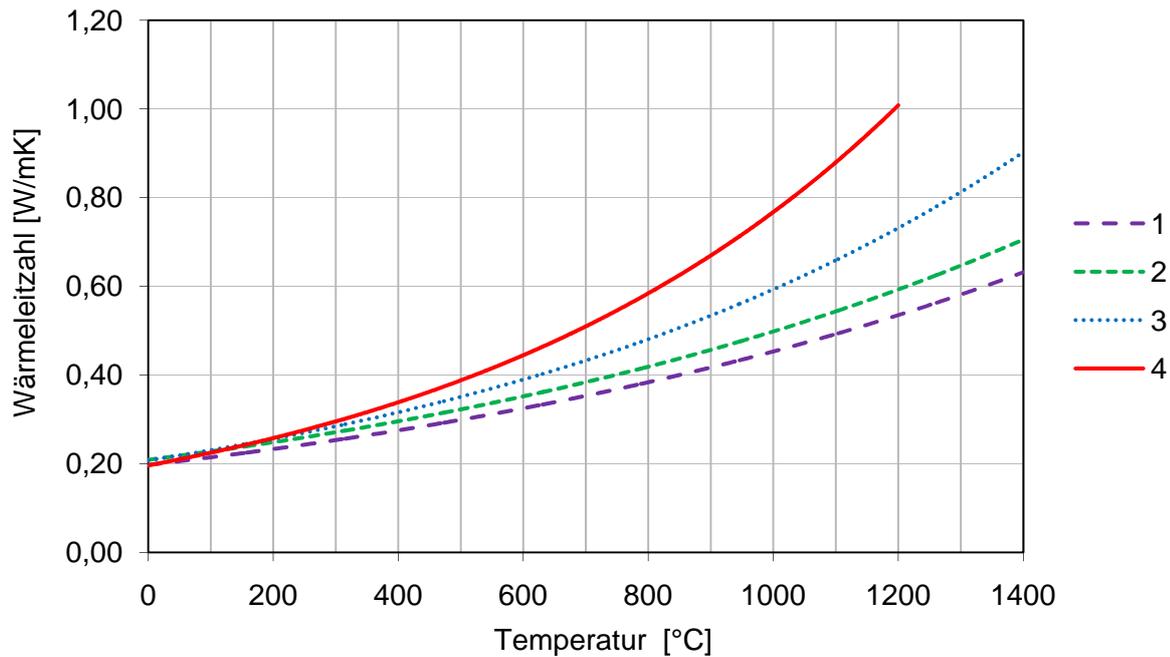


Abbildung 8: Wärmeleit Zahlen von Schamotteleichtsteinproben mit unterschiedlichem mittlerem Porendurchmesser in Abhängigkeit von der Temperatur [15]

Tabelle 2: Ausgangseigenschaften der untersuchten Schamotteleichtsteinproben

Probe	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Porengrößenbereich mittlerer Durchmesser [mm]
1	0,48	0,37 bis 0,50
2	0,48	0,50 bis 0,80
3	0,50	0,80 bis 1,00
4	0,53	1,00 bis 1,25

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Heißdrahtverfahren gemäß der Messkreuzmethode zeigte, dass bei einem größeren mittleren Porendurchmesser der innere Wärmetransport bei höheren Temperaturen deutlich zunahm. Dies ist auf einen gestiegenen Strahlungsanteil zurückzuführen. Es ist aber auch ersichtlich, dass bei Raumtemperatur die Porengröße keinen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat.

Spitzner stellte in seiner Dissertation [16] Rechenmodelle auf Basis der Ähnlichkeitstheorie auf, um die äquivalente Wärmeleitfähigkeit eines geschäumten Materials berechnen zu können. Die Poren wurden als Würfelporen modelliert und damit Schaumziegel mit Porositäten von über 85 % betrachtet. Es wurden die Wärmeleitung im Feststoff, im Porengas und die Wärmestrahlung zwischen den Poreinnenflächen untersucht. Ein- und Zwei-Porengrößen-Modelle wurden dargestellt und analysiert. Das Nachrechnen des messtechnisch ermittelten Zusammenhangs zwischen Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit verschiedener, geschäumter Ziegel mit dem aufge-

stellten Würfelporenmodell ergab Abweichungen von 25 %, was mit der starken Vereinfachung des Rechenmodells erklärt wird.

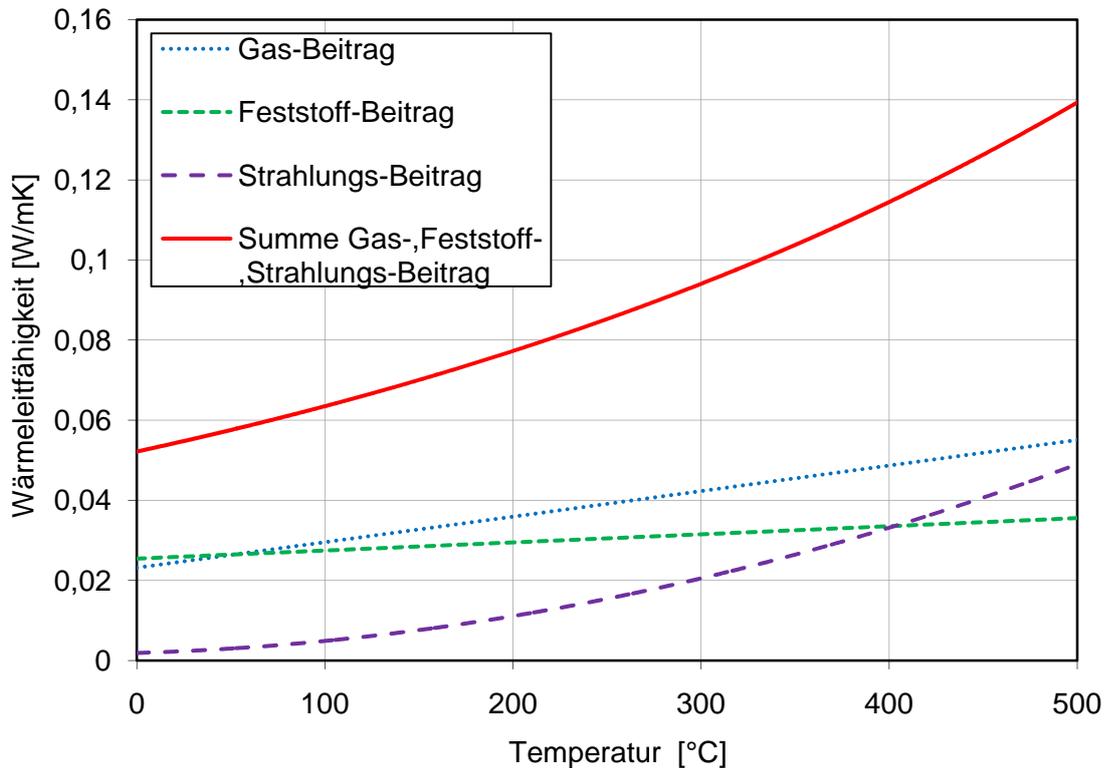


Abbildung 9: Beitrag der Summanden zur äquivalenten Wärmeleitfähigkeit für eine Würfelpore mit 1mm innerer Kantenlänge [16]

In Abbildung 9 sind die unterschiedlichen Anteile der Wärmetransportmechanismen zur äquivalenten Wärmeleitfähigkeit einer Würfelpore aufgeführt. Der Anteil des Gas- und des Feststoffbeitrags ist bei Raumtemperatur etwa gleich groß, der Strahlungsbeitrag beträgt ca. 5 % der beiden anderen und ist damit bei Raumtemperatur unbedeutend. Hieraus ergibt sich, dass bei niedrigen Temperaturen eine Verminderung der Porengröße (und damit des Strahlungswärmetransports; der absolute Beitrag der anderen beiden Transportwege zum Gesamt-Wärmestrom ändert sich bei gleich bleibender Porosität nicht) nicht zu einer merklichen Abnahme der Wärmeleitfähigkeit des geschäumten Materials führt. Erst bei hohen Temperaturen steigt der Strahlungswärmeanteil (Abbildung 10) und damit der Einfluss der Porengrößen.

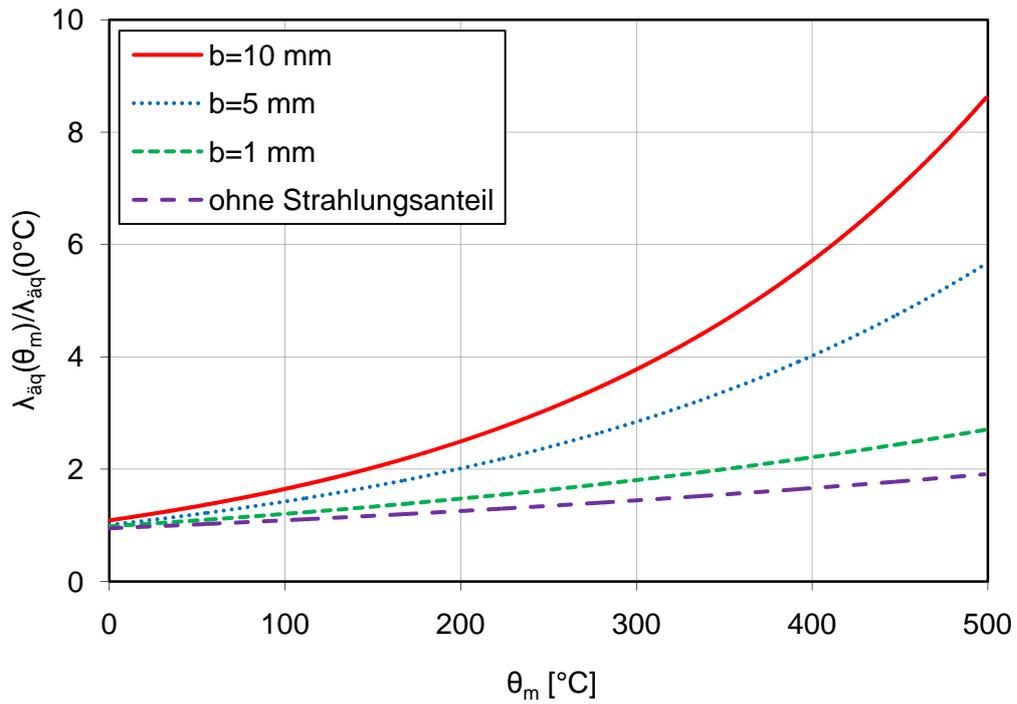


Abbildung 10: Relative Zunahme der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit beim Würfelporenmodell gegenüber  $0^\circ\text{C}$  mit steigender Temperatur für verschiedene Porengrößen [16]

#### Abhängigkeit der Festigkeit vom mittleren Porendurchmesser

Zusätzlich zur Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom mittleren Porendurchmesser untersuchte W. Schulle [15] auch die Biegefestigkeit von Proben mit derselben Porosität und unterschiedlichen mittleren Porendurchmessern. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt.

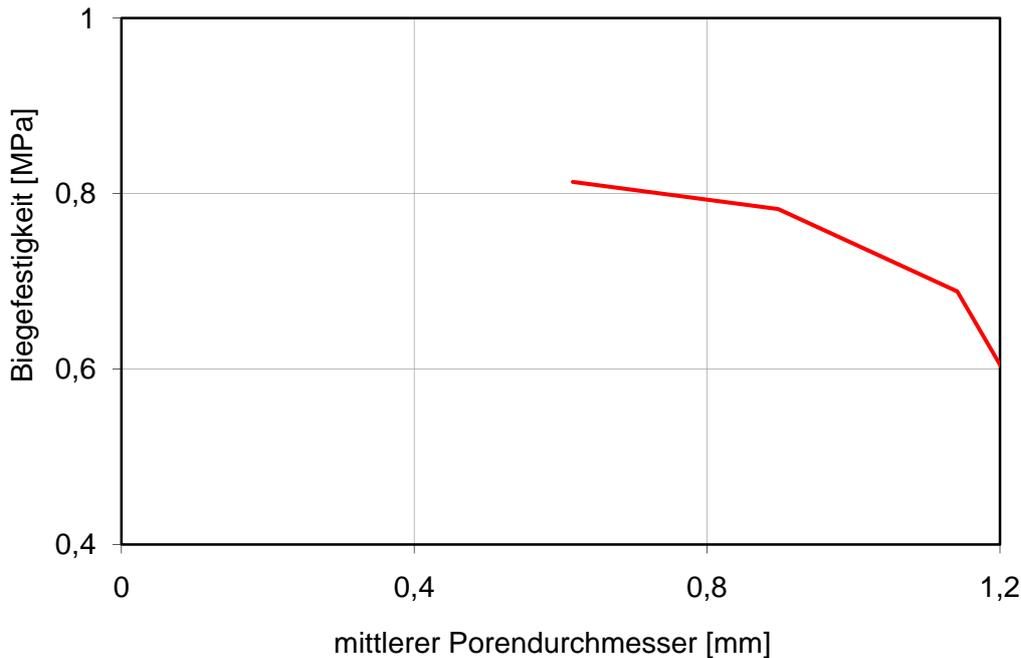


Abbildung 11: *Biegefestigkeit von Schamotteleichtsteinen bei Raumtemperatur in Abhängigkeit vom mittleren Porendurchmesser [15]*

Tabelle 3: *Biegefestigkeiten von Schamottenleichtsteinproben mit gleichem Porenvolumenanteil, aber verschiedenem mittleren Porendurchmesser bei Raumtemperatur*

Probe	Porengrößenbereich; mittlerer Durchmesser [mm]	Biegefestigkeit [MPa]
1	0,37 bis 0,80	0,84
2	0,80 bis 1,00	0,76
3	1,00 bis 1,25	0,64

Es ist ein deutlicher Abfall der Festigkeit bei größerem mittlerem Porendurchmesser zu erkennen. Dies wird bis zu einem Porendurchmesser von 0,6 mm beobachtet. Darunter ist kein Einfluss mehr zu erkennen.

Schulle erklärt dies mit der sinkenden Anzahl von tragenden Porenwänden je Volumeneinheit bei steigendem Durchmesser.

#### Abhängigkeit der Festigkeit von der Porengrößenverteilung poröser Materialien

In [17] wurden mit der Quecksilberdruckporosimetrie untersuchte Proben mit einem analytischen Modell, das auf der Bruchmechanik nach Griffith und der Theorie der Composite basiert, verglichen. Die Ergebnisse lieferten gute Übereinstimmungen zwischen den Messergebnissen und den errechneten Werten.

Als Porenmodell wurden zylindrische Poren verwendet, die sich orthogonal verschneiden. Dieses Modell bildet die tatsächlichen Verhältnisse der Kapillarporen in hydraulisch gebundenen Materialien gut ab und stimmt mit den bei der Quecksilberporositätsmessung verwendeten Modellen überein, sodass die Ergebnisse gut vergleichbar sind.

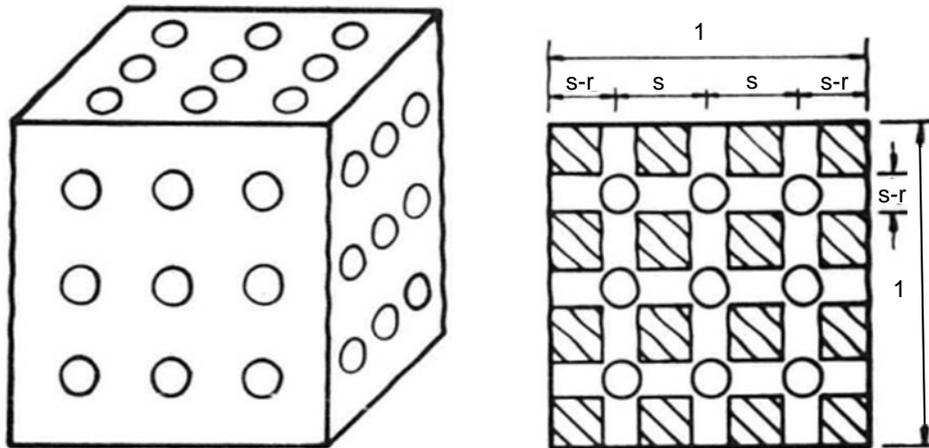


Abbildung 12: Porenmodell mit zylindrischen, sich orthogonal kreuzenden Poren an der schwächsten Stelle [17]

Die Porengrößenverteilung hat einen direkten Einfluss auf den Versagensvorgang des Bauteils und damit auf die Festigkeit. Bei größeren Poren sinkt beim Versagen einzelner Teile die verbleibende Matrixquerschnittsfläche schneller und das endgültige Versagen findet bei einer geringeren Gesamtlast statt.

Dieser Zusammenhang kann aus Abbildung 13 und der zugehörigen Tabelle 4 entnommen werden. Die Proben C4-3 und C4-4 haben die gleiche Gesamtporosität und dieselbe Matrix, jedoch sind die Poren nach Abbildung 13 bei der Probe C 4-3 kleiner. Diese Verschiebung hin zu kleineren Poren führt, wie in Tabelle 4 dargestellt, zu einer Steigerung der Druckfestigkeit.

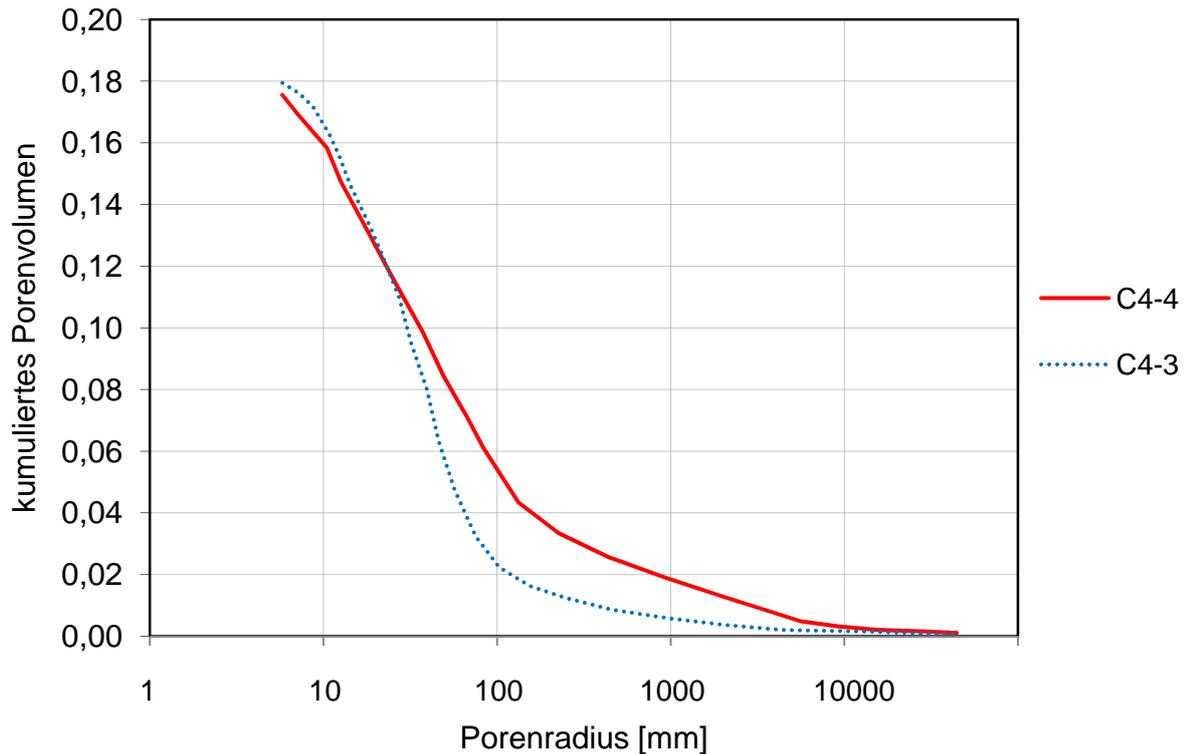


Abbildung 13: Porengrößenverteilungen der betrachteten Proben [17]

Tabelle 4: Abhängigkeit der Festigkeit von der Gestalt des Luftporenraums

Probe	Tatsächliche Druckfestigkeit [MPa]	Errechnete Druckfestigkeit [MPa]	Abweichung [%]	K [ $\text{MN}^2/\text{m}^3$ ]
C4-3	45,9	46,77	1,9	$3,488 \cdot 10^{-3}$
C4-4	34,8	34,18	-1,78	

In [14] wurden chemisch aufgetriebene, lufthärtende, mineralisch gebundene Schäume untersucht mit dem Ziel, bereits bekannte Herstellungsverfahren so zu optimieren, dass die hieraus resultierenden Konstruktionsleichtbetone reproduzierbar und praxistauglich sind. Ein Schwerpunkt lag auf der Beschreibung des Porenraumes und damit auf den davon abhängigen physikalisch-mechanischen Eigenschaften. Als Analysemethoden wurden die digitale Bildbearbeitung und die Quecksilberdruckporosimetrie angewandt.

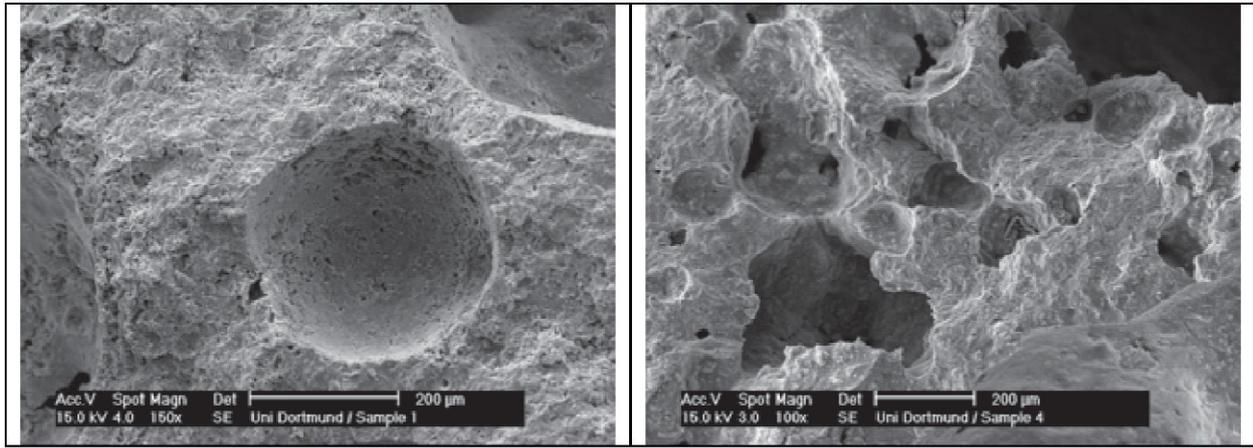


Abbildung 14: Luftporen in zwei Schaumbetonen (Ausschnitt  $800 \times 600 \mu\text{m}$ ):  $w/z = 0,60$ , kein Mikrosilica (links);  $w/z = 0,35$ , Mikrosilica-Gehalt = 10 % (rechts) [18]

Just [18] kam hierbei bezüglich des Zusammenhangs zwischen den Luftporen und der Festigkeit zu folgenden Ergebnissen:

Die Festigkeit von mineralisch gebundenen Schäumen wird von der Gestalt des Luftporenraums bestimmt. Steife Frischbetonkonsistenzen und der Einsatz von Fließmitteln begünstigen die Ausbildung von Luftporen, die mit zunehmender Größe immer weiter vom Kreisquerschnitt abweichen (Abbildung 14). Die Festigkeit von Schäumen ist jedoch umso größer, je kugelig die Luftporen geformt sind. Luftporen sind umso kugelig geformt, je geringer ihr Durchmesser ist (Abbildung 15). Zum Einstellen erhöhter Druckfestigkeiten sollte ein möglichst geringer Anteil von Luftporen eine Querschnittsfläche von  $1 \text{ mm}^2$  überschreiten.

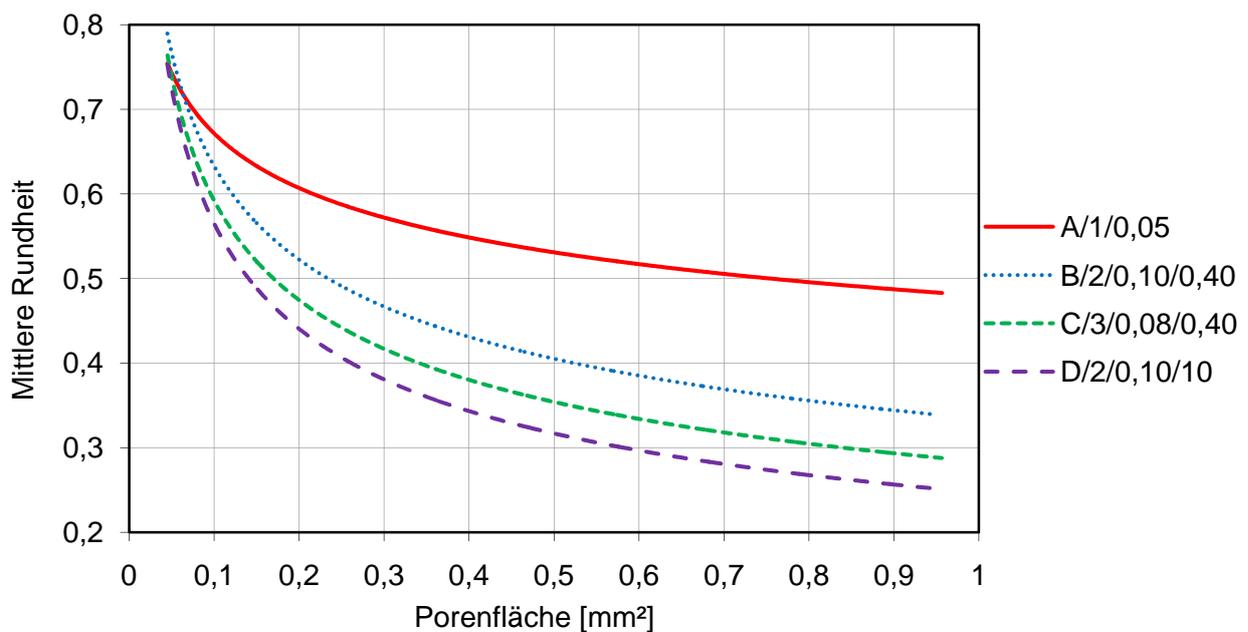


Abbildung 15: Mittlere Rundheit verschiedener Luftporenklassen am Beispiel von vier ausgewählten Proben [18]

Die Untersuchungen des Porenraums haben ferner ergeben, dass das Gefüge im Bereich der Kapillar- und Gelporen mineralisch gebundener Schäume und von Zementleimen, die nicht aufgetrieben worden sind, vergleichbar ist. Die Porenradienverteilungen im Bereich von 4 nm bis 1  $\mu\text{m}$  liefern an identischen Porengrößen gleiche charakteristische Zustände.

Die Quecksilberdruckporosimetrie erweist sich im Bereich der Kapillarporen aufgrund des Flaschenhalsphänomens nicht als Abbild der tatsächlichen Porenverteilung.

Sowohl durch chemisches Auftreiben als auch durch physikalisches Aufschäumen können die erforderliche Menge und die Porenradienverteilungen der Luftporen, zur Erreichung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften, zielgenau und reproduzierbar im Labor eingestellt werden [19].

### Zusammenfassung

Die untersuchte Literatur stimmt bezüglich der Aussagen zum Einfluss der Porengrößen auf die Wärmeleitfähigkeit und die Tragfähigkeit von porösen Medien sehr gut überein.

Zum Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit kann übereinstimmend gesagt werden, dass diese bei Raumtemperatur vom Gesamtporenvolumen und hiermit von der Rohdichte direkt abhängt. Die Porengrößen spielen erst bei höheren Temperaturen eine Rolle. Dies liegt am Anteil der Strahlungswärme bezogen auf den Gesamtwärmetransport. Dieser steigt bei größeren Poren deutlich stärker als bei kleineren Poren und führt zu einer gesteigerten Gesamtwärmeleitfähigkeit.

Anders verhält es sich mit dem Einfluss der Porengrößen auf die Tragfähigkeit. Hierbei wurde übereinstimmend ein deutlicher Einfluss auf die Tragfähigkeit festgestellt. Die Festigkeit steigt mit abnehmendem Porendurchmesser, da die Abweichung der Porenform von der idealen Kugelform sinkt. Allerdings kann mit Kugelporen aufgrund der optimalen Packungsdichte ein maximaler Luftporenanteil von 55 % erreicht werden. Dieser Einfluss ist unter einer Querschnittsfläche von 1  $\text{mm}^2$  nach [18] oder 0,3  $\text{mm}^2$  nach [15] nicht mehr zu erkennen.

Daraus kann gefolgert werden, dass die Luftporen, um eine hohe Tragfähigkeit und eine geringe Wärmeleitfähigkeit zu erzielen, ein hohes Gesamtporenvolumen und einen Einzelporendurchmesser kleiner als 0,6 mm besitzen sollten. Die Porenform sollte so nah wie möglich an der optimalen Kugelform liegen.

## 4.2.2 Leichtbeton

Betone mit einer Trockenrohddichte von  $\rho \leq 2,0 \text{ kg/dm}^3$  werden auch Leichtbetone genannt. Durch das gezielte Einbringen von Poren, sei es über Zuschläge, in der Zementmatrix oder über ein Haufwerk, werden gegenüber herkömmlichem Normalbeton geringere Dichten erreicht. Man spricht deshalb auch von kornporig, matrixporig oder haufwerksporig. Diese drei Möglichkeiten lassen sich auch miteinander kombinieren.

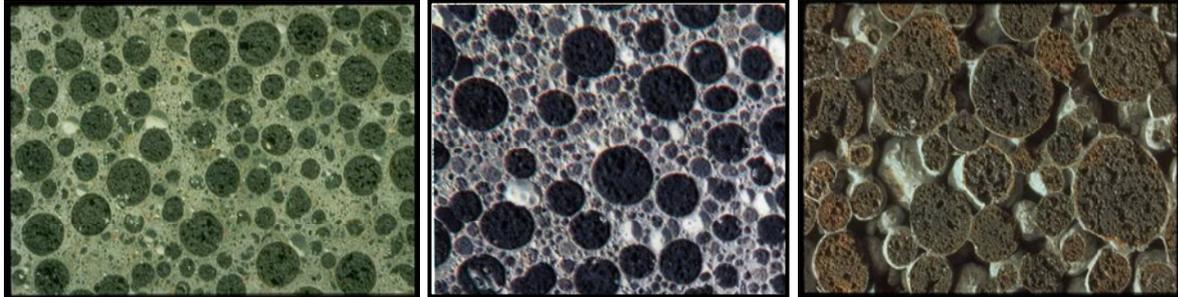


Abbildung 16: Konstruktiver Leichtbeton (links); Haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix (mitte); haufwerksporiger Leichtbeton (rechts) [20]

### 4.2.2.1 Gefügedichte Leichtbetone

Betone, deren normale Gesteinskörnung durch leichte poröse Zuschläge ersetzt wird, werden als gefügedichte Leichtbetone bezeichnet. Dieser Beton wird auch Konstruktionsleichtbeton genannt, und ist in DIN 1045-2 bzw. DIN EN 206-1 genormt. Je nach gewählter Gesteinskörnung liegt die Rohddichte dieser Leichtbetone zwischen  $0,8$  und  $2,0 \text{ kg/dm}^3$  [21],[22].

Die Hohlräume zwischen der Gesteinskörnung sind, wie bei Normalbeton, mit Zementleim gefüllt. Tabelle 5 zeigt die Einteilung in verschiedene Rohdichteklassen.

Tabelle 5: Klasseneinteilung von Leichtbeton nach der Rohddichte [23]

Rohdichteklasse	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Rohdichtebereich [kg/m <sup>3</sup> ]	$\geq 800$ und $\leq 1000$	$> 1000$ und $\leq 1200$	$> 1200$ und $\leq 1400$	$> 1400$ und $\leq 1600$	$> 1600$ und $\leq 1800$	$> 1800$ und $\leq 2000$

Die Festigkeiten von Konstruktionsleichtbeton erreichen ähnliche Werte wie Normalbeton nach DIN 1045-1, jedoch unterscheidet sich das Tragverhalten des Zweistoff-Systems aus Gesteinskörnung und Zement von gefügedichtem Leichtbeton und gefügedichtem Normalbeton. Während bei Normalbeton die Gesteinskörnung weit höhere Festigkeiten und höhere Elastizitätsmodulen aufweist als der Zementstein, liegen diese Werte beim gefügedichteten Leichtbeton enger beieinander oder der Zementstein ist sogar der festere Partner. Die leichten Gesteinskörnungen tragen also nur bei geringen Belastungen mit und dienen bei höherer Belastung nur noch als Aussteifung der Zementsteinlamellen [22].

#### 4.2.2.2 Porenleichtbeton

Porenleichtbeton oder auch Schaumbeton besteht aus vorgefertigtem Schaum (Protein- oder Tensidschaum), der mit Beton vermischt wird [18],[24]. Mit einer Rohdichte von weniger als  $0,8 \text{ kg/dm}^3$  (derzeit bis  $0,4 \text{ kg/dm}^3$  realisierbar) und deshalb nur geringen 28-Tage-Festigkeiten wird Porenleichtbeton für leichte Ausgleichsschichten, Verfüllungen oder Trag- und Sauberkeitsschichten eingesetzt. Geringe Wärmeleitfähigkeitswerte ermöglichen auch einen Einsatz für wärmedämmende Bauteile.

#### 4.2.2.3 Haufwerksporiger Leichtbeton

Haufwerksporiger Leichtbeton wird durch Sieblinien mit Ausfallkörnung mit möglichst viel Hohlraum zwischen den Körnern erstellt [25]. Die Zuschläge werden bei diesen Betonen zwar von der Zementmatrix umhüllt, sind jedoch nur punktuell miteinander verkittet. Wegen seiner geringen Wärmeleitfähigkeit dient haufwerksporiger Beton hauptsächlich zur Wärmedämmung, z.B. in Mauerwerkssteinen nach DIN V 18152-100. Verfeinerungen bei der Aufbereitung bzw. Herstellung der Gesteinskörnung und Loch- bzw. Kammergestaltung erlauben es inzwischen, Leichtbetonmauersteine mit Rohdichten von  $0,35 \text{ kg/dm}^3$  herzustellen. Damit werden Wärmeleitfähigkeitszahlen von  $0,07 \text{ W/mK}$  erreicht.

#### 4.2.2.4 Haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix

Haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix stellt die Kombination aus haufwerkporigem Leichtbeton und Porenleichtbeton dar [20],[26]. Dabei bildet das Haufwerk aus Leichtzuschlag eine möglichst dichte Packung, so dass die Kraftübertragung über die Kontaktflächen als räumliches Tragwerk gesehen werden kann. Die porosierte Matrix stabilisiert dieses Tragwerk über eine räumliche Abstützung in einer sehr effektiven Art. Die Porosierung der Matrix erfolgt über Zumischung von Schaum in den Zementleim oder durch andere Luftporenbildner in flüssiger oder pulverförmiger Form. Hierbei wird durch die zusätzliche Porosierung der Matrix die Wärmeleitfähigkeit weiter reduziert und die Tragfähigkeit erhöht. Bei einer Rohdichte von  $0,3 \text{ kg/dm}^3$  sind Wärmeleitfähigkeitszahlen von  $0,08 \text{ W/mK}$  realisierbar. „Infra“-Leichtbeton nach [26] ist ein haufwerksporiger Leichtbeton.

Tabelle 6: *Eigenschaften eines Infralichtbetons [26]*

Würfeldruckfestigkeit, $f_{lck,cube}$	7,00 N/mm <sup>2</sup>
Biegezugfestigkeit, $f_{lct,fl}$	0,95 N/mm <sup>2</sup>
Spaltzugfestigkeit, $f_{lct,sp}$	0,55 N/mm <sup>2</sup>
Berechnete Spaltzugfestigkeit, $f_{lctm}$	0,66 N/mm <sup>2</sup>
Elastizitätsmodul, $E_{lc}$	4000 N/mm <sup>2</sup>
Wärmeleitfähigkeit, $\lambda_{tr,10}$	0,18 W/(mK)
Wärmedurchgangskoeffizient, $U$ ( $t_{wall}=50$ cm)	0,34 W/(m <sup>2</sup> K)
Feuchtrohdichte	1,00 g/cm <sup>3</sup>
Trockenrohdichte	0,76 g/cm <sup>3</sup>

#### 4.2.2.5 Porenbeton

Porenbeton ist, anders als Porenleichtbeton, ein werksgefertigter Leichtbeton (DIN EN 771-4 und DIN V 20000-404). Er weist eine überwiegend geschlossenzellige Struktur mit Poren von 0,5 bis 1,5 mm Größe auf und erlaubt massive monolithische Konstruktionen mit gleichzeitigen Anforderungen an die Tragfähigkeit, den Wärmeschutz, Schall- und Brandschutz. Die Rohdichte liegt zwischen 0,3 und 1,0 kg/dm<sup>3</sup>. Hergestellt wird Porenbeton in stationären Industrieanlagen aus Quarzsand als Zuschlagsstoff, Kalk und Zement als Bindemittel, Anhydrit oder Gips zur Verbesserung der Produktionseigenschaften und Wasser. Aluminiumpulver oder Aluminiumpaste dienen als Porenbildner. Mit einem Porenvolumen von etwa 80 % und dementsprechend 20 % Feststoffanteil konnten 2007 Wärmeleitfähigkeitszahlen von 0,08 W/mK erreicht werden. Die Festigkeiten liegen zwischen 2 und 8 N/mm<sup>2</sup> [27].

#### 4.2.2.6 Leichtzuschläge

In DIN EN 13055-1 ist der Einsatz der Leichtzuschläge geregelt. Mineralische Zuschläge, deren Kornrohdichte  $\rho_a \leq 2,0$  kg/dm<sup>3</sup> oder Schüttdichte  $\rho_b \leq 1,2$  kg/dm<sup>3</sup> beträgt, werden als Leichtzuschläge bezeichnet. Zur Erzielung besonders geringer Rohdichten und Wärmeleitfähigkeiten kommen bei verschiedenen Forschungsvorhaben Aerogele und geschäumte Polymere zum Einsatz [28].

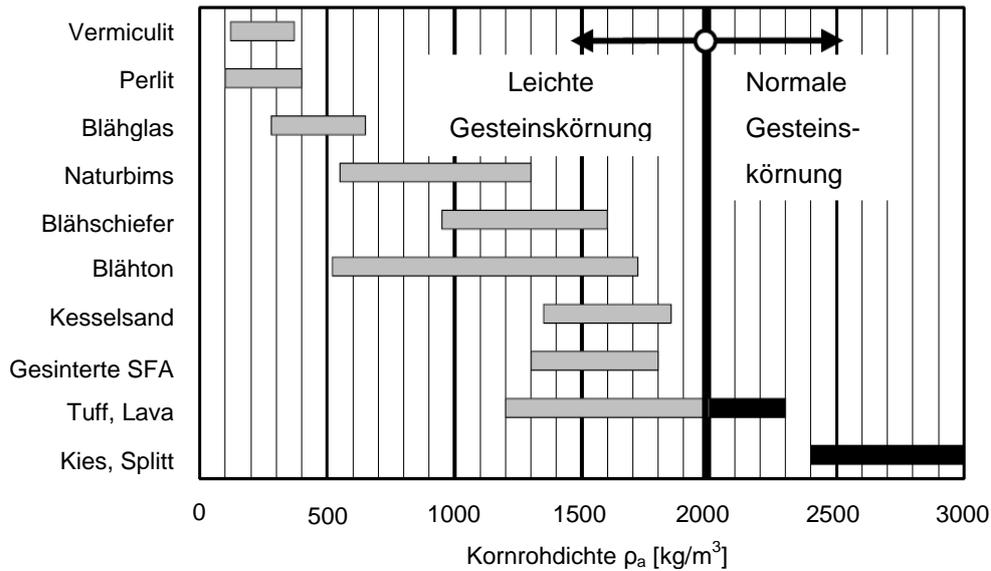


Abbildung 17: Kornrohichte von verschiedenen leichten Zuschlagssorten [21]

Leichtzuschläge können in drei Gruppen unterteilt werden:

- natürliche Zuschläge (Naturbims, Lavastein, Tuffstein)
- rezyklierte Zuschläge aus Abbruchmaterial
- industriell hergestellte Zuschläge (Blähton, Blähschiefer, Perlite, Vermiculite, Blähglas, gesinterte oder kaltgebundene Flugasche, Kesselsand, Hochofenschlacke)

Bei der industriellen Herstellung werden die Leichtzuschläge unter hoher Temperatur (zwischen 1100 und 1300 °C) im Drehrohrföfen aufgebläht. Dabei beruht der Blähvorgang auf der Gasentwicklung beim Verbrennen von bestimmten Rohstoffbestandteilen oder beim Verdampfen von zugemischtem Wasser, was eine zellenartige Struktur beim Abkühlen hinterlässt. Je nach Ausgangsmaterial und Verfahrenstechnik können unterschiedliche Leichtzuschläge im gesamten Körnungsbereich hergestellt werden. Idealerweise ist das Blähgranulat ein Korn von runder Form mit gleichmäßig verteilter Porenstruktur und einer dichtgesinterten Außenhaut ohne Risse, welche die Wasserabsorption vermindert. Angestrebt wird auch ein optimales Verhältnis von Festigkeit zu Rohdichte [21].

#### 4.2.2.7 Tragverhalten

Anders als bei Normalbeton ist die leichte Gesteinskörnung maßgebend für die Festigkeit des Leichtbetongefüges. Je nach Eigenschaften der Gesteinskörnung kann die Betonfestigkeit hinter der Matrixdruckfestigkeit zurückbleiben. Während sich die Festigkeit im jungen Alter zunächst wie beim Normalbeton entwickelt (Abbildung 18 rechts) und die Druckkräfte von Korn zu Korn übertragen werden, überschreitet mit zunehmender Erhärtung die Steifigkeit und Festig-

keit der Matrix diejenige der Gesteinskörnung. Dadurch ändert sich das Tragverhalten, und die Hauptdruckspannungen laufen nun um die leichten Gesteinskörner herum (Abbildung 18 links). Somit wird die Mörtelschicht auf Druck beansprucht und es entstehen ober- und unterhalb der Gesteinskörnung rechtwinklig zu den Drucktrajektorien Zugspannungen und bei Überschreitung der Zugfestigkeit Risse. Wenn sich diese Zugkräfte auf die Gesteinskörner umlagern und deren Zugfestigkeit überschritten wird, kommt es zum sogenannten Kornbruch. Dieser stellt die obere Grenze der Druckfestigkeit von Leichtbetonen dar. Die Grenzfestigkeit wird erreicht, wenn der E-Modul der Matrix denjenigen des Gesteinkorns überschreitet und sich die Körner somit nicht mehr entsprechend ihrem Volumenanteil an der Kraftübertragung beteiligen können. Werden aufgrund schlechten Verbundes die Zugkräfte nicht auf das Korn übertragen, reißt die Matrix in einem vorzeitigen Verbundbruch entlang der Korngrenzen.

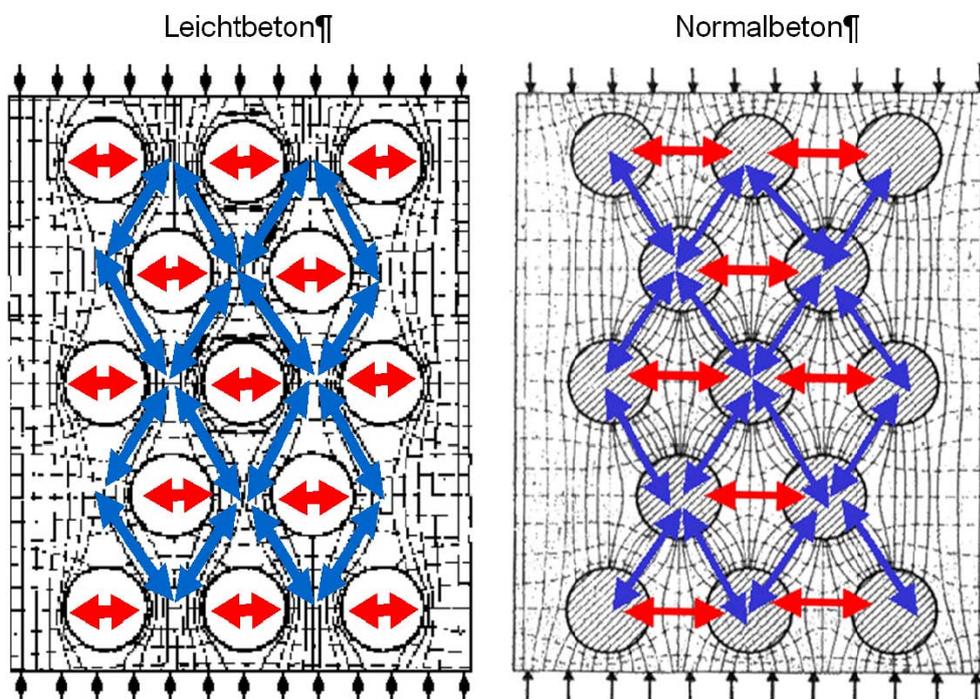


Abbildung 18: Tragverhalten von Leicht- und Normalbeton, Verlauf der Hauptspannungslinien bei Druckspannung (blau: Druckspannungen, rot: Zugspannungen) [20]

#### 4.2.3 Faserbeton, Textilbeton

Textile Betonbewehrungen eignen sich besonders für den Einsatz in funktional gradierten Betonbauteilen, da diese in den dünnen höherfesten Schichten untergebracht werden können und keine hohen Betondeckungen zum Korrosionsschutz erforderlich sind [29],[30],[31]. Textile Bewehrungen wie Glas- und Kohlefasergelege wurden ausgiebig in den beiden Sonderforschungsbereichen 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ und 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ untersucht. In den beiden Sonderforschungsbereichen wurden auch Feinkornbetone, die optimal für einen Einsatz von textiler Bewehrung geeignet sind, entwickelt.

Fasern aus alkaliresistentem Glas und Carbon sind die am häufigsten verwendeten textilen Bewehrungen. Sie werden als Rovings, also Multifilamentgarne mit parallelem Faserverlauf, in den Betonquerschnitt eingebaut.

Die Zugfestigkeit eines textilen Rovingquerschnitts ist geringer als die Summe der Zugfestigkeiten der einzelnen Filamente. Diese Tatsache begründet sich durch die Lasteinleitung in den Querschnitt, welche im Allgemeinen über eine Verbundwirkung erzielt wird. Dabei werden lediglich die äußeren Filamente direkt beansprucht. Die Filamente im Inneren des Querschnitts werden nur durch die Reibung der Filamente aneinander aktiviert. Um die Reibung zu aktivieren, ist eine Verformung notwendig. Die äußeren Filamente müssen also bereits eine Dehnung aufweisen, bevor die inneren überhaupt beansprucht werden. Bei der Bemessung textilbewehrter Bauteile muss diese geminderte Effektivität berücksichtigt werden (Abbildung 19).

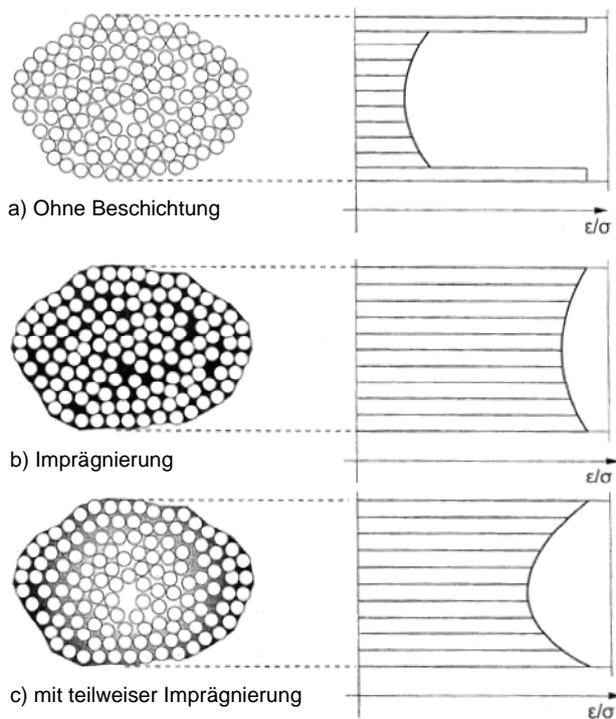


Abbildung 19: Dehnungsverteilung der Filamente eines Garns in Abhängigkeit der Homogenität und Steifigkeit der Sekundärbeschichtung

Bei der Auswahl eines Gewebes für die Verwendung als textile Bewehrung sollte auf eine möglichst geradlinige Faserorientierung geachtet werden. Aus einem gekrümmten Faserverlauf entstehen zusätzliche Beanspruchungen, welche zu Betonabplatzungen führen (Abbildung 20). Daher kommen häufig Gewirke und Gelege anstelle von Geweben zum Einsatz.

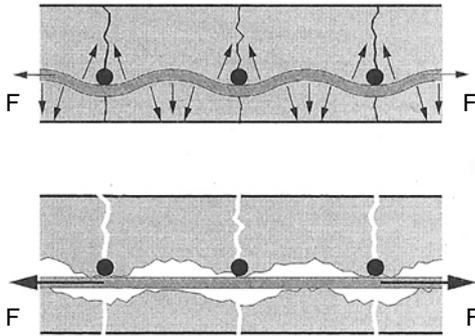


Abbildung 20: Gekrümmter Faserverlauf kann zum Versagen der Betondeckung führen [29]

Die Konstruktion und der Lastabtrag von Textilbetontragwerken erfolgt analog zum Stahlbeton. „Textilbeton ist miniaturisierter Stahlbeton“ [29]. Der Vorteil textiler Bewehrung liegt in geringeren Anforderungen an die Betondeckung zur Sicherung des Korrosionsschutzes und des Verbundes. Bedingt durch die filigranen Bewehrungsdurchmesser der textilen Bewehrung kann die Betondeckung im Millimeterbereich ausfallen. Tabelle 7 liefert einen Vergleich gängiger Dimensionen im Stahlbeton- und Textilbetonbau.

Tabelle 7: Dimensionsvergleich Stahlbeton - Textilbeton

	Stahlbeton	Textilbeton
Größtkorndurchmesser	8 bis 32 mm	1 bis 4 mm (auch darunter)
Bewehrungsdurchmesser	6 bis 32 mm (0,28 bis 8,04 cm <sup>2</sup> )	0,6 bis 2,5 mm (0,0025 bis 0,02 cm <sup>2</sup> )
Stababstände	5 bis 25 cm	5 bis 25 mm

Im Textilbeton wird die Bewehrung, genau wie beim Stahlbeton, gerichtet in ein Bauteil eingelegt. Der Versagensmechanismus wird durch das Erreichen der Zugfestigkeit der Bewehrung gekennzeichnet. Das Verformungsvermögen des fertigen Bauteils hängt von dem Verformungsvermögen des Bewehrungsmaterials ab. Die bisher verwendeten Bewehrungsmaterialien versagen im Allgemeinen spröde und haben keine Duktilität.

## 4.3 Mischungsentwürfe für Gradientenbetone

### 4.3.1 Einführung

Bauteile aus Gradientenbeton erfordern die Kenntnis der betontechnologischen Eigenschaften von Mischungen variierender Dichte in einer Bandbreite von einem minimalen bis hin zu einem maximalen Luftporengehalt. Abhängig vom Luftporengehalt und der Ausformulierung der Luftporen ergeben sich die Festigkeit und die Dämmeigenschaften.

Um einen abgestuften Verlauf der Eigenschaften zu erhalten, werden gestufte Gradientenmischungen mit variierender Porosität entworfen. Dabei dienen eine Feinkornbetonmischung (RA) als obere und verschiedene Kernmischungen maximaler Porosität als untere Grenze. Dazwischen wird ein Porositätsgradient approximiert (Abbildung 21).

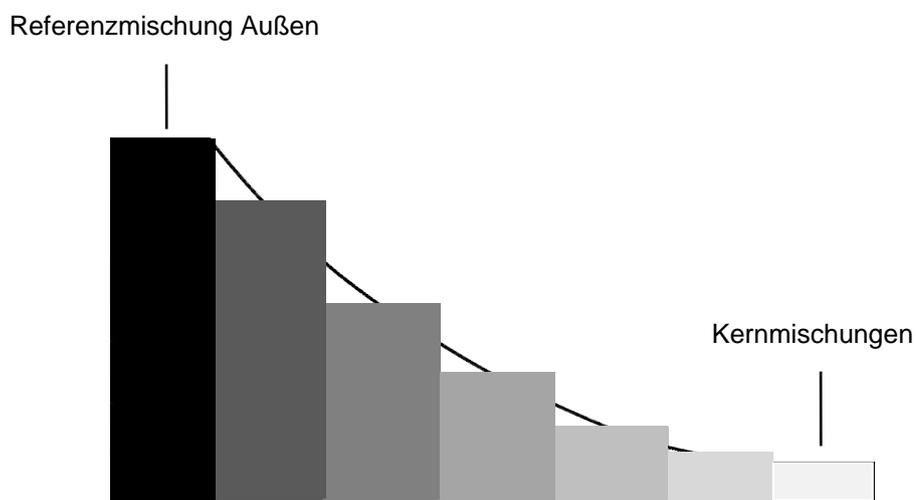


Abbildung 21: Gradientenbildung

### 4.3.2 Verwendete Materialien

#### 4.3.2.1 Sika® Basismischung CR

Bei den meisten Mischungsentwürfen kam die Fertigmischung ADDIMENT Basismischung CR von dem Hersteller Sika® zum Einsatz. Diese wird üblicherweise zur Herstellung von frühhochfestem Reparaturbeton verwendet. Die Fertigmischung besteht aus ca. 37 M.-% Zement der Zementart CEM I 52,5 R und einer abgestuften Gesteinskörnung von ca. 59 M.-%. Die sandhaltige Gesteinskörnung hat ein Größtkorn bis 2 mm und einen Mehlkornanteil von ca. 33 % mit Korngrößen bis 0,125 mm. Außerdem sind noch weitere Zusätze wie Fließmittel, Beschleuniger und andere Additive im Produkt enthalten [32]. Die wichtigsten Daten dieser Fertigmischung sind in Tabelle 8 abzulesen.

Tabelle 8: Technische Daten von Sika Basismischung CR [32]

Form	Pulver
Farbe	Grau
pH	> 11
Schüttdichte	~ 1550 kg/m <sup>3</sup>
Rohdichte	~ 2800 kg/m <sup>3</sup>
Flammpunkt	Geschlossener Tiegel: Nicht anwendbar

### Zement

Um vergleichbare Ergebnisse zwischen den einzelnen Mischungen zu erzielen, wurde derselbe Zement, wie er in Sika® Basismischung CR enthalten ist, auch für die Mischungen ohne Basismischung verwendet: Portlandzement CEM I 52.5 R der Marke Heidelberg Milke Premium nach DIN EN197-1 mit hoher Anfangsfestigkeit [33].

Tabelle 9: Technische Daten von CEM I 52,5 R

Schüttdichte, lose eingelaufen	900-1200 kg/m <sup>3</sup>
Rohdichte	3100 kg/m <sup>3</sup>
pH-Wert (T=20°C)	11,0-13,5
Schmelzbereich	> 1250°C
Kennfarbe	rot
Farbe des Aufdrucks	weiß

### Gesteinskörnung und Sieblinie

Als Zuschläge wurden Körnungen aus den Silos 1 (Korngruppe 0/1,2) und 2 (Korngruppe 1,2/2) der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart entnommen. Die Zuschläge sind trocken. Die verwendete Sieblinie in Abbildung 22 ergibt sich aus der Zusammensetzung dieser beiden Korngruppen nach Tabelle 10. Als Kennwerte ergeben sich für diese Sieblinie die Körnungsziffer  $k = 2,46$  und die Durchgangssumme  $D = 354$ .

Tabelle 10: Zusammensetzung der Sieblinie

Silo Nr.	Körnung [mm]	Anteil [%]	Durchgang [M.-%] durch die Prüfsiebe mit Durchmesser [mm]							
			0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8
1	0/1,2	30	0,69	2,40	9,3	17,4	28,5	30	30	30
2	1,2/2	70	0,33	0,7	0,7	0,7	1,4	65,8	70	70
Ist-Sieblinie			1,02	3,1	10	18,1	29,9	95,8	100	100

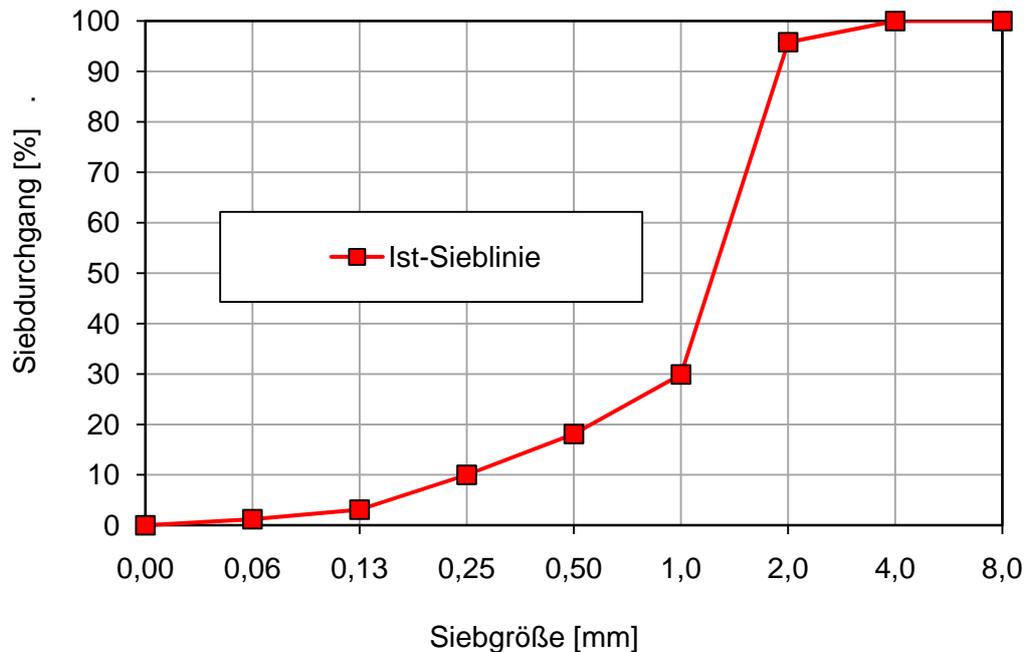


Abbildung 22: Darstellung der verwendeten Sieblinie

#### 4.3.2.2 Wasser

Für alle Versuche wurde herkömmliches auf 20 °C vortemperiertes Leitungswasser verwendet. Solches Wasser ist in Deutschland ohne Prüfung für die Herstellung von Beton zugelassen.

#### 4.3.2.3 Leichtzuschläge

Als Leichtzuschlag bei den experimentellen Versuchen kamen Blähglas, Aerogel und expandiertes Perlit zum Einsatz. Alle drei Leichtzuschläge weisen eine geringe Rohdichte von unter 0,3 kg/dm<sup>3</sup> auf. Die weitere Eignung als Leichtzuschlag bezüglich Festigkeit, Wasseraufnahme, Verarbeitbarkeit wurde nachfolgend geprüft.

## Blähglas

Aus zermahlenem Altglas oder Glasbruch wird in einem patentierten Verfahren ein Rohgranulat geformt und in einem Blähofen bei Temperaturen von 750 bis 900 °C gesintert und aufgeschäumt.



Abbildung 23: Liaver-Korn, Korndurchmesser 4 mm [1]

Es entsteht so ein ökologisches Produkt aus mineralischen Rohstoffen, welches chemisch beständig ist und ein sehr geringes Gewicht bei hoher mechanischer Festigkeit hat. Es kann vollständig und problemlos recycelt werden. In den Mischungen wurde Blähglasgranulat der Körnung 2 bis 4 mm der Firma Liaver GmbH & Co. KG verwendet.

Tabelle 11: Technische Daten von Liaver-Blähglas [1]

Grundsätzliche Eigenschaften	Material	Blähglas
	Kornform	oval, geschlossen
Physikalische Eigenschaften	Schüttdichte	190 ± 15 % kg/m <sup>3</sup>
	Kornrohddichte	310 ± 15 % kg/m <sup>3</sup>
	Kornfestigkeit	2,2 N/mm <sup>2</sup>
	Frostwiderstand	< 4,0 M.-%
Chemische Eigenschaften	Chloride	< 0,001 M.-%
Sonstige Eigenschaften	Wärmeleitfähigkeit	0,07 W/mK
	Brandklasse	A1 DIN 4102
	Preis	ca. 100 €/m <sup>3</sup>

## Aerogel

Aerogel gilt laut Hersteller als der zurzeit leichteste und am besten isolierende Feststoff der Welt. Es ist ein ultraleichter und hochporöser Werkstoff, der über ein Sol-Gel-Verfahren hergestellt wird. Zwei Komponenten, Wasser und ein Alkoxid (Tetraethylorthosilikat), reagieren in einer wässrigen Lösung chemisch miteinander und bilden kleine Teilchen, die in der Dispersion (Sol genannt) fein verteilt sind. Durch Zusammenlagern dieser etwa 1 bis 1000 nm großen Teilchen entsteht ein Gel mit offenporigem Netzwerk. Trocknet dieses Gel an der Luft aus, schrumpft es auf nur einige Prozent des ursprünglichen Volumens zusammen. Grund dafür ist

die Oberflächenspannung an der Phasengrenze des ausweichenden Lösungsmittels. Steigert man hingegen Druck und Temperatur über den kritischen Punkt des Fluids hinaus, verschwindet die Phasengrenze zwischen Flüssigkeit und Dampf und damit auch die Oberflächenspannung. Es kommt zur sogenannten überkritischen Trocknung, wobei das feste Netzwerk der kolloidalen Teilchen weitestgehend erhalten bleibt.

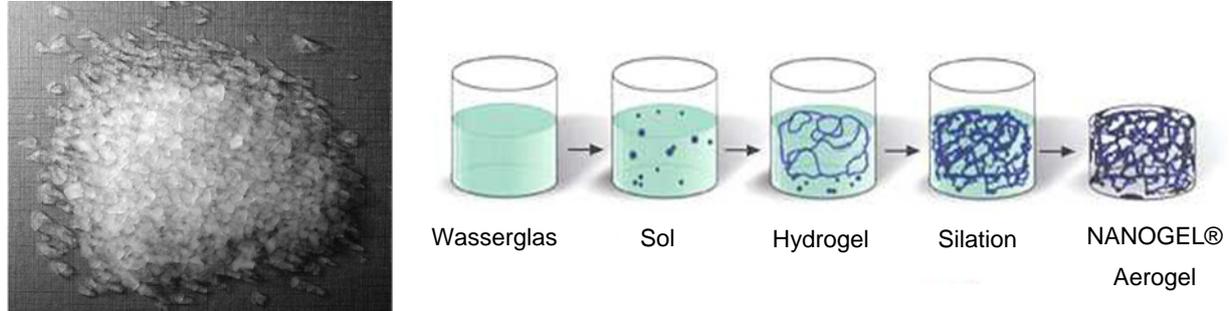


Abbildung 24: Fertiges Produkt und Herstellung von Aerogel Granulat [28],[34]

Die Porosität des entstandenen Materials liegt bei mehr als 80 % und kann bis zu 99,8 % betragen. Die technischen Daten des verwendeten Aerogels vom Hersteller Cabot fasst Tabelle 12 zusammen.

Tabelle 12: Technische Daten von Aerogel [34]

Transluzentes Granulat mit 95 % Luft und 5 % Feststoff	
Hauptbestandteil	amorphe Kieselsäure (Silica)
Wasseraufnahme	völlig hydrophob (Benetzungswinkel > 160 Grad)
Teilchengröße	5 µm bis 4 mm
Innere Oberfläche	750 m <sup>2</sup> /g
Schüttdichte	70 kg/m <sup>3</sup>
Kornrohddichte	140 kg/m <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit (bei 25 °C)	0,018 W/mK
Brandklasse	A1 DIN EN 13501-1
Preis	ca. 1000 €/m <sup>3</sup>

### Expandiertes Perlit

Als Perlit wird ursprünglich ein relativ schweres vulkanisches Gestein mit einer Rohdichte von bis zu 2,0 kg/dm<sup>3</sup> bezeichnet. Durch die vulkanischen Aktivitäten gilt Perlit als unerschöpflicher Rohstoff. Es ist ein glasartiges Ergussgestein mit Wassereinschluss und dient lediglich als Rohmaterial für verschiedene expandierte Vulkangesteine. Durch Glühen bei Temperaturen zwischen 800 und 1000 °C wird das körnige Rohmaterial zähflüssig, und das eingeschlossene Wasser verdampft. Dabei wird das Korn auf das zwanzigfache Volumen aufgetrieben und kann dann als Leichtzuschlag verwendet werden. Um die Wasseraufnahme zu begrenzen, muss der Zuschlag mit einer Silikonschicht umhüllt werden. Dies bringt wiederum Nachteile aus ökologi-

scher Sicht bei der Entsorgung [35]. Tabelle 13 gibt einige Eigenschaften des verwendeten Perlits von Europerl wieder.

Tabelle 13: Technische Daten von Thermo-Mix Europerl [35]

Grau-weißes, expandiertes Vulkangestein	
Hauptbestandteil	vulkanisches Glas (Obsidian)
Wasseraufnahme	wasserabweisend erst nach einer feinen Silikonummantelung
Korngröße	0,5 bis 6 mm
Schüttdichte	85 kg/m <sup>3</sup>
Kornrohddichte	104 kg/m <sup>3</sup>
Traglast	5000 kg/m <sup>2</sup>
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Tr}$	0,038 W/mK
Trittschall-Dämmung $L_{n,w}$	25 dB
Brandklasse	A1 DIN 4102
Preis	ca. 170 €/m <sup>3</sup>

#### 4.3.2.4 Matrixporosität

##### Superabsorbierende Polymere (SAP)

In den Beton eingemischte Superabsorbierende Polymere nehmen Wasser auf, speichern dies und geben es langsam an den umgebenden Zementleim ab. Das von den SAP aufgenommene Wasser muss beim Anmischen zusätzlich zugegeben werden, da andernfalls die Verarbeitbarkeit des Frischbetons herabgesetzt wird. Dieses Wasser steht für die Hydratation zur Verfügung, bewirkt eine innere Nachbehandlung und vermindert das Schwinden. Während der Hydratation trocknen die Partikel aus und hinterlassen, je nach Partikelgröße und Wasseraufnahmekapazität, feine Luftporen. Dadurch können die SAP den Frost-/Tausalz widerstand im Beton erhöhen, hohe Gehalte verringern jedoch auch die Festigkeit. Üblich sind Konzentrationen kleiner 1,0 M.-% vom Zementanteil [36]. Das weiße, grobkörnige Pulver ist chemisch gesehen ein Gemisch aus Acrylsäure und Natriumacrylat mit Partikelgrößen je nach Herstellungsart von 20 bis 1000  $\mu\text{m}$  [37].

SAP Luquasorb ist ein kommerzielles Produkt von BASF, das vor allem im Zierpflanzenbau eingesetzt wird, und dabei die Substrateigenschaften verbessern soll. Es ist ein vernetztes, auf Kaliumsalz basiertes Polyacrylat mit einem pH-Wert von ca. 6,0.

Die DSAP wurden von O.M. Jensen (Technical University of Denmark) hergestellt und für die Verwendung in dieser Arbeit freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Eine SAP Typ 3-Sorte, die speziell für den Einsatz im Bauwesen durch BASF Construction Chemicals [38] entwickelt wurde. Die chemische Zusammensetzung des Polymers basiert auf modifiziertem Polyacrylamid.

### Mikrohohlkugeln

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) hat im Januar 2008 dem Betonzusatzmittel „SikaAer Solid“ die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erteilt. Diese vorgefertigten Luftporen mit einer elastischen Kunststoffhülle (Polyvinylidenchlorid-Acrylnitril-Polymer) und mittleren Durchmessern von 50 µm werden mit Wasser zu einer weißen Paste mit einer Dichte von 0,2 kg/dm<sup>3</sup> angerührt. Der Vorteil gegenüber anderen Luftporenbildnern ist die zielsichere Einbringung von Luftporen, die sich während Transport, Pumpen, Einbau und Verdichten des Betons nicht mehr verändert. Höchstwerte der empfohlenen Dosierung sind 3,5 kg/m<sup>3</sup> bei Beton und 7 kg/m<sup>3</sup> bei Spritzbeton. Die in den Beton gelangende Alkalimenge, ausgedrückt als Na<sub>2</sub>O-Äquivalent, beträgt auf den Zement bezogen weniger als 0,02 M.-% und gilt somit bei Anwendung der empfohlenen Höchstdosierung als unbedenklich [32].

### Schaumbildner

Für die Leichtbetonmischungen mit Schaumzusatz wurden Schaumbildner der Firma Sika geprüft und eingesetzt. Die Aufschäumung für die relativ kleinen Volumina der Laborversuche erfolgte mittels eines handelsüblichen Milchaufschäumers. Bei größeren Mengen wird eine Bohrmaschine mit Quirlaufsatz für die Aufschäumung genutzt. Mit diesen Geräten kann bei den Versuchen für diese Arbeit ein relativ standfester Schaum in gleichbleibender Qualität und in kleinen Mengen erzeugt werden.

### Proteinschaum

Der Addiment Schaumbildner SB 3 von Sika ist ein für Porenleichtbeton einsetzbarer Schaumbildner. Die dunkelbraune Flüssigkeit mit dem Hauptwirkstoff Proteinhydrolysat hat bei 20 °C eine Dichte von 1,13 kg/dm<sup>3</sup> und einen Chloridgehalt von 0,2 %. Laut Hersteller entsteht fester Schaum bei einem Mischungsverhältnis von Schaumbildner zu Wasser von 1:20 bis 1:40. Der Proteinschaum SB 3 ist besonders für extrem niedrige Rohdichten (< 0,4 kg/dm<sup>3</sup>) geeignet und wird üblicherweise mit einem Schaumgerät erzeugt [32].

### Tensidschaum

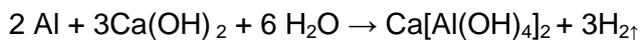
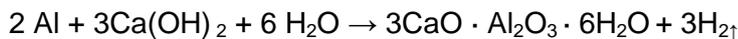
Als weiterer Schaumbildner wurde Sika Schaumbildner SB 2 getestet. Dieser Tensidschaum ist ebenfalls für Porenleichtbeton geeignet. Die leicht gelbliche Flüssigkeit hat bei 20 °C eine Dichte von 1,01 kg/dm<sup>3</sup> und einen Chloridgehalt von 0,10 %. Die Wirkstoffbasis ist ein organisches

---

Tensid. Als Mischungsverhältnis wird je nach gewünschter Porenleichtbetonrohddichte ebenfalls ein Wert von 1:20 (Schaumbildner zu Wasser) angegeben [32].

### Aluminiumpulver

Als Porosierungs- oder Treibmittel für Betonschäume dient auch Aluminiumpulver oder eine Aluminiumpaste. Das Aluminium reagiert mit dem alkalischen Wasser und es entsteht Wasserstoff, der den plastischen Mörtelleim auftreibt. Dabei verursacht jedes Aluminiumteilchen die Entstehung einer Luftpore. Je nach Mahlfeinheit entstehen unterschiedliche Porendurchmesser. Der entstandene Wasserstoff diffundiert nach und nach aus den Poren heraus und wird durch Luft ersetzt. Die chemische Reaktion lässt sich in folgenden Gleichungen beschreiben [18]:



Die Versuche werden mit Aluminiumpasten der Firma Eckart GmbH durchgeführt. Dabei kommen zwei verschiedene Produkte zum Einsatz, die sich nur in ihrer Sieblinie unterscheiden: STAPA Hydropor N 903/75 mit einem Siebdurchgang bei 71 µm von bis zu 99 % und STAPA Hydropor N 300/75 mit einem Siebdurchgang bei 100 µm von bis zu 90 %. Beides sind wasserhaltige Aluminiumpasten aus 99,5 % Reinaluminium und einem aktiven Metallgehalt von bis zu 92 %.

### 4.3.2.5 Zusatzmittel

#### Fließmittel

Fließmittel verbessern die Verarbeitbarkeit des Betons bei gleichem w/z-Wert, was zu einer erhöhten Druckfestigkeit und Dichtigkeit führt. Die Wirkungsweise beruht auf dem Inhaltsstoff Polycarboxylatether, einem Polymer mit einer negativ geladenen Hauptkette und elektrisch neutralen Seitenketten. Die Ketten lagern sich aufgrund der negativen Ladung an der Zementkornoberfläche ab und bewirken eine Dispergierung der Zementpartikel. Die Feinstteile der Betonmischung werden durch die Seitenketten räumlich getrennt [18].

Bei der Versuchsdurchführung kommt Sika ViscoCrete-1020 X zum Einsatz, eine bräunliche Flüssigkeit auf der Wirkstoffbasis von Polycarboxylatether. Weitere Daten in Tabelle 14.

Tabelle 14: Technische Daten von Sika® ViscoCrete-1020 X

Rohdichte (bei 20 °C)	1,03 kg/dm <sup>3</sup>
pH-Wert	ca. 4
Chloridgehalt	≤ 0,10 %
Alkaligehalt (Na <sub>2</sub> O-Äquivalent)	≤ 0,5 %
Dosierbereich	0,2 bis 2,5 % vom Zementgewicht

### Beschleuniger

Beschleuniger bewirken ein schnelleres Erstarren bzw. Erhärten, der Beton lässt sich somit früher ausschalen oder belasten. Die Reaktion des Zements mit Wasser wird beschleunigt, sodass sich die Hydratationswärme bereits zu einem früheren Zeitpunkt entwickelt. Auch die Entmischung oder das Aufschwemmen von Leichtzuschlagskörnern wird vermindert. Allerdings lässt sich die Wirkung von Beschleunigern nur schwer kontrollieren und der Einsatz bewirkt oft auch eine Herabsetzung der Endfestigkeit.

Von Sika wurde ein pulverförmiger Erstarrungsbeschleuniger verwendet (Sika Beschleuniger BE2). Dieses hellgraue Pulver mit der Wirkstoffbasis Natriumaluminat hat eine Dichte von 0,9 kg/dm<sup>3</sup> und einen Chloridgehalt < 0,10 %. Der empfohlene Dosierbereich liegt zwischen 1,8 und 4,5 % vom Zementgewicht [32].

#### 4.3.2.6 Plastoform Glasseiden-Armierungsgewebe, Panzer

Das Plastoform Glasseiden-Armierungsgewebe wurde zur Armierung von Putzen entwickelt. Das Gewebe besteht aus alkalibeständig beschichteten E-Glas Rovings und hat ein Flächengewicht von 540 g/m<sup>2</sup>. Die Fadendichte beträgt 21 Dreherschnüre in Kettrichtung und 12 Schussfäden auf jeweils 10 cm Breite. Die Maschenweite beträgt 6 x 9 mm.

Die Plastoform GmbH gibt in dem Datenblatt des Produktes, die in Tabelle 15 dargestellten Reißfestigkeiten, im Anlieferungszustand und nach einer 28-tägigen Lagerung in 5%iger Natronlauge, an. Alle Werte beziehen sich auf einen 5 cm breiten Streifen [39].

Tabelle 15: Plastoform Glasseiden-Armierungsgewebe, Panzer – Reißfestigkeiten

Anlieferungszustand	
Reißfestigkeit Kette [N/5cm]	4340 N
Reißfestigkeit Schuss [N/5cm]	9876 N
Nach 28-tägiger Lagerung in 5%iger Natronlauge	
Reißfestigkeit Kette [N/5cm]	2843 N
Reißfestigkeit Schuss [N/5cm]	6586 N

Im Rahmen der Bauteilversuche wurden nur die Schussfäden als tragend angesetzt. Die Schussfäden haben einen ovalen Querschnitt, welcher im Mittelwert, mit Beschichtung, eine Breite  $b_{SF} = 4,1$  mm und eine Höhe  $h_{SF} = 1,0$  mm besitzen. Die Höhe des Gewebes in den Kreuzungspunkten der Kett- und Schussfäden beträgt im Mittel  $h_{Gew} = 0,8$  mm, da die Kettfäden die Schussfäden zusammenpressen. Die Feinheit  $f_F$  der Schussfäden beträgt 2400 tex.

### 4.3.3 Versuchsdurchführungen

#### 4.3.3.1 Frischbetonprüfungen

Solange sich der Beton in einem verarbeitbaren Zustand befindet, nennt man ihn Frischbeton. In dieser Zeit weist Beton Eigenschaften einer viskosen Flüssigkeit aber auch eines Feststoffes mit Kohäsion und innerer Reibung auf. Je nach Betonzusammensetzung ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften. Die wichtigste aller Frischbetoneigenschaften ist die Konsistenz als Maß für die Verarbeitbarkeit. Sie ist so zu wählen, dass der Beton ohne Entmischung gefördert, eingebaut und verdichtet werden kann. Es wurden nur Zuschläge bis zu einer Maximalkorngröße von 4 mm bei den Mischungen verwendet, weshalb für manche Prüfungen auch auf die Normen für Mörtel zugegriffen wurde.

#### Ausbreitversuch

In der DIN EN 1015 Teil 3 ist ein Verfahren zur Bestimmung der Konsistenz von frisch angemischtem Mörtel festgelegt. Darunter fallen auch Mörtel aus mineralischen Bindemitteln mit Leichtzuschlägen. Als messbare Größe dient das Ausbreitmaß. Dabei wird eine Frischmörtelprobe in eine definierte Form auf einem Ausbreittisch gefüllt, und dieser Tisch anschließend aus einer vorgegebenen Höhe frei fallen gelassen. Der Mörtel wird in zwei Schichten, jeweils durch 10 kurze Stöße mit einem Stampfer verdichtet, in den Setztrichter gefüllt. Nach dem vertikalen Abheben des Trichters wird der Ausbreittisch 15-mal angehoben und wieder fallen gelassen. Danach wird mit einem Messschieber in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen der Durchmesser des ausgebreiteten Mörtels gemessen [40].

#### Frischbetonrohichte

Um die Frischbetonrohichte zu bestimmen, wird ein Behälter mit bekanntem Volumen (hier eignet sich der Luftporentopf) und bekanntem Gewicht mit Beton gefüllt und anschließend gewogen. Die Befüllung des Topfes und die Art der Verdichtung des Materials hängen dabei von der Konsistenz ab. Das Verhältnis aus Frischbetonmasse und Volumen ergibt die gemessene Frischbetonrohichte nach Formel (4.1) [40].

$$\rho_{\text{Fb}} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.1)$$

mit:  $m_2$ : Masse des gefüllten Behälters [kg]  
 $m_1$ : Masse des leeren Behälters [kg]  
 $V$ : Volumen des Behälters [m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{\text{Fb}}$ : Rohdichte des Frischbetons [kg/m<sup>3</sup>]

### Luftgehalt

Der Luftgehalt kann über den Vergleich der tatsächlichen Frischbetonrohddichte mit der theoretischen Rohdichte des luftporenfreien Betons oder zuverlässiger über das Druck-Verfahren nach DIN EN 1015-7 ermittelt werden. Bei einem Luftgehalt von weniger als 20 % kann dieses Verfahren angewendet werden. Ein Probebehälter (LP-Topf) mit einem Fassungsvermögen von 1 l wird dabei mit Mörtel gefüllt und verdichtet. Nach Säuberung der Außenseite schließt ein Metallaufsatz mit Manometer das Probengefäß luftdicht ab. Über ein Ventil kann die restliche Luft im eingeschlossenen Luftspalt mit Wasser verdrängt werden. Nachdem ein definierter Druck aufgebracht wurde, wird das Überstromventil geöffnet. Es stellt sich wieder ein Druckausgleich ein, und der Luftgehalt in Vol.-% kann am Manometer abgelesen werden [40].

### 4.3.3.2 Festbetonprüfungen

Bis zur Festbetonprüfung nach 28 Tagen werden alle Probekörper in Wasser gelagert. Notwendig für die Festbetonprüfungen sind jeweils drei Proben oder Probekörper, sofern nichts anderes in den Normen bestimmt ist. Dabei sollte das kleinste Maß eines Probekörpers mindestens das Vierfache des größten verwendeten Zuschlagskorns betragen. In diesem Forschungsvorhaben wurden Zuschläge mit maximal 4 mm Durchmesser in den Mischungen eingesetzt. Für Biegezug- und Druckfestigkeit wurden demnach Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm hergestellt. Für die Prüfung des statischen Elastizitätsmoduls sind vorzugsweise Zylinder zu verwenden. Diese hatten hier einen Durchmesser von 100 mm und eine Höhe von 200 mm. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sind zwei möglichst identische und planparallele Platten herzustellen. Bei der Probenvorbereitung wurden die betonierten Platten auf die gewünschte Dicke plan geschliffen. Die Abmessungen sind von der Größe des Plattenprüfgeräts abhängig und betragen in diesem Fall 200 x 200 x 25 mm.

### Biegezugfestigkeit

Um die Biegezugfestigkeit zu ermitteln, wird das Drei-Punkt-Lastverfahren angewendet. Drei Prismen pro Wert mussten dafür geprüft werden. Dabei sind die Prismen mit einer Seitenfläche auf die Stützrollen zu legen. Über eine Belastungsrolle wird die Last bis zum Bruch mit einer Laststeigerung von  $50 \pm 10$  N/s auf die gegenüberliegende Seitenfläche des Prismas aufge-

bracht. Die gespaltenen Prismenhälften werden noch für die Druckfestigkeitsprüfung verwendet und sind bis dahin mit einem feuchten Tuch abzudecken [41].



Abbildung 25: Drei-Punkt-Lastverfahren zur Biegezugermittlung von 4 x 4 x 16 cm Prismen

Die Biegezugfestigkeit berechnet sich nach DIN EN 196-1 als Mittelwert der drei Prüfungen wie folgt:

$$f_{cb} = \frac{1,5 \cdot F \cdot l}{b^3} \quad (4.2)$$

mit:  $f_{cb}$ : Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $b$ : Seitenlänge des Querschnitts des Prismas [mm]  
 $F$ : aufgebrachte Bruchlast [N]  
 $l$ : Abstand zwischen den Auflagern [mm]

### Druckfestigkeit

DIN EN 196-1 beschreibt das Prüfverfahren zur Ermittlung der Druckfestigkeit. Die sechs Prismen-Hälften aus der Biegezugfestigkeit finden dafür Verwendung. Die Hälften werden mit einer Seitenfläche nach oben, parallel und mittig zu den Druckplatten in die Druckpresse (Abbildung 26) gelegt, wobei die Abmessungen der Druckplatten 40 x 40 mm betragen. Die Belastung wird mit einer Laststeigerung von 2400 ± 200 N/s bis zum Bruch erhöht. Eine Anpassung der Laststeigerung bei Annäherung an die Höchstlast erfolgt bei dieser Prüfmaschine automatisch [42].



Abbildung 26: Druckpresse mit Messeinrichtung

Aus den gemittelten Werten lässt sich die Druckfestigkeit berechnen:

$$f_c = \frac{F}{1600} \quad (4.3)$$

mit:  $f_c$ : Druckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 1600: Fläche der Druckplatten (40 x 40 mm) [mm<sup>2</sup>]  
 F: die Höchstlast im Bruchzustand [N]

### Elastizitätsmodul

„Als statischer Druck-Elastizitätsmodul gilt der als Sehnenmodul ermittelte Verhältniswert zwischen einer Druckspannungsdifferenz und der ihr entsprechenden sogenannten elastischen Verformung“ [42].

An dem plangeschliffenen Zylinder werden in Längsrichtung drei hochempfindliche Wegaufnehmer über zwei Metallringe fixiert. Nach dem Einsetzen der Probekörper in die Prüfmaschine wird mit der unteren Prüfspannung  $\sigma_u = 0,5 \text{ N/mm}^2$  belastet. Danach fährt die Prüfmaschine den Belastungszyklus nach Abbildung 27 mit zwei Belastungen bis zur oberen Prüfspannung  $\sigma_o$ , jeweils anschließender Entlastungen und erneuter Belastung. Die Berechnung des E-Moduls erfolgt mit den Spannungen und Dehnungen ( $\epsilon_o$  und  $\epsilon_u$ ) des dritten Belastungszyklus in Punkt A und B und der zugehörigen Messlänge  $l_o$  der Wegaufnehmer. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt  $0,5 \text{ N/mm}^2$  je Sekunde und die Oberspannung sollte etwa ein Drit-

tel der zu erwartenden Druckfestigkeit betragen. Die Prüfung erfolgt mit der gleichen Prüfmaschine wie bei der Druckfestigkeit [42].

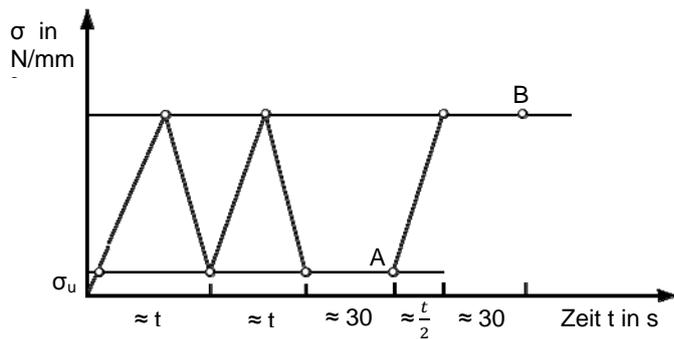


Abbildung 27: Belastungs-Zeit-Diagramm für Elastizitätsmodul-Messung [42]

Nach Registrierung der zur oberen Spannung  $\sigma_o$  zugehörigen Dehnung  $\varepsilon_o$  wird der Zylinder bis zum Bruch belastet. Die dabei gemessene Druckfestigkeit sollte um nicht mehr als 20 % von der vorausgesetzten Festigkeit abweichen.

Die Berechnung folgt der Formel:

$$E_b = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (4.4)$$

mit:

- $E_b$ : Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>]
- $\sigma_o$ : obere Prüfspannung bei der 3. Belastung [N/mm<sup>2</sup>]
- $\sigma_u$ : untere Prüfspannung bei der 3. Belastung [N/mm<sup>2</sup>]
- $\varepsilon_o$ : am Punkt B und bei  $\sigma_o$  gemessene Dehnung
- $\varepsilon_u$ : am Punkt A und bei  $\sigma_u$  gemessene Dehnung



Abbildung 28: Wegaufnehmer an Zylinder (15 x 30 cm) zur Elastizitätsmodul-Prüfung

### Wärmeleitfähigkeit

Mit einem Plattengerät kann nach DIN EN 12664 und DIN 52 612 Teil 2 die Wärmeleitfähigkeit eines Feststoffes bestimmt werden. Dabei wird bei homogenen Probekörpern im Plattengerät eine in einer Richtung wirkende konstante und gleichmäßige Wärmestromdichte hergestellt. Die Wärmedurchlassprüfung erfolgt mit einem Zweiplattengerät. Bei diesem Gerät wird eine quadratische Heizplatte zwischen die zwei nahezu identischen Probekörper gebracht und der Wärmestrom zu den Kühlplatten oben und unten übertragen (Abbildung 29).



Abbildung 29: Zweiplattengerät mit Versuchsaufbau (Platten: 20 x 20 x 3 cm)

Die Heizplatte besteht aus einer Messfläche, an der die gleichmäßige Wärmestromdichte erzeugt wird, und einem durch einen schmalen Spalt getrennten Schutzring. Die Kühlplatten bestehen aus Metall, damit deren Temperatur konstant gehalten werden kann. Um Messabweichungen zu begrenzen, müssen die Probekörper dieselbe Oberfläche wie die Heizplatten aufweisen. Eine zusätzliche Randdämmung um die Platten schützt bei Messungen oberhalb und unterhalb der Raumtemperatur [43].

Die Messung sollte an trockenen Stoffen erfolgen. Dazu sind alle Prüfplatten bis zur Massekonstanz bei 105 °C in einem Ofen zu trocknen. Massekonstanz gilt als erreicht, wenn der Probekörper über 24 h weniger als 0,01 Vol.-% seiner Masse verliert. Unmittelbar vor dem Einbau werden Dicke, Abmessungen und Gewicht der Proben bestimmt. Mit der sich daraus ergebenden Trockenrohddichte der Prüfkörper kann deren Gleichheit beschrieben werden.

Über die mittlere Leistungszufuhr ( $\Phi$ ) zum Messausschnitt der Heizplatte lassen sich dann Wärmestromdurchlasswiderstand ( $R$ ) oder Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) errechnen [43].

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} \quad (4.5)$$

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (4.6)$$

mit:  $T_1$ : mittlere Temperatur der heißen Seite der Probekörper [K]  
 $T_2$ : mittlere Temperatur der kalten Seite der Probekörper [K]  
 $A$ : Messfläche der Heizplatte [m<sup>2</sup>]  
 $d$ : mittlere Dicke der Probekörper [m]  
 $\Phi$ : mittlere Leistungszufuhr zur Heizplatte [W]

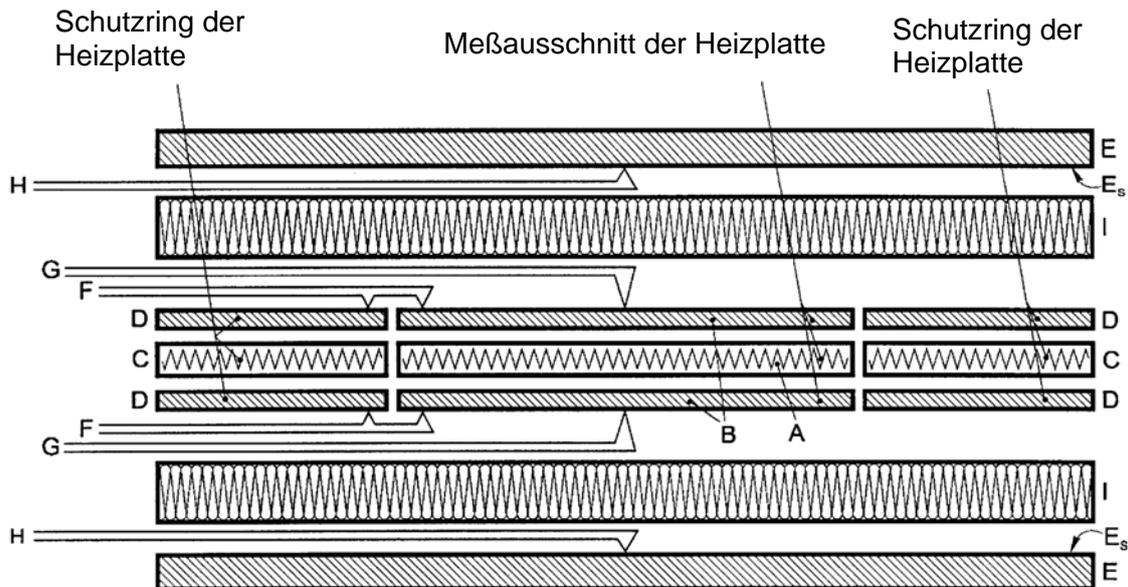


Abbildung 30: Systemaufbau des Zweiplattengeräts [43]

mit:	A	Heizeinrichtung des Messausschnittes
	B	Deckplatten des Messausschnittes
	C	Heizeinrichtung des Schutzringausschnittes
	D	Deckplatten des Schutzringausschnittes
	E	Kühlplatte
	Es	Deckplatte der Kühlplatte
	F	Differenzthermoelemente
	G	Thermolemente der Heizplattenoberfläche
	H	Thermolemente der Kühlplattenoberfläche
	I	Probekörper
	L	Schutzplatte
	M	Schutzplattendämmung
	N	Differenzthermoelemente der Schutzplatte

#### 4.3.4 Vorversuche und Ergebnisse

Um die Eignung der Leichtzuschläge und der Porosierungsmittel für die in dieser Forschungsarbeit herzustellenden Mischungszusammensetzungen zu überprüfen, werden einige Vorversuche durchgeführt. Es stehen drei unterschiedliche SAP-Sorten, zwei verschiedene Schaumbildner und zwei Aluminiumpulver mit unterschiedlicher Sieblinie für die Versuche zur Verfügung.

Über die Ermittlung der Sieblinie und dazugehöriger Wasseraufnahme einer SAP-Sorte lässt sich die spätere Porengröße und die Porengrößenverteilung im Beton bestimmen. Die drei SAP-Sorten werden mit diesen Kenngrößen dann untereinander verglichen.

Die geeigneteren Sorten der unterschiedlichen Schaumbildner und Aluminiumpulver werden über den Vergleich der Eigenschaften von erstellten Probekörpern ermittelt.

Für die Mischungsentwürfe mit Leichtzuschlägen ist der Volumenanteil des Anmachwassers zu bestimmen. Da Leichtzuschläge im frischen Beton Wasser aufnehmen können, muss dieses Absorptionswasser bestimmt und dem Anmachwasser hinzugerechnet werden.

#### 4.3.4.1 Verwendung der SAP in den Mischungsentwürfen

Bei den durchgeführten Versuchen werden die SAP als Porosierungsmittel der Zementmatrix genutzt. Hierfür wird eine große Menge an SAP benötigt. Die drei Polymer-Typen unterscheiden sich in den Vorversuchen nur geringfügig bei der Wasseraufnahme und etwas in der Sieblinie und führen zu sehr ähnlichem Porengefüge. Deshalb werden die weiteren Versuche aus Gründen der Wirtschaftlichkeit mit dem kommerziellen und damit günstigsten Produkt SAP Luquasorb durchgeführt. Erste Mischungsentwürfe mit einer größeren Menge an SAP können allesamt nicht verarbeitet werden, da die Mischungen zu trocken werden. Die SAP nehmen mehr Wasser auf, als in den obigen Versuchen ermittelt wurde. Nach [36] liegt dies an der geringeren Ionenkonzentration im Frischbeton. Bei geringen Konzentrationen von SAP im Vergleich zum Zementgehalt wird die Wasseraufnahmefähigkeit durch die hohe Ionenkonzentration begrenzt. Steigt dagegen das Verhältnis von SAP-Menge und zusätzlichem Wasser zu der Zementmenge, nimmt auch die Wasseraufnahmefähigkeit zu. Eine Grenze des aufgenommenen Wassers ergibt sich bei dem Wert, den SAPs in ionenfreier Umgebung bzw. in reinem Wasser aufnehmen. Bei den SAP Luquasorb liegt sie bei ca. 28 bis 30 g/g. Über mehrere Versuche mit unterschiedlichen SAP-Konzentrationen ergibt sich Abbildung 31. Dargestellt ist die Wasseraufnahme der SAP in Abhängigkeit der Konzentration als Ergebnis aus dem Verhältnis von SAP plus Wasser zu Zement.

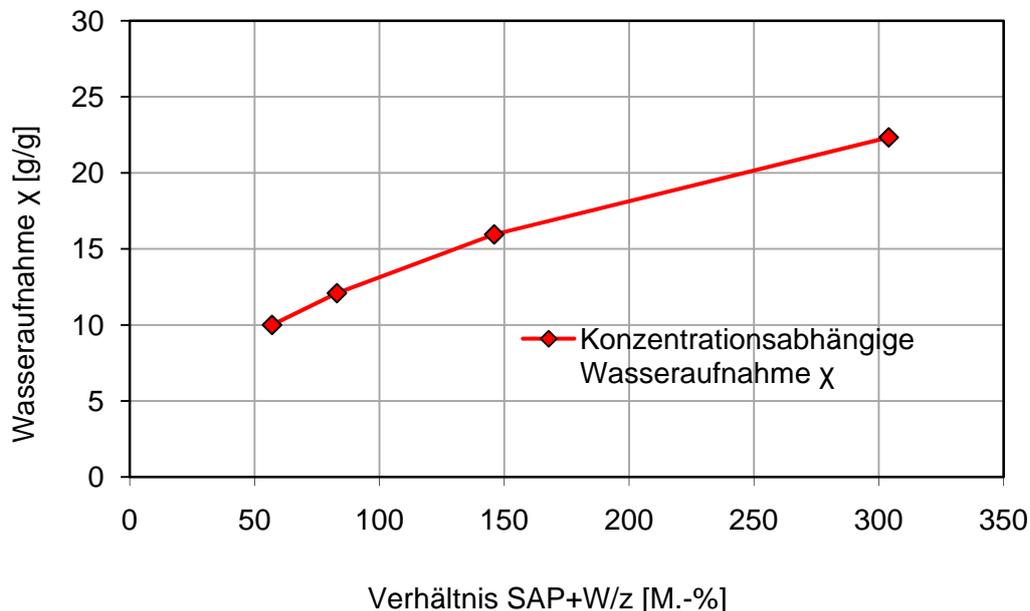


Abbildung 31: Wasseraufnahmefähigkeit in Abhängigkeit der Ionenkonzentration

#### 4.3.4.2 Wahl des Schaumbildners

In einem Vorversuch wird die Eignung der beiden Schaumbildner Sika SB 2 (Tensidschaum) und Sika SB 3 (Proteinschaum) untersucht. Dazu werden beide Konzentrate im gleichen Mi-

schungsverhältnis mit Wasser aufgeschäumt und das Verhalten an der Luft über einen Zeitraum von einer Stunde beobachtet. Anschließend werden mit beiden Schäumen Probekörper betoniert und die Festbetoneigenschaften nach einem Tag miteinander verglichen.

Tabelle 16: Vergleich der zwei Schaumbildner

	Mischungsverhältnis mit Wasser	Wassermenge	Aufschäumungszeiten	Erzielte Schaummenge
SB2	01:20	10 ml	2 min	≈ 70 cm <sup>3</sup>
SB3	01:20	10 ml	2 min	≈ 100 cm <sup>3</sup>

Der Schaum mit SB2 zeigt nach 2 Minuten noch keine Entmischungserscheinungen und ist auch nach 10 bis 15 Minuten noch stabil. Erst danach setzt sich das Wasser ab und der Schaum zerfällt langsam. Im Gegensatz dazu bleibt der Schaum mit SB3 nur rund 2 Minuten stabil, bevor sich das Wasser langsam absetzen kann. Im ausgehärteten Probekörper zeigen sich nach einem Tag bei der Mischung mit SB2 kleinere Luftporen, aber auch eine augenscheinlich geringere Zugfestigkeit als bei der Mischung mit SB3. Biegezug- und Druckfestigkeit sind bei gleicher Rohdichte am Probekörper der Mischung mit SB3 deutlich höher. Auf Grund dieser Beobachtungen und Ergebnisse werden alle weiteren Versuche mit dem Proteinschaum SB3 durchgeführt. Es wird allerdings darauf geachtet, den Schaum direkt nach dem Aufschäumen der Betonmischung beizugeben, um die Entmischungsneigung zu begrenzen, die zu einem geringeren Porenvolumen im zementgebundenen Schaum im Verhältnis zum vorgefertigten Schaum führt.

#### 4.3.4.3 Aufschäumen mit Aluminium

Um das Aufschäumen mit den beiden Aluminiumpasten STAPA Hydropor N 903/75 (A1) und STAPA Hydropor N 300/75 (A2) zu bestimmen, werden Vorversuche an einer hochfesten Feinkornbetonmischung und an einem haufwerksporigen Leichtbeton mit porosierter Matrix gemacht. Die Zugabe der Aluminiumpasten erfolgt zunächst im empfohlenen Dosierungsbereich von 0,25 kg/m<sup>3</sup>. Damit lässt sich das Porenvolumen der hochfesten Feinkornbetonmischung deutlich steigern. Da sich die beiden Produkte nur in ihrer Sieblinie unterscheiden, ist das erzeugte Porenvolumen gleich groß, unterscheidet sich jedoch in der Porengrößenverteilung. Versuche, diese Eigenschaft auch auf den haufwerksporigen Leichtbeton mit porosierter Matrix zu übertragen und die Zementmatrix dieses Leichtbetons aufzuschäumen, sind allerdings misslungen. Zweierlei Gründe können festgestellt werden:

- Erstens ist die aufzuschäumende Zementmenge im Vergleich zum Haufwerksporenvolumen sehr klein. Um dieses Volumen durch Aufschäumen des Zementleims mit Aluminiumpasten zu erreichen, muss der empfohlene Dosierungsbereich deutlich überschritten werden

- Zweitens erzeugt die schnelle Reaktion des Aluminiums mit dem alkalischen Wasser eine sehr große Wärmeentwicklung. Das Anmachwasser verdunstet sehr schnell, und die Hydratation wird gestoppt (die Erstarrung des Zementleims erfolgte schon kurz nach dem Anmischen). Die Leichtzuschläge werden nicht miteinander verkittet. Aus diesem Grund finden die Aluminiumpasten in den weiteren Versuchen keine Anwendung

#### 4.3.4.4 Wasseraufnahme der als Leichtzuschläge verwendeten Materialien

Trocken zugegebene Leichtzuschläge können im Frischbeton Wasser aufnehmen. Dieses Absorptionwasser muss dem Anmachwasser bei der Leichtbetonherstellung hinzugerechnet werden. Gemäß DIN 1097-6 ist die Absorptionwassermenge mit der Wasseraufnahme in einem Wasserbad nach 60 Minuten abzuschätzen [21].

#### Perlit

Der verwendete Leichtzuschlag Perlit wird mit diesem Verfahren getestet. Die Leichtzuschlagskörner werden im ofentrockenen Zustand in einem LP-Topf mit bekanntem Volumeninhalt gefüllt und anschließend mit Wasser bedeckt. Eine Glasplatte verhindert das Aufschwimmen der Körnung. Die Massen sind in trockenem und nassem Zustand zu bestimmen. Über Filterpapier wird der Leichtzuschlag vom überschüssigen Wasser getrennt. Abtupfen mit Tüchern soll die Restmenge des an der Oberfläche haftenden Benetzungswassers möglichst gering halten. Die Wasserabsorption  $W_{as}$  ergibt sich nach Gleichung (4.7) in M.-%.

$$W_{as} = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (4.7)$$

mit:  $m_s$ : Masse der gesättigten Probe [g]  
 $m_d$ : Masse der trockenen Probe [g]

Tabelle 17: Wasserabsorption von Perlit

$m_{d,Perlit}$	$m_{nass}$	davon 5 % Benetzungswasser (geschätzt)	$m_s$	$W_{as}$
69,2 g	409,5 g	17,0 g	392,4 g	467 M.-%

Weil das Benetzungswasser an der Oberfläche nicht komplett abgetrocknet werden kann, wird das Gesamtgewicht der Probe um 5 % abgemindert.

#### Blähglas

Bei Blähglas ist in Versuchen nur eine sehr geringe Wasseraufnahme festzustellen. Die geschlossene und wasserundurchlässige Sinterhaut des Granulats verhindert die Absorption von

Wasser. Lediglich bei gebrochener Körnung kann Wasser in die Poren aufgenommen werden, weshalb darauf zu achten ist, dass die Körnung vom Mischer nicht zerschlagen wird.

### Aerogel

Laut Hersteller ist Aerogelgranulat von Cabot vollständig hydrophob, der Benetzungswinkel dabei größer als 160 Grad. Aus diesem Grund wird auf die Prüfung der Wasseraufnahme dieses Leichtzuschlages verzichtet.

Bei allen Leichtzuschlägen ist zu beachten, dass - wie bei der Gesteinskörnung im Normalbeton - die Oberflächen der Zuschläge mit Wasser benetzt werden. Je größer diese Oberfläche ist, desto größer ist der tatsächliche Wasserbedarf einer Mischung.

### 4.3.5 Mischungsentwürfe

Die Entwicklung der Gradientenbetonmischungen erfolgte unter den in Kapitel 4.3.1 genannten Gesichtspunkten der Porositätsgradierung und den nachfolgend beschriebenen Materialien als Ausgangsrepertoire.

Dies wurde durch die Herstellung von Betonmischungen mit unterschiedlichen Zuschlägen und Luftporenbildnern erreicht. Es entanden Betone variierender Dichte und daraus resultierend auch variierender Festigkeit, Dichtungs- und Dämmeigenschaft.

Die Variation wurde dabei durch schrittweise Erhöhung oder Verringerung eines Bestandteiles oder durch dessen Ersatz mit einem anderen Material erzeugt. Als äußere Grenzen für die Betonentwürfe dienten zwei verschiedene Mischungen. Eine höherfeste Feinkornbetonmischung, im Folgenden als ‚Referenzmischung Außen‘ (kurz RA) bezeichnet, und mehrere extrem leichte und wärmedämmende Mischungen, Kernmischungen (K) genannt. Ausgangspunkt für die Entwicklung weiterer Kernmischungen stellt die von Thienel in [25] beschriebene Mischung dar, die sich bei einer umfangreichen Literaturrecherche als leichteste Mischung mit besten Dämmeigenschaften und Tragfähigkeiten herauskristallisiert hat. Zwischen diesen beiden Mischungen liegen die in zwei unterschiedlichen Bereichen abgestuften Gradientenmischungen (Abbildung 32).

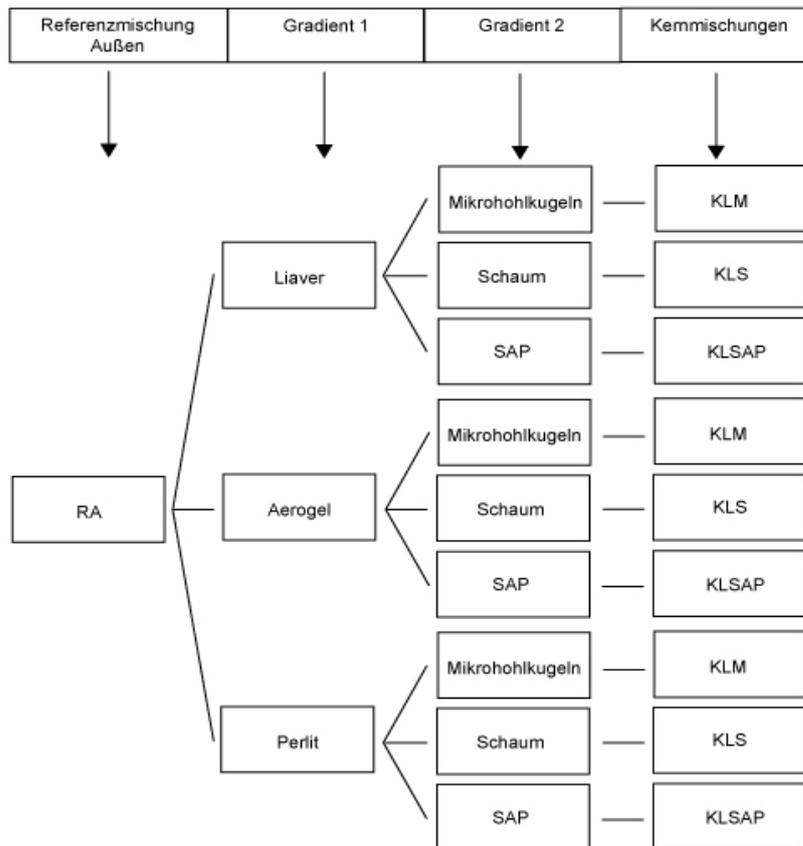


Abbildung 32: Baumstruktur Mischungsentwicklung

Um auf eine aufwändige Sieblinienberechnung und -zusammenstellung verzichten zu können, wurde bei der Referenzmischung Außen mit einer Fertigmischung von Sika experimentiert. Die normalerweise für schnelle Instandsetzungen verwendete Basismischung wurde dabei ohne weitere Zugabe von Zuschlägen wie Sand, Kies oder Splitt genutzt. Für die später hergestellten Gradientenmischungen ermöglichte dies eine einfachere Umrechnung der Abstufungen durch volumenbezogenen Austausch der RA durch Leichtzuschläge oder Luftporenbildner.

Mit der Stoffraumrechnung nach Gleichung (4.8) wurden die einzelnen Massenanteile der Materialien berechnet. Zusatzmittel wurden per Definition vernachlässigt.

$$1000 = \left( \frac{BM}{\rho_{BM}} + \frac{LZ}{\rho_{LZ}} + \frac{LP}{\rho_{LP}} + \frac{W}{\rho_W} \right) [\text{dm}^3] \quad (4.8)$$

mit:	<i>BM</i> :	Masse Basismischung [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{BM}$ :	Rohdichte Basismischung [kg/dm <sup>3</sup> ]
	<i>LZ</i> :	Masse Leichtzuschlag [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{LZ}$ :	Rohdichte Leichtzuschlag [kg/dm <sup>3</sup> ]
	<i>LP</i> :	Masse Luftporenbildner [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{LP}$ :	Rohdichte Luftporenbildner [kg/dm <sup>3</sup> ]
	<i>W</i> :	Masse Wasser in [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_W$ :	Rohdichte Wasser [kg/dm <sup>3</sup> ]

Sind die einzelnen Bestandteile einer Mischung und deren Massen bekannt, lässt sich die Soll-Frischbetonrohddichte über Gleichung (4.9) berechnen. Bei den Berechnungen wird der Luftgehalt nicht berücksichtigt. Die tatsächlichen, gemessenen Frischbetonrohddichten weichen also leicht von diesem Wert ab. Bei üblichen Luftgehalten von wenigen Prozent ergibt dies aber nur

kleine Abweichungen. Kann der Frischbeton nicht vollständig verdichtet werden, ist die tatsächliche Frischbetonrohddichte aufgrund des höheren Luftgehaltes deutlich niedriger als die Soll-Frischbetonrohddichte. Eine höhere gemessene Rohddichte könnte durch Entmischung oder durch die Zerstörung von Leichtzuschlägen verursacht werden.

$$\rho_{\text{FB,soll}} = \frac{\text{BM} + \text{LZ} + \text{LP} + \text{W}}{\frac{\text{BM}}{\rho_{\text{BM}}} + \frac{\text{LZ}}{\rho_{\text{LZ}}} + \frac{\text{LP}}{\rho_{\text{LP}}} + \frac{\text{W}}{\rho_{\text{W}}}} \quad (4.9)$$

#### 4.3.5.1 Referenzmischung Außen

Die äußere Referenzmischung (RA) wurde aus nur zwei Komponenten hergestellt: Wasser und Sika Basismischung. Der Vorteil dieser Fertigmischung liegt in einer einfachen Herstellung mit gleichbleibenden Qualitätseigenschaften.

Im Produktdatenblatt des Herstellers [32] ist folgendes Mischungsverhältnis angegeben:

- 45 M.-% Basismischung CR
- 55 M.-% Zuschläge (Kiessand und Edelsplitt)
- 6,5 M.-% Wasser

Dabei sind die 6,5 M.-% Wasser im Bezug auf die Masse aus Basismischung und Zuschlag zu verstehen. Mit dem Zementanteil von ca. 37 % in der Basismischung errechnet sich der w/z-Wert zu:

$$\frac{w}{z} = \frac{6,5}{0,45 \cdot 0,37} = 0,40 \quad (4.10)$$

#### Herstellung

Für den Mischungsentwurf der RA wurden die 55 M.-% Zuschlagskörnung durch Basismischung ersetzt, dabei wurde der w/z-Wert von 0,40 gehalten. Daraus ergibt sich ein w/b-Wert (Wasser zu Basismischung) von ca. 0,15. Die Frischbetonrohddichte  $\rho_{\text{FB,soll}}$  errechnet sich zu ca. 2270 kg/m<sup>3</sup>. In Tabelle 18 sind diese Ergebnisse für die Mischungszusammensetzung von einem Kubikmeter Beton angegeben. Nachdem die Basismischung in den Mischer gegeben wurde, wurde unter ständigem Mischen das Wasser zugegeben. Beim Mischvorgang ist darauf zu achten, dass die Wasserzugabe nur sehr langsam und mit einer ausreichenden Mischdauer erfolgen soll. Nur so können auch die enthaltenen Zusatzmittel ihre Wirkung entfalten. Erste Versuche mit sehr schnellem Einschütten führten zu einer kompletten Verfestigung im oberen Bereich des Mixers, während das Material am Boden des Mixers gar nicht vermischt wurde.

Tabelle 18: Mischungszusammensetzung RA

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
BM	2800	1976	0,706	w/b = 0,15
→ <i>davon Zement</i>	3100	731	0,236	
→ <i>davon andere Stoffe</i>	2650	1245	0,470	
Wasser $W_{BM}$	1000	294	0,294	
	Summe $\Sigma$	2270	1,000	$\rho_{FB,soll} = 2270$

Erklärungen: kursiv gesetzte Zahlen fließen nicht in die Summenberechnung ein  
 $W_{BM}$ : das für die Basismischung benötigte Anmachwasser

#### 4.3.5.2 Kernmischungen

##### Allgemein

An die Kernmischungen werden die Anforderungen einer leichten und gleichzeitig tragfähigen Wärmedämmschicht gestellt. Ein haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix kann diese Anforderungen am besten erfüllen. Dabei wird ein Haufwerk aus Leichtzuschlag mit einer aufgeschäumten Matrix ausgefüllt. Die porosierte Matrix vergrößert dabei die kraftübertragene Kontaktfläche zwischen den groben Leichtzuschlagkörnern im Vergleich zu den sonst üblicherweise eingesetzten Leichtsand. Bei gleicher Rohdichte kann somit eine höhere Festigkeit erzielt und die Wärmeleitfähigkeit gesenkt werden. Durch den Einsatz unterschiedlicher Leichtzuschläge und Luftporenbildner ergeben sich mehrere Kernmischungen.

##### Kernmischung nach Thienel

Der von Thienel in [20] und [25] beschriebene haufwerksporige Leichtbeton mit porosierter Matrix dient als eine Referenzmischung für die hergestellten Kernmischungen. Es wird dabei Blähglas als Leichtzuschlag und Stabilisierer als Porosierungsmittel eingesetzt.

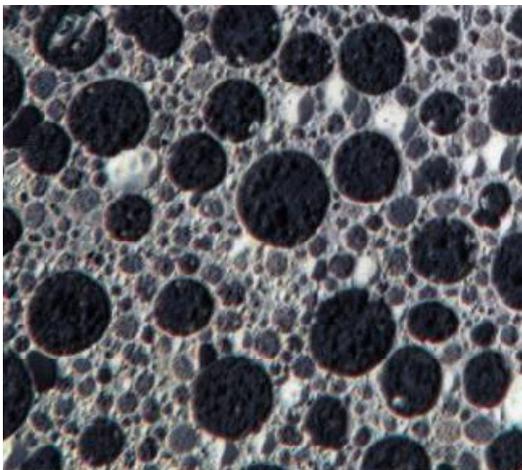


Abbildung 33: Kernmischung nach Thienel (Größtkorn 4 mm) [25]

Tabelle 19 zeigt die Mischungszusammensetzung und die angegebene Trockenrohddichte.

Tabelle 19: Zusammensetzung der Kernmischung nach Thienel

Liaver 2/4	1050 l/m <sup>3</sup>
CEM I 42,5 R	120 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	140 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittel	1 kg/m <sup>3</sup>
Trockenrohddichte	0,3 kg/m <sup>3</sup>

Um die porosierte Matrix zu erzeugen, nennt Thienel drei derzeit genutzte Zusatzmittel: synthetische Schäume, flüssige Luftporenbildner und Stabilisierer, die im Nebeneffekt Luftporen eintragen. Für diese Mischung wird das speziell für haufwerksporigen Leichtbeton entwickelte Stabilisierer-Zusatzmittel verwendet. Das pulverförmige Produkt auf Proteinbasis wird zusammen mit dem Zement in die Mischung gegeben und erzielt eine stabile Porenradienverteilung. Dieses Zusatzmittel stand für die durchgeführten Versuche allerdings nicht zur Verfügung. Auch die Mengenangabe des Liavers in l/m<sup>3</sup> ist sehr ungenau. Für 1 m<sup>3</sup>, also 1000 Liter Beton, werden 1050 Liter Liaver angegeben. Berechnet man das Gewicht des Liavers über die Schüttdichte, kann zusammen mit dem Zementgewicht die angegebene Trockenrohddichte von 0,3 kg/m<sup>3</sup> nicht eingehalten werden. Eine einfache Reproduktion dieser Mischung ist deshalb nicht möglich. Experimentell werden daraufhin einige Versuche durchgeführt, um verarbeitbare und sich verfestigende Mischungen mit ähnlichen Rohddichte-Werten zu erzeugen.

#### Entwicklung der Kernmischungen

Als vergleichbare Größe wurde der Zementgehalt von 120 kg/m<sup>3</sup> bei allen Kernmischungen eingehalten. Allerdings wurde ein CEM I 52,5 R verwendet, da die Basismischung von Sika ebenfalls mit diesem Zement angemischt ist und so dem Gedanken einer Gradientenbildung von Mischungen mit gleichen Materialien besser Rechnung getragen wird. Mit einem w/z-Wert von 0,40, wie er in der äußeren Referenzmischung eingestellt wird, konnte bei den Kernmischungen die für die Verarbeitbarkeit benötigte Konsistenz nicht erreicht werden. Die Wassermenge wurde deshalb nach den ersten Versuchen deutlich um 25 % erhöht, so dass sich ein w/z-Wert von 0,50 ergab. Dieser erhöhte Wasseranteil senkt nach [12] die Endfestigkeit eines Betons. Jedoch wird diese Einschränkung im Zuge einer erst möglichen Verarbeitbarkeit hingenommen. Ein positiver Nebeneffekt des erhöhten Wassergehaltes sind die nach Aushärtung und Austrocknung entstehenden Kapillarporen, welche für eine zusätzliche Reduzierung der Rohddichte sorgen. Für Wasser und Zement gelten die in den Tabellen angegebenen Kurzzeichen W und Z.

Bei den ersten Versuchen zur Schüttdichte und der maximalen Packungsdichte des Blähglases in den Kernmischungen ergaben sich Werte von 180 kg Blähglas + 120 kg Zement pro m<sup>3</sup> Beton, die in allen Kernmischungen konstant blieben. Das in den Versuchen verwendete Blähglas

Liaver erhält das Kurzzeichen L. In späteren Versuchen wurde das Liaver dann durch die noch leichteren Zuschläge Aerogel (A) und Perlit (P) ersetzt. Der Austausch erfolgte volumenbezogen, so dass die anderen Parameter beim Mischungsentwurf möglichst nicht verändert werden mussten.

Um die Zementmatrix zu porosieren, wurden vier verschiedene Möglichkeiten getestet: Zugabe von fertigem Schaum (Kurzzeichen S) in der letzten Phase des Mischvorgangs, Zumischung von ‚fertigen Luftporen‘ durch Mikrohohlkugeln (M), Zumischung von wassergesättigten superabsorbierenden Polymeren (SAP), wodurch ein Porenvolumen erst nach Austrocknung entsteht, und Aluminiumpaste als Aufschäumungsmittel. Nach den Vorversuchen in 4.3.4 wurde die vierte Möglichkeit mit Aluminium jedoch verworfen. Die Bezeichnung der Kern- und auch der Gradientenmischungen folgt dabei folgender Systematik: Der Erste Buchstabe K steht für ‚Kernmischung‘. Die beiden folgenden Zeichen geben den verwendeten Zuschlag und das Porosierungsmittel an. Mischung KLS besteht also aus einem Liaver-Haufwerk und aus einer mit Schaum porosierten Zementmatrix. Die Bestandteile Zement und Wasser blieben bei allen Kernmischungen gleich, sodass ihre Auflistung in der Bezeichnung nicht notwendig ist.

## KLS

Die Reproduktion der Referenz-Mischung nach Thienel [25] gelang mit der im Folgenden beschriebenen Mischung KLS.

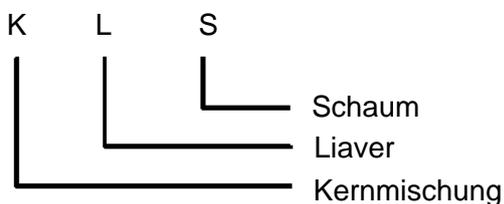


Abbildung 34: Bezeichnung Kernmischung KLS

Für die Kernmischung KLS sind in folgender Tabelle die Mischungszusammensetzung und der Mischvorgang angegeben. Während Zement, Wasser und Liaver für die Zumischung abgewogen werden, wird die Schaummenge über das Volumen bestimmt. Der Proteinschaum wurde vor Mischbeginn in einem separaten Behältnis aufgeschäumt und dem fertig angemischtem Zementleim unmittelbar beigemischt. Erst zum Schluss wurde der Leichtzuschlag dazugegeben. Änderte man die Reihenfolge des Mischvorgangs und gab z.B. das Liaver vor dem Schaum in den Zementleim, wurde dieser bei der späteren Schaumzugabe nicht mehr richtig porosiert und es entstand kein homogenes Gefüge des Frischbetons.

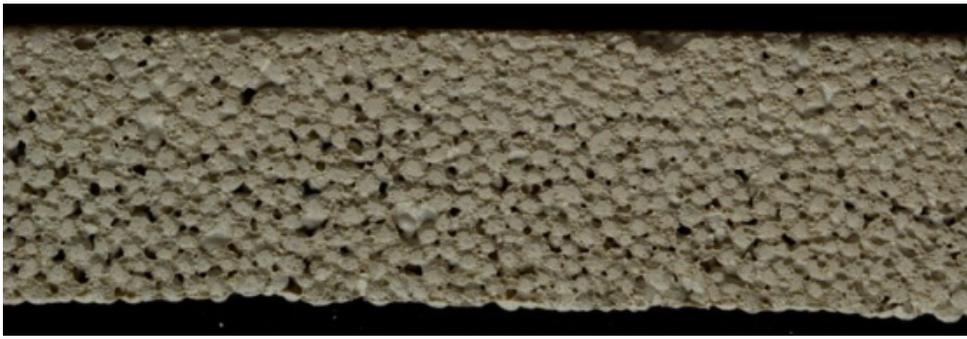


Abbildung 35: Kernmischung mit Liaver und Schaum (Prisma 4 x 4 x 16 cm)

Neben der errechneten Soll-Frischbetondichte ist auch das Porenvolumen  $P_{V_{ZUS}}$  in der Tabelle berechnet, welches aus dem Volumen des Leichtzuschlages und dem Volumen der in den Zement eingebrachten Poren besteht. Die Feststoffanteile des Leichtzuschlags werden bei dieser Berechnung vernachlässigt. Mit diesem zusätzlich eingebrachten Porenvolumen lässt sich später die Gradientenbildung erklären.

Tabelle 20: Mischungszusammensetzung KLS

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
Zement Z	3100	120	0,039	w/z = 0,5
Wasser W <sub>Z</sub>	1000	60	0,06	
Liaver L	300	180	0,600	P <sub>V<sub>ZUS</sub></sub> 90,1 %
Proteinschaum S	149	45	0,301	
Summe $\Sigma$		405	1,000	$\rho_{FB,soll} = 405$

Tabelle 21: Mischvorgang KLS

Material	Vorgang	Dauer	Ort
S	aufschäumen	120 s	Sc
Z + W <sub>Z</sub>	mischen	60 s	Mi
S	zugeben, mischen	60 s	Mi
L	langsam beimischen	120 s	Mi

Erklärungen:            Sc:    Extra Schüssel  
                               Mi:    Mischer  
                               WZ:   für den Zement benötigtes Anmachwasser

## KLSAP

Ein Austausch des Proteinschaums durch SAP als Porosierungsmittel ergibt die Kernmischung KLSAP.

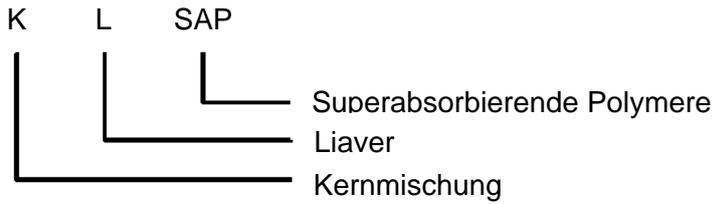


Abbildung 36: Bezeichnung Kernmischung KLSAP

Für diese Mischung wurde das trockene SAP-Pulver mit dem Zement vorgemischt und anschließend das Wasser für den Zement ( $W_Z$ ) zusammen mit dem Wasser für die SAP ( $W_{SAP}$ ) zugegeben. Es wird davon ausgegangen, dass die SAP das für sie gedachte Wasser aufsaugen und somit der effektive w/z-Wert ( $w/z_{eff}$ ) von 0,5 eingehalten wird.  $w/z_{eff}$  berechnet sich bei Vernachlässigung des in den SAP gespeicherten Wassers. Im weiteren Verlauf der Austrocknung steht das in den SAP gespeicherte Wasser entweder für die Hydratation des Zements zur Verfügung oder verdunstet und hinterlässt damit die erwünschten Poren.



Abbildung 37: Kernmischung mit Liaver und SAP (Prisma 4 x 4 x 16 cm)

Tabelle 22: Mischungszusammensetzung KLSAP

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
Zement Z	3100	120	0,039	w/z = 0,5
Wasser $W_Z$	1000	60	0,060	
Liaver	300	180	0,600	$P_{V_{zus}}$ 90,1 %
SAP	1400	13	0,009	
Wasser $W_{SAP}$	1000	292	0,292	
Summe $\Sigma$		665	1,000	$\rho_{FB,soll} = 665$

Erklärungen:  $W_{SAP}$ : von den SAP aufgenommenes Wasser

Tabelle 23: Mischvorgang SAP

Material	Vorgang	Dauer	Ort
Z + SAP	trocken vormischen	30 s	Mi
$W_{SAP} + W_Z$	zugeben, mischen	90 s	Mi
L	langsam beimischen	120 s	Mi

## KLM

Wurde das komplette Volumen des Schaums durch Mikrohohlkugeln (M) ersetzt, wurde die Mischung sehr trocken und ließ sich nicht mehr verarbeiten. Die geringe Zementleimmenge reichte nicht aus, um die große Oberfläche der Hohlkugeln zu benetzen, obwohl diese schon werkseitig mit Wasser zu einer Paste vorgemischt waren.

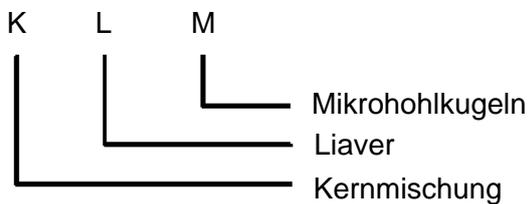


Abbildung 38: Bezeichnung Kernmischung KLM

Nach einigen Versuchen mit Fließmittelzugabe, die jedoch keine nennenswerten Verbesserungen der Konsistenz und der Verarbeitbarkeit lieferten, wurde der Volumenanteil der Mikrohohlkugeln verringert und durch zusätzliches Wasser ( $W_M$ ) ersetzt. Mit diesem Wasser wurden die Mikrohohlkugeln vor der Zumischung in den Zementleim zu einer sahnartigen Paste angemischt. Dies erfolgte in einer Metallschüssel durch Umrühren mit einem Löffel, bis das Wasser komplett eingerührt war. Da dieses zusätzliche Wasser bei der Austrocknung verdunstet, kann es dem späteren Porenvolumen zugerechnet werden.

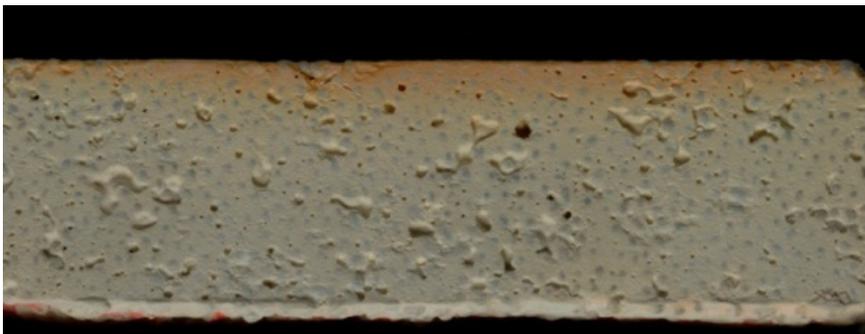


Abbildung 39: Kernmischung mit Liaver und Mikrohohlkugeln (Prisma 4 x 4 x 16 cm)

Tabelle 24: Mischungszusammensetzung und Mischvorgang KLM

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
Zement Z	3100	120	0,039	w/z = 0,5
Wasser W <sub>Z</sub>	1000	60	0,060	
Liaver L	300	180	0,600	P <sub>V,zus</sub> 90,1 %
Mikrohohlkugeln M	200	48	0,600	
Wasser W <sub>M</sub>	1000	60	0,060	
Summe $\Sigma$		468	1,000	$\rho_{FB,soll} = 468$

Zeichenerklärungen: W<sub>M</sub>: mit Mikrohohlkugeln angemischtes Wasser

Tabelle 25: Mischvorgang KLM

Material	Vorgang	Dauer	Ort
M + W <sub>M</sub>	zu Paste mischen		Sc
Z + W <sub>Z</sub>	mischen	60 s	Mi
M + W <sub>M</sub>	zugeben, mischen	60 s	Mi
L	langsam beimischen	120 s	Mi

## KAM

Eine weitere Variation der Kernmischung entsteht durch Austausch des Leichtzuschlages.

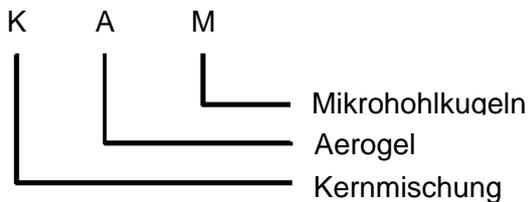


Abbildung 40: Bezeichnung Kernmischung KAM

In einem ersten Versuch wurde dazu die Kernmischung KLM verwendet, die in der oben beschriebenen Zusammensetzung die besten Verarbeitungs- und Festigkeitseigenschaften zeigt. Anstatt Blähglas wurde in dieser Mischung Aerogel (A) als Leichtzuschlag verwendet. Der Austausch erfolgte volumenbezogen. Das für die Mikrohohlkugeln zusätzliche Wasser wurde auch in dieser Mischung für eine bessere Verarbeitung benötigt.

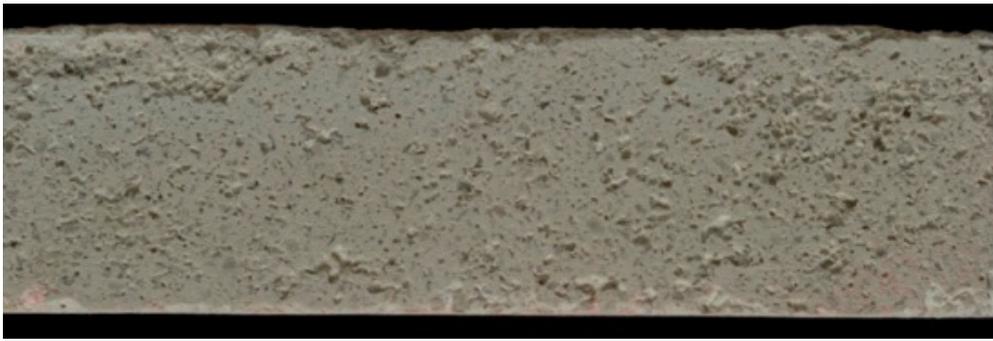


Abbildung 41: Kernmischung mit Aerogel und Mikrohohlkugeln (Prisma 4 x 4 x 16 cm)

Folgende Tabellen zeigen die Zusammensetzung und den Mischvorgang der Kernmischung KAM.

Tabelle 26: Mischungszusammensetzung KAM

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
Zement Z	3100	120	0,039	w/z = 0,5
Wasser W <sub>Z</sub>	1000	60	0,060	
Aerogel A	140	84	0,600	P <sub>V,zus</sub> 90,1 %
Mikrohohlkugeln M	200	48	0,241	
Wasser W <sub>M</sub>	1000	60	0,060	
Summe $\Sigma$		372	1,000	$\rho_{FB,soll} = 372$

Tabelle 27: Mischvorgang KAM

Material	Vorgang	Dauer	Ort
M + W <sub>M</sub>	zu Paste mischen		Sc
Z + W <sub>Z</sub>	mischen	60 s	Mi
M + W <sub>M</sub>	zugeben, mischen	60 s	Mi
A	langsam beimischen	180 s	Mi

#### 4.3.5.3 Gradient 1

Von der ‚Referenzmischung Außen‘ ausgehend sieht der erste Gradient den schrittweisen Austausch von Basismischung durch Leichtzuschlag vor. Das Maximum an Gewichtseinsparung bei diesem Gradienten ist erreicht, wenn die Leichtzuschläge ein dichtes Haufwerk bilden und die restliche Zementleimenge die Matrix dazwischen ausfüllt. Würde man mit dem Austausch über diese Grenze fortfahren, entstünde ein haufwerksporiger Leichtbeton, der im Zuge der Vergleichbarkeit nicht beabsichtigt ist. Es wird davon ausgegangen, dass in den Kernmischungen ein optimales, sich selbst abstützendes Korngerüst erreicht wird. Deshalb stellt das in den Kernmischungen verwendete Leichtzuschlagsvolumen die Grenze dieses Gradienten dar. Es ergibt sich also ein Verhältnis von Leichtzuschlag zu aus Basismischung bestehender Matrixfüll-

lung von 70:30. Der Gradient bekommt deshalb die Bezeichnung G0,30. Um den Verlauf der Eigenschaften zwischen G0,30 und RA zu approximieren, werden zwei weitere Gradientenschritte eingefügt: G0,53 mit einem Verhältnis von 53 % Matrixfüllung und 47 % Leichtzuschlag sowie G0,77 mit 77 % Matrixfüllung und 23 % Leichtzuschlag.

Die Bezeichnung der Gradientenmischungen folgt der gleichen Systematik der Kernmischungen. G steht für Gradient, und die folgende Zahl gibt in Prozent das Volumen der enthaltenen Basismischung an. Die beiden folgenden Zeichen geben den verwendeten Zuschlag und das Porosierungsmittel an. Ab Gradient 0,30 entfällt das letzte Zeichen, da kein Porosierungsmittel mehr in den Mischungen enthalten ist.

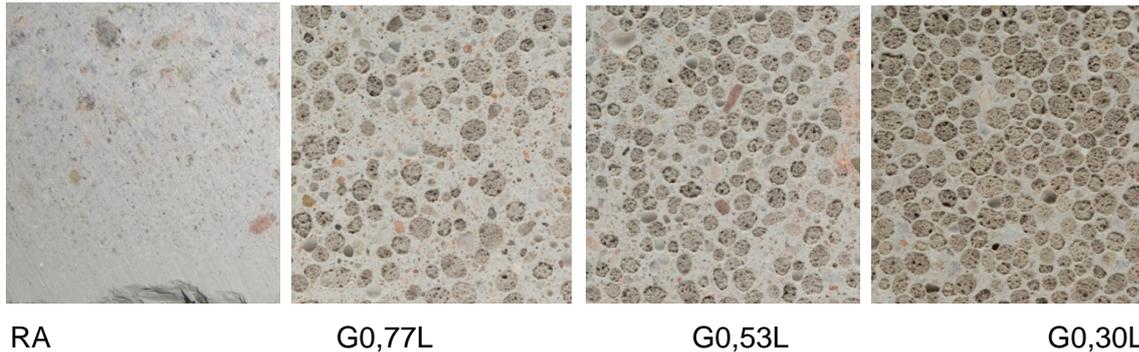


Abbildung 42: Bilderreihe zu Gradient 1 (Größtkorn 4 mm)

Die folgenden Tabellen geben zu jedem Gradientenschritt eine Beispielzusammensetzung und den dazugehörigen Mischvorgang an.

Tabelle 28: Mischungszusammensetzung G0,77A

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
BM	2800	1518	0,542	w/b = 0,5
→ davon Zement	3100	562	0,181	
→ davon andere Stoffe	140	84	0,600	
Wasser W <sub>BM</sub>	1000	226	0,226	w/z = 0,5
Zement Z	3100	48	0,241	
Wasser W <sub>Z</sub>	1000	60	0,060	P <sub>V<sub>ZUS</sub></sub> 90,1 %
Aerogel A	140	28	0,199	
	Summe $\Sigma$	1832	1,000	$\rho_{FB,soll} = 1832$
Zusatzmittel BE	900	3,01	0,003	ZM/z = 0,005

Erklärungen: BE: Beschleuniger

Tabelle 29: Mischvorgang G0,77A

Material	Vorgang	Dauer	Ort
BM + Z	trocken vormischen	30 s	Mi
W <sub>BM</sub> + W <sub>Z</sub>	langsam beimischen	60 s	Mi
A	langsam beimischen	120 s	Mi
BE	kurz untermischen	30 s	Mi

Tabelle 30: Mischungszusammensetzung G0,53L

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
BM	2800	1518	0,542	w/b = 0,15
→ davon Zement	3100	562	0,181	
→ davon andere Stoffe	2650	665	0,251	
Wasser W <sub>BM</sub>	1000	157	0,157	w/z = 0,5
Zement Z	3100	80	0,026	
Wasser W <sub>Z</sub>	1000	40	0,040	
Liaver L	300	120	0,400	PV <sub>zus</sub> 40 %
	Summe $\Sigma$	1453	1,000	$\rho_{FB,soll} = 1453$
Zusatzmittel BE	900	4,71	0,005	ZM/z = 0,01

Tabelle 31: Mischvorgang G0,53L

Material	Vorgang	Dauer	Ort
BM + Z	trocken vormischen	30 s	Mi
W <sub>BM</sub> + W <sub>Z</sub>	langsam beimischen	60 s	Mi
L	langsam beimischen	120 s	Mi
BE	kurz untermischen	30 s	Mi

Tabelle 32: Mischungszusammensetzung und Mischvorgang G0,30L

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
BM	2800	1518	0,542	w/b = 0,15
→ davon Zement	3100	220	0,071	
→ davon andere Stoffe	2650	375	0,142	
Wasser W <sub>BM</sub>	1000	89	0,089	w/z = 0,5
Zement Z	3100	120	0,039	
Wasser W <sub>Z</sub>	1000	60	0,060	
Liaver L	300	180	0,060	PV <sub>zus</sub> 60 %
	Summe $\Sigma$	1044	1,000	$\rho_{FB,soll} = 1044$
Zusatzmittel BE	900	3,4	0,004	ZM/z = 0,01

Tabelle 33: Mischvorgang G0,30L

Material	Vorgang	Dauer	Ort
BM + Z	trocken vormischen	30 s	Mi
W <sub>BM</sub> + W <sub>Z</sub>	langsam beimischen	60 s	Mi
L	langsam beimischen	120 s	Mi
BE	kurz untermischen	30 s	Mi

#### 4.3.5.4 Gradient 2

Der zweite Gradientenverlauf zwischen G0,30 und Kernmischungen entsteht durch schrittweise Erhöhung der Matrixporosität. Auch hier werden zwei Gradientenschritte eingefügt. Man erhält also G0,2 mit 20 % Matrixvolumen, 10 % Matrixporenvolumen und 70 % Leichtzuschlag sowie G0,1 mit einem Verhältnis von 10 % Matrixvolumen, 20 % Matrixporenvolumen und 70 % Leichtzuschlag. Abbildung 43 zeigt zu dieser Variation eine Grafik mit den Volumenanteilen.

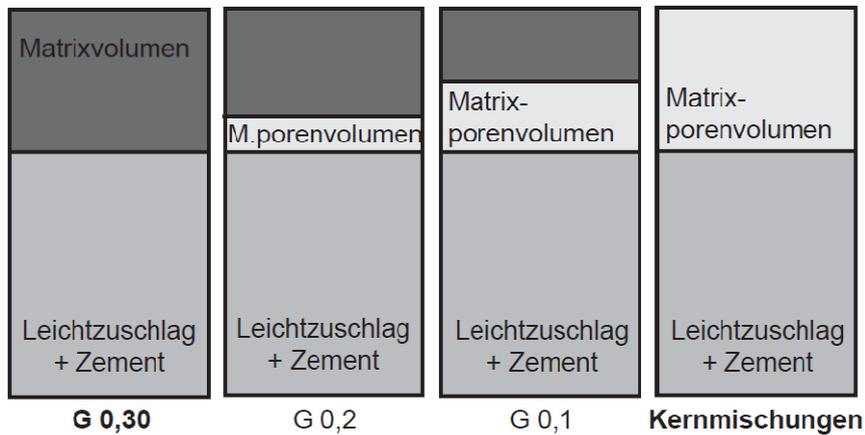


Abbildung 43: Erläuterung zu Gradient 2

Die folgenden Tabellen geben zu jedem Gradientenschritt eine Beispielzusammensetzung und den dazugehörigen Mischvorgang an. Der Austausch des Leichtzuschlages oder der Porosierungsmittel erfolgt immer volumenbezogen.

Tabelle 34: Mischungszusammensetzung G0,1LM

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
BM	2800	198	0,071	w/b = 0,15
→ davon Zement	3100	73	0,024	
→ davon andere Stoffe	2650	124	0,047	
Wasser W <sub>BM</sub>	1000	29	0,029	w/z = 0,5
Zement Z	3100	120	0,039	
Wasser W <sub>Z</sub>	1000	60	0,060	PV <sub>zus</sub> 80,1 %
Liaver L	300	180	0,600	
Mikrohohlkugeln M	200	36	0,181	
Wasser W <sub>M</sub>	1000	20	0,020	$\rho_{FB,soll} = 643$
	Summe $\Sigma$	643	1,000	

Tabelle 35: Mischvorgang G0,1LM

Material	Vorgang	Dauer	Ort
M + W <sub>M</sub>	zu Paste mischen		Sc
BM + Z	trocken vormischen	30 s	Mi
W <sub>BM</sub> + W <sub>Z</sub>	langsam beimischen	60 s	Mi
M + W <sub>M</sub>	zugeben, mischen	60 s	Mi
L	langsam beimischen	120 s	Mi

Tabelle 36: Mischungszusammensetzung G0,2LSAP

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	Kennwerte
BM	2800	395	0,141	w/b = 0,15
→ davon Zement	3100	146	0,047	
→ davon andere Stoffe	2650	249	0,094	
Wasser W <sub>BM</sub>	1000	59	0,059	w/z = 0,5
Zement Z	3100	120	0,039	
Wasser W <sub>Z</sub>	1000	60	0,060	PV <sub>zus</sub> 70,1 %
Liaver L	300	180	0,600	
SAP	1400	8	0,006	
Wasser W <sub>M</sub>	1000	96	0,096	$\rho_{FB,soll} = 918$
	Summe $\Sigma$	918	1,000	

Tabelle 37: Mischvorgang G0,2LSAP

Material	Vorgang	Dauer	Ort
BM + Z + SAP	trocken vormischen	30 s	Mi
W <sub>BM</sub> + W <sub>Z</sub> + W <sub>SAP</sub>	langsam beimischen	60 s	Mi
L	langsam beimischen	120 s	Mi

### 4.3.6 Versuchsergebnisse der Gradientenbetonmischungen

Um die Ergebnisse miteinander vergleichbar zu machen, wurden die Prüfkörper so weit als möglich derselben Nachbehandlung unterzogen und unter gleichen Bedingungen gelagert. Nachbehandlung und Lagerung verhindern eine frühzeitige Unterbrechung der Hydratation und damit eine Reduktion der Festigkeit. Die Schalungen mit frischem Beton wurden in einem Feuchtraum mit 20 °C und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit bis zum Ausschalen gelagert. Das Ausschalen erfolgt üblicherweise nach 24 Stunden, sofern die Mischung schon genügend Festigkeit entwickelt hat. Bei einigen Mischungen mit hohem zusätzlichem Wassergehalt (SAP- und Schaummischungen) konnte erst nach bis zu sieben Tagen ausgeschalt werden. Waren die Prüfkörper ausgeschalt und beschriftet, wurden sie unter Wasser (20 °C) bis zum Prüfungstag gelagert. Sehr leichte Mischungen mit Rohdichten kleiner 1 kg/dm<sup>3</sup> sind leichter als Wasser und mussten deshalb für die Lagerung unter Wasser beschwert werden. Die Kernmischung KLSAP enthält durch den hohen SAP-Anteil einen sehr hohen zusätzlichen Wasseranteil. Die Verfestigung vollzieht sich nur sehr langsam und nur, wenn die Probekörper austrocknen können. Diese Mischung verblieb nach dem Ausschalen deshalb im Feuchtraum und wurde nicht unter Wasser gelagert.

#### 4.3.6.1 Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen

Je flüssiger eine Betonmischung ist, desto leichter lässt sie sich verarbeiten und in die Schalung bringen. Gleichzeitig neigen leichte Mischungen allerdings auch schneller zur Entmischung oder zum Bluten, also dem Absondern von Wasser an der Oberfläche. Die Mischungen können jedoch nicht nach der Konsistenz eingestellt werden, da sonst die Vergleichbarkeit und die Gradientenbildung über das Volumen der einzelnen Bestandteile nicht mehr funktioniert. Je nach Eigenschaften der Leichtzuschläge, vor allem aber in Abhängigkeit des Porosierungsmittel, ergeben sich Mischungen von fließfähigen bis hin zu sehr steifen Konsistenzen. Dadurch unterscheiden sich auch die Art der Verdichtung und die Verarbeitbarkeit der einzelnen Mischungen. Für jede Zusammensetzung ist ein individueller Verarbeitungsweg zu finden.

#### Luftgehalt

Abbildung 44 zeigt den Luftgehalt von vier Mischungen über die Frischbetonrohddichte. Die Ergebnisse wurden mittels Druckausgleichs-Verfahren nach DIN EN 1015-7 ermittelt. Abgebildet sind die Messergebnisse für die Referenzmischung Außen und den ersten Gradienten mit Liaver als Leichtzuschlag. Bei den Mischungen des zweiten Gradienten und der Kernmischungen ist ein Luftgehalt von mehr als 20 % zu erwarten, weshalb das Druck-Verfahren nicht mehr angewendet werden kann.

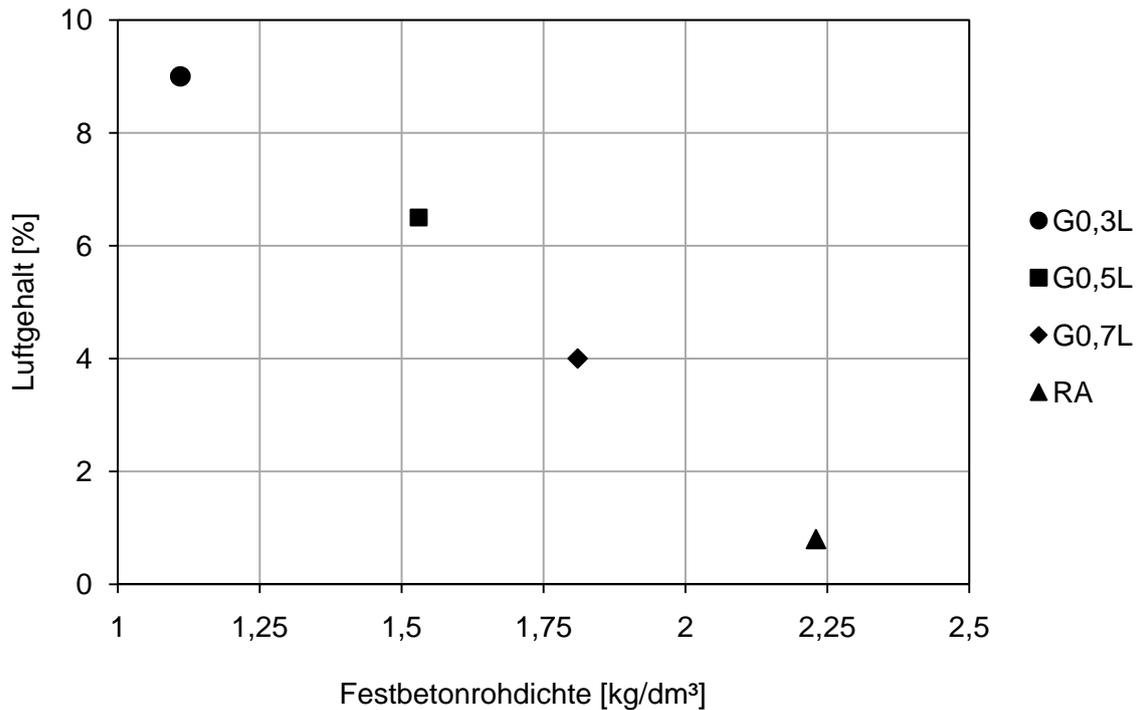


Abbildung 44: Luftgehalt von Gradient 1 mit Liaver in Abhängigkeit der Rohddichte

#### Frischbetonrohddichte und Festbetonrohddichte

Vergleicht man die berechnete Soll-Frischbetonrohddichte  $\rho_{\text{FB,soll}}$  mit der tatsächlichen Ist-Frischbetonrohddichte  $\rho_{\text{FB,ist}}$ , ist zu erkennen, ob der Frischbeton vollständig verdichtet wurde oder ob eventuell Leichtzuschläge zerstört wurden. Die tatsächliche Ist-Frischbetonrohddichte wird dabei im Luftporentopf gemessen. Das Volumen ist dabei möglichst genau zu bestimmen. Für die Ergebnisse nach Tabelle 38 werden alle Prismen einer Mischung nach dem Ausschalen gewogen und deren Höhe bestimmt. Mit den daraus gebildeten Mittelwerten von Masse und Volumen berechnet sich die tatsächliche Ist-Festbetonrohddichte im Anlieferungszustand. In Tabelle 38 ist der Vergleich von  $\rho_{\text{FB,soll}}$  und  $\rho_{\text{FB,ist}}$  zusammen mit der Abweichung in Prozent dargestellt. Bei der Berechnung von  $\rho_{\text{FB,soll}}$  wurde das Porenvolumen  $P$  nicht berücksichtigt.

Tabelle 38: Vergleich der Soll- und Ist-Frischbetonrohddichten

Mischungs- bezeichnung:	$\rho_{\text{FB,ist}}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{FB,soll}}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	Abweichung [%]
KLM	0,485	0,468	3,47
G0,1LM	0,695	0,643	7,52
G0,2LM	0,963	0,838	12,97
KLS	0,343	0,405	-17,95
G0,1LS	0,567	0,617	-8,91
G0,2LS	0,736	0,829	-12,61
KLSAP	0,552	0,665	-20,50
G0,1LSAP	0,749	0,792	-5,77
G0,2LSAP	0,930	0,918	1,26
KAM	0,323	0,372	-15,21
G0,1AM	0,485	0,563	-16,08
G0,2AM	0,666	0,755	-13,28
G0,30L	1,109	1,044	5,87
G0,53L	1,687	1,453	13,85
G0,77L	2,071	1,864	10,01
G0,30A	0,827	0,948	-14,61
G0,53A	1,258	1,389	-10,40
G0,77A	1,813	1,832	-1,05
RA	2,231	2,270	-1,76

### Konsistenz und Verarbeitbarkeit

„Die Konsistenz eines Frischbetons ist nach den Gegebenheiten beim Einbau des Frischbetons so zu wählen, dass der Beton vollständig verdichtet werden kann“ [12]. Bei den Versuchen ergibt sich die Konsistenz aus dem Mischungsentwurf und kann daher nicht verändert werden. Alle hergestellten Mischungen werden augenscheinlich auf die Konsistenz und die Verarbeitbarkeit überprüft. Die Art der Verdichtung des Frischbetons lässt dabei auf die nach DIN 1045-2 genannten Konsistenzklassen F1 bis F6 schließen. Die Zuordnung ist in Tabelle 39 dargestellt.

Tabelle 39: Verarbeitbarkeit und Konsistenzklassen der Mischungen

Konsistenzklasse	Konsistenzbereich	Verdichtungsart	KLM	G0,1LM	G0,2LM	KLS	G0,1LS	G0,2LS	KLSAP	G0,1LSAP	G0,2LSAP	KAM	G0,1AM	G0,2AM	G0,3L	G0,5L	G0,7L	G0,3A	G0,5A	G0,7A	RA
F1-F2	steifplastisch	Stampfen		X	X							X	X	X				X			
F3-F5	weichfließfähig	Vibrations	X			X	X	X	X	X	X				X	X	X		X	X	
F6	sehr fließfähig	selbstverdichtend																			X

#### 4.3.6.2 Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

In diesem Abschnitt werden die Festbetoneigenschaften wie Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Elastizitätsmodul und Wärmeleitfähigkeit der Mischungen in Bezug zu ihrer Trockenrohddichte gezeigt. Zusätzlich sind die Festigkeitsentwicklungen bis zum 28. Tag einiger Mischungen über die Zeit angegeben. Zusammenfassend sind in Tabelle 41 alle Eigenschaften, sortiert nach aufsteigender Trockenrohddichte, dargestellt.

#### Druckfestigkeit

Abbildung 45 zeigt die Druckfestigkeiten  $f_c$  nach 28 Tagen. DIN EN 196-1 schreibt für die Prüfung eine Laststeigerung von 2400 N/s vor. Dieser hohe Wert kann bei den Zusammensetzungen mit geringer Festigkeit nicht verwendet werden, da der Bruchzeitpunkt sonst nicht erkannt wird. Bei den Mischungen KLS, KLM, KLSAP, KAM, G0,1AM, G0,2AM und G0,3A wird deshalb die Laststeigerung auf 100 N/s gesenkt.

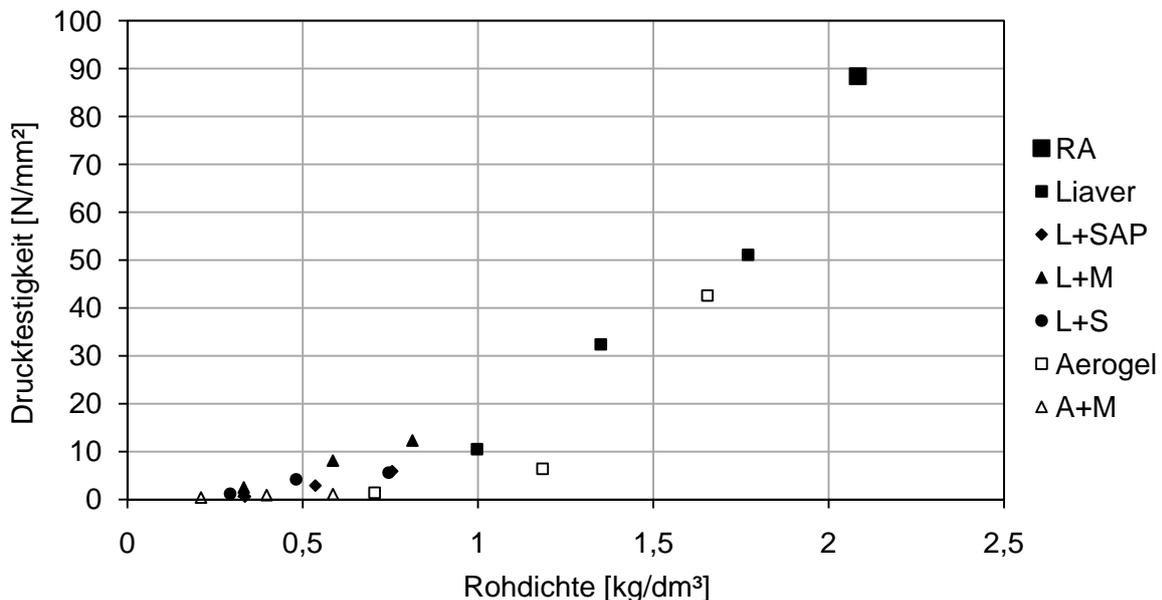


Abbildung 45: 28-d Druckfestigkeit aller Mischungen

Um den interessanten Bereich der leichten Mischungen von Gradient 2 etwas deutlicher zu zeigen, wird dieser in Abbildung 46 vergrößert dargestellt. Gleichzeitig ist eine Vergleichskurve von im Autoklaven gehärtetem Porenbeton von Ytong [44] eingezeichnet (obere Kurve). Hier waren nur 3 Messwerte vorhanden, die erwartungsgemäß extrapoliert wurden. Ebenso ist ein nach [23] gezeigter Vergleichsbereich von Schaumbeton dargestellt (Bereich zwischen den zwei unteren Linien). Bis auf wenige Ausnahmen liegen die Versuchsergebnisse im Bereich zwischen diesen beiden Produkten. Mischungen mit Liaver und Mikrohohlkugeln übertreffen sogar die Vergleichskurve von Porenbeton.

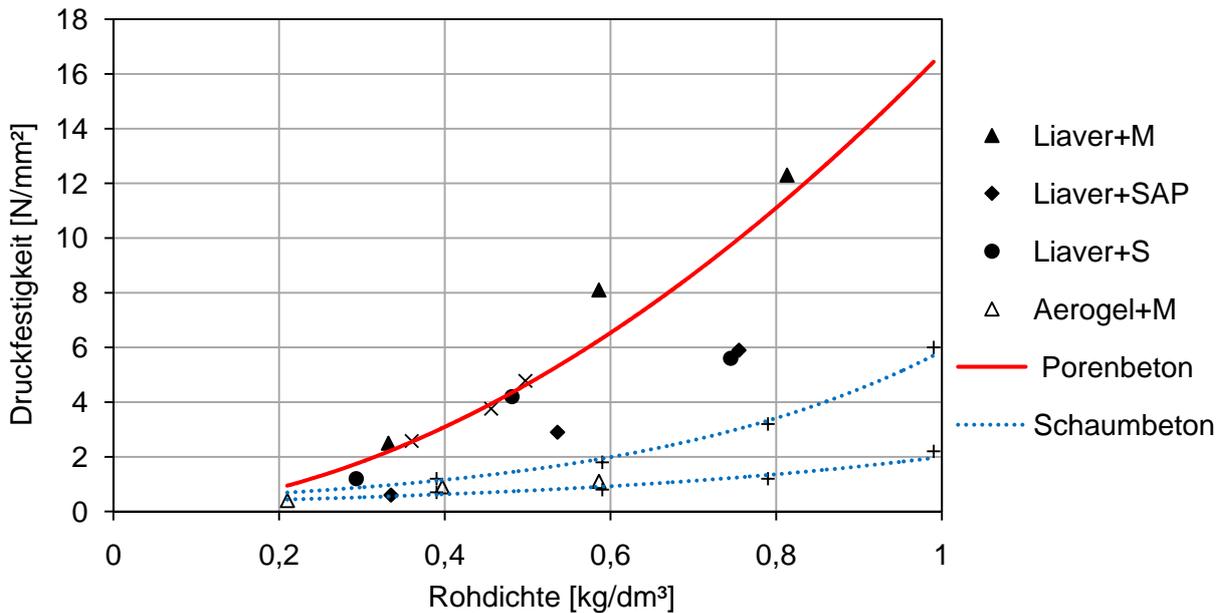


Abbildung 46: Druckfestigkeiten mit Vergleich zu Porenbeton und Schaumbeton

Abbildung 47 zeigt die Festigkeitsentwicklung der vier Mischungen des ersten Gradienten mit Liaver als Leichtzuschlag über einen Zeitraum von 28 Tagen. Für die Ergebnisse werden jeweils 3 Prismen bis zum Prüfungstag nach Norm gelagert und erst kurz vor der Prüfung aus dem Wasser genommen. Das Schaubild zeigt, abgesehen von Mischung G0,7L, eine Festigkeitszunahme der Mischungen, die nach 28 Tagen eine geringere Festigkeit als nach Tag 14 aufweist.

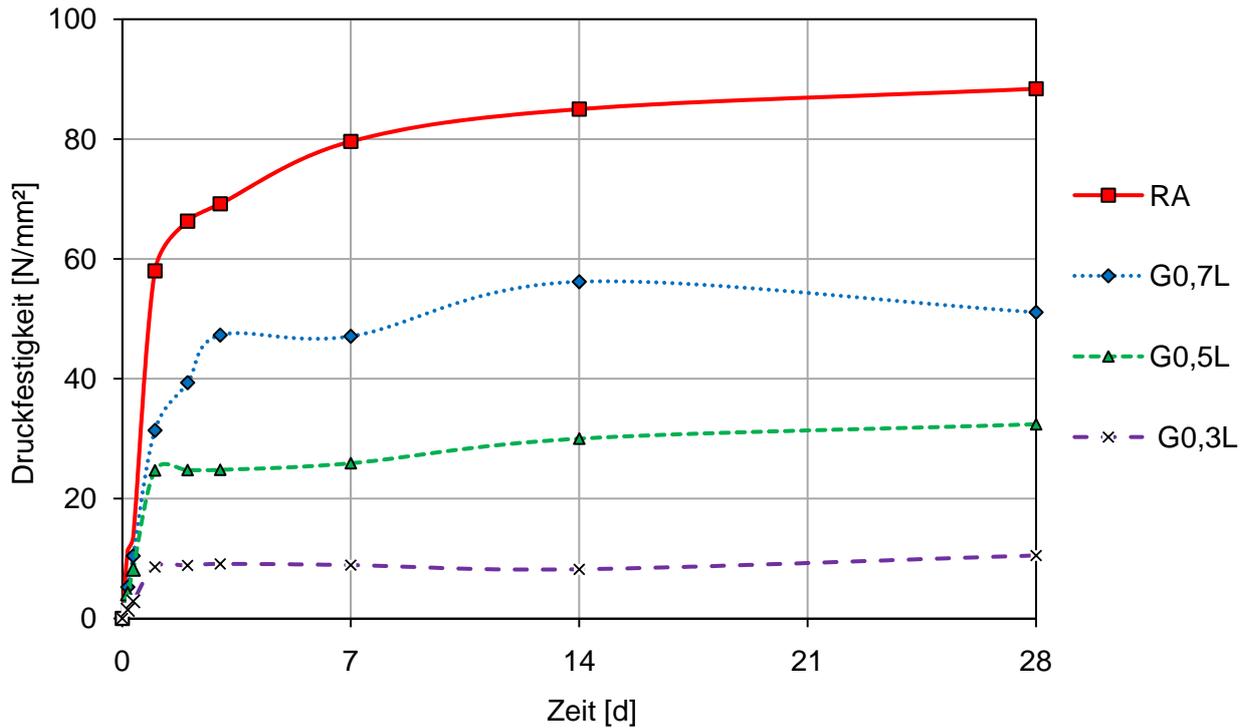


Abbildung 47: Festigkeitsentwicklung von vier Mischungen

### Biegezugfestigkeit

Die beiden folgenden Diagramme geben die Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen Wasserlagerung der Mischungen an. Während in Abbildung 48 alle Mischungen gezeigt werden, stellt Abbildung 49 wieder eine Vergrößerung der leichten Kern- und Gradientenmischungen dar. Der Vergleich mit Porenbeton oder Schaumbeton kann für die Biegezugfestigkeit nicht gezeigt werden, da der Hersteller hierfür keine Angaben macht.

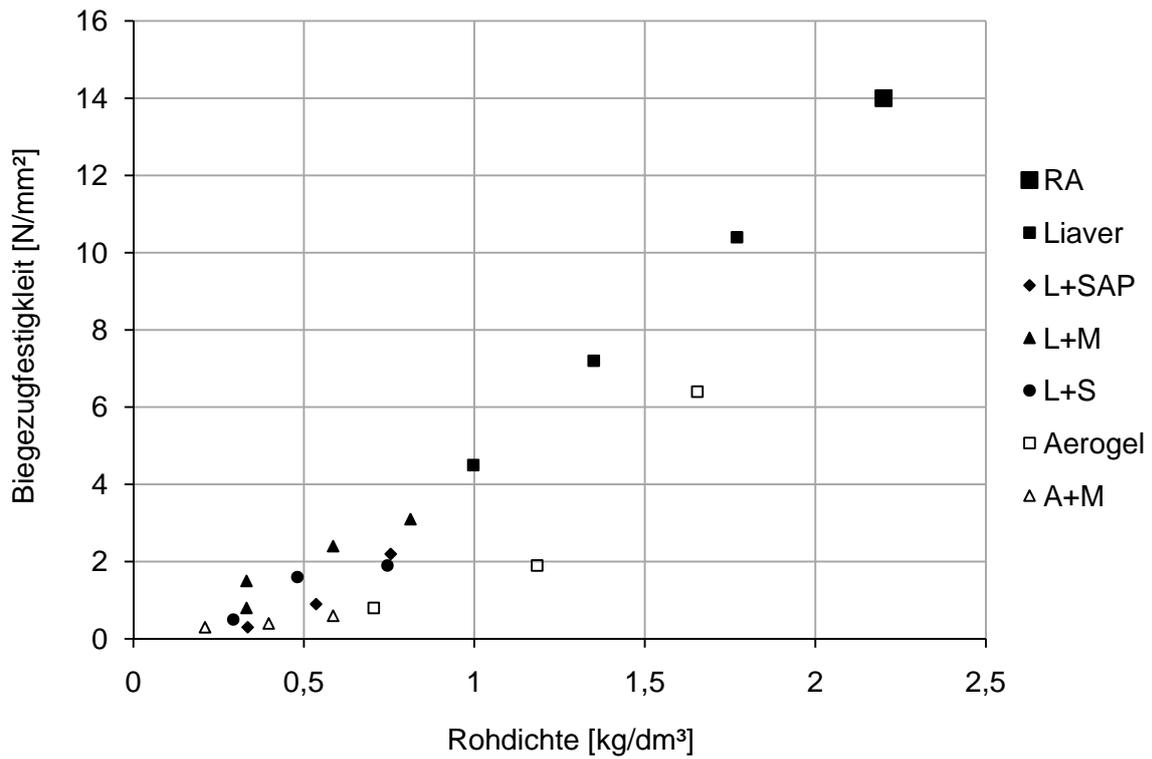


Abbildung 48: 28-d Biegezugfestigkeit aller Mischungen

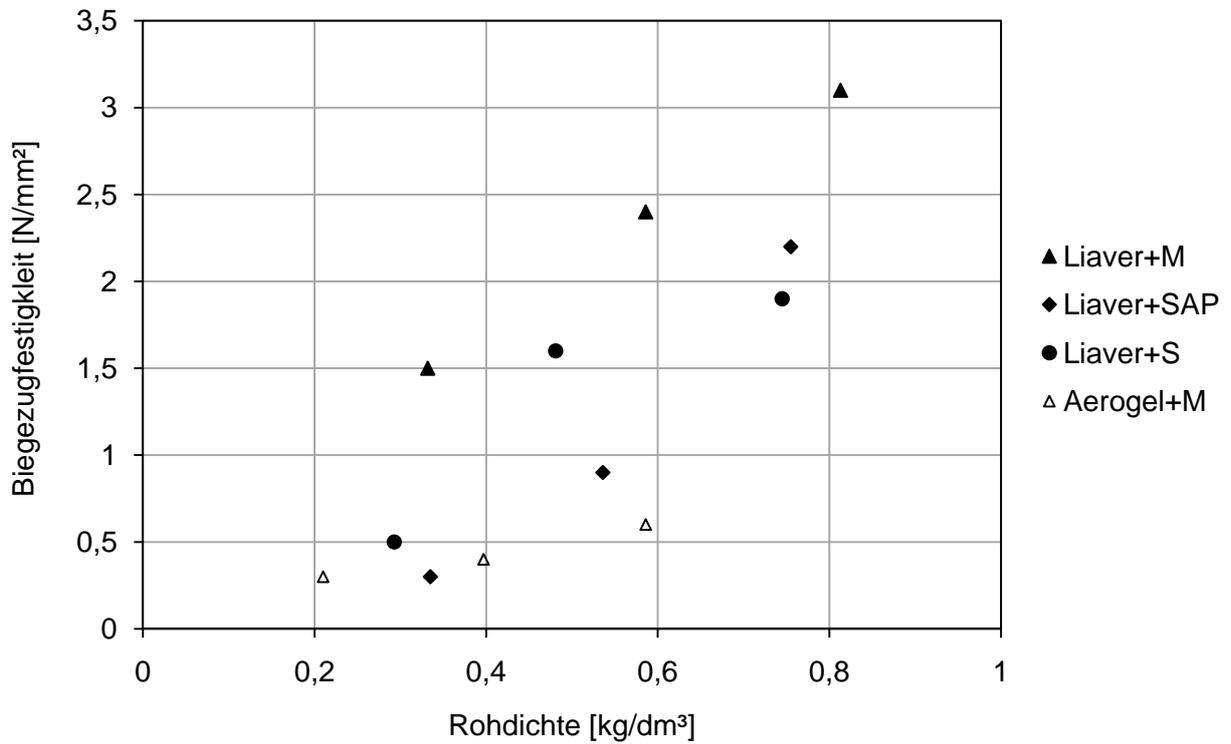


Abbildung 49: Biegezugfestigkeiten der Kernmischungen und des zweiten Gradienten

Die Biegezugfestigkeit zeigt nach Abbildung 50 keine einheitliche Veränderung über den zeitlichen Verlauf.

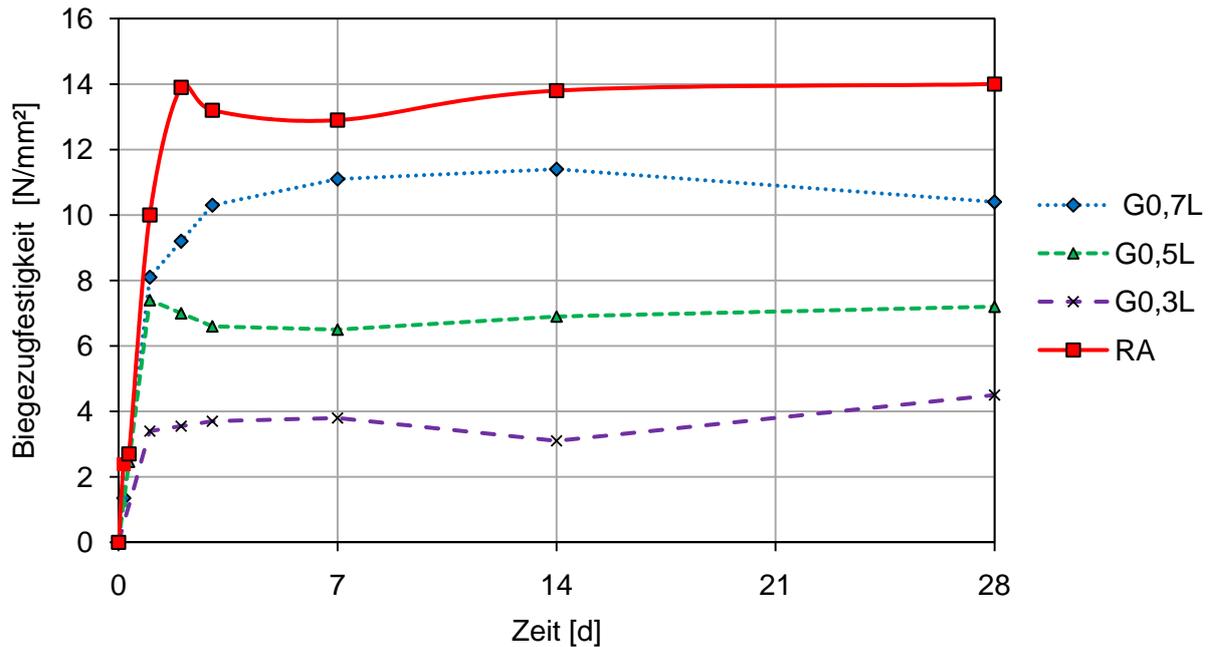


Abbildung 50: Zugfestigkeitsentwicklung über die Zeit

#### Elastizitätsmodul

Die Werte für den Elastizitätsmodul (kurz E-Modul) werden nach der Formel (4.11) berechnet. Dabei gilt für die obere Prüfspannung

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (4.11)$$

$$\sigma_o = \frac{1}{3} \cdot f_c$$

mit:  $f_c$ : Bestimmte Druckfestigkeit

und für die Unterspannung normalerweise 0,5 N/mm<sup>2</sup>. Allerdings liegt bei manchen Kernmischungen die rechnerische Oberspannung schon nahe oder unterhalb der Unterspannung. Deshalb werden dafür niedrigere Werte angenommen. Auch die Belastungsgeschwindigkeit von normalerweise 0,5 N/mm<sup>2</sup>\*s wird bei diesen Prüfungen verringert. Bei den anderen in mit veränderten Prüfbedingungen.

Tabelle 40 angegebenen leichten Mischungen wird nur die Belastungsgeschwindigkeit angepasst und die Unterspannung bei normgerechten 0,5 N/mm<sup>2</sup> belassen. Tabelle 40 zeigt die gewählten Werte bei den Mischungen mit veränderten Prüfbedingungen.

Tabelle 40: Anpassung der Prüfparameter

Mischung	KAM	KLSAP	KLS	KLM	G0,1LSAP	G0,2LSAP	G0,1LS	G0,2LS
gewählte Unterspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	0,1	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Belastungsgeschwindigkeit [s]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse der Elastizitätsprüfungen in Abhängigkeit der Trockenroh-dichten der einzelnen Mischungen. Aerogelmischungen sind nicht abgebildet, da keine Prüfkörper der Gradientenmischungen mit Aerogel hergestellt wurden. Einzig für die Kernmischung KAM wird ein Zylinder für die E-Modul-Prüfung hergestellt. Dieser zeigt allerdings sehr geringe Festigkeiten. Die Wegaufnehmer sind bei dieser Zusammensetzung nur sehr schwer am Prüfkörper zu befestigen, da die Unterlagsscheiben der Befestigungsschrauben in das Material hineingedrückt werden. Der E-Modul dieser Mischung beträgt nahezu Null.

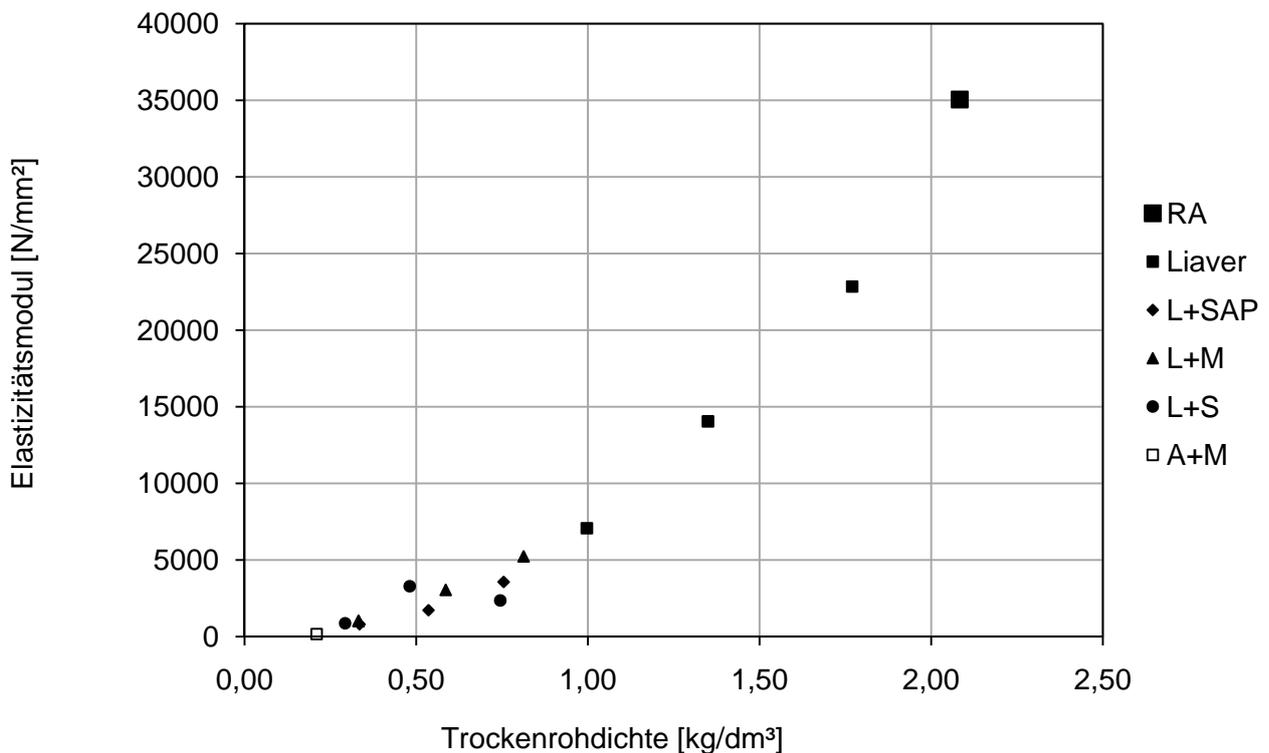


Abbildung 51: Elastizitätsmodul über die Rohdichte

## Wärmeleitfähigkeit

Mit einem Plattengerät kann nach DIN EN 12664 die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Dazu wird eine sogenannte 3-Punkt-Messung an ofentrockenen Probeplatten durchgeführt. Bei drei verschiedenen Temperaturen (10 °C, 19 °C und 27 °C) wird ein konstanter Zustand im Plattengerät erzielt und jeweils die Wärmeleitfähigkeit gemessen. Eine Ausgleichsgerade durch diese drei Punkte ergibt den gemittelten Wert  $\lambda_{Tr, 10}$  bei 10 °C. Dieser ist in Tabelle 41 in Bezug zur Trockenrohdichte für die einzelnen Mischungen angegeben. Die eingezeichneten Kurven geben wieder Vergleichswerte für Porenbeton (Kurve blau) und Schaumbeton (Kurve rot) an.

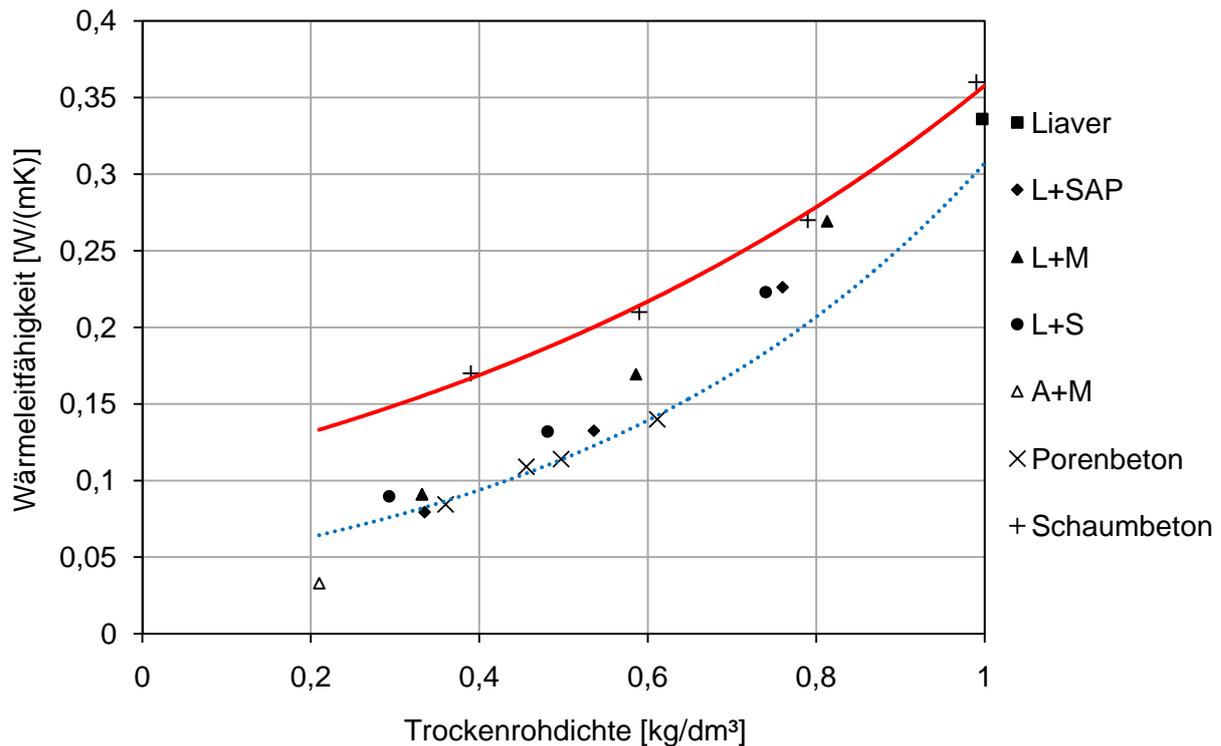


Abbildung 52: Wärmeleitfähigkeit der Mischungen mit Vergleich zu Porenbeton und Schaumbeton

## Trockenrohdichten

Um die Trockenrohdichte zu bestimmen, werden Probekörper der Mischungen bis zur Massenkonstanz bei 105 °C im Ofen getrocknet. Das Gewicht der im Ofen lagernden Proben ist dabei täglich zu messen. Ändert sich die Masse innerhalb dieser 24 Stunden um weniger als 0,01 M. %, gilt die Massenkonstanz als erreicht. Die Probe wird dann nochmals vermessen und über den Quotienten aus Masse und Volumen die Trockenrohdichte bestimmt. Tabelle 41 zeigt zusammenfassend die geprüften Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen sortiert nach der Trockenrohdichte der Mischungen.

Tabelle 41: Übersicht Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen

Mischung	$\rho_{Tr,10}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	$\rho_{FB,soll}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	$\rho_{FB,ist}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cb}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\lambda_{Tr}$ [W/mK]
KAM	0,210	0,372	0,323	0,4	0,3	162,73	0,033
KLS	0,293	0,405	0,343	1,2	0,5	863,35	0,090
KLM	0,332	0,468	0,485	2,5	1,5	1022,57	0,091
KLSAP	0,335	0,665	0,552	0,6	0,3	796,56	0,079
G0,1AM	0,397	0,563	0,485	0,9	0,4	X	X
G0,1LS	0,481	0,617	0,567	4,2	1,6	3285,31	0,132
G0,1LSAP	0,536	0,792	0,749	2,9	0,9	1714,03	0,133
G0,2AM	0,586	0,755	0,666	1,1	0,6	X	X
G0,1LM	0,586	0,643	0,695	8,1	2,4	3043,93	0,169
G0,3A	0,705	0,948	0,827	1,4	0,8	X	X
G0,2LS	0,745	0,829	0,736	5,6	1,9	2469,61	0,223
G0,2LSAP	0,755	0,918	0,93	5,9	2,2	3566,62	0,226
G0,2LM	0,813	0,838	0,963	12,3	3,1	5232,49	0,269
G0,3L	0,997	1,044	1,109	10,5	4,5	7069,57	0,336
G0,5A	1,184	1,389	1,258	6,4	1,9	X	X
G0,5L	1,350	1,453	1,687	32,4	7,2	14040,18	X
G0,7A	1,654	1,832	1,813	42,6	6,4	X	X
G0,7L	1,770	1,864	2,071	51,1	10,4	22841,03	X
RA	2,083	2,27	2,231	88,4	14	35049,75	X

X: keine Prüfergebnisse

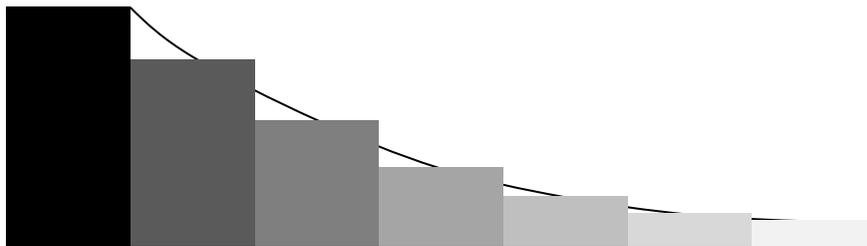
### 4.3.7 Diskussion der Ergebnisse

#### 4.3.7.1 Diskussion der Gradientenbildung

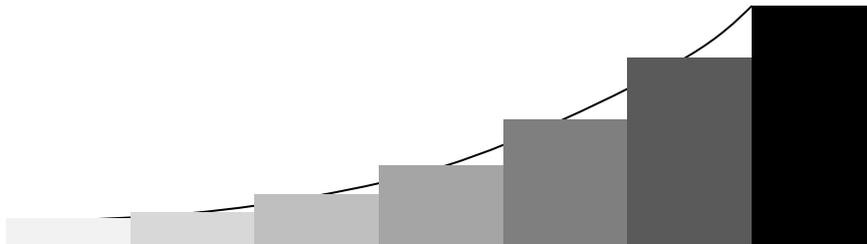
In Kapitel 4.2 wurden die Grundlagen zur Beantwortung der in Kapitel 4.1 gestellten Fragen, wie sich Betone porosieren lassen und wie der Grad der Porosität die Eigenschaften beeinflusst, aufgezeigt. Es wurde ein umfangreiches Ausgangsrepertoire an Betonmischungen geschaffen. Um die noch in 7 Schritten approximierten Eigenschaftsverläufe (Abbildung 53) fließend ineinander zu überführen, werden im Kapitel 4.4 mögliche Herstellverfahren beschrieben.

**Referenzmischung Außen RA**

Mit 100% Feinkornbeton



Rohdichte, Druckfestigkeit, E-Modul



Luftporenanteil, 1/Wärmeleitfähigkeit

Abbildung 53: Gradientenschritte und Verlauf der Eigenschaften (Größtkorn Blähglas 4 mm)

## 4.3.7.2 Vergleich der erreichten Eigenschaften

Die einzelnen Mischungen werden über die Verarbeitbarkeit, die Festigkeit und die Wärmeleitfähigkeit miteinander verglichen. Zusätzlich lassen sich Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit der leichten Mischungen mit Ergebnissen von Porenbeton und Schaumbeton vergleichen.

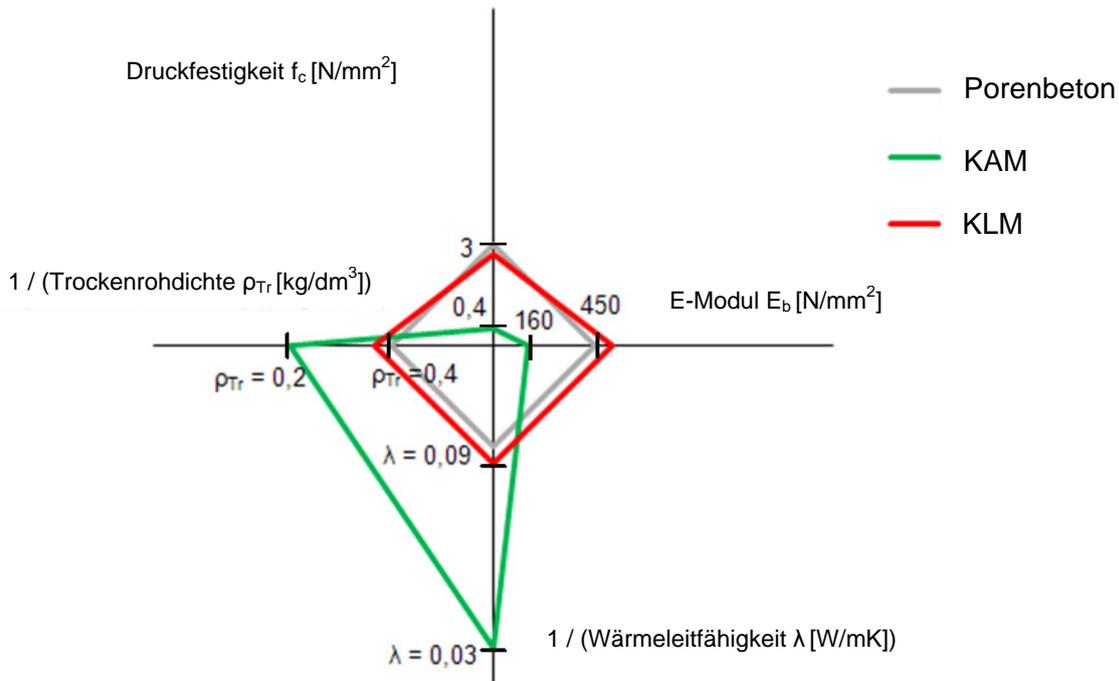


Abbildung 54: Quantitativer Vergleich von Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Trockenrohichte und Wärmeleitfähigkeit von zwei Kernmischungen mit Porenbeton

#### Vergleich der Verarbeitbarkeit

Das oberste Ziel bei den Mischungsentwürfen ist immer die Herstellung von verarbeitbaren Mischungen. Während bei den Mischungen des ersten Gradienten (schwere Mischungen) durch die flüssige Basismischung Probleme durch Entmischung entstanden, lagen die Schwierigkeiten des leichten Gradienten (Liaver oder Aerogel mit Mikrohohlkugeln) in der trockenen und steifen Konsistenz. Mischungen mit Schaum oder SAP ließen sich hingegen relativ gut verarbeiten. Dies liegt an dem in beiden Bestandteilen enthaltenen Wasser, das die Konsistenzklasse erhöht. Um den gleichen Effekt auch bei den Mischungen mit Mikrohohlkugeln zu erzielen, wurde ein Teil der Mikrohohlkugeln durch Wasser ersetzt. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Verarbeitbarkeit der Mischungen mit Liaver leichter ist als die mit Aerogel. Bei den Porosierungsmitteln zeigt sich für die Verarbeitbarkeit die Reihenfolge Schaum vor SAP vor Mikrohohlkugeln.

#### Vergleich der Festigkeit

Im Bereich der Festigkeiten lieferten Blähglas-Mischungen die besten Ergebnisse aller Leichtzuschläge. Das einzelne Liaver-Korn hat im Vergleich zur Rohdichte eine hohe Eigenfestigkeit und durch die nahezu perfekte Kugelform ergibt sich schon bei der losen Schüttung ein sich abstützendes Tragwerk, welches durch die Zementsteinmatrix verkittet und zusätzlich abgestützt

wird. Bei gleicher Rohdichte ergaben sich mit Liaver höhere Druck- und Zugfestigkeitswerte als mit Aerogel.

Ab einem ausreichend hohen Zementanteil nimmt der Einfluss des Leichtzuschlags ab. Die G0,7A-Mischung liegt im gleichen Druckfestigkeitsbereich wie Liaver-Mischungen. Allerdings ist die Biegezugfestigkeit etwas geringer. Es ist anzunehmen, dass die Zementmatrix hauptsächlich die Lastübertragung sicherstellt und der geringe Volumenanteil an Leichtzuschlägen keinen großen Einfluss mehr darauf hat.

Vergleicht man die Druckfestigkeiten der Mischungen mit porosierter Matrix, sind zwischen den einzelnen Porosierungsmitteln deutliche Unterschiede zu sehen. Die Porengrößen und die Porenverteilung spielen dabei die größte Rolle. Je kleiner die Poren sind und je besser die Porenverteilung im Vergleich zum Gesamtporenvolumen ist, desto günstiger ist dies für die Festigkeitsentwicklung. Abbildung 46 zeigt, dass die Mischungen mit Mikrohohlkugeln vor Schaumbildner und SAP die größten Festigkeiten erzielen.

In der Kombination Liaver und Mikrohohlkugeln lassen sich Leichtbetone herstellen, die höhere Festigkeiten aufweisen als im Autoklaven unter Druck und hoher Temperatur gehärteter Porenbeton. Alle drei Mischungen (KLM, G0,1LM und G0,2LM) liegen über der Trendlinie von Porenbeton.

Die Kombinationen von Liaver und Schaum oder Liaver und SAP liegen zwar unterhalb der Porenbeton-Trendlinie, aber alle sechs Mischungen (KLS, G0,1LS, G0,2LS, KLSAP, G0,1LSAP und G0,2LSAP) übertreffen den Festigkeitsbereich von Schaumbeton nach [23].

Bis auf die Mischung G0,2AM liegen die geprüften Aerogelmischungen im unteren Bereich der Festigkeiten von Schaumbeton.

#### Vergleich der Wärmeleitfähigkeit

Das außergewöhnlichste Ergebnis der Wärmeleitfähigkeitsprüfung ist die KAM-Mischung. Durch den enorm hohen Luftanteil von 95 % im Aerogel lassen sich erstaunlich gute Wärmeleitfähigkeitswerte erzielen. Mit einem Wert von nur 0,033 W/mK liegt diese Mischung im Bereich von Mineralwolle oder Polystyrolschaum und damit deutlich unter dem Wert von Porenbeton.

Die weiteren Mischungen mit Liaver als Leichtzuschlag liegen alle im Bereich zwischen Porenbeton und Schaumbeton. Die drei Kernmischungen KLM, KLS und KLSAP liegen im Bereich von  $\lambda=0,08$  W/mK und damit alle bei dem von Thienel in [25] beschriebenen Wert für haufwerksporigen Leichtbeton mit porosierter Matrix.

## 4.4 Herstellungsverfahren

Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Einstellung fließender und stufenweiser Eigenschaftsänderungen in Betonbauteilen untersucht.

### 4.4.1 Schichtweises Gießen

Das schichtweise Gießen von verschiedenen Betonmischungen wurde untersucht. Dabei wird eine homogene Schicht auf die nächste gelegt. Die Betonmischungen der einzelnen Schichten werden jeweils separat in einem Zwangsmischer erzeugt. Die Schichtdicke begrenzt die Auflösung der Gradierung.

Vertikale und horizontale Schichtungen wurden untersucht. Beim Nass-in-Nass-Gießen konnte ein guter Schichtenverbund erreicht werden. Der Übergangsbereich von Schicht zu Schicht kann durch die Anzahl und Dicke der Schichten sowie den Grad der Variation der Zusammensetzung von Schicht zu Schicht gesteuert werden. Die Eigenschaften der einzelnen Schichten können punktgenau über die jeweils verwendete Betonmischung gesteuert werden.

Mit diesem Verfahren wurden die Probekörper für die Gradientenwand in Kapitel 4.5.1 und die Gradientendecke in Kapitel 4.5.2 gefertigt. Es lassen sich vorzugsweise einachsige Gradienten herstellen.



Abbildung 55: Porositätsgradient, geschichtet, Zuschlag (Blähglas), Prisma 4 x 4 x 16 cm



Abbildung 56: Porositätsgradient, geschichtet, Porenbildner (Aluminiumpulver), Prisma 4 x 4 x 16 cm

Bei einer Schichtung in zwei Richtungen kommen zusätzlich Trennbleche zum Einsatz (Abbildung 57). Diese dienen nur als Einbringhilfe und werden vor dem Verdichten gezogen. Kapitel 4.4.4 zeigt den Versuch, alkalisch lösliche Folien einzubetten, die im Bauteil verbleiben können.

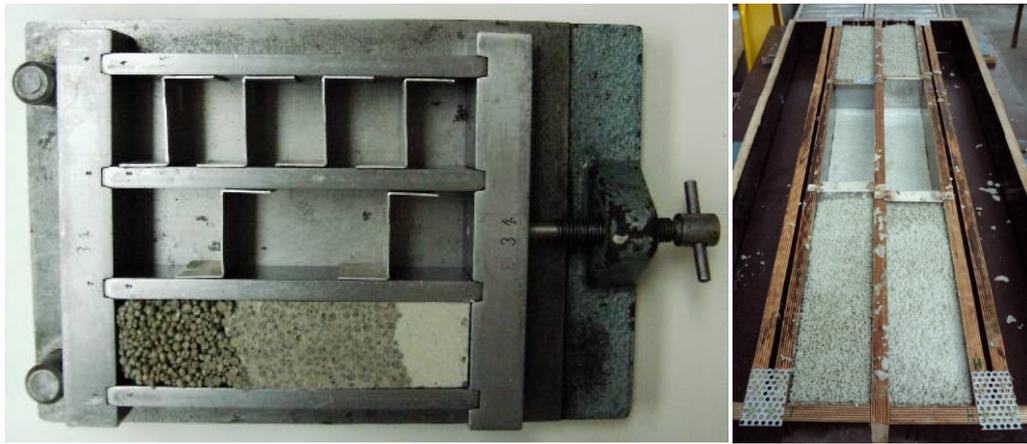


Abbildung 57: Vertikale und horizontale Schichtungen zur Herstellung von Gradientenbauteilen

Eine Automatisierung des Schichtenverfahrens birgt Potential zur wirtschaftlichen Herstellung einachsig gespannter funktional gradierte Plattenbauteile wie Fassadenelemente und Elementdecken.

Die Automatisierung kann zum einen durch die Verfahrbarkeit der Ausbringvorrichtung (Kapitel 4.4.7) und zum anderen durch das Verfahren der Schalung erfolgen.

Es bleibt jedoch das Problem der vielen erforderlichen Betonmischungen und der harten Schichtengrenzen bestehen. Die Aufhebung der Schichtengrenzen und damit die Weiterentwicklung des Schichtengießens erfolgt beim Konzept des Schichtensprühens in Kapitel 4.4.8.

#### 4.4.2 Kontrolliertes Entmischen

Ausgehend von einer homogenen Leichtbetonmischung mit Blähglaszuschlägen wurden mit Hilfe einer Zentrifuge und eines Rütteltisches die Möglichkeiten zur kontrollierten Entmischung untersucht.

##### 4.4.2.1 Gradientenbildung durch Rotation

###### Versuchsaufbau

In Abbildung 58 ist der Versuchsaufbau der Versuche zur Gradientenbildung durch Rotation dargestellt. Ein PE-Rohr mit einem Durchmesser von 105 mm, das mit Frischbeton befüllt ist, wird in eine Drehbank eingespannt und in Rotation versetzt. Das eine Ende ist fest verschlossen und abgedichtet, das andere Ende ist mit der Möglichkeit des Wiederöffnens verschlossen. Die Rotation wird über Spannbacken eingeleitet. Das freie Ende ist über einen frei drehbaren Dorn gelagert.



Abbildung 58: Versuchsaufbau Gradientenbildung durch Rotation

Die erforderliche Frischbetonmenge wird für eine Wandstärke des Bauteils von 2 cm berechnet. Hierbei ergibt sich ein Betonvolumen von 2800 cm<sup>3</sup>.

Die Mischung setzt sich folgendermaßen zusammen:

Tabelle 42: Mischungsbestandteile Rotationsversuch

45 % Basismischung	1260 cm <sup>3</sup>	3,15 kg
Wasser	w/z = 0,35	0,41 l
55 % Zuschläge	1540 cm <sup>3</sup>	0,29 kg
aufgesplittet in:		
Körnung 1/2 mm		0,17kg
Körnung 2/4 mm		0,12kg

### Versuchsdurchführung

Um die Mischung für eine optimale Gradientenbildung einzustellen, werden mehrere Versuchsserien gefahren. Dabei wird zum einen die Konsistenz der Betonmischung über die Variation des w/z-Werts und des Fließmittelgehalts eingestellt, zum anderen werden die Drehzahlen und die Schleuderabfolge verändert.

Der Frischbeton wird in einem Zwangsmischer gemischt und in das Rohr eingefüllt. Beim Frischbeton handelt es sich um einen schnell abbindenden Beton, der bereits nach 30 Minuten steif wird.

Nach dem Einfüllen des Betons wird die Schalung dicht verschlossen. Durch Rollen wird eine gleichmäßige Vorverteilung der Betonmasse in horizontaler Richtung erzielt. Nach dem Einspannen wird die Drehbank zuerst mit einer Drehzahl von 30 Umdrehungen pro Minute ange-

fahren, um die Frischbetonmasse nochmals zu durchmischen und gleichmäßig zu verteilen. Da bei den ersten Versuchen eine Konzentration des Betonvolumens an einer Seite der Schalung erfolgte, werden zur gleichmäßigen Verteilung während des Betriebs der Drehbank zusätzlich kurze Stöße quer zur Schalung eingetragen. Anschließend wird die Drehzahl auf 300, 600 oder 1100 U/min erhöht. Schleuderbetonstützen werden im Allgemeinen mit einer Drehzahl von 300 bis 400 U/min hergestellt [45],[46]. Nach einer Verweildauer von 30 Minuten auf der Drehbank wird die Rotation gestoppt und die Schalung geöffnet. Der Beton ist jetzt steif und formstabil.

#### Variation der Drehzahl

Ausgehend von einem konstanten w/z-Wert von 0,35 wird der Einfluss der Drehzahlen auf die gleichmäßige Verteilung des Betons über den Querschnitt und die Gradientenbildung untersucht. Die Probekörper 1, 2 und 3 werden mit Drehzahlen von 300, 600 und 1100 U/min hergestellt. Das Ergebnis, eine Anhäufung von Material auf einer Seite, war nahezu gleich. Aufgrund der Konsistenz des Frischbetons kann sich dieser nicht gleichmäßig verteilen. Hieraus wird ersichtlich, dass das Ergebnis hauptsächlich von der Konsistenz des Frischbetons abhängig ist. Die Drehzahl spielt eine untergeordnete Rolle.

#### Variation des w/z-Werts

In weiteren Versuchsreihen wird nun der w/z-Wert von 0,35 bis 0,44 variiert. Hierüber kann die Konsistenz des Frischbetons zielgenau eingestellt werden. Die Annäherung an die optimale Mischung erfolgt in Schritten von 0,01. Trotzdem stellt sich im Versuch entweder das Ergebnis einer schlechten Verteilung über den Querschnitt oder ein Entmischen über die Wandstärke ein. Der nächste Schritt führt dann zur Variation des w/z-Wertes. Das beste Ergebnis wird mit einem w/z-Wert von 0,41 erzielt (Abbildung 59).

*Tabelle 43: Übersicht über die Versuchsserien*

Versuch	Wasser (kg)	w/z	Drehzahl	Ergebnis
1	0,41	0,35	300	keine Verteilung über den Querschnitt
2	0,41	0,35	600	keine Verteilung über den Querschnitt
3	0,41	0,35	1100	keine Verteilung über den Querschnitt
4	0,43	0,37	600	keine Verteilung über den Querschnitt
5	0,45	0,39	600	keine Verteilung über den Querschnitt
6	0,47	0,4	600	bessere Verteilung über den Querschnitt
7	0,48	0,41	600	bestes Ergebnis
8	0,49	0,42	600	entmischt
9	0,51	0,44	600	entmischt



Abbildung 59: *Kontrolliertes Entmischen in einer Zentrifuge (Durchmesser 10,5 cm, Wandstärke ca. 2 cm); Ansicht Probekörper (links), Ausschnitt (rechts)*

### Ergebnisdiskussion

Es konnte festgestellt werden, dass mit diesem Verfahren die Einstellung fließender Gefügevariationen prinzipiell möglich ist. Die erforderliche Genauigkeit bei der Einhaltung der Prozessparameter ist jedoch sehr hoch, wodurch die Reproduktion der Ergebnisse erschwert wird. Völlige Entmischung bzw. keine Entmischung sind die Folge. Es lassen sich lediglich einachsige Gradienten einstellen.

#### 4.4.3 Einbringen und Herauslösen reversibler Platzhalter

Das Einbringen und Herauslösen reversibler Platzhalter aus Paraffin, expandiertem Polystyrol und Pneus wurde untersucht. Eine Gradierung kann durch eine gleichmäßige Verteilung von Platzhaltern mit unterschiedlicher Geometrie, durch eine ungleichmäßige Verteilung von Platzhaltern gleicher Geometrie oder durch eine Kombination beider Ansätze erfolgen.

Im Falle von expandiertem Polystyrol erwies sich die Verwendung acetonhaltiger Lösungsmittel zur Entfernung der Platzhalter als zweckmäßig. Dieser Ansatz wurde jedoch auf Grund gesundheitlicher und umweltschutztechnischer Nachteile nicht weiter verfolgt.

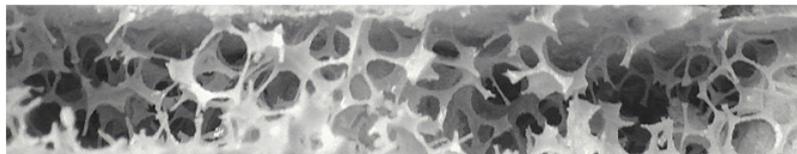


Abbildung 60: *Platzhalter: EPS, chemisch herausgelöst (Porendurchmesser: 2 bis 4 mm)*

Pneumatische Platzhalter mit variierenden Durchmessern und zunehmender Packungsdichte wurden erprobt. Durch Einpressen der Pneu in eine Schalung werden diese zu Polygonen verformt. Die verbleibenden Zwischenräume bilden offenzellige Schaumstrukturen, welche vergos-

sen werden können. Das Aufschwimmen der Pneus und der hohe Grad an Zufälligkeit bzgl. der Porengeometrie erwiesen sich als nachteilig.

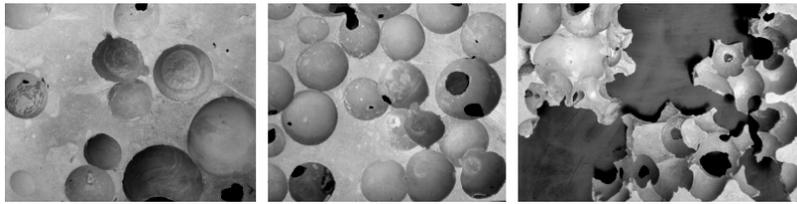


Abbildung 61: Platzhalter: Pneumatische Inlay (Porendurchmesser: 40 bis 100 mm)

Platzhalter aus Paraffin müssen untereinander verbunden sein und Auslassöffnungen sind vorzusehen, um ein Ausschmelzen des Wachses zu ermöglichen. Ein vollständiges Herauslösen der Paraffinkörper erwies sich bei Versuchen als schwierig, da sich in Abhängigkeit der Platzhaltergeometrie, der Position der Berührungspunkte und der Ausflussrichtung, Wachsnester bildeten. Die Schwierigkeit der Positionierung der Platzhalter im Raum sowie die Notwendigkeit einer Temperaturbehandlung zum Ausschmelzen sind weitere Nachteile des Verfahrens.



Abbildung 62: Platzhalter: Paraffin, thermisch herausgelöst (Porendurchmesser: 10 bis 50 mm)

#### 4.4.4 Alkalisch lösliche Trennlagen

Die Verwendung von Folien aus alkalisch löslichen Polymeren zur temporären Abtrennung von Bereichen innerhalb eines Bauteils erwies sich als wenig geeignet. Versuche zeigten, dass die verwendeten Folien sich zwar anlösten, aber dennoch eine Trennschicht zwischen den verschiedenen Betonmischungen bildeten.

Verwendet wurden die Folien BellEx1000, ein Polymer mit hoher Steifigkeit, welches sich bei einem pH-Wert von 12 bis 14 und einer Temperatur von 50 bis 60 °C in ca. 20 Minuten löst, und die Folie BellEx 4008, die weicher und schneller löslich ist.



Abbildung 63: Alkalisch lösliche Trennlagen zwischen verschiedenen Betonmischungen (Prisma 4 x 4 x 16 cm)

#### 4.4.5 Infiltration

Verwendung gradierter, offenzelliger Schaumkörper als Vorform für die Infiltration mit Beton. Eine genauere Beschreibung dieses Verfahrens ist in Kapitel 5.2.3.2 Konsolidieren durch Infiltration geboten.



Abbildung 64: Beton-infiltrierte offenzellige Schaumstruktur

#### 4.4.6 Gradiertes Mischen

Durch das Mischen in einem Durchlaufmischer (Abbildung 65) wurde ein kontinuierliches Ineinander-Überführen verschiedener Betonmischungen variierender Dichte angestrebt. Der Ansatz bestand darin, den Mischer mit einer adaptiven Steuerung so auszurüsten, dass die Zugabe der Zuschläge und Betonzusatzmittel über eine Dosiervorrichtungen geregelt wird.

Erste Versuche zeigten jedoch, dass zwar die bisher ermittelten Mischungen stabil und in einer geeigneten Konsistenz vorlagen, jedoch das kontinuierliche Ändern der Mischungen schnell zur Verstopfung im Mischer führte. Es war erkennbar, dass sich bei Beachtung gegebener Mischzeiten und Reihenfolgen ein aufwändiges System mit geringer Redundanz ergeben würde.

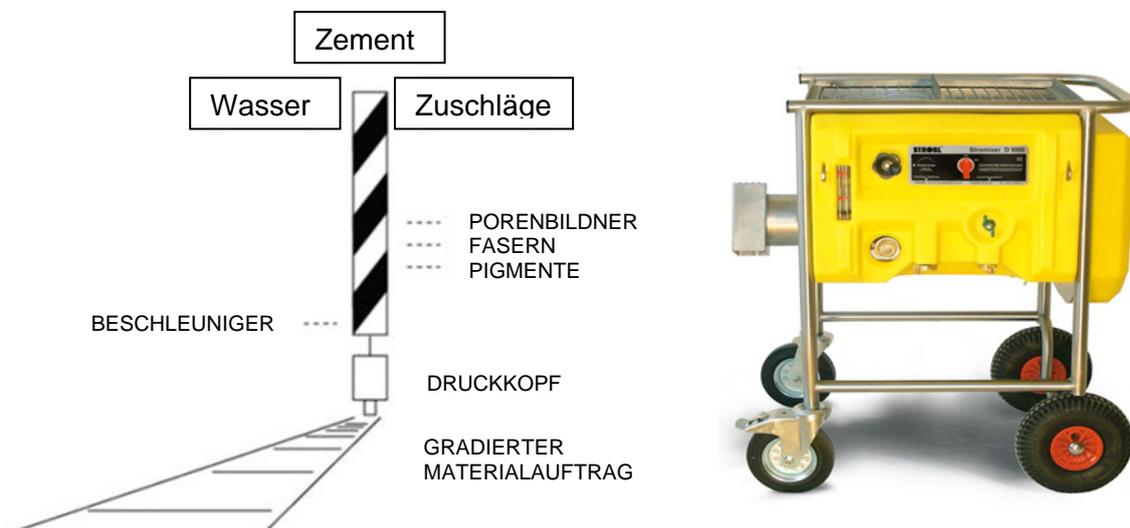


Abbildung 65: Prinzip des Gradierten Mischens (links); Durchlaufmischer der Firma Putzmeister (rechts)

#### 4.4.7 Betondrucken

Beim Drucken von Beton handelt es sich um ein generatives Fertigungsverfahren, wobei ein Bauteil schichtweise hergestellt wird. Es lassen sich zwei Verfahrensarten unterscheiden:

1. Verfahren mit direktem Materialauftrag

Khoshnevis [47] beschreibt ein Verfahren, bei denen eine feinkörnige Betonmischung über eine Düse, die dreiaxsig geführt werden kann, aufgebracht wird. Das als „contour crafting“ bezeichnete Verfahren soll dafür eingesetzt werden, verlorene Schalungen zu drucken, die mit Bewehrungsmodulen versehen und anschließend mit Beton ausgegossen werden.

2. Verfahren, bei denen ein Bindemittel in ein Pulverbett lokal eingebracht wird

Bei der als D-Shape bezeichneten Technologie wird in Anlehnung an Verfahren des Rapid Prototyping ein Bindemittel lokal in ein Pulverbett gedruckt, wobei das Pulverbett schichtweise aufgebracht wird. Anschließend wird das ungebundene Pulver entfernt. Die Benetzung des Pulverbetts durch das Bindemittel lässt sich nur wenig präzise steuern. Das Einbringen weiterer Mischenergie ist nicht möglich. Hiermit hergestellte Bauteile erfordern ein hohes Maß an Nachbearbeitung.

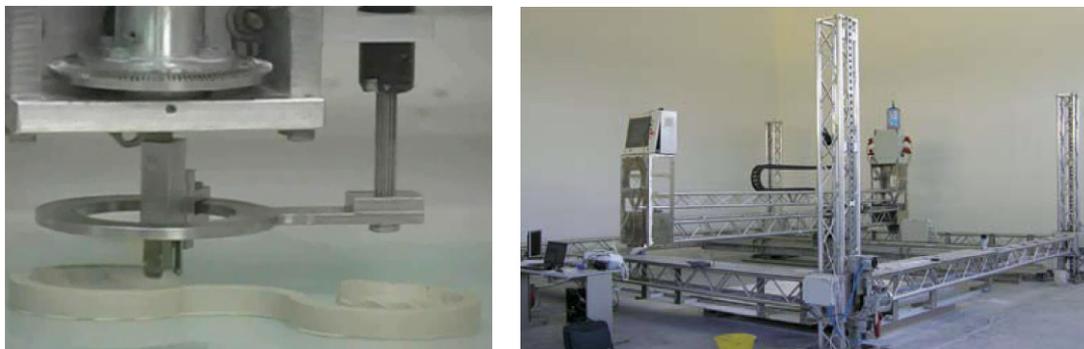


Abbildung 66: Ausgabevorrichtung, direkter Materialauftrag (links) [47], Bindemittel in Pulverbett (rechts) [48]

Das Betondrucken mit einem Druckkopf ist ein zeitintensives Herstellungsverfahren. Es lassen sich in Abhängigkeit der Druckkopfführung und Ausbildung der Materialausgabedüse räumliche Strukturen mit einer variierenden Voxelauflösung (Voxel = volumetric pixel) herstellen. Die Verfahren sind auf jeweils eine Betonmischung begrenzt. Gradierungen lassen sich nur über die Variation der gedruckten Bauteilstruktur, nicht aber über eine Variation der Betonzusammensetzung erreichen.

#### 4.4.8 Schichtweises Sprühen

Aufgrund der Feinheit des Materialauftrags und der realisierbaren Schichtdicken im Millimeterbereich wird bei Gradientenbetonen die Bezeichnung Beton-Sprühtechnik analog zu den Herstellungsverfahren im Bereich der Metalle und Polymere verwendet.

Das Betonsprühen hat gegenüber Gießverfahren den Vorteil der direkten Verdichtung beim Materialauftrag und macht somit ein nachträgliches Verdichten überflüssig, welches den Verlust einer bereits angelegten Gradierung zur Folge haben kann. Außerdem lassen sich die Schichten dünner ausführen als bei Gießverfahren und verzahnen sich besser.

Zur Entwicklung des gradierten schichtweisen Sprühens wurde es erforderlich, die Mischung KLM aus Kapitel 4.3.5 so anzupassen, dass sie mit der zur Verfügung stehenden Putzmeister Strobot 406 S Mörtelspritze gefördert werden kann (Abbildung 67). Dies wurde durch die Erhöhung des w/z-Werts und der Zugabe von Fließmitteln erreicht. Das Größtkorn des Leichtzuschlags Blähglas wurde auf 2 mm reduziert.



Abbildung 67: Pumpbare KLM Leichtbetonmischung

Abbildung 68 zeigt ein Mehrschichtbauteil mit Variation der Pigmentierung, des Fasergehaltes und des Gehalts an Leichtzuschlägen, das mit dem Verfahren des Schichtensprühens hergestellt wurde.

Der Nachteil hierbei ist das Vorhalten der verwendeten Betonmischungen. Analog zum schichtweisen Gießen ist die Gradierung von der Anzahl und der Feinheit der Abstufungen abhängig. Im Gegensatz zum schichtweisen Gießen ermöglicht die Sprühtechnik den kontrollierten Materialauftrag auch auf nicht ebenen Schalungen.



Abbildung 68: *Mehrschichtbauteil (Dicke 2 cm), mit folgendem Aufbau: Deckschicht – Leichtbetonkern – textile Bewehrung – Pigmentierte Oberfläche*

#### 4.4.9 Gradiertes Sprühen

Eine Weiterentwicklung des schichtweisen Sprühens ist das gradierte Sprühen. Der Mischungsprozess erfolgt hierbei im Sprühnebel durch die zugeführte Druckluft.

Die Zusammensetzung der aufgetragenen Mischung kann auf zwei Arten variiert und gesteuert werden:

- Zuführen gewünschter Bestandteile wie Leichtzuschläge, Pigmente etc. im Sprühkopf zu einer Spritzbeton Basismischung. Danach Zerstäuben und Mischen der Komponenten im Sprühnebel. Hierfür sind zusätzliche steuerbare Pumpen für die einzelnen Bestandteile erforderlich
- Simultansprühen zweier Betonmischungen mit Hilfe zweier Sprühgeräte. Die Durchmischung erfolgt durch ein Überschneiden der Sprühnebel. Durch Dosierung der jeweiligen Materialzufuhr der Mischung A und der Mischung B werden fließende Eigenschaftsverläufe erreicht

Die beiden Varianten werden mit den erzielten Ergebnissen nachfolgend beschrieben.

##### 4.4.9.1 Mischen verschiedener Volumenströme im Sprühnebel

Das Prinzip des Mischens verschiedener Volumenströme wurde ausgiebig mit dem gesteuerten Zumischen von Pigmenten an mehreren Stellen im Förder- und Sprühprozess geprüft. In Abbildung 69 ist der Prozess systematisch dargestellt. Die homogene Mischung der Pigmente mit der Feinkornbetonmischung erfolgt erst im Sprühnebel. Durch den vom Kompressor erzeugten Druck von bis zu 15 bar und einem Volumenstrom von 400 l/min erfolgt auf dem Weg vom Aus-

tritt an der Düse bis zum Einbringort eine gute Homogenisierung. Beim Trockenspritzen wird das Wasser erst auf diese Weise in die Mischung eingebracht.

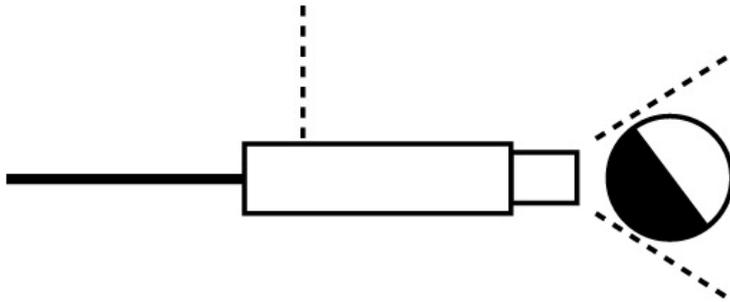


Abbildung 69: Mischen verschiedener Volumenströme im Sprühnebel

Abbildung 70 zeigt, wie mit einer über eine Bohrmaschine betriebene Pumpe in einem ersten Versuch Pigmente im Pumptrichter volumendosiert zugemischt wurden. Die Steuerung des Volumens der Pigmentlösung erfolgte über die Drehzahl der Bohrmaschine.



Abbildung 70: Zuführung der Pigmente im Pumptrichter

Das in Abbildung 71 dargestellte Bauteil wurde mit einer Zuführung der Pigmente am Sprühkopf gefertigt. Die Zuführung kurz vor Zutritt der Druckluft erwies sich als zweckmäßig, da hiermit die Zugabemenge der Pigmente in Echtzeit geregelt werden kann und nicht die Verzögerung über die Förderstrecke von der Pumpe zum Sprühkopf mit eingerechnet werden muss.



Abbildung 71: Gradierung der Pigmente über die Bauteillänge (Schnitt Zylinder 10 x 40 cm)

Da die Regelgenauigkeit der Pumpe nicht ausreichend war, wird in einer weiteren Versuchsserie eine rechnergesteuerte Membranpumpe verwendet, die sich von 2,5 ml/h bis 950 l/h frei regeln lässt und somit die Einstellung genau vordefinierte Farbverläufe erlaubt.

#### 4.4.9.2 Variation des Verhältnisses zweier Mischungen im Sprühnebel

Versuche mit dem Prinzip des Mischens zweier Mischungen im Sprühnebel (Abbildung 72) wurden auf dem Betriebsgelände der Firma Putzmeister durchgeführt (Abbildung 73). Dabei wurde die Mischung KLM, die zum Beispiel bei den Gradientenbetondecken als leichte Kernmischung verwendet wurde, als leichte Mischung mit dem Pumpenstrang A gefördert. Mit dem Pumpenstrang B wurde die von Sika entwickelte Feinkorn Spritzbetonmischung Matrix 2 [32] gefördert.

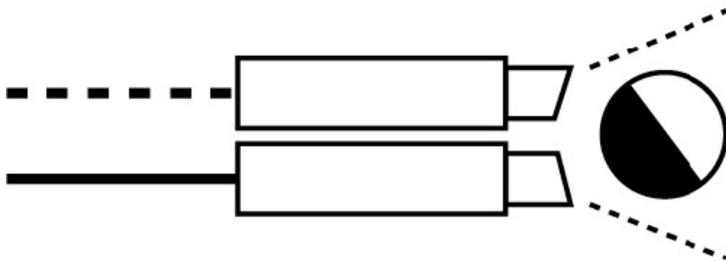


Abbildung 72: Variation des Verhältnisses zweier Mischungen im Sprühnebel

Zur Versuchsdurchführung standen zwei baugleiche Strobot 406 S Pumpen zur Verfügung. Das Fördervolumen ist bei diesen Maschinen von 0 bis 15 l/min manuell frei über einen Drehschalter regelbar. Daher wurde die Gradierung von Hand eingestellt, indem die Füllzeit der Schalung ermittelt wurde. Danach wurde Pumpstrang A und Pumpstrang B gegengerichtet vom maximalen bis zum minimalen Fördervolumen in der ermittelten Füllzeit der Schalung gefahren. Hierdurch gelang es in einer ersten Approximation, einen Strukturgradienten von maximal tragfähig zu maximal porös einzustellen.



Abbildung 73: Gradientenspritzen durch Variation der Verhältnisse im Sprühnebel

Zur Prüfung der Gradierung wurden Probekörper, bestehend aus fünf übereinander angeordneten Mörtelprismen (Abbildung 74), entwickelt und die hierfür erforderliche Schalung entworfen und hergestellt. Diese Probekörper ließen sich in einem Sprühvorgang übereinander am Stück

fertigen. Durch die gezielte Steuerung der beiden Pumpstränge wurde im Probekörper ein Gradient über die Höhe erstellt. Die Probekörper konnten nach der Herstellung ausgeschalt und zugeschnitten werden.



Abbildung 74: Gradientenprobekörper, die in 5 Mörtelprismen aufgeteilt werden können (links); gefüllte Schalungen (rechts)

Die Qualität des erstellten Strukturgradienten wurde anhand von Bauteilschliffen mit Photographien dokumentiert (Abbildung 82). Hierbei wurde deutlich, dass es gelungen war, einen eindeutigen Strukturgradienten einzustellen, und dass es zu keinerlei Fehlstellen und Rissen bei der Herstellung und Festigkeitsentwicklung der Probekörper gekommen war. Es waren keinerlei Schichtgrenzen erkennbar.



Abbildung 75: Mittels zweier Sprüngeräte realisierter Porositätsgradient (Zylinder 10 x 40 cm)



Abbildung 76: Mörtelprismen gesägt aus Gradientenprobekörper (4 x 4 x 16 cm)

Die vier optisch besten Gradientenprobekörper wurden in einem zweiten Schritt statischen Prüfungen zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit unterzogen. Dabei wurden die Prüfkörper in 5 Mörtelprismen unterteilt (Abbildung 76), die mit der Probekörpernummer 1 bis 5 von unten nach oben bezeichnet wurden. Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Prüfungen. Die genauen Werte sind Anhang 3 zu entnehmen.

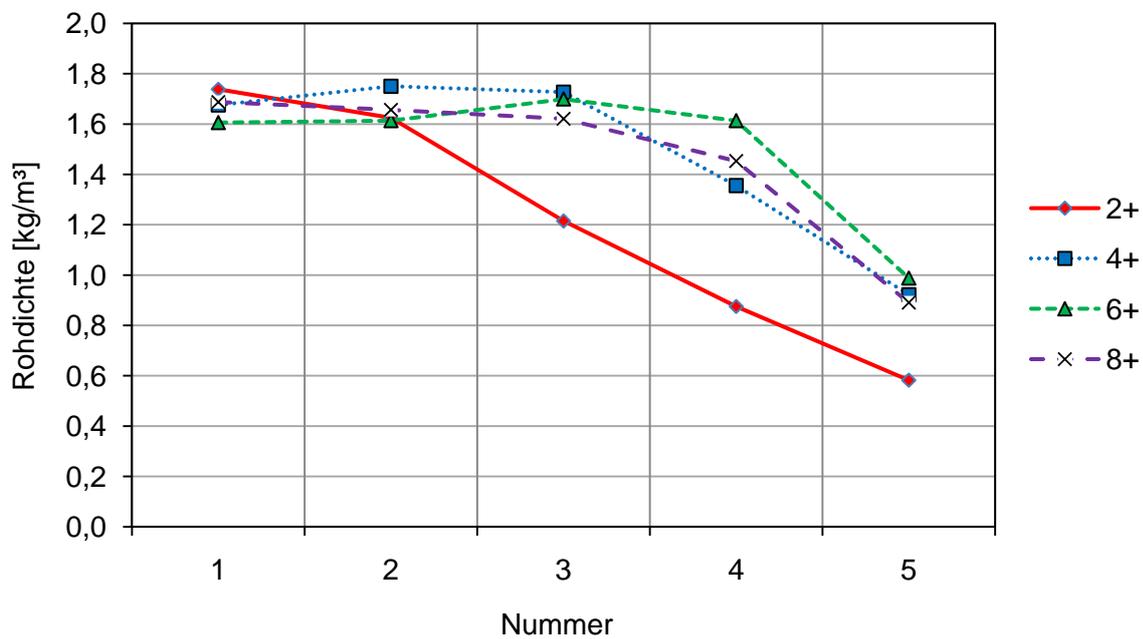


Abbildung 77: Rohdichten der Gradientensprühversuche

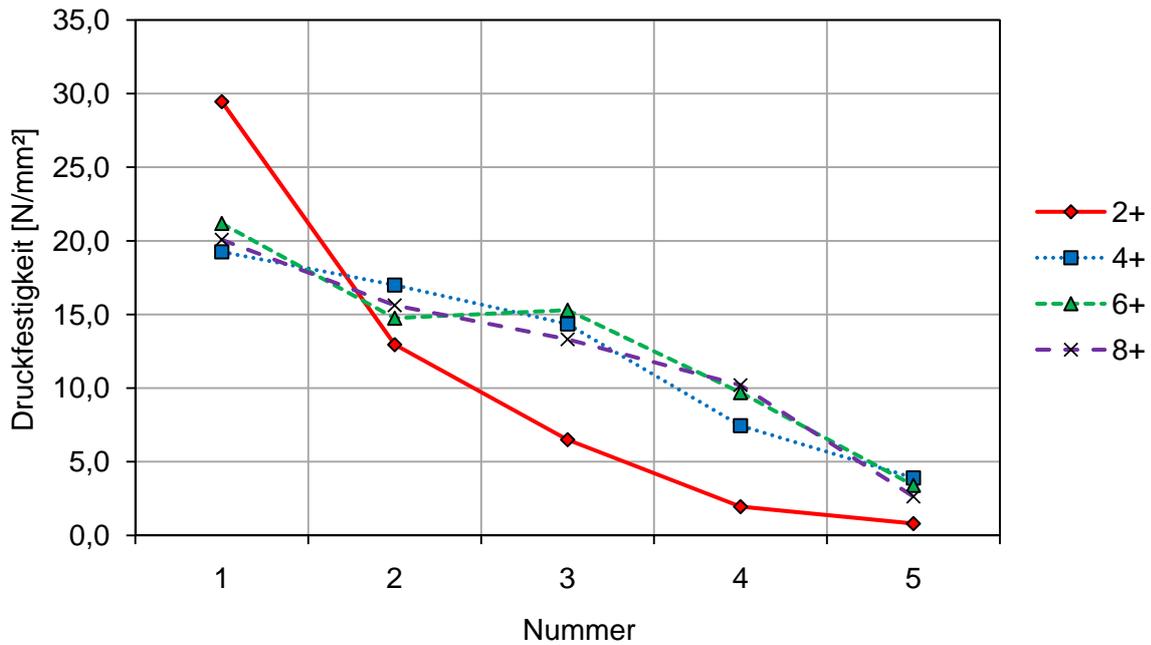


Abbildung 78: Druckfestigkeiten der Gradientensprühversuche

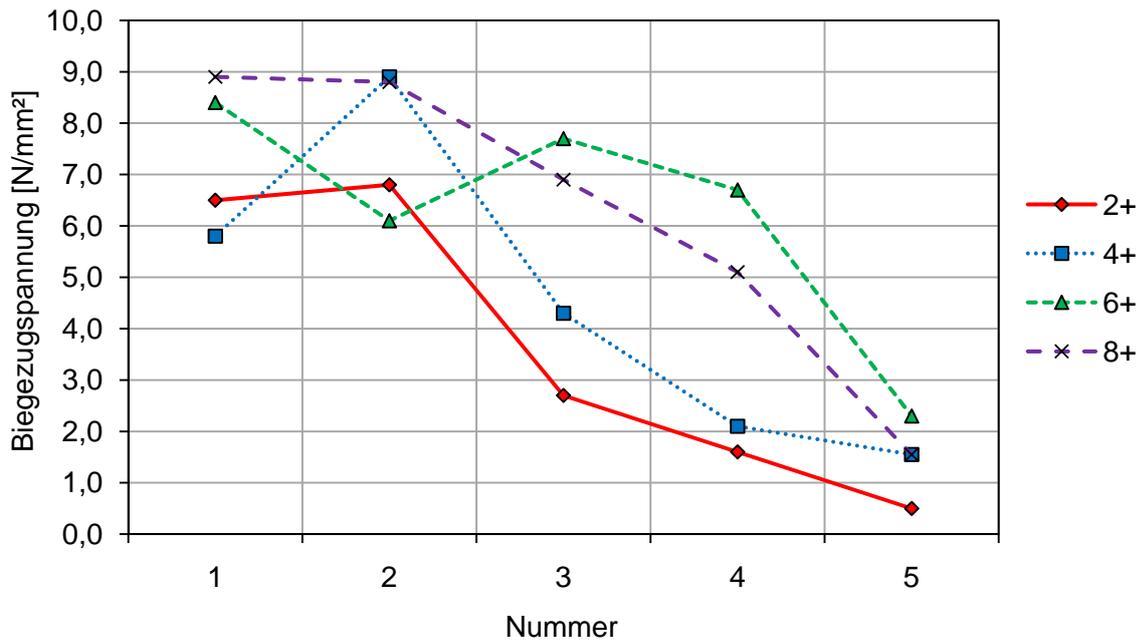


Abbildung 79: Biegezugfestigkeiten der Gradientensprühversuche

Die hergestellten Probekörper und die Ergebnisse der zugehörigen Festbetonprüfung zeigen, dass es möglich ist, mit dem angewandten Verfahren Strukturgradienten im Betonbau herzustellen und kontinuierliche Eigenschaftsverläufe zu erzeugen. Die Genauigkeit des angewandten Verfahrens ist abhängig von der Genauigkeit der Steuerung der Volumenströme. Diese ist nur durch eine automatisierte Steuerung der beiden Pumpstränge zu erreichen.

Die Gradientenbeton-Sprühtechnik bildet die Voraussetzung für die Anwendung der Gradientenbeton-Technologie bei Bauteilen mit komplexeren Geometrien wie Schalenträgwerken, die nicht mit dem Schichtverfahren hergestellt werden können. In Kombination mit einer rechnergesteuerten Führung des Sprühkopfes/Einfüllstutzens lassen sich somit effiziente Betonleichtbau-tragwerke herstellen, die in ihrem Schichtenaufbau oder ihrem flächigen Verlauf eine funktionale Gradierung hinsichtlich ihrer Tragwirkung oder anderer Funktionalitäten aufweisen.

## 4.5 Anwendungsbereiche

### 4.5.1 Außenwand

#### 4.5.1.1 Herleitung der Gradientenbetonwand

Die Gradientenbeton-Technologie verspricht die Realisierbarkeit eines rein mineralischen Außenwandbauteils, das alle Anforderungen an Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Wärmeschutz erfüllt und dies mit geringeren Wandstärken als bei vergleichbar leistungsfähigen Wärmedämmverbundsystemen. Die Vorteile liegen in der guten Rezyklierbarkeit, der Massen- und CO<sub>2</sub>-Reduktion, dem Gewinn an Nutzfläche und in der Energieeinsparung in allen Phasen des Produkt-Lebenszyklus.

Im Gegensatz zu bekannten Dämmbetonen wird nicht eine homogene Betonrezeptur eingesetzt, die bei hinreichender Festigkeit eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist. Hier hat es sich gezeigt, dass zur Erfüllung geltender Wärmeschutzverordnungen Wandstärken von 50 bis 80 cm vonnöten sind [49],[50]. Stattdessen werden nach dem Prinzip des Sandwich-Bauteils, dichte, hochfeste Außenschichten mit einem mineralischen Dämmkern kombiniert, wobei ein fließender Porositätsverlauf (Gradient) als Übergang zwischen den Schichten eingestellt wird, um den dauerhaften Verbund der Funktionsschichten zu gewährleisten. Damit können in einem rein mineralischen Bauteil, Tragwirkung und Dämmfunktion kombiniert werden.

Darüber hinaus könnten, im Rahmen der Weiterentwicklung des Ansatzes, Pigmente, Fasern und Funktionsmaterialien (z.B. PCM) selektiv eingebracht und damit sparsamer dosiert werden. Der Entwurf der einzelnen Gradientenmischungen führt zum Entwurf eines gradierten Musterbauteils. Als Musterbauteil wird ein Außenwandelement gewählt, da sich in diesem Bauteil die Funktionen Tragen, Dichten und Dämmen vereinen und darüber hinaus Anforderungen an die sichtbare Oberfläche gestellt sind.

#### 4.5.1.2 Schichtenaufbau der Gradientenbetonwand

Das Außenwandelement wird hauptsächlich unter den Gesichtspunkten der Wärmedämmung, der Tragfähigkeit sowie der Eignung der Oberflächen in Sichtbeton entworfen. Der gradierte Bauteilentwurf sieht einen symmetrischen Schichtaufbau mit drei unterschiedlichen Mischungen vor. Für die Sichtbetonflächen wird innen und außen am Wandbauteil jeweils eine zwei Zentimeter dicke Schicht der RA-Mischung gewählt. Diese Schicht übernimmt auch die tragende Funktion des Bauteils. Eine Bewehrung aus Glasfasergewebe wird in die Mitte der RA-Schichten eingelegt. Daran anschließend folgt jeweils eine drei Zentimeter dicke Schicht G0,30L oder G0,30A, welche den Porositätsgradienten repräsentiert, und im inneren Bereich des Wandelements die Kernmischungen KLM oder KAM.

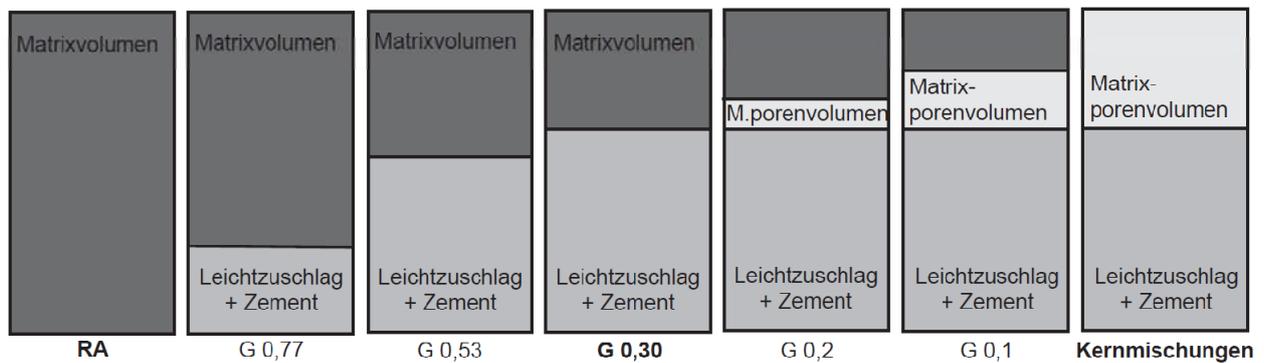


Abbildung 80: Schichtauswahl für Musterbauteil

#### 4.5.1.3 Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten

Die aktuellen Energieeinsparverordnungen fordern eine deutliche Verbesserung des Wärmeschutzes von Bauteilen der wärmeabgebenden Hüllflächen eines Gebäudes. Mit Einführung der Energieeinsparverordnung 2009 wird für eine Außenwand gegen Außenluft bei einem Referenzgebäude ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von  $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$  gefordert. Die EnEV 2012 fordert einen U-Wert von  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Der U-Wert eines Bauteils ist abhängig von den Dicken der einzelnen Schichten und dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit dieser Schichten. Die Ermittlung des U-Wertes erfolgt über folgende Formeln:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad (4.12)$$

mit:

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

Die angegebenen Werte für  $R_{se}$  und  $R_{si}$  gelten für eine horizontale Richtung des Wärmestroms.

$$R = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (4.13)$$

mit:

- $d_i$ : Schichtdicke [m]
- $\lambda_i$ : Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W/mK}$ ]

#### 4.5.1.4 Gradientenbetonwand mit Blähglasbetonkern

Bei der Herstellung des gradierten Musterbauteils werden zwei Aufbauten untersucht. Zum einen ein Wandaufbau mit Blähglas als Leichtzuschlag (Abbildung 81). Dieser Wandaufbau lässt sich durch die gute Verarbeitbarkeit der Mischungen einfach realisieren und der Leichtzuschlag

ist verhältnismäßig kostengünstig. Tabelle 44 zeigt die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstands des Gesamtbauteils.

Tabelle 44: Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten des Musterbauteils

Mischung:	Schichtdicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wärmedurchlasswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
RA	0,02	1,65	0,012
G0,30L	0,03	0,337	0,089
KLM	0,3	0,092	3,274
G0,30L	0,03	0,337	0,089
RA	0,02	1,65	0,012
Bauteildicke: 0,4		R <sub>si</sub>	0,13
		R <sub>se</sub>	0,04
		Σ <sub>R</sub>	3,647

Der U-Wert ( $1/\Sigma_R$ ) dieses Musterbauteils beträgt rechnerisch bei einer Wandstärke von 40 cm 0,274 W/m<sup>2</sup>K, liegt also schon unterhalb des nach der EnEV 2009 geforderten Referenzwertes von 0,28 W/m<sup>2</sup>K.



Abbildung 81: Gradientenbetonwand mit Blähglaskern (Wandstärke 40 cm)

#### 4.5.1.5 Gradientenbetonwand mit Aerogelbetonkern

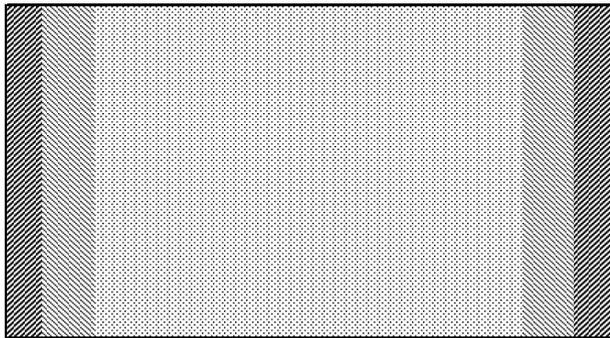
Der zweite untersuchte Aufbau hat als Kern die Mischungen mit den geringsten Wärmeleitfähigkeitszahlen. Ersetzt man die Kernmischung aus Liaver und Mikrohohlkugeln durch Aerogel und Mikrohohlkugeln, erreicht man bei gleicher Wandstärke einen Wert von  $U = 0,106$  W/m<sup>2</sup>K. Voraussetzung für diese guten Werte ist dabei die vollständige Austrocknung des Kernmaterials. Wird zusätzlich die Übergangsschicht G0,3L auf 1 cm verringert, kann bei einer Trag-

schichtdicke von jeweils 3 cm eine Wandstärke von 22 cm die voraussichtlichen Anforderungen nach EnEV 2012 erfüllen.

Tabelle 45: Variation des Musterbauteils

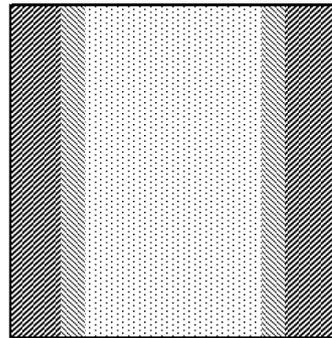
	Schichtdicke	Wärmeleitfähigkeit	Wärmedurchlasswiderstand
Mischung:	[m]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> K/W]
RA	0,03	1,65	0,018
G0,30L	0,01	0,337	0,03
KAM	0,14	0,033	4,245
G0,30L	0,01	0,337	0,03
RA	0,03	1,65	0,018
Bauteildicke:	0,22	$R_{si}$	0,13
		$R_{se}$	0,04
		$\Sigma_R$	4,511

Der U-Wert ( $1/\Sigma_R$ ) dieser Variante beträgt bei einer Wandstärke von nur 22 cm rechnerisch 0,22 W/m<sup>2</sup>K und erfüllt damit die EnEV 2012 (Referenzwert einer Außenwand  $U = 0,24$  W/m<sup>2</sup>K).



$U = 0,27$  W/m<sup>2</sup>K  
d = 40 cm

Abbildung 82: Wandbauteil mit KLM als Dämmmaterial



$U = 0,22$  W/m<sup>2</sup>K  
d = 22 cm

Abbildung 83: Variation mit KAM als Dämmmaterial

## 4.5.2 Geschossdecke

### 4.5.2.1 Herleitung der funktional gradierten Geschossdecke

Die Entwicklung funktional gradiert Elementdecken beruht auf der Tatsache, dass bei klassischen massiven Betondecken gemäß der inneren Spannungsverteilung ein Großteil des eingesetzten Betonvolumens nicht oder nur sehr gering beansprucht wird (Abbildung 84).

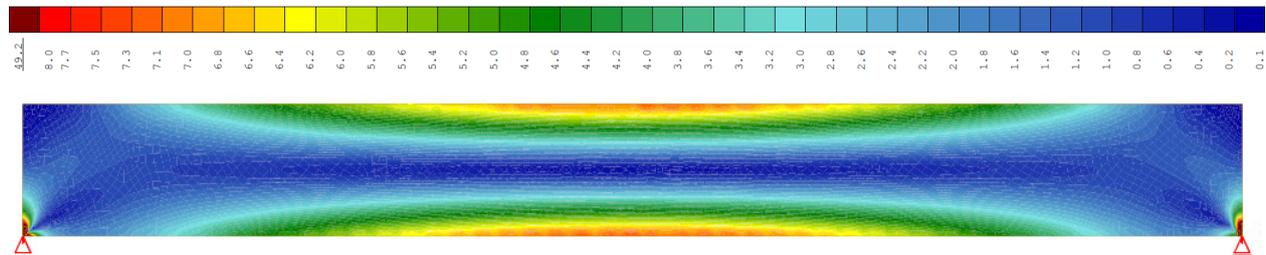


Abbildung 84: Verteilung der Vergleichsspannung eines Balkens unter Gleichlast auf zwei Stützen isotropen Materials

Dies führt zu einem hohen Eigengewicht der Decken, die bei normalen Geschossbauten bis zu 70 % der Gesamtmasse der Konstruktion ausmachen. Die hohen Lasten aus den Decken führen sowohl zu einem höheren Anspruch an Bewehrungsstahl in den Decken als auch zu größer dimensionierten lastweiterleitenden Bauteilen wie Stützen, Wänden und Fundamenten.

In Bereichen geringerer Anforderungen an die Druckfestigkeit, wie in Feld- und Querschnittsmitte, kann die Festigkeit des Betons deutlich reduziert werden. Dies ermöglicht einen hohen Luftporenanteil und somit geringere Rohdichten, die das Eigengewicht des Gesamtbauteils deutlich reduzieren.

Normalbeton hat einen Zementanspruch von ca. 500 kg/m<sup>3</sup>. Weltweit ist die Zementindustrie für ca. 5 bis 7 % des anthropogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich [51]. Pro Tonne Zement wird durchschnittlich ca. eine Tonne CO<sub>2</sub> freigesetzt. Die leichte Kernmischung, die für die Versuchskörper in Feldmitte des Bauteils eingesetzt wird, hat einen Zementanteil von 120 kg/m<sup>3</sup>.

Die Gradientendecken stellen einen innovativen Ansatz im Betonleichtbau dar und bieten erhebliches Ressourceneinsparpotential. Die Relevanz der notwendigen Material- und CO<sub>2</sub>-Ersparnis im Betonbau wird durch direkte Rückmeldung mehrerer führender Unternehmen der Branche, die als Kooperationspartner am Forschungsprojekt beteiligt sind, bestätigt.

#### 4.5.2.2 Vorgehen bei modellstatischen Versuchen

Zur Bestätigung der Masseneinsparpotentiale und der Herstellbarkeit der Gradientendecken wurden Bauteilversuche geplant und durchgeführt.

In Abbildung 85 ist das allgemeine Vorgehen bei modellstatischen Untersuchungen dargestellt. Diese Untersuchungen gliedern sich in 5 Unterpunkte auf.



Abbildung 85: Vorgehen bei modellstatischen Versuchen

Zuerst wird das Referenzobjekt, eine einachsig gespannte massive Decke mittlerer Spannweite und Dicke unter gängigen Hochbaulasten bemessen. Hierfür sind die Berechnungsansätze und die Ergebnisse bekannt. Daher müssen hierzu keine Versuche durchgeführt werden. In einem zweiten Schritt wird die angestrebte Hauptausführung, die Gradientendecke im Originalmaßstab bemessen. Ohne Skalierung würde nun die Hauptausführung auf ihre Traglast geprüft werden. Da diese Prüfkörper jedoch schwer zu handhaben und materialintensiv wären, wird eine Skalierung auf im Labor handhabbare Abmessungen vorgenommen. Des Weiteren geht die maximale Prüflast der Prüfmaschine mit in die Auslegung ein. Aus der Skalierung ergibt sich das Modell und die hierfür skalierten Lasten der Prüfmaschine. Das Modell wird nun für die skalierten Lasten bemessen und die erforderliche Anzahl an Prüfkörpern hergestellt. Diese werden in Bauteilversuchen geprüft. Über den Schritt der Rückrechnung lassen sich nun Aussagen zum Vergleich Referenzobjekt und Hauptausführung treffen.

#### 4.5.2.3 Bemessung und Skalierung

Referenzobjekt:

Der Vergleich des Masseneinsparpotentials der Gradientenbetondecken wird mit einer hochbautypischen Stahlbeton-Massivdecke mit den Abmessungen 5,0 x 1,0 x 0,2 m (L x B x H) geführt. Die Betongüte wird zu C20/25 angenommen. Die Decke wird durch ihr Eigengewicht und typische Ausbau- und Verkehrslasten beansprucht. Die Lasten werden zu zwei resultierenden Einzellasten in den Viertelpunkten analog zum Versuchsaufbau des Vierpunkt-Biegeversuchs zusammengefasst. Die Bemessung erfolgt nach DIN 1045-1:2008.

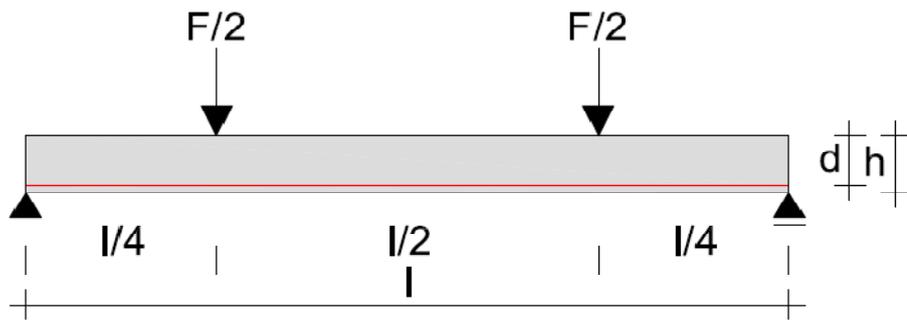


Abbildung 86: Referenzobjekt Massivdecke mit Punktlasten

Die Lasten und zugehörigen Beanspruchungen sind in Tabelle 46 zusammengefasst.

Tabelle 46: Belastung des Referenzobjekts

Belastung	$F_{Ek} =$	46,25 kN
Maximales Biegemoment $M_{Ek} = F_{Ek} \times l / 8$	$M_{Ek} =$	28,91 kNm
Maximale Querkraft $V_{Ek} = F_{Ek} / 2$	$V_{Ek} =$	23,13 kN

Hieraus ergibt sich eine erforderliche Biegebewehrung von 3,9 cm<sup>2</sup>/m und keine erforderliche Querkraftbewehrung. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass hierbei ohne Sicherheiten gerechnet wird, handelt es sich um einen üblichen Wert.

Hauptausführung:

Für die Hauptausführung der Gradientenbetondecke wurden dieselben Dimensionen (5,0 x 1,0 x 0,2 m) und Lasten wie für das Referenzobjekt angesetzt. Das Eigengewicht ist abhängig vom Aufbau des Bauteils. In einer ersten Abschätzung und unter Berücksichtigung der Herstellung wurden die Deckschichthöhen zu 10 mm und der Kern zu 180 mm gewählt. Die funktionale Gradierung erfolgte über die Länge des Elementes durch die Anpassung des leichten Kerns an die erforderliche Querkrafttragfähigkeit. Da es beim Vierpunkt-Biegeversuch nur zwei verschiedene Querkraftbereiche gibt, nämlich zwischen Auflager und Lasteinleitung sowie zwischen den zwei Lasteinleitungen, erfolgt die Gradierung in zwei Stufen (Abbildung 87). Die verwendeten Betonmischungen für die Kernmischung 1 (KM1), die Kernmischung 2 (KM2), die Deckschichtmischung (DM) und die textile Bewehrung werden in Abschnitt 4.5.2.4 beschrieben.

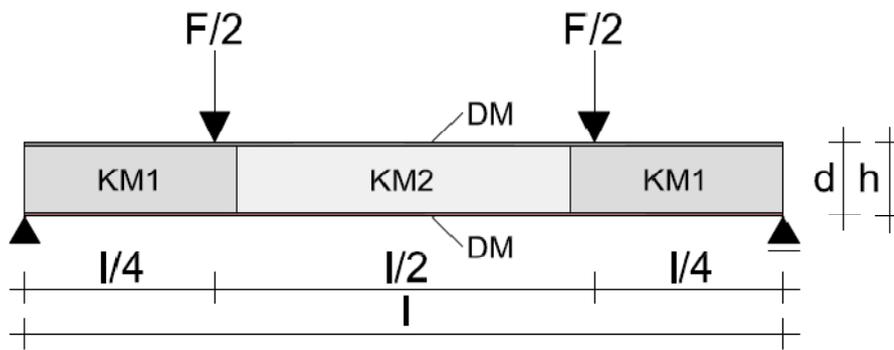


Abbildung 87: Hauptausführung der Gradientendecke

Die sich ergebenden Lasten und zugehörigen Beanspruchungen sind in Tabelle 47 zusammengefasst.

Tabelle 47: Belastung der Hauptausführung

Belastung	$F_{Ek} =$	31,25 kN
Maximales Biegemoment $M_{Ek} = F_{Ek} \times l / 8$	$M_{Ek} =$	19,53 kNm
Maximale Querkraft $V_{Ek} = F_{Ek} / 2$	$V_{Ek} =$	15,63 kN

Die Bemessung der Hauptausführung erfolgt analog zu [52]. Für die gewählten Materialien ergibt sich eine erforderliche Biegebewehrung von 182,6 mm<sup>2</sup> oder 191 Multifilamentfäden, die in zwei Lagen eingelegt werden können.

#### Skalierung und Bemessung der Modelle

Aufgrund der Handhabbarkeit der Bauteile und der Materialvolumina wird nicht die Hauptausführung gefertigt und geprüft, sondern skalierte Modelle hergestellt. In die Auswahl der Maßstäbe fließen bezüglich der Herstellbarkeit sowohl die maximale Prüflast der verfügbaren Prüfmaschine als auch minimale Deckschichtstärken der verwendeten Betonmischungen mit ein.

Im Rahmen des Projekts wurde eine nicht einheitliche Skalierung auf die Maße  $b \times h \times l = 0,1 \times 0,1 \times 1,0$  m realisiert. Die Skalierung wird hinsichtlich der Biegetragfähigkeit nach [53] vorgenommen.

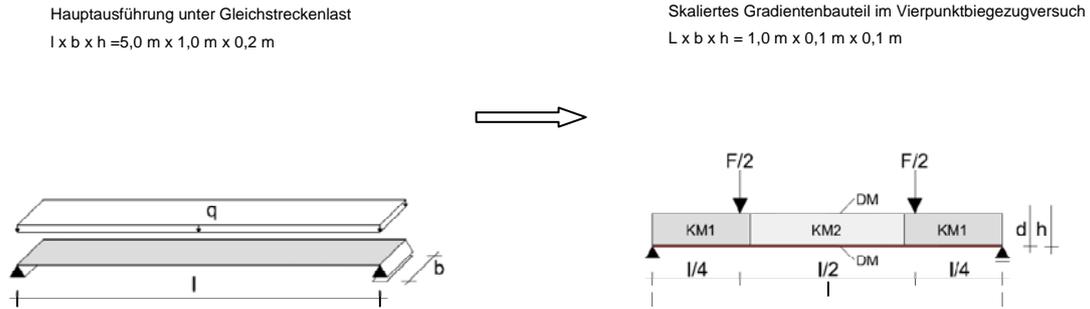


Abbildung 88: Skalierung der Bauteile und Anpassung an die Belastung bei der Prüfung

Es ergeben sich nachfolgende Maßstäbe unter der Annahme von Spannungs- und Dehnungsgleichheit für das Biegemoment im Modell (Index M) und der Hauptausführung (Index H):

Spannungs- und Dehnungsgleichheit in Modell und Hauptausführung:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M_H}{W_H} = \frac{M_M}{W_M} \tag{4.14}$$

Längenmaßstab:

$$l_{MS} = \frac{l_M}{l_H} = \frac{1,0}{5,0} = 0,2 \tag{4.15}$$

Breitenmaßstab:

$$b_{MS} = \frac{b_M}{b_H} = \frac{0,1}{1,0} = 0,1 \tag{4.16}$$

Höhenmaßstab:

$$h_{MS} = \frac{h_M}{h_H} = \frac{0,1}{0,2} = 0,5 \tag{4.17}$$

Hieraus ergibt sich eine Skalierung der Prüfkraft wie folgt

$$F_M = F_H \cdot \frac{b_{MS} \cdot h_{MS}^2}{l_{MS}} \tag{4.18}$$

und eine Skalierung der Momente wie folgt

$$M_M = M_H \cdot b_{MS} \cdot h_{MS}^2 \tag{4.19}$$

Die resultierenden skalierten Belastungen sind in Tabelle 48 aufgeführt.

Tabelle 48: Skalierte Belastung der Modelle

Belastung	$F_{Ek} =$	3,90 kN
Maximales Biegemoment $M_{Ek} = F_{Ek} \times l / 8$	$M_{Ek} =$	0,49 kNm
Maximale Querkraft $V_{Ek} = F_{Ek} / 2$	$V_{Ek} =$	1,95 kN

Für diese Lasten wird die Bemessung analog zur Hauptausführung durchgeführt. Für die gewählten Materialien ergibt sich eine erforderliche Biegebewehrung von  $9,2 \text{ mm}^2$ . Gewählt werden 11 Multifilamentfäden, die in einer Lage eingelegt werden können. Hieraus ergibt sich eine errechnete Prüflast für die Biegetragfähigkeit von  $4,52 \text{ kN}$ .

#### 4.5.2.4 Vorversuche

Um eine Dimensionierung der Bauteile durchführen zu können, wurden die betontechnologischen Kennwerte der verwendeten Mischungen (Tabelle 49) und die Bruchspannung der verwendeten textilen Bewehrung ermittelt. Hierzu wurden die erforderlichen Begleitprüfungen durchgeführt.

Tabelle 49: Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen der verwendeten Mischungen

	$\rho_{\text{FB,soll}}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{\text{cb}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Deckschichtmischung (RA)	2,27	88,4	14	35049,75
Kernmischung 1 (G02LM)	0,838	12,3	3,1	5232,49
Kernmischung 2 (KLM)	0,468	2,5	1,5	1022,57

Die Zugfestigkeit  $f_{\text{tm,fil,v}}$  der textilen Bewehrung im einbetonierten Zustand (Mischung RA) wurde an zwei Serien von Dehnkörperversuchen ermittelt.

Die Versuchsdurchführung und die Geometrie der Probekörper orientiert sich an den in [52] beschriebenen Versuchen. Hierbei wird die Effektivität  $k_1$  bestimmt, welche das Verhältnis zwischen der mittleren Bruchspannung der Filamente im Dehnkörperversuch und der Filamentzugfestigkeit beschreibt. Für ein epoxidharzgetränktes Gewebe liegt dieser Wert bei  $k_1 = 0,51$ . Im Rahmen des Versuchsprogramms wird das in Kapitel 4.3.2.6. und Tabelle 50 beschriebene Gewebe verwendet.

Tabelle 50: Allgemeine Daten der Bewehrung in den Dehnkörperversuchen

$F_{t,50mm}$	9876 N	Bruchkraft eines 50 mm breiten Streifens der Bewehrung im Anlieferungszustand (Herstellerangabe)
$n_V = n_{50mm}$	6	Anzahl der beanspruchten Fäden im Versuch bzw. eines 50 mm breiten Streifens der Bewehrung
$f_F$	0,0024 g/mm	Feinheit eines Schussfadens (Herstellerangabe)
$\rho$	0,0025 g/mm <sup>3</sup>	Dichte von Glas
$A_F$	0,96 mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche eines Fadens
$A_t$	5,76 mm <sup>2</sup>	Gesamtquerschnittsfläche der Fäden
$f_{t,50mm}$	1714,6 N/mm <sup>2</sup>	mittlere Filamentzugfestigkeit eines 50 mm breiten Streifens der Bewehrung im Anlieferungszustand

Die Abmessungen der Prüfkörper und der Versuchsaufbau sind in Abbildung 89 dargestellt.

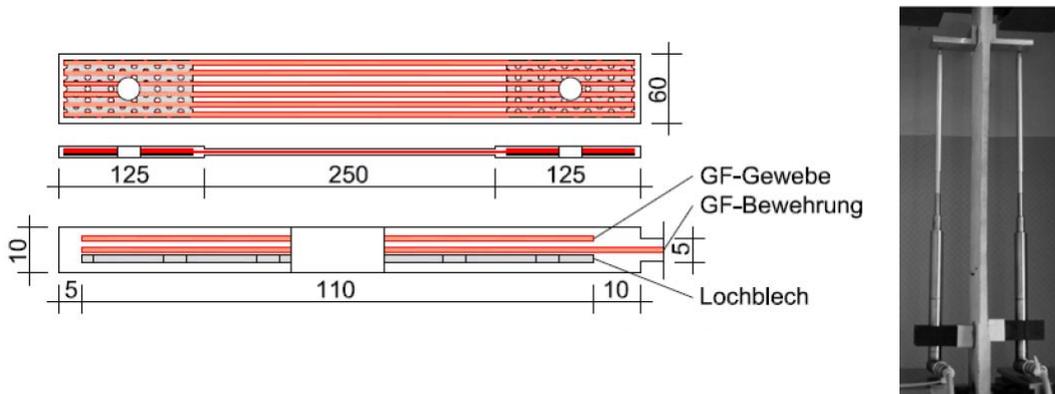


Abbildung 89: Dehnkörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit der textilen Bewehrung im eingebauten Zustand; Prinzipskizze (links), Versuchsaufbau (rechts)

Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt. Die Traversengeschwindigkeit betrug 0,005 mm/s. Die Steuerungs- und Messsoftware zeichnete während der Prüfung zwei Datensätze pro Sekunde auf, welche die Versuchsdauer, die Kraft und die Längenänderungen der beiden Wegaufnehmer enthielten.

Während der Versuchsdurchführung wurde die Rissbildung beobachtet. Bei den Dehnkörpern der Serie 2 bildeten sich 10 bis 14 Risse im verjüngten Messbereich mit einem Rissabstand von durchschnittlich 16 mm.

Die Auswertung Serie 2 ergibt eine mittlere Filamentzugfestigkeit der textilen Bewehrung im einbetonierten Zustand  $f_{tm,fil,V}$  von 457,73 N/mm<sup>2</sup>. Der Effektivitätsbeiwert des Gewebes  $k_{1,50mm}$  bestimmt sich im Mittel zu 0,267. Die mittlere Bruchdehnung  $\epsilon_{tm,V}$  beträgt 5,8 %.

Die Ergebnisse der Versuchsserie 2 sind in Tabelle 54 in Anhang 1 dargestellt. Mit den ermittelten Rechenwerten wurde eine erste Dimensionierung prüffähiger Modelle vorgenommen und diese gefertigt und geprüft. Hierbei wurden die Herstellbarkeit der Bauteile sowie der Verbund

zwischen den Schichten und die Bruchfestigkeit der Bewehrung unter Biegezugbelastung geprüft.

Die Glasfaserbewehrung erreichte unter Biegezugbeanspruchung größere rechnerische Bruchspannungen als im Zugversuch. Dies liegt an der Verbesserung der Verbundeigenschaften und der Aktivierung der inneren Filamente aufgrund der Umlenkpressung an den Risskanten infolge der Krümmung des Balkens.

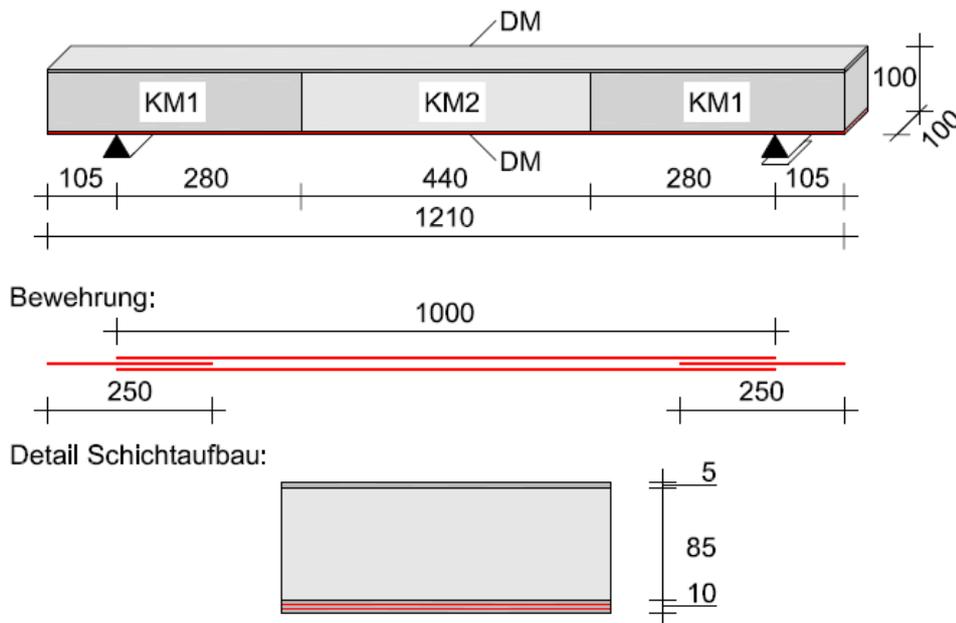


Abbildung 90: Prüfkörper der Vorversuche



Abbildung 91: Gradientendecken Prüfkörper Vorversuch (Balken 10 x 10 x 120 cm)

Aus den Vorversuchen der Bauteile konnte das Herstellverfahren verbessert sowie der Prüfvorgang und die Messtechnik erprobt werden (Abbildung 90 und Abbildung 91). Der Beiwert der Bruchfestigkeit der textilen Bewehrung unter Biegezugbelastung wurde vorläufig zu  $k_{fl} = 1,25$  bestimmt und die Dimensionierung der Bauteile in einem ersten Schritt validiert. Die detaillierten Ergebnisse der Bauteil-Vorversuche sind in Anhang 1 dargestellt.

#### 4.5.2.5 Herstellung der Bauteile

Der Herstellung der Bauteile kommt bei den Gradientenbeton Bauteilen eine besondere Bedeutung zu, da die Bauteile aus mehreren Mischungen im Schichtenverfahren zusammengesetzt wurden. Die Herstellung erfolgte Nass-in-Nass, um einen optimalen Verbund zwischen den einzelnen Schichten zu gewährleisten.

Bei den Vorversuchen, bei denen verschiedene Herstellungsverfahren erprobt wurden, hat sich die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise als sinnvoll erwiesen. Es wurde zuerst die 5 mm dünne Deckschicht der Druckzone betoniert, da diese möglichst präzise hergestellt werden muss, um ein vorzeitiges Ausknicken aufgrund von Fehlstellen zu vermeiden. Auf diese unbewehrte Deckschicht wurde nun der nach den Erfordernissen der Schubtragfähigkeit dimensionierte, gradierte Kern getrennt durch Abschnittsbleche eingebaut. Nach Ziehen der Trennbleche wurde eine dünne Betonschicht für die Zugzone betoniert. In diese Schicht wurde die textile Bewehrung eingelegt und mit einer weiteren, möglichst dünnen Schicht bedeckt. Die Einzelschritte sind in Abbildung 92 dargestellt.

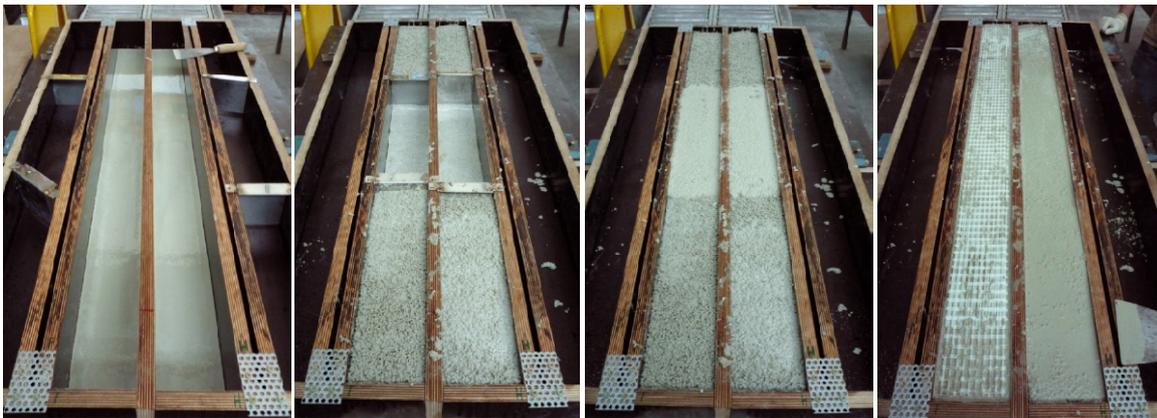


Abbildung 92: Herstellung der Bauteile (Balken 10 x 10 x 120 cm)

Die Bauteile wurden nach einem Tag ausgeschalt und dann 28 Tage bis zur Prüfung in einem klimatisierten Raum mit 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 100 % gelagert.

Vor der Prüfung wurden die Bauteile vermessen, gewogen und mit einem Lack zur Rissdetektion überzogen.

#### 4.5.2.6 Bauteilprüfung

Im weggesteuerten Vierpunkt-Biegeversuch an Bauteilen wurden das Last-Verformungsverhalten und die Tragfähigkeit von funktional gradierten Deckenelementen untersucht. Die Prüfungen wurden in Anlehnung an [54] und [55] durchgeführt. Die Lasteinleitung erfolgte in den Viertelpunkten. Die maximale Prüflast der Prüfmaschine liegt bei 20 KN. Die Prüfung erfolgte weggesteuert mit einer Traversengeschwindigkeit von 0,1 mm/s. Diese Geschwindigkeit

erfüllt die Forderung der DIN 53293:1982 nach einer Versuchsdauer von 1 bis 3 Minuten. Als Abbruchkriterium wurde ein Lastabfall von 60 % definiert. Gemessen und aufgezeichnet wurden der Traversenweg, die Prüflast und die Verformungen in Feldmitte mit zwei induktiven Wegaufnehmern mit einem Messbereich von 20 mm.

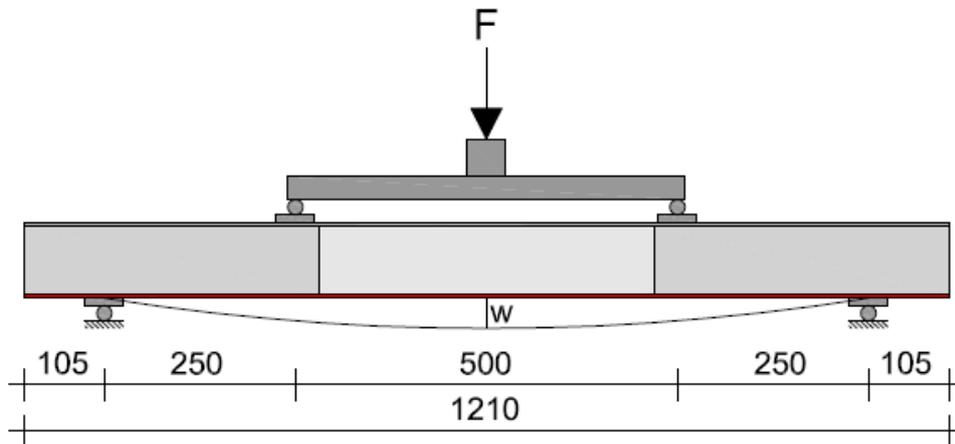


Abbildung 93: Schema des Biegeversuchs

Die Traverse wurde aufgesetzt, bis die Prüfmaschine einen Widerstand von 0,1 kN erkannte. Danach wurde der Versuch bis zum Bruch gefahren. Dieser konnte durch Schubversagen oder Biegezugversagen erfolgen.

Insgesamt wurden acht Prüfserien geprüft. Die maßgebenden Prüfserien sind die Prüfserien 3 bis 6, deren Auslegung in Tabelle 51 beschrieben ist.

Tabelle 51: Versuchsserien 3 bis 6

	Modelle der Serien SV3 & SV4	Modelle der Serien SV5 & SV6	Bemerkung
$A_{t,vorh}$	19,20 mm <sup>2</sup>	10,56 mm <sup>2</sup>	Feldbewehrung
$\Delta A_t$	-	9,60 mm <sup>2</sup>	Zulage für Querkraft
$M_{Rk}$	1,04 kNm	0,57 kNm	Mit $k_{fl} = 1,25$
$F_{Traglast}$	8,35 kN	4,49 kN	Aus $M_{Rk}$
$V_{Rk}$	3,74 kN	3,75 kN	charakteristisch berechnete Querkrafttragfähigkeit
$F_{Traglast}$	7,48 kN	7,50 kN	Aus $V_{Rk}$
Bemessen für	Querkraftversagen	Biegeversagen	

#### 4.5.2.7 Versuchsergebnisse

Die Auswertung der Messwerte der Versuche ergeben das in Abbildung 94 dargestellte Verhalten bei Querkraftversagen und das in Abbildung 95 dargestellte Kraft-Verformungsverhalten für ein Biegezugversagen. Gut zu erkennen ist der Bereich im Zustand I bis ca. 45 % der Bruchlast. Danach findet eine Rissbildung mit einer gleichmäßigen Verteilung der Risse im Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten und damit der Übergang in den Zustand II statt. Dies belegt die abgesunkene Steifigkeit in diesem Bereich. Der Versuch endet mit dem Überschreiten der Zugfestigkeit der textilen Bewehrung oder Schubversagen. Einen Zustand III mit einem konstanten Lastniveau bei steigender Verformung gibt es aufgrund der geringeren Duktilität der textilen Bewehrung nicht. Das Bauteil versagt spröde.

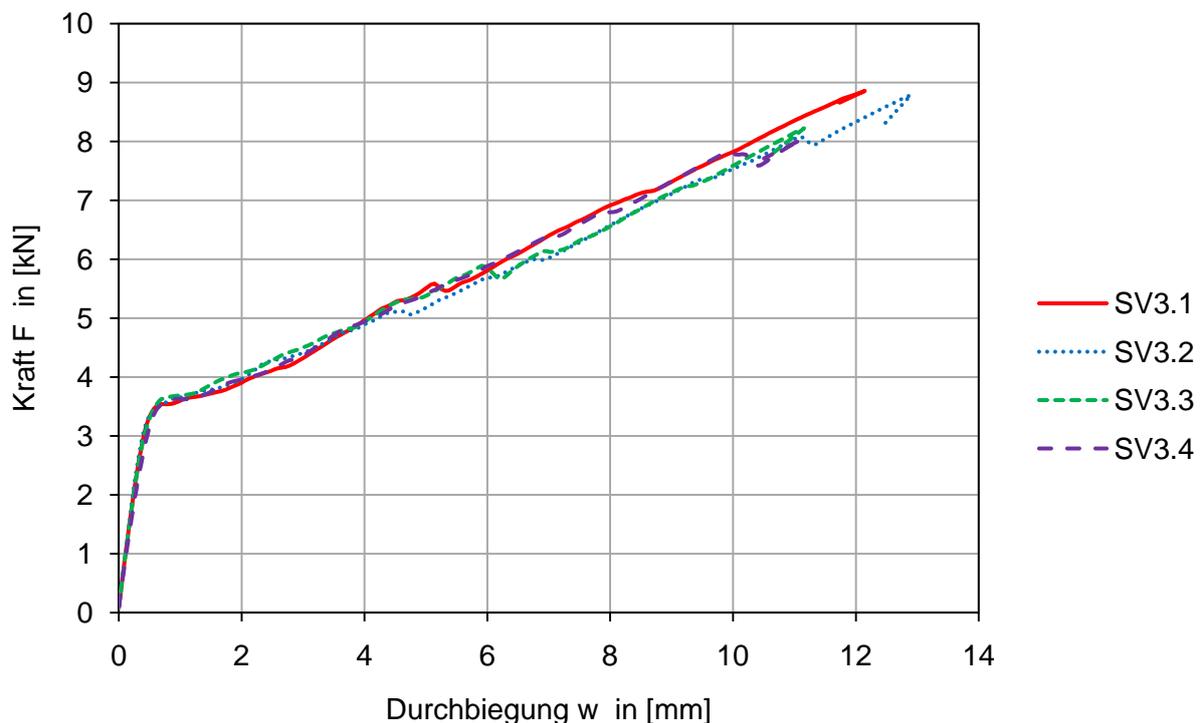


Abbildung 94: Kraft-Verformungsdiagramm der Versuchsserie 3 (Querkraftversagen)

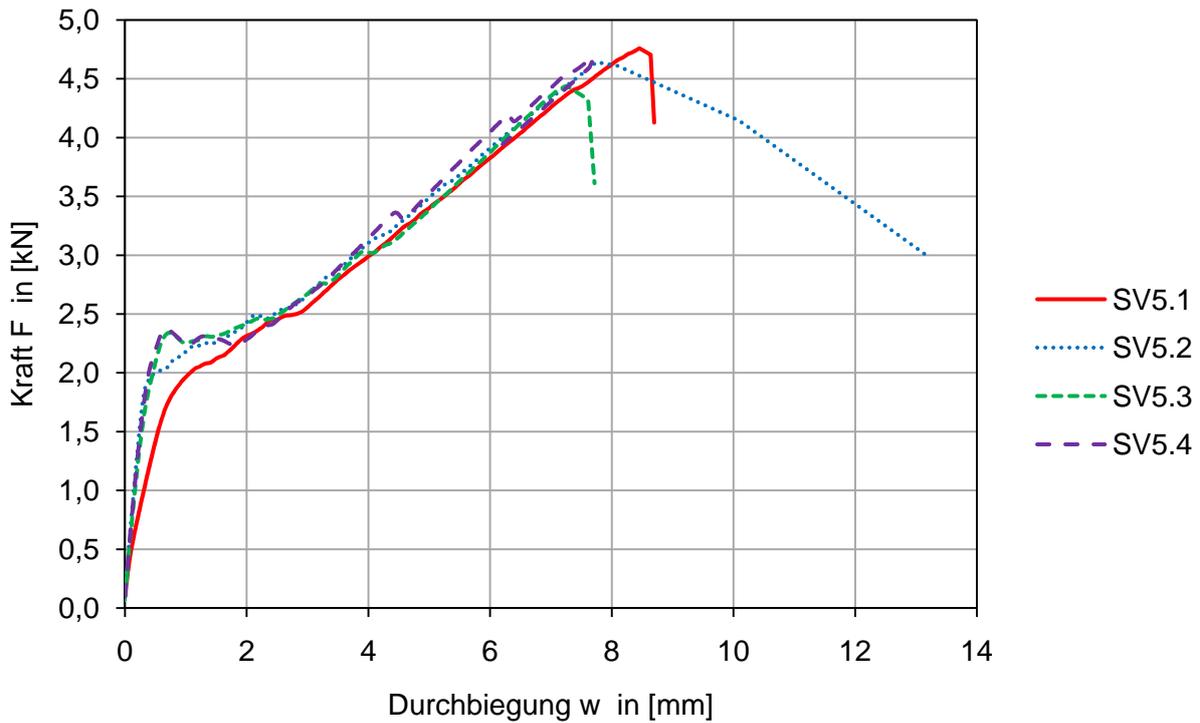


Abbildung 95: Kraft-Verformungsdiagramm der Versuchsserie 5 (Biegeversagen)

Ein Vergleich der Bauteilversuche mit den berechneten Ergebnissen aus der Bemessung und Skalierung liefert folgende Ergebnisse:

Tabelle 52: Ergebnisse Bemessung der Versuchsserie 5

Belastung aus Skalierung	3,90 kN
Maximales Biegemoment	0,49 kNm
$A_{\text{erf}}$	9,47 mm <sup>2</sup>
erf. Schussfäden	9,86 Fäden
vorh. Schussfäden	11,00 Fäden
Biegetragfähigkeit	0,55 kNm
Traglast	4,4 kN

Tabelle 53: Bauteilversuche der Versuchsserie 5

Bauteilversuche Serie 5	Traglast [kN]
5.1	4,76
5.2	4,65
5.3	4,44
5.4	4,68
Mittelwert	4,63

Die erreichte Traglast der Bauteile entspricht den errechneten Werten. Der Mittelwert der Bauteilversuche liegt um 5 % über den berechneten Werten bei Biegezugversagen. Die geprüfte Querkrafttragfähigkeit der Versuchsserien 3 und 4 liegt durchschnittlich 13,8 % über der be-

---

rechneten Querkrafttragfähigkeit (Anhang 2). Dies liegt auch an der aus Herstellungsgründen zusätzlich eingelegten Bewehrung.

Die guten Übereinstimmungen der Bauteile innerhalb einer Serie zeigen die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der Herstellung der Bauteile. Dies könnte durch einen industriellen Herstellungsprozess noch weiter verbessert werden.

In Anhang 2 sind alle vier Serien der Hauptversuche dokumentiert.

#### 4.5.2.8 Diskussion der Ergebnisse und weiteres Vorgehen

Erste Bauteilversuche belegen die Machbarkeit und das Masseneinsparpotential der funktional gradierten Elementdecken.

Hierbei konnte bei gleicher Tragfähigkeit eine Massenersparnis von ca. 60 % gegenüber einer massiven Flachdecke realisiert werden. Die mittlere Dichte der Modelle und somit auch der Hauptausführung der Gradientendecke beträgt  $910 \text{ kg/m}^3$ , woraus sich eine Eigengewichtsreduktion von ca. 60 % gegenüber einer massiven Ausführung aus Normalbeton ergibt.

Zum Übertrag auf Bauteilversuche im Maßstab 1:1 müssen jedoch einige Änderungen vorgenommen werden.

Die verwendete textile Bewehrung ist nur mit Schussfäden in einer Länge bis zu 1,0 m verfügbar. Die Effektivität der Glasfaserbewehrung im eingebauten Zustand liegt bei ca. 26 % der Bruchspannung der Faser. Die Langzeitbeständigkeit der Glasfaserbewehrung ist trotz alkaliresistenter Beschichtung noch nicht geklärt. Entsprechende erste Einschätzungen gehen von einem Festigkeitsverlust von 50 % über den Lebenszyklus von 50 Jahren aus [29]. Des Weiteren verliert die Glasfaserbewehrung im Brandfall sehr schnell ihre Festigkeit und fällt aus.

Aus den oben genannten Gründen sollen die funktional gradierten Elementdecken sowohl für eine textile Bewehrung, die aufgrund geringer erforderlicher Betondeckungen eine maximale Massenersparnis ermöglicht, als auch für konventionelle Stahlbewehrung, die aufgrund ihrer anerkannten Bemessungsregeln eine schnelle Umsetzbarkeit für den Markt ermöglicht, weiterentwickelt werden. Dies garantiert die Einsatzmöglichkeit der Gradientendecken bei verschiedenen Anforderungen bezüglich Umweltbedingungen und Brandschutz.

In dem fortführenden Forschungsvorhaben „Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierter Elementdecken“ sollen Berechnungs- und Simulationswerkzeuge entwickelt und durch weitere Bauteilversuche validiert werden.

Die Simulationen sollen den genauen Lastabtrag der Bauteile darstellen und durch eine numerische Optimierung weiteres Masseneinsparpotential aufzeigen. Hiermit kann die theoretische Obergrenze ermittelt werden, die dann unter Einschränkung der Herstellbarkeit umgesetzt werden kann.

Die Bauteilversuche im Labormaßstab sollen auf die Produktion im Fertigteilwerk in enger Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern erweitert werden.

## 5 Polymere

### 5.1 Grundlagen

Die Ansätze zur Herstellung von Bauteilen mit kontrolliert inhomogener Porosität, die in diesem Kapitel behandelt werden, konzentrieren sich auf Verfahren zur Modifikation von offenzelligen Schaumstoffen aus Polyurethan.

#### 5.1.1 Rohstoff

Polyurethane (PU, DIN-Kurzzeichen: PUR) sind Kunststoffe oder Kunstharze, welche aus der Polyadditionsreaktion von Diolen beziehungsweise Polyolen mit Polyisocyanaten entstehen. Polyurethane können je nach Herstellung hart und spröde, aber auch weich und elastisch sein. Schaumstoffe aus Polyurethan können in Hart- und Weichschäume eingeteilt werden. Im Folgenden kommen, auf Grund des Gradierungsverfahrens, ausschließlich retikulierte Polyurethan-Weichschäume zum Einsatz. Das „Retikulieren“ ist ein Verfahren der Schaumnachbearbeitung, wobei die bei der Produktion entstehenden dünnen „Häutchen“ zwischen den einzelnen Schaumstoffzellen durch ein thermisches Verfahren zerstört werden (Abbildung 96). Somit entsteht ein offenzelliger und damit durchströmbarer Schaumkörper. Auf Grund dieser Eigenschaft finden Schaumstoffe dieser Art vorzugsweise Anwendung als Filter und werden daher auch als Filterschäume bezeichnet. Die Porosität derartiger Schäume ist durch die Einheit „pores per inch“ (ppi) definiert. Zur Bestimmung der Porosität wird an mehreren Materialproben linear die Anzahl der Poren auf der Länge von einem Inch (2,54 cm) gezählt und anschließend der Mittelwert gebildet.

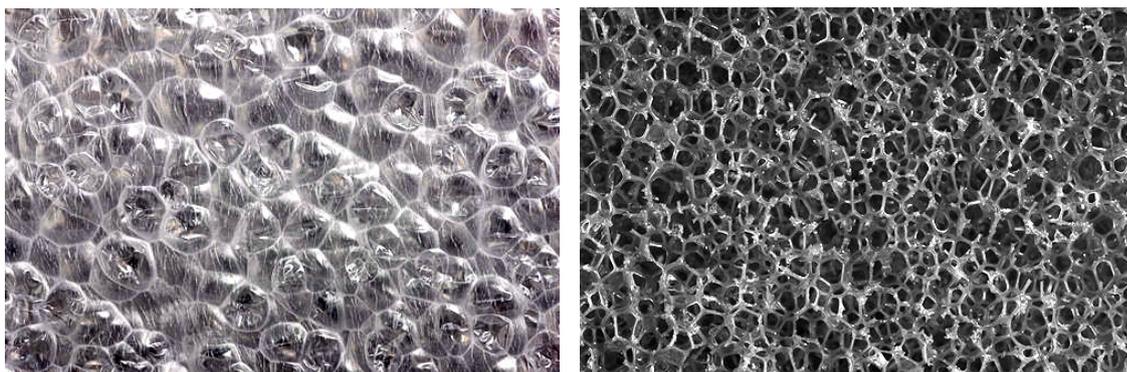


Abbildung 96: Polyurethanschaum vor und nach dem Retikulieren

## 5.2 Herstellung

Die im Folgenden beschriebenen Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit gradierter Porosität aus Polyurethan-Filterschaumstoffen basieren auf einem dreistufigen Vorgehen. Dieses Vorgehen wurde prinzipiell von Cichocki [56] für die Herstellung gradierter Filter für Anwendungen in Brennstoffzellen beschrieben:

1. Schaumzuschnitt – Definition des späteren Porositätsverlaufs
2. Komprimieren – Definition der Bauteilgeometrie
3. Konsolidieren – Definition der Materialeigenschaft, Fixierung der Gradierung

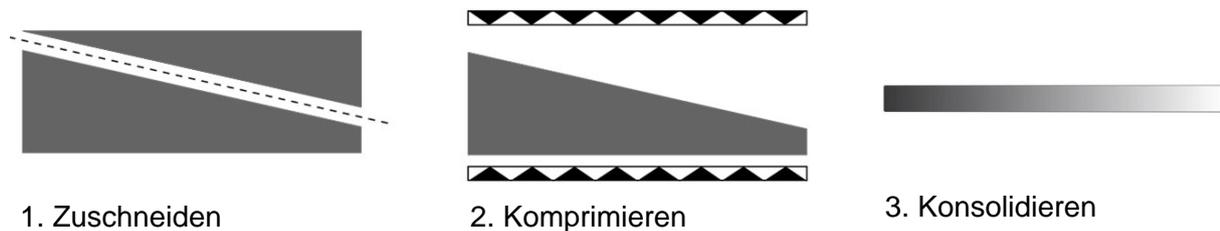


Abbildung 97: Prinzipskizze: Herstellung gradiert poröser PUR Filterschäume

### 5.2.1 Zuschnitt

Der Zuschnitt von Polyurethan-Filterschaumstoffen erfolgt vorzugsweise mit Hilfe thermischer Sägen. Alternativ können geeignete mechanische Sägen und Fräsen eingesetzt werden.

#### 5.2.1.1 Thermosäge

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Thermosägen konstruiert, die das Zuschneiden von Schaumstoffkörpern unterschiedlicher Größe erlauben.

Die Sägen bestehen prinzipiell aus fünf Komponenten:

1. Halterung zur Spannung eines Drahtes über die gewünschte Schnittlänge
2. Vorrichtung, die das Nachspannen des Drahtes zur Kompensation von Längenänderungen auf Grund thermischer Ausdehnung erlaubt
3. Widerstandsdraht, dessen Länge in Verbindung mit dem Widerstand des Drahtes die Anforderungen an Spannung und Stromstärke definiert
4. Verkabelung zur Verbindung des Widerstandsdrahts mit dem Netzteil
5. Netzteil mit der Möglichkeit die Spannung und Stromstärke in Hinblick auf den verwendeten Draht und zur Einstellung der notwendigen Drahttemperatur zu variieren

---

### Säge 1 - Tischgerät

Das Tischgerät erlaubt Zuschnittsbreiten von bis zu 30 cm. Es eignet sich vor allem für die Herstellung gerader Schnitte und Winkel bei kleineren Teilen.

Drahtwiderstand: 10  $\Omega$ /m

Drahtlänge: 0,4 m

Drahtdurchmesser: 0,25 mm

Leistungsaufnahme: 36 W (12 V, 3 A)

Widerstand der Verkabelung: 0,1  $\Omega$

### Säge 2 - Freihandschneider

Der Freihandschneider ermöglicht das Bearbeiten von größeren Schaumstoffkörpern. Es lassen sich frei geführte gerade Schnitte mit einer Breite von 40 bis 75 cm durchführen.

Drahtwiderstand: 2,5  $\Omega$ /m

Drahtlänge: 0,5 m

Drahtdurchmesser: 0,5 mm

Leistungsaufnahme: 63 W (9 V, 7 A)

Widerstand der Verkabelung: 0,3  $\Omega$

#### 5.2.1.2 Zuschnittsgeometrie

Die Festlegung der Zuschnittsgeometrie dient der Definition des späteren Porositätsgradienten. Sie folgt dem Grundsatz, dass eine Dichtegradierung durch ein unterschiedlich starkes Komprimieren eines homogenen Ausgangsschaums erreicht werden kann.

In Abhängigkeit von der Bauteilgröße ist der Einfluss des zunehmenden Verformungswiderstandes des Schaumkörpers bei fortschreitender Eindringtiefe zu berücksichtigen, wie unter 5.2.2 beschrieben.

Somit kann die Notwendigkeit eines dreidimensionalen Zuschnittes entstehen, verbunden mit einem mehrseitigen Pressvorgang im darauf folgenden Arbeitsschritt. Ein Beispiel für eine anwendungsbezogene Zuschnittsentwicklung ist unter 5.3.2 dargestellt.

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen den Zusammenhang von Zuschnittsgeometrie und der daraus resultierenden Gradierung.

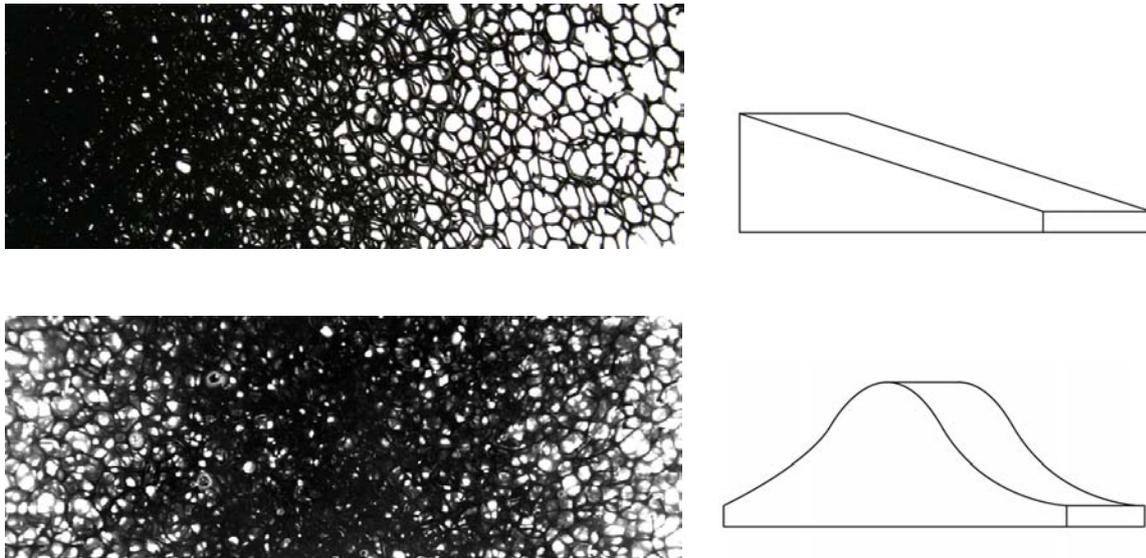


Abbildung 98: Porositätsgradient und dazugehörige Zuschnittsgeometrie (Probekörper:  $l \times b \times h = 110 \times 40 \times 5 \text{ mm}$ )

### 5.2.2 Komprimieren

Für das Komprimieren des Schaumes muss eine geeignete Negativform hergestellt werden, die die Geometrie des herzustellenden Bauteils abbildet. Die Anforderungen an die Form hinsichtlich Temperaturbeständigkeit und Oberflächenbeschaffenheit ergeben sich aus dem gewählten Konsolidierungsverfahren. Das Komprimieren kann von einer oder mehreren Seiten erfolgen, in Abhängigkeit vom gewünschten Eigenschaftsverlauf, der Härte des Schaumes sowie der Bauteilgeometrie.

Bei der Komprimierung ist der Einfluss des anwachsenden Verformungswiderstandes des Schaumes bei zunehmender Kompression zu berücksichtigen. Abbildung 99 zeigt das Verhalten eines Schaumstoffkörpers (10 ppi) während des Kompressionsprozesses. Die nebenstehenden Graustufenverläufe verdeutlichen den Komprimierungsgrad.

Dabei nimmt zunächst die Verdichtung von der Eindruckrichtung her bis zu einem lokalen Kompressionsmaximum zu. Zwischen diesem Bereich und dem nicht komprimierten Schaum stellt sich ein deutlicher Gradient ein. Dieser bleibt nahezu unverändert und verschiebt sich in Druckrichtung. Mit fortschreitender Kompression baut sich von der gegenüberliegenden Seite der Eindruckrichtung ein zweiter Kompressionsbereich auf. Diese qualitativen Beobachtungen sind hinsichtlich des jeweiligen Anwendungsbereichs weitergehend zu untersuchen und zu quantifizieren.

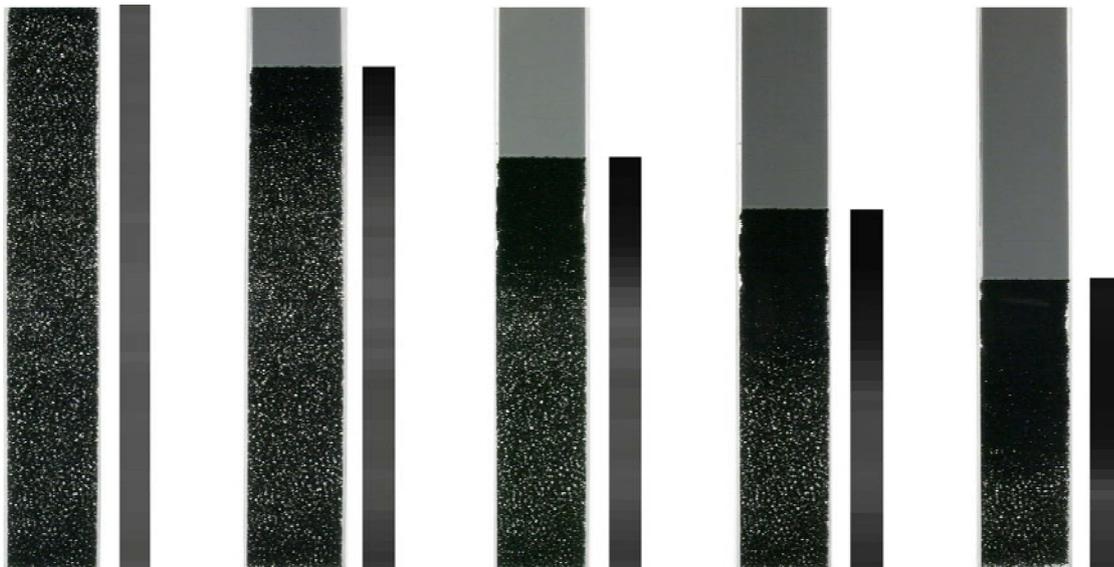


Abbildung 99: *Kompressionsverhalten bei zunehmender Eindringtiefe (Probekörper:  $l \times b \times h = 300 \times 50 \times 20 \text{ mm}$ )*

### 5.2.3 Konsolidieren

Die Konsolidierung dient der Fixierung des durch den Pressvorgang eingestellten Porositätsgradienten. Außerdem wird durch das gewählte Konsolidierungsverfahren die Materialeigenschaft des erstellten Bauteils definiert. Im Folgenden werden vier Ansätze unterschieden.

#### 5.2.3.1 Thermisches Konsolidieren

Durch eine Wärmebehandlung ist es möglich, die durch die Komprimierung eingestellte Schaumstruktur dauerhaft zu fixieren. Hierbei bleibt die Elastizität des Schaumes erhalten. Die dauerhafte Fixierung des Schaumes erfolgt durch Anschmelzen der Oberfläche der Schaumstege und einer Neuvernetzung sich berührender Stege während des Abkühlens. Der Härtegrad des Schaumes variiert hiernach in Abhängigkeit vom Komprimierungsgrad. Es wurden verschiedene Versuchsreihen zu Prozesstemperaturen und -zeiten durchgeführt.

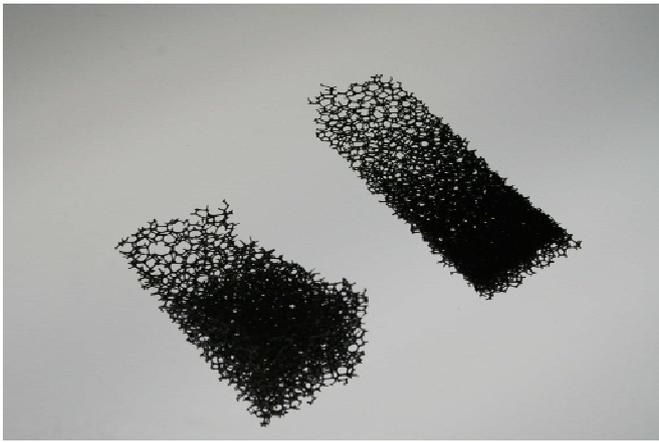


Abbildung 100: Probekörper vor und nach der thermischen Konsolidierung

Hierfür wurde bei einer Temperatur von 235 °C und einer Verweildauer im Ofen von 35 Minuten begonnen. Temperatur und Dauer wurden schrittweise solange gesenkt, bis die gewünschte Fixierung nicht mehr zu beobachten war. Somit konnte eine geeignete Prozessroutine entwickelt werden. Eine Temperatur von 190 °C bei einer Verweildauer von 20 Minuten, wobei sich der Probekörper bereits während der Aufheizphase im Ofen befand, erwies sich als zielführend. Probekörper mit Abmessung von  $l \times b \times h = 23 \times 3 \times 1$  cm wurden untersucht. Bei größeren Schaumvolumina ist der Isolationseffekt des Schaumes zu berücksichtigen. Hierbei können deutlich längere Verweilzeiten im Ofen erforderlich werden. Die Durchströmbarkeit des offenzelligen Schaumes kann sich in diesem Zusammenhang als vorteilhaft erweisen, da hierbei durch ein Heißluftverfahren der Schaum gleichmäßig erwärmt werden kann.



Abbildung 101: Porositätsgradient nach Wärmebehandlung (Probekörper:  $l \times b \times h = 200 \times 30 \times 10$  mm)

### 5.2.3.2 Konsolidieren durch Infiltration

Als Infiltrationsverfahren werden im Folgenden Techniken bezeichnet, bei denen der offenzellige PUR-Schaum mit einer zweiten Phase getränkt oder durchströmt wird; dies führt zu einer Beschichtung der Schaumstege. Das verwendete Infiltrationsmaterial bestimmt die Eigenschaften des Bauteils maßgeblich. Eine Gradierung kann entweder durch die gleichmäßige Beschichtung eines gradierten Schaumes oder durch selektive Infiltration eines homogen-porösen Schaumkörpers erreicht werden.

Der Grad der Beschichtung hängt im Wesentlichen von der Viskosität des Infiltrationsmaterials, den Adhäsionseigenschaften zwischen den Phasen und der Anzahl der Wiederholungen der Infiltration ab. Durch mehrmaliges Infiltrieren kann die Beschichtungsdicke der Schaumstege ge-

steuert werden. Die Offenzelligkeit dieser Bauteile eröffnet die Möglichkeit der Bauteilaktivierung. Durch Verwendung transparenter Infiltrationsharze können transluzente Bauteile hergestellt werden.

Als Infiltrationsmaterial eignen sich Materialien, die mit PUR-Schaum chemisch kompatibel sind und bei Temperaturen unter 80 °C in flüssiger Phase vorliegen.

Exemplarisch wurden Versuche mit 2-Komponenten-Acrylharz und Zementmilch durchgeführt.

### Infiltration mit Acrylharz

Die Infiltration mit Acrylharz wurde experimentell untersucht. Hierbei muss ein lufthärtendes Harz (Harz: UP 303 BMT, Härter: Curox M-300, Hersteller: Lange + Ritter) verwendet werden. Aufgrund der Offenzelligkeit des Schaumes kann ein Herstellungsverfahren gewählt werden, bei denen das Harz die Vorform kontinuierlich oder schrittweise durchströmt (Abbildung 102).

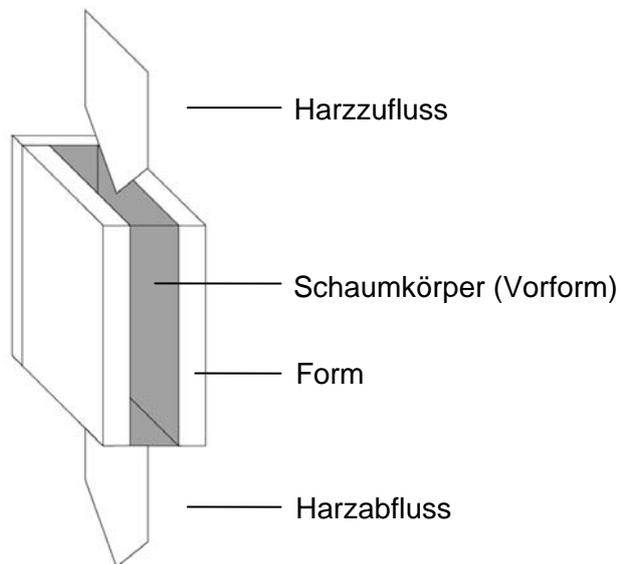


Abbildung 102: Prinzipskizze: Herstellungsverfahren Infiltration

Die Lichtdurchlässigkeit des Schaumes ist nach der Infiltration mit dem transparenten Harz nicht beeinträchtigt. Ein teilweises Schließen der Zellwände erhöht die Steifigkeit des Schaumes. Bei offenzelligen Strukturen bleibt die Durchströmbarkeit des Bauteils erhalten.

Es wurden zwei Verfahrensvarianten erprobt:

#### 1. Infiltrieren eines bereits gradierten Schaumkörpers

Hierbei wird in Abhängigkeit des Verpressungsgrades die Infiltration erschwert, wenn die Schaumzellen so stark komprimiert wurden, dass die Durchströmbarkeit dadurch behindert wird.

## 2. Infiltrieren des zugeschnittenen Schaumkörpers mit anschließendem Komprimieren

Hierbei kann das oben genannte Problem vermieden werden. Das Verfahren ist auf einmaliges Infiltrieren beschränkt – größere Beschichtungsstärken können nicht aufgebracht werden.



Abbildung 103: Acrylharzinfiltrierter PUR-Schaum, 10 ppi (Porendurchmesser: 2 bis 3 mm)

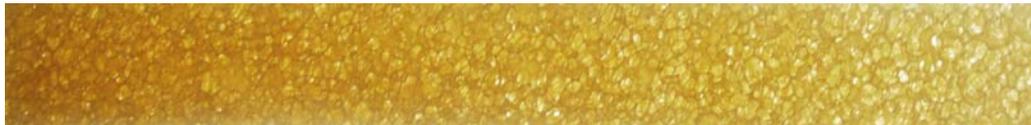


Abbildung 104: Gradiert infiltrierter PUR-Schaum (Acrylharz) (Probekörper:  $l \times b \times h = 255 \times 30 \times 10$  mm)

### Infiltration mit Zementmilch

Schaumvorformen wurden mit Zementmilch infiltriert. Durch Wiederholung des Vorgangs konnte die Beschichtungsstärke variiert werden.

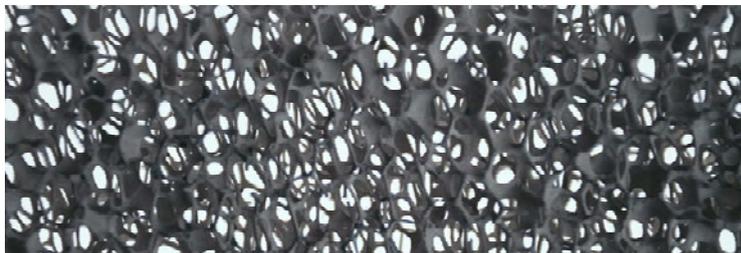


Abbildung 105: Mit Zement infiltrierter PUR-Schaum, 10 ppi (Porendurchmesser: 2 bis 3 mm)

Durch mehrmaliges Infiltrieren der Vorform mit Zementmilch bei sukzessiver Reduktion des Infiltrationsbereichs konnte die Gradierung einer Schaumstoffvorform mit homogener Zellstruktur erreicht werden.

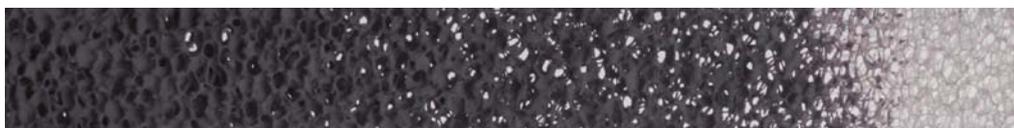


Abbildung 106: Gradiert infiltrierter PUR-Schaum (Zement) (Probekörper:  $l \times b \times h = 255 \times 30 \times 10$  mm)

Aufgrund des Verbleibens der PUR-Schaumstruktur im Betonvolumen erscheint dieses Verfahren aus ökologischen Gesichtspunkten, vor allem in Hinblick auf ein späteres Recycling, als nachteilhaft. Statt Polyurethan sollten Vorformen aus Materialien recherchiert und erprobt werden, die ökologisch weniger bedenklich sind. Des Weiteren erscheint das verwendete Material als zu feinporig für eine bautechnische Anwendung.

### 5.2.3.3 Einbetten

Das Fixieren einer gradierten Schaumstruktur durch Einbetten in eine zweite Phase wurde untersucht. Dies stellt ein einfaches Verfahren zur Konservierung des definierten Porositätsgradienten dar. Es wurden zunächst Versuche mit transparentem 2-Komponenten-Polyesterharz durchgeführt, um die Porenstruktur auch nach dem Eingießen beurteilen zu können.

Beim Anschleifen der Oberfläche im Zuge der Nachbearbeitung traten Lufteinschlüsse zu Tage, die sich im Falle einer Einbettung in Beton oder keramische Matrices als problematisch erweisen könnten.



Abbildung 107: Gradiertes PUR-Schaum in Polyesterharz (Probekörper:  $l \times b \times h = 210 \times 55 \times 15 \text{ mm}$ )

Daraufhin wurde das Einbetten von Schäumen in Beton untersucht. Hierbei können nur sehr feinkörnige Betonrezepturen verwendet werden, da ansonsten das Verstopfen der Schaumporen durch Zuschlagskörner ein Ausgießen verhindert. Es wurden exemplarisch Versuche mit verschiedenen Betonrezepturen durchgeführt (UHPC, Feinkornmischung (Zement, Quarzmehl, Wasser)).

Anschließend wurde die Möglichkeit erprobt, Schaumeinlagen durch Pyrolyse zu entfernen.

Hierfür wurden die Proben mittig im ausgeschalteten Brennofen (Maximaltemperatur: 1200 °C) platziert. Die Temperatur wurde in Abstufungen von 100 °C alle 10 Minuten bis auf 900 °C erhöht. Bei jeder Temperaturstufe wurde das Schaumverhalten beobachtet. Bei einer Temperatur von ca. 250 °C konnte das Verkohlen des Schaumes festgestellt werden, bei 700 bis 800 °C waren keine Schaumrückstände mehr zu erkennen. Nach langsamem Abkühlen im ausgeschalteten Ofen und Schneiden der Proben konnte das Ergebnis bewertet werden.

Der Schaum hinterließ deutlich erkennbare Hohlräume im Beton. Die UHPC-Mischungen wiesen abgesehen von äußeren Haarrissen keine zu erkennenden Schädigungen durch die Temperaturbehandlung auf. Die Feinkornmischung war zwei Tage nach Abkühlung von deutlichen Rissen durchzogen.

Durch die Temperaturbehandlung des Betons sind Gefügeschädigungen festzustellen, die das Verfahren des Ausbrennens von Schaumeinlagen als wenig empfehlenswert erscheinen lassen. Bei den UHPC-Proben könnten die Schaumeinlagen dem Brandschutz oder der Erhöhung der Frostbeständigkeit dienen, da Expansionsraum zur Kompensation thermischer Ausdehnung geboten wird. Diese These müsste durch weitergehende Untersuchungen verifiziert werden.

Ein weiterer Ansatz, das Ausgießen der entstandenen Hohlräume mit Metall als Möglichkeit der Bewehrung, wurde aus den oben genannten Gründen nicht weiter verfolgt.

#### 5.2.3.4 Konsolidieren durch Replizieren

Es besteht die Möglichkeit, Vorformen aus PUR-Schaum in Metall abzubilden. Das Verfahren wurde von der Firma m-pore [57] entwickelt und basiert auf dem Prinzip der verlorenen Form. Dabei wird ein Modell aus PUR-Schaum in einen Formstoff eingebettet und ausgeschmolzen. Die im Formstoff entstandenen Hohlräume werden sodann mit Metall ausgegossen. Nachdem das Metall erstarrt ist, wird der Formstoff entfernt. Das Verfahren ist geeignet für alle Arten von offenporigen zellularen Strukturen, insbesondere offenporigen Metallschäumen. Gradierte Metallschäume können dadurch hergestellt werden, dass eine gradierte PUR-Vorform verwendet wird.



Abbildung 108: Metallschäume als Replikate von PUR-Schäumen [57]

Abfolge der Verfahrensschritte:

1. Schaumzelle aus Polyurethan als Vorform, ggf. gradiert
2. Ausgießen der Vorform mit temperaturbeständigem Formstoff
3. Thermisches Herauslösen der Vorform (Pyrolyse)
4. Füllen der zurückbleibenden Hohlräume mit Metall
5. Entfernen des Formstoffs – der Metallschaum liegt als Abbild des PUR-Schaumes vor
6. Möglichkeit zur Einbettung des Metallschaumes in ein weiteres Material



1. Einzelzelle    2. Ausgießen    3. Lösen    4. Füllen    5. Entformen    6. Einbetten

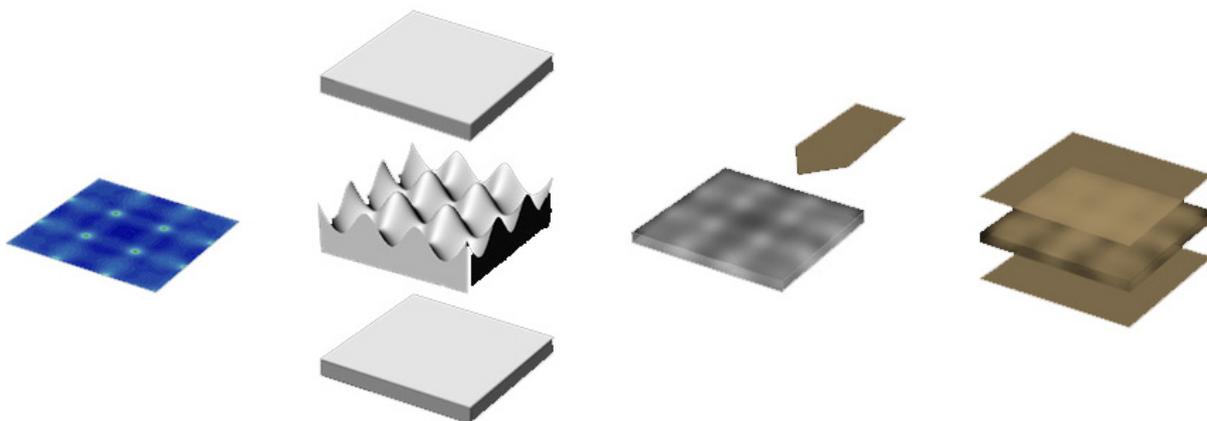
Abbildung 109: *Prinzipskizze: Herstellungsverfahren von Metallschäumen als Replikate von PUR-Schäumen*

### 5.3 Anwendungsbereiche

#### 5.3.1 Optimierte Kernschichten von Sandwichbauteilen

Die Optimierung von Sandwichbauteilen kann durch Anwendung des Gradierungsverfahrens mit Konsolidierung durch Infiltration erfolgen.

So kann in Abhängigkeit von der tatsächlichen Beanspruchung ein Eigenschaftsprofil im Sandwichkern eingestellt werden. Nach Analyse der Spannungsverteilung im Sandwichkern (1) wird der Zuschnitt des Ausgangsschaumes entsprechend gewählt (2). Daraufhin wird der Schaum verpresst und infiltriert (3). Abschließend kann der gradierte Schaumkern mit Deckschichten versehen werden (4) (Abbildung 110).



1. FE-Analyse    2. 3-D-Zuschnitt    3. Gradieren    4. Deckschichten

Abbildung 110: *Prinzipskizze: Herstellung funktional gradierter Sandwichelemente.*

Mit dieser Methode könnten optimierte Sandwichbauteile realisiert werden, deren Kernstruktur dem Anforderungsprofil folgt. Eine Durchströmbarkeit des Bauteils kann gewährleistet werden. Dies bietet die Möglichkeit der Bauteilaktivierung (Flächenheizung, -kühlung, -kollektor). Außerdem können Sandwichbauteile dieser Art transluzent ausgeführt werden und somit der Raum-

belichtung dienen und solare Wärmegewinne ermöglichen. Es können sortenreine Bauteile mit günstigen Recycling-Eigenschaften umgesetzt werden.

### 5.3.2 Gestaltung

Schaumstoffe mit gradiertem Härtegrad eröffnen neue gestalterische Möglichkeiten. So können die Objekteigenschaften unabhängig von der äußeren Form definiert werden. Ein Entwurf für eine Liege illustriert diesen Gedanken [2].

Hierbei wird die Komforteigenschaft der Liege nicht durch die äußere Formgebung definiert, sondern in das Material eingeschrieben. Ähnliche Ansätze konnten in der Vergangenheit nur durch eine Kombination verschiedener Materialien mit verschiedenen Eigenschaften erreicht werden. Durch die Manipulation der Eigenschaften eines Materials kann hiermit erstmals eine sortenreine Umsetzung erfolgen. Die Vorteile liegen neben dem gestalterisch-kulturellen Beitrag in der einfachen Rezyklierbarkeit derartiger sortenreiner Objekte oder Bauteile.

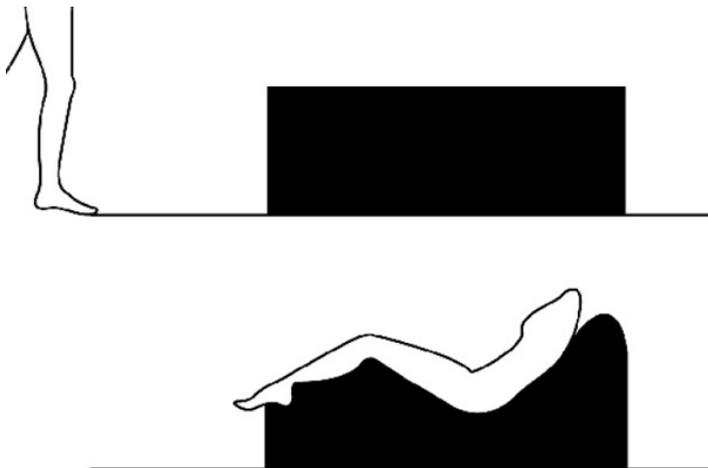


Abbildung 111: Entwurfsskizze: Gradierte Liege [2]

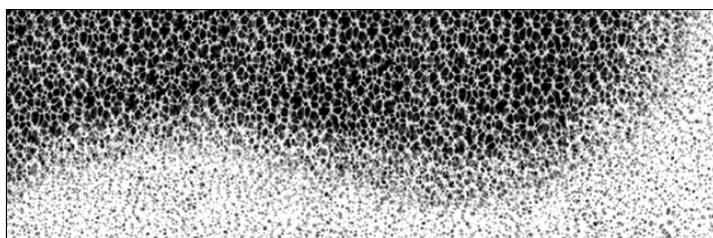


Abbildung 112: Prinzipskizze: Porositätsverlauf gradierte Liege [2]

Modellhaft wurden die Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung des gezeigten Entwurfs erprobt. Hierbei wurden die erarbeiteten theoretischen Grundlagen bezüglich Zuschnitt, Kompression und Konsolidierung angewandt.

Es wurden verschiedene Zuschnittsgeometrien untersucht. Abbildung 113 zeigt Zuschnittsvarianten mit Unterscheidungen hinsichtlich ein- und mehrseitigen Überständen sowie geraden und schrägen Anschnitten.

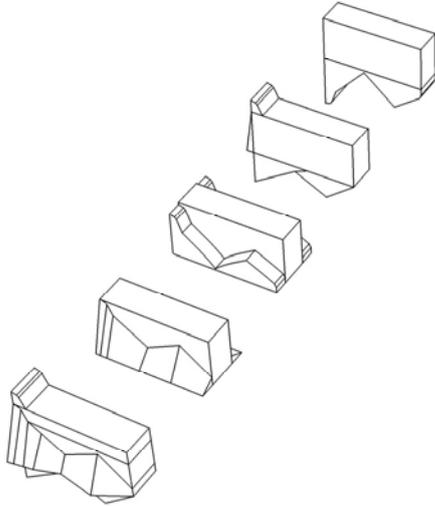


Abbildung 113: Varianten möglicher Schaumzuschnitte für die gradierte Liege

Drei Zuschnittsvarianten wurden ausgewählt und im Maßstab 1:10 erprobt. Dies führt zu Abmessungen der Probekörper von  $l \times b \times h = 135 \times 40 \times 40$  mm. Als Ausgangsmaterial diente ein PUR-Schaum mit einer Porosität von 80 bis 100 ppi. Die zugeschnittenen Schaumkörper wurden in eine Holzform gepresst und bei 210 °C für 25 Minuten thermisch konsolidiert. In dünne Scheiben geschnitten und hinterleuchtet konnte die erreichte Porositätsverteilung über den Querschnitt untersucht und bewertet werden.

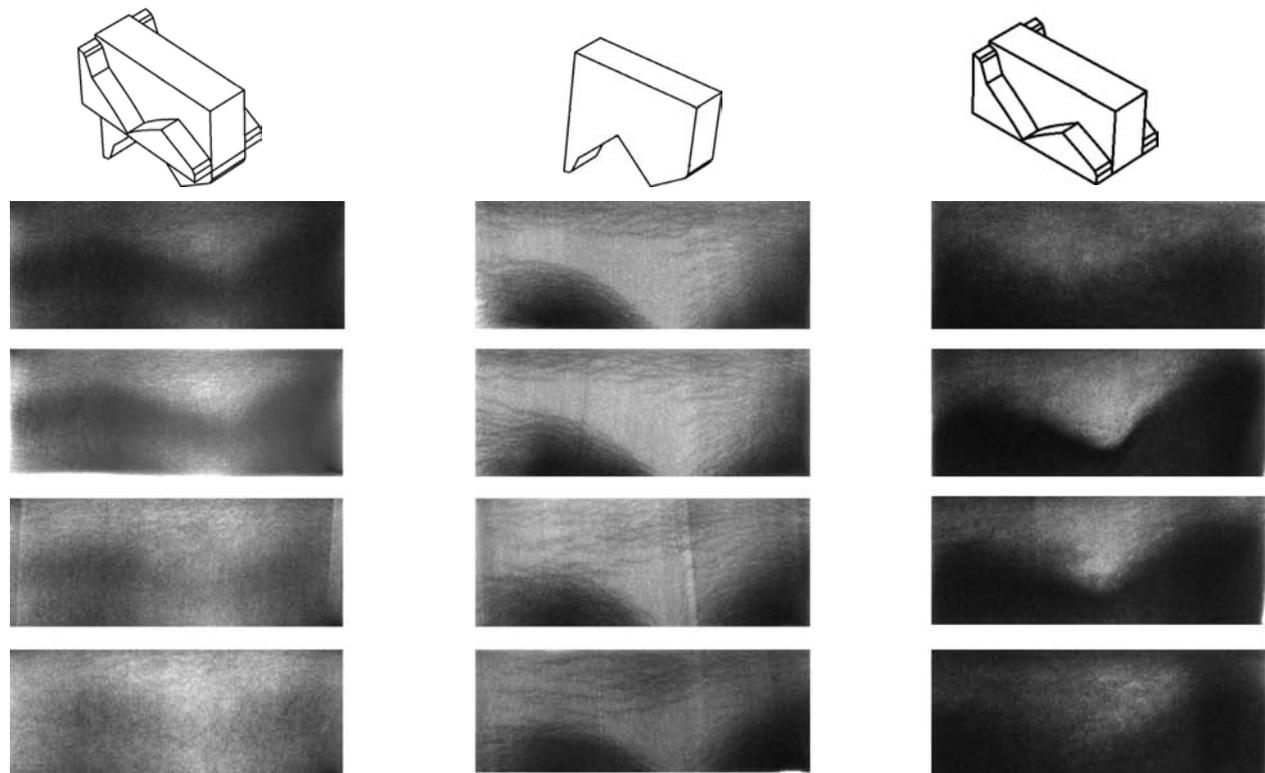


Abbildung 114: Gradierungen der Schaumstruktur auf Basis verschiedener Zuschnitte



Abbildung 115: Porositätsgradient: Gradierte Liege (Probekörper:  $l \times b \times h = 140 \times 50 \times 45 \text{ mm}$ )

Für eine Umsetzung des Entwurfs im Maßstab 1:1 sind weitere Untersuchungen hinsichtlich zu erwartender Skalierungseffekte durchzuführen. Hierbei sind vor allem das Kompressions- und Isolationsverhalten von großvolumigen Schaumstoffkörpern von Interesse.

Der dargestellte Entwurf illustriert beispielhaft den neuen Gestaltungsansatz, der durch die Gradierung von Bauteilen und Baustoffen möglich wird. Waren die Formen von Objekten bisher die Folge der Eigenschaften der Materialien, aus denen sie bestanden, so können nun Bauteilformen frei definiert und durch eine Anpassung der inneren Materialstruktur funktionalisiert werden. Dieser Ansatz kann als „formgerechte Materialgebung“ bezeichnet werden und stellt eine Ergänzung zum etablierten Optimierungsprinzip „materialgerechte Formgebung“ dar.

### 5.3.3 Schallschutz

PUR-Schaumstoffe werden im Fahrzeugbau bereits als Schallschutzmatten eingesetzt. Das Frequenzspektrum der Schallwellen legt eine Gradierung von Schallschutzelementen nahe, um relevante Frequenzbereiche durch Porositätsvariation gezielt zu kompensieren.

Die Relevanz des Themas, beispielsweise im Anwendungsbereich textile Gebäudehülle, sowie das Interesse von Herstellerseite motivieren zu einer Weiterverfolgung des Themas.

### 5.3.4 Massenersparnis

Das Einbetten gradiertem Schaumkörper in ein Matrixmaterial ermöglicht die Reduktion von Bauteilmasse. Der Schaum dient hierbei als Platzhalterstruktur. Die Gradierung kann in Hinblick auf die Beanspruchung des Bauteils erfolgen. Eine Massenersparnis ist dann realisierbar, wenn die Masse des Schaumes geringer ist als die Masse des Matrixwerkstoffes.

Dabei kann die Vorform im Bauteil verbleiben oder entfernt werden. Wird die Vorform entfernt, können die verbleibenden Hohlräume der Bauteilaktivierung dienen.

Die Verwendung von Polyurethan-Schäumen wird in diesem Zusammenhang vor allem aus Gründen der Nachhaltigkeit kritisch bewertet. Außerdem scheint die Auflösung der Poren und Stege für das Bauwesen zu fein. Alternative Schaumstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe mit einer gröberen Porenstruktur (< 5 ppi) sind die Voraussetzung für die Weiterverfolgung des Ansatzes im Bauwesen.

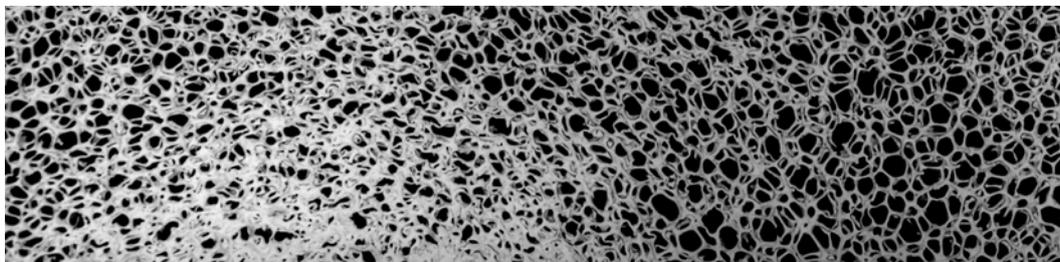


Abbildung 116: *Gradierte Porosität, 10 ppi (Porendurchmesser: 2 bis 3 mm)*

### 5.3.5 Bewehrung

Das unter 5.2.3.4 dargestellte Herstellungsverfahren für gradierte Metallschäume legt den Gedanken nahe, diese als Bewehrungsstruktur mit hoch- oder ultrahochfesten Betonen (UHPC) zu kombinieren, um deren ausgeprägt sprödes Materialverhalten zu kompensieren. Ausgehend von einem PUR-Schaum-Körper, welcher in Hinblick auf die Anforderungen als Bewehrungsstruktur gradiert und in Metall überführt wird, kann ein derartiges Bewehrungselement in Beton eingelassen werden.

Zum jetzigen Zeitpunkt erscheint ein derartiges Herstellungsverfahren für das Bauwesen als zu aufwändig. Die Verwendung neuer Hochleistungswerkstoffe wie UHPC ermöglicht auf Grund der deutlich gesteigerten Festigkeiten schlankere Querschnitte und eine feinere Auflösung bei der Ausformulierung von Tragstrukturen. Somit werden auch für Bewehrung und Verbindungstechnik neue Ansätze erforderlich. Die Verwendung gradiert metallischer Schaumstrukturen zur Verbesserung der Duktilität und Zugfestigkeit sollte in diesem Zusammenhang untersucht werden.

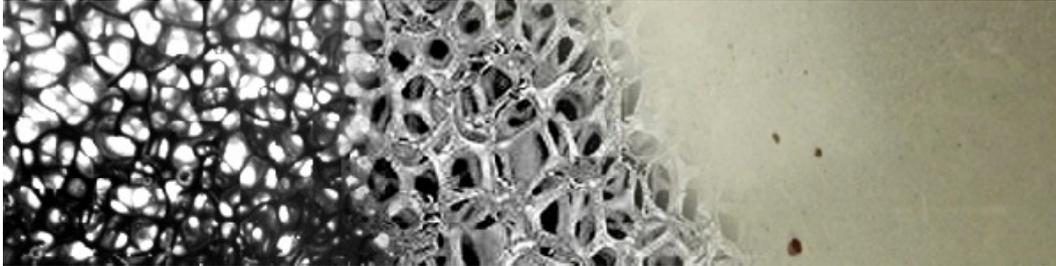


Abbildung 117: *Konzeptmontage: PUR-Schaum als Vorform für die Umsetzung in Metall und Einbettung in Beton*

### 5.3.6 Verbindungstechnik

Die Herstellbarkeit gradiert Metallschaumstrukturen eröffnet eine interessante Perspektive für die Verbindungstechnik. Abbildung 118 verdeutlicht diesen Ansatz: hier ist ein fließender Übergang von einem massiven Metallbauteil über eine Zone gradiert Porosität in ein zweites Material schematisch dargestellt ist. Die gradierte Verzahnung verschiedener Materialien verspricht eine hohe mechanische und thermische Belastbarkeit der Verbindung.

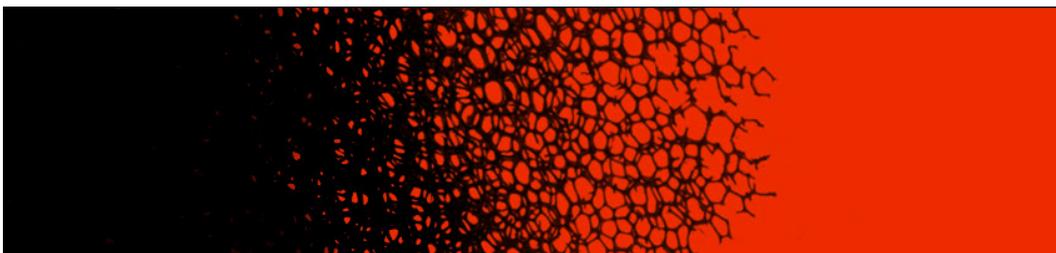


Abbildung 118: *Materialübergang durch Einbetten einer gradierten Metall-Schaumstruktur in eine zweite Phase*

## 6 Textilien und Faserverbundwerkstoffe

### 6.1 Einführung

Textilien und Faserverbundwerkstoffe bestehen in der Regel aus zwei Komponenten – den Fasern und der Beschichtung bzw. der Matrix. Eine Eigenschaftsgradierung kann für beide Komponenten erfolgen.

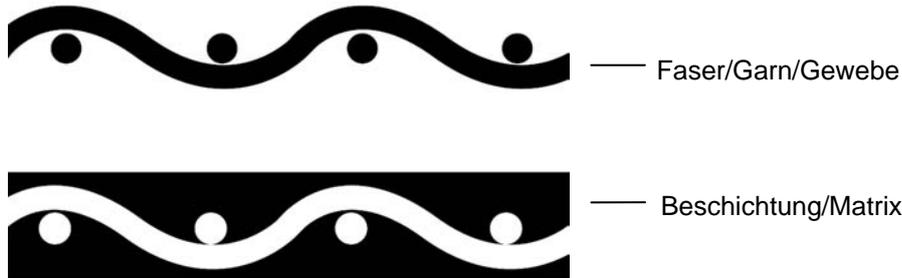


Abbildung 119: Gradierungspotentiale: Faser/Gewebe, Beschichtung/Matrix

Im Bereich der Fasern kann durch eine gezielte Faserausrichtung oder durch Variation des Fasergehalts eine Eigenschaftsgradierung erreicht werden. Bei Faserverbundwerkstoffen wird der Ansatz der gezielten Faserausrichtung bereits beforscht [58] und teilweise angewendet. Hierbei handelt es sich vor allen Dingen um Anwendungen im Flugzeugbau und der Automobilindustrie. Für das Bauwesen sind in diesem Bereich keine wesentlichen Effizienzsteigerungen zu erwarten. Daher konzentrieren sich die Untersuchungen im Folgenden auf eine Gradierung der Beschichtung bzw. der Matrix.

Der Unterschied zwischen einer Beschichtung und einer Matrix besteht darin, dass bei Beschichtungen der Beschichtungsstoff auf das Garn bzw. das Gewebe aufgebracht wird, wohingegen eine Matrix die Benetzung möglichst aller Filamente zum Ziel hat (Abbildung 120). Beschichtungen dienen der Abdichtung und dem Schutz des Gewebes, Matrices dem Schubverbund der einzelnen Filamente.

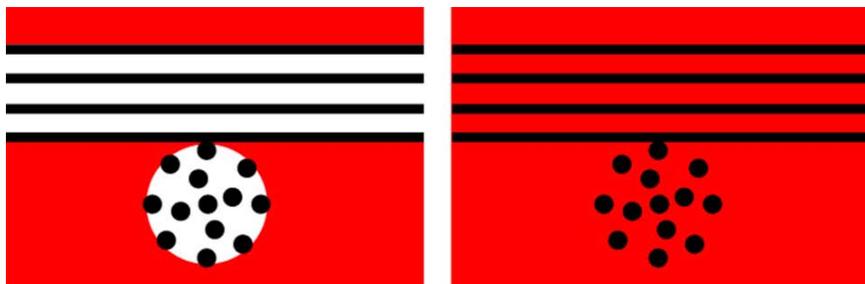


Abbildung 120: Unterscheidung: Beschichtung und Matrix (rot)

Für Textilien erscheint eine Gradierung der Permeabilität und der Steifigkeit vielversprechend. Die Gradierung der Permeabilität, nach dem Vorbild von Funktionsoberbekleidung, ermöglicht beispielsweise die gezielte Steuerung von Feuchte- und Gasaustauschmechanismen der Gebäudehülle. Die Gradierung der Steifigkeit ermöglicht neue Lösungen bei beweglichen Bautei-

len und im Bereich Membranbau. Dies bietet neue Gestaltungspotentiale für Innenausbau, Gebäudehülle und Tragwerk.

Bei Faserverbundwerkstoffen bietet die Gradierung der Matrix vor allem einen Ansatz zur materialgerechten Fügung von Faserverbundwerkstoffprofilen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten initiale Untersuchungen und Experimente durchgeführt werden, die die prinzipielle Machbarkeit und Funktionstüchtigkeit von gradierten Beschichtungen belegen.

## **6.2 Textilien**

Die durchgeführten Untersuchungen im Bereich Textilien konzentrieren sich auf eine Gradierung der Beschichtung in Hinblick auf die fließende Variation der Permeabilität und der Steifigkeit.

### **6.2.1 Herstellungsverfahren**

#### **6.2.1.1 Gradierung der Permeabilität**

Ausgangsmaterial zur Gradierung der Permeabilität von Textilien war ein Glasfasergewebe mit einem Flächengewicht von 300 g/m<sup>2</sup>. Dieses Material wurde vor und nach dem Aufbringen einer gradierten Beschichtung auf Wasserdichtigkeit nach DIN 20811 geprüft. Die Norm schreibt die Belastung mit einer Wassersäule von 35 cm von unten auf den Probekörper vor. Dringt an mehr als drei Stellen Wasser durch, ist die Membrane undicht.

Die Prüfung der unbeschichteten Membrane zeigte eine großflächige Wasserdurchlässigkeit. Nach kurzer Belastungsdauer drang flächig Wasser durch. Zur Beschichtung der Membrane wurde ein Sprühauftrag von 25 g/m<sup>2</sup> Silikon ELASTOSIL E 41 der Wacker-Chemie GmbH vorgenommen. Dabei wurde das Silikon in einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 mit Waschbenzin verdünnt, um eine genügend niedrige Viskosität zu erreichen, die einen Sprühauftrag mit einer handelsüblichen Lackierpistole ermöglichte.

Zur Gradierung der Permeabilität von undicht und dampfdiffusionsoffen zu wasser- und dampfdicht wurde das Silikon in mehreren Sprühvorgängen in einem Auftragsgradienten aufgesprüht (Abbildung 121). Um diesen Auftragsgradienten sichtbar zu machen, erfolgte eine Beimischung von Pigmenten zum Silikon.

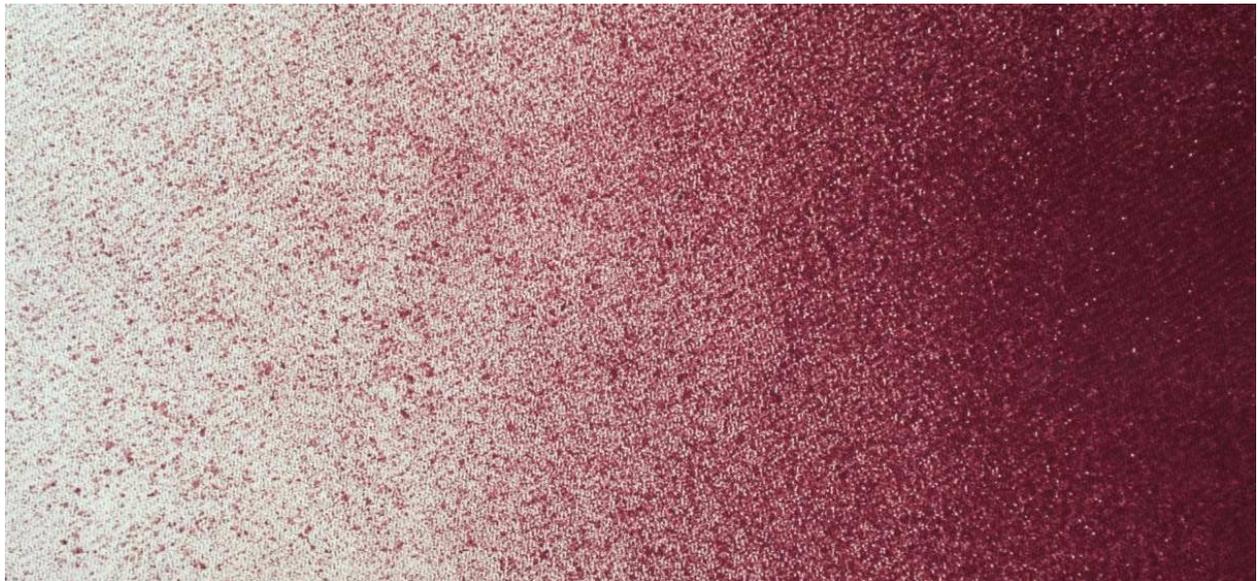


Abbildung 121: Auftragsgradient an Silikonbeschichtung (Glasfasergewebe 300 g/m<sup>2</sup>)

Bei der anschließend durchgeführten Prüfung durch Belastung mit einer Wassersäule trat der eingestellte Permeationsgradient deutlich zu Tage (Abbildung 122).



Abbildung 122: Permeationsgradient bei Belastung mit einer Wassersäule

### 6.2.1.2 Gradierung der Steifigkeit

Die Gradierung der Steifigkeit wurde analog zur Gradierung der Permeabilität hergestellt. Beispielhaft wurde hierbei die im vorherigen Kapitel beschriebene biegeschlaffe Membrane verwendet.

Die Gradierung der Steifigkeit konnte durch einen Sprühauftrag, bestehend aus verdünntem Epoxidharz Larit L 285 der Firma Lange und Ritter GmbH und dem zugehörigen Härter, realisiert werden. Abbildung 123 zeigt dieselbe mit Epoxidharz gradiert beschichtete Membran bei der Einspannung auf der biegeweichen Seite B und auf der biegesteifen Seite A. Dazwischen konnte ein deutlicher Steifigkeitsgradient eingestellt werden.

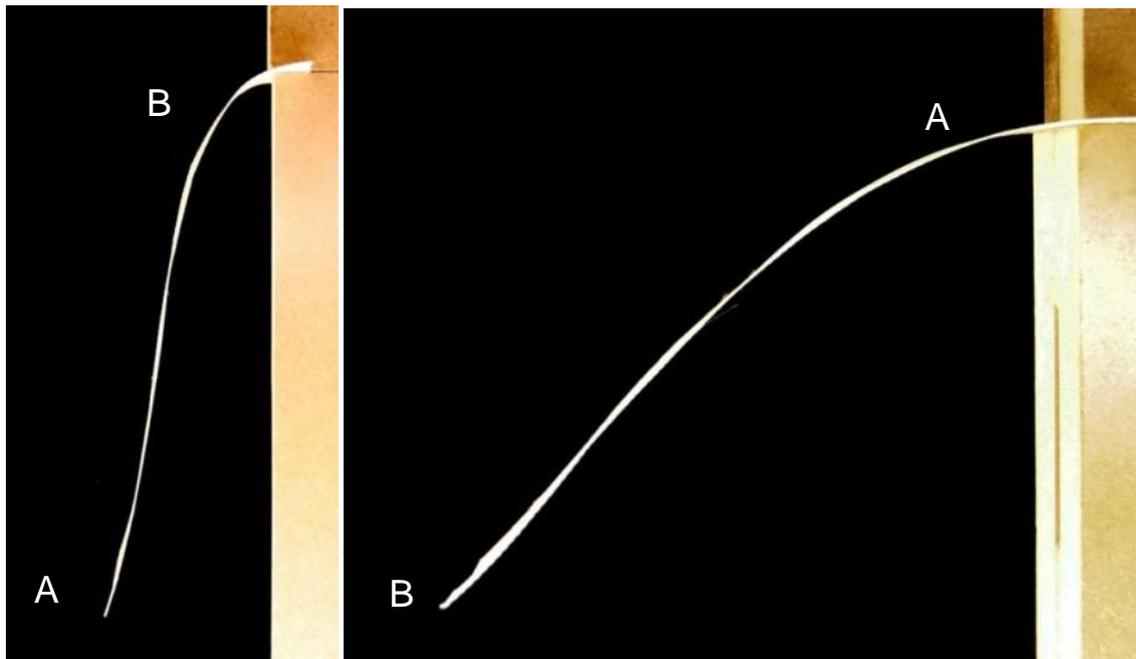


Abbildung 123: Gradiertes Steifigkeitsverlauf einer Membrane (Glasfasergewebe 300 g/m<sup>2</sup>)

## 6.2.2 Anwendungsbereiche

### 6.2.2.1 Permeationsverläufe

Der kontrollierte Austausch von Luft und Feuchte in Innenräumen gewinnt angesichts einer zunehmend dichten Gebäudehülle an Bedeutung. Die Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden der Nutzer hängen maßgeblich mit der Raumluftqualität und der Zu- und Abluftführung zusammen. Darüber hinaus bestehen gesundheitliche Risiken durch Schimmelbildung und Keimübertragung bei mangelhaften Lüftungskonzepten.

Der Luftwechsel wird im Falle mechanischer Lüftungssysteme in der Regel über lokale Lüftungselemente gewährleistet. Es lassen sich Zu- und Abluftelemente unterscheiden. Diese können dezentral oder in Verbindung mit einer zentralen Lüftungsanlage ausgelegt werden.

Die punktuelle Zuluft kann im Umfeld von Lüftungsgeräten zu Zugserscheinungen führen, die von Nutzern als unangenehm empfunden werden. Außerdem stellt die lokale Perforation der Gebäudehülle eine strukturelle und optische Irritation dar.

Statt punktueller Lüftungselemente können, durch eine Gradierung der Permeabilität von Membranen, luftdurchlässige Bereiche der Raumbofläche nahtlos definiert werden.

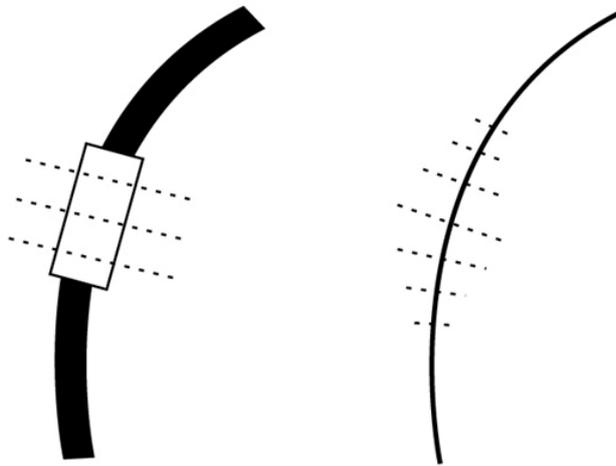


Abbildung 124: *Prinzipskizze: Vergleich lokales Lüftungsgert und gradierte Permeabilität*

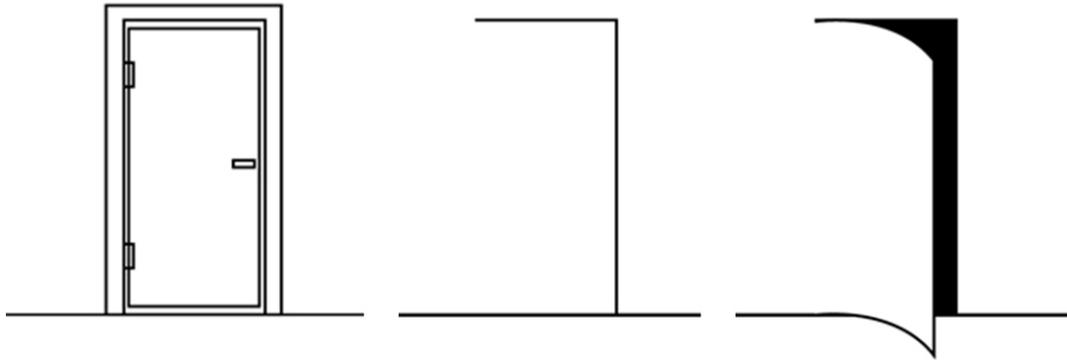
Der Verzicht auf punktuelle Lüftungsöffnungen ermöglicht im Innenraum einen Luftwechsel ohne Zugserscheinungen. Auf der Außenseite kann die Permeabilität auf Basis der natürlichen Umströmung des Gebäudes so gewählt werden, dass unter Berücksichtigung von Winddruck und -sog ein natürlicher Luftwechsel stattfindet.

Vor allem im Bereich textiler Gebäudehüllen kann hiermit ein interessanter Alternativansatz zu herkömmlichen Lüftungsanlagen geboten werden. Textile Gebäudehüllen für Anwendungen im Wohn- und Bürobau werden in der Regel mehrschichtig konzipiert. Die inneren und äußeren Luftkreisläufe können bei der Entwicklung der Lagenaufbauten mit einbezogen werden.

#### 6.2.2.2 Steifigkeitsverläufe

Steifigkeitsverläufe in Textilien und Faserverbundwerkstoffen können im Innenausbau und im Membranbau zu neuartigen Lösungen führen. Bisher existiert eine klare Trennung zwischen tragenden und ausfachenden sowie zwischen steifen und flexiblen Bauteilen. Dies führt zu einer elementierten Bauweise, wobei Bauteile mit spezifischen Eigenschaften verbunden werden. Durch die Einführung gradiertter Steifigkeitsverläufe können verschiedene Bauteileigenschaften in einer kontinuierlichen Fläche abgebildet werden.

Am Beispiel eines einfachen Öffnungselementes, einer Tür, wird der Ansatz deutlich. Eine Tür besteht in der Regel aus zahlreichen Komponenten mit unterschiedlichen Funktionen (Rahmen, Bänder, Türblatt, Beschläge). Durch gradierte Steifigkeit können diese Funktionen in einem kontinuierlichen Bauteil zusammengefasst werden (Abbildung 125).



*Abbildung 125: Aufbau von Öffnungssystemen – Tür im Vergleich zu gradiertem Öffnungselement*

Der Ansatz bietet darüber hinaus ein großes Potential zur weiteren gestalterischen Ausformulierung durch den fließenden Übergang von steifen zu flexiblen Zonen innerhalb eines Bauteils. Hierbei gewinnt die Möglichkeit zur freien Formgebung von Textilien und Faserverbundwerkstoffen an Bedeutung, wodurch die Materialsteifigkeit mit der geometrischen Steifigkeit aus Faltungen und räumlichen Krümmungen im Zusammenhang betrachtet werden kann.

Der hohe Steifigkeitssprung am Rand von Membranen, die z.B. mit scharfkantigen Klemmplatten gelagert sind, führt zur Schädigung der Textilien an dieser Stelle. Besonders gefährdet sind Glasfasergewebe, die beim Biegen über zu kleine Biegeradien brechen. Ein Steifigkeitsgradient in diesem Bereich kann den Steifigkeitssprung reduzieren, die Rotationen unter Last vermindern und helfen, den Übergang in die steifen Randelemente zu entschärfen.

## 6.3 Faserverbundwerkstoffe

### 6.3.1 Voruntersuchungen

Faserverbundwerkstoffe bieten ein überragendes Leichtbaupotential. Das Prinzip besteht darin, dass hochfeste und steife Fasern belastungsgerecht in eine Matrix eingebettet werden, wodurch Bauteile mit herausragenden mechanischen Eigenschaften entstehen. Diese sind typischerweise 25 % leichter als Aluminium und 50 % leichter als Stahlstrukturen mit vergleichbarer Leistungsfähigkeit. Außerdem verfügen sie über ein hohes gewichtsspezifisches Energieaufnahmevermögen und gute Ermüdungseigenschaften. Der Anteil an Faserverbundwerkstoffbauteilen, z.B. im Flugzeugbau, wurde in den letzten vierzig Jahren kontinuierlich gesteigert. Das Strukturgewicht eines A 380 Jumbojets besteht zu 20 % aus FVK, geplant ist in naher Zukunft ein Anteil von bis zu 50 %.

Erste Anwendungen für faserverstärkte Kunststoffprofile im Bauwesen sind Fensterprofile, Fußgängerbrücken und Raumbachwerke [59]. Bei diesen Anwendungen sind Eigenschaften wie hohe Festigkeit und Widerstandsfähigkeit bei niedrigem Gewicht und minimalem Instandhaltungsaufwand gefordert, die die Faserverbundwerkstoffe besser erfüllen als traditionelle Baustoffe wie Stahl, Holz oder Aluminium. Größte Schwierigkeiten bereitet jedoch immer noch das Fügen der Faserverbundwerkstoffprofile und die Lasteinleitung im Knoten. Hier müssen die ankommenden Kräfte, die sehr effektiv über die hochfesten Fasern abgetragen werden, über Werkstoffe und Bauteile geringerer Festigkeit übertragen werden [60],[58]. Diese Probleme haben bisher eine massenhafte Verbreitung des effizienten Werkstoffs im Bauwesen verhindert.

Bisherige Füge-technologien für Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen

Punktuelle Fügungen von polymergebundenen Faserverbundwerkstoffen, wie sie auf der Baustelle möglich sind und bereits eingesetzt werden, widersprechen der Kontinuität des Kraftflusses der meist dünnwandigen und flächigen Bauteile.

Eine Schraubverbindung beansprucht die Matrix auf Lochleibung. Das spröde und meist anisotrop verstärkte Grundmaterial erlaubt keine plastischen Umlagerungen der Lochleibungsspannungen, die übertragbaren Kräfte sind gering. Dies könnte durch eine Metallmatrix, die in der Lage ist, die Beanspruchung auf Lochleibung aufzunehmen und die Lasten in die Fasern einzuleiten, gelöst werden.

Nietverbindungen, wie sie im Flugzeugbau vorkommen, reduzieren das Problem der Spannungskonzentrationen durch Verteilung auf viele Verbindungspunkte. Sie sind jedoch zeitaufwändig und schwer zu lösen (Rezyklierbarkeit).

Klebeverbindungen der Profile, die eine flächige und kraftschlüssige Verbindung darstellen, können nur im Werk unter konstanten Umweltbedingungen hergestellt werden, welche auf der Baustelle nicht garantiert werden können. Es besteht das Problem der Transportlängenbeschränkung und der Rezyklierbarkeit.

Die materialgerechte Fügung von Faserverbundwerkstoffprofilen soll durch den gradierten Übergang von Faserverbundwerkstoffprofilen mit Polymermatrix (FVK) zu Faserverbundwerkstoffen mit Metallmatrix (FVM) in den Knotenpunkten der Lastübertragung/-ausleitung ermöglicht werden. Hierfür wird im Knotenbereich der Matrix-Kunststoff durch eine metallische Matrix substituiert (Abbildung 126).

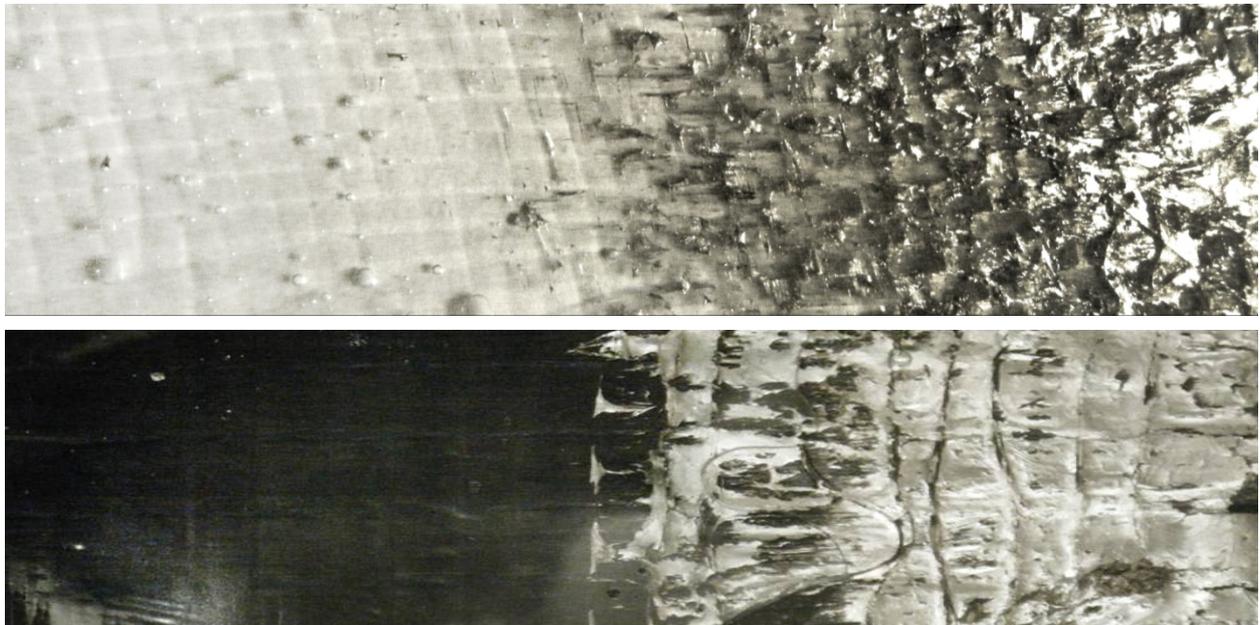


Abbildung 126: *Gradiertes Übergang harzgebundener (oben) und metallgebundener (unten) Glas-/Kohlefaser (Streifen 2 x 10 cm)*

Der metallgebundene Faserverbundwerkstoff im Knotenbereich ermöglicht Verbindungstechnologien, wie sie aus dem Stahlbau bekannt sind (Schrauben und Schweißen). Dadurch können die Vorteile von Faserverbundwerkstoffen, wie Witterungsbeständigkeit, hohe Tragfähigkeit, geringe Wärmeleitfähigkeit und geringe Rohdichte, um die Vorteile der Metallbaukonstruktionen, wie gute Fügbarkeit und Rezyklierbarkeit, erweitert werden. Die leichte Polymermatrix kommt dabei überwiegend zum Einsatz, die Metallmatrix hingegen ausschließlich im Anschlussbereich.

### 6.3.2 Herstellungsverfahren

Erste Probekörper zur Veranschaulichung des geplanten Übergangs des Matrixwerkstoffs wurden im Rahmen des Forschungsprojekts angefertigt (Abbildung 127). Hierbei werden in einem Ofen die verwendeten Metalle Aluminium und Zinn in den flüssigen Zustand überführt. Anschließend werden die Fasern in die Metallschmelze getaucht und das Metall infiltriert die Faserzwischenräume. Nach dem Abkühlen werden die freien Fasern mit einer Harzmatrix im Injektionsverfahren infiltriert.



Abbildung 127: Herstellen erster Probekörper mit einem gradierten Matrixübergang von Harz zu Metall

Abbildung 128 zeigt das erzeugte Gefüge und den Verbund zwischen Glasfasern und Metallmatrix unter dem Mikroskop. Ohne zusätzlichen Verdichtungsdruck benetzt die Metallmatrix die Fasern nur oberflächlich. Dies führt zu schlechten Verbundeigenschaften.

Die Recherche von Herstellungsverfahren von Metallmatrixverbundwerkstoffen ergab die Möglichkeiten des Metall-Ultraschallschweißens, des diskontinuierlichen Induktionsschweißens und des Thixoschmiedens. Die besten Verbundeigenschaften zwischen der metallischen Matrix und den hochfesten Fasern können durch das Thixoschmieden erzielt werden.

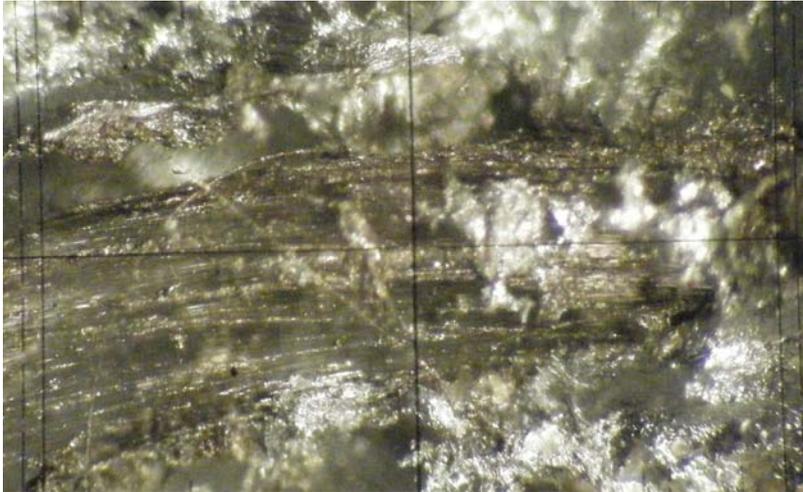


Abbildung 128: Verbund Fasern - Metallmatrix

Mit diesen Erkenntnissen wurden ein Folgeantrag mit dem Titel „Materialgerechtes Fügen von Faserverbundprofilen“ (Zukunft Bau II3-F20-10-054) gestellt, der 2010 bewilligt wurde. Die Bearbeitung beginnt im Januar 2011 gemeinsam mit dem Institut für Umformtechnik (IFU) als Kooperationspartner. Am IFU wurde in diversen Forschungsvorhaben das Thixoschmieden von Metallen mit lokalen Faserverstärkungen untersucht.

Im Rahmen des Anschlussprojekts werden verschiedene Materialübergänge im Knoten hergestellt, untersucht und deren Eigenschaften ermittelt (Abbildung 129).

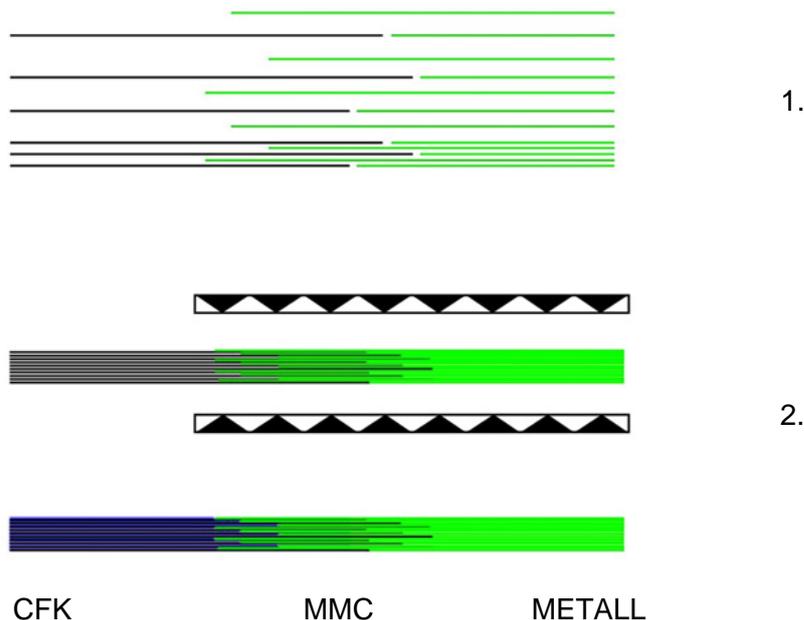


Abbildung 129: Herstellungsprozess geschmiedeter Übergang CFK – MMC – Metall  
 1. Schichten von Kohlefasern und Metallblechen  
 2. Komprimieren und Infiltrieren beim Schmiedevorgang

## Thixoschmieden

Seit der Entdeckung der Thixotropie metallischer Suspensionen durch Versuche von Spencer [61] an einem Sn-15Pb-Legierungssystem 1971, wird das Feld der so genannten `Semi-Solid Metal Forming-Technologien, die sich durch diese Entdeckung innerhalb der bekannten Normung der Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580 entwickelten, in Forschung und Entwicklung bearbeitet. Durch die englische Bezeichnung `Semi-Solid Metal Forming´ (SSMF) werden verschiedene Formgebungsverfahren beschrieben, bei denen die Eigenschaften von teilflüssigen beziehungsweise teilerstarten Metalllegierungen gezielt zur Formgebung eingesetzt werden [62]. Die bekanntesten SSMF-Verfahren sind das Rheocasting, das Thixomoulding, das Thixocasting, das Vexocasting, das Thixoforging bzw. Thixo-Schmieden, das Gieß-Schmieden, das New-Rheo-Casting sowie das New-Rheo-Forging. Heutzutage finden semi-solid Formgebungsverfahren in Bereichen kommerzielle Anwendung, in denen hochintegrale Bauteile mit komplexer Geometrie und guten mechanischen Eigenschaften benötigt werden [63],[64].

Am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart liegen umfangreiche Kenntnisse zur Herstellung von metallischen Verbundwerkstoffen (MMC: metal matrix composite) durch die semi-solid Formgebung vor, und die entwickelten Verfahren wurden zum Patent angemeldet [65],[66]. Neben der Verstärkung mit Langfasern können kurzfaser-, whisker- oder partikelverstärkte Bauteile hergestellt werden. Hierbei ist die Verstärkungs Komponente in der Regel bereits vor der Formgebung im Matrixwerkstoff eingebettet. Solche Verbunde werden zum Beispiel im Sprühkompaktierverfahren als Stangenmaterial erzeugt [67].

Bei der teilflüssigen Formgebung von Metallmatrixverbundwerkstoffen mit Faserverstärkung wird ein geschichtetes Paket (z.B. aus Aluminiumblechen und Kohlenstofffasern) infrarot in den teilflüssigen Metallzustand erwärmt. Alternativ können die Fasermatten bereits vor der Formgebung mit dem Matrixwerkstoff thermisch bespritzt werden (Prepreg) (Abbildung 130). Die Infiltration der Fasern erfolgt durch eine anschließende Kompaktierung mit Hilfe einer hydraulischen Hochgeschwindigkeitspresse in einem werkstückspezifisch angepassten Werkzeug.

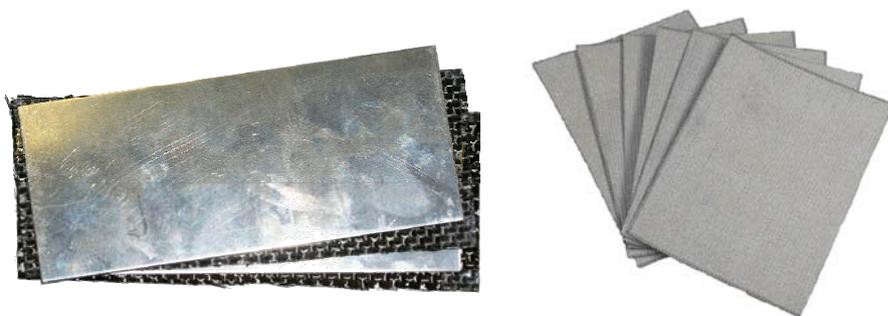


Abbildung 130: Geschichtetes Paket und Prepregs (11 x 15 cm)

## 6.4 Zusammenfassung

Im Bereich der Textilien und Faserverbundwerkstoffe konnte ein breites Spektrum von Eigenschaftsverläufen dargestellt werden:

1. Von unbeschichtet zu silikonbeschichtet zur Variation der Permeabilität
2. Von einer Silikonbeschichtung zu einer Kunstharzbeschichtung/-matrix zur Variation der Steifigkeit
3. Von einer Kunstharzmatrix zur einer metallischen Matrix als Verbindungstechnik
4. Vom Faserverbundbauteil mit metallischer Matrix zum reinen Metall (Ausblick)

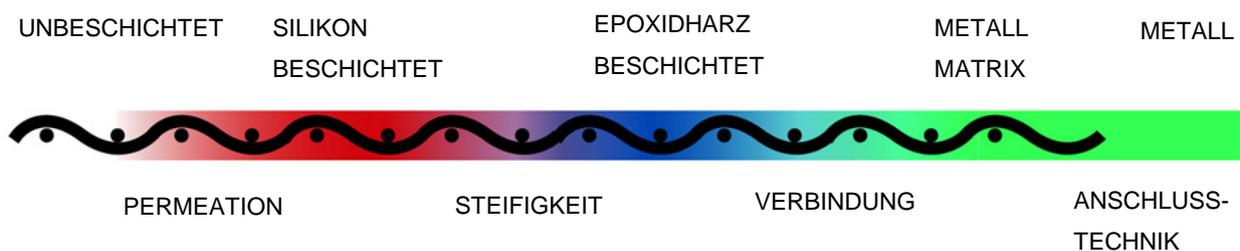


Abbildung 131: Übersicht: Eigenschaftsverläufe von Textilien und Faserverbundwerkstoffen

Die Anwendungsbereiche für gradierte Textilien und Faserverbundwerkstoffe bieten Lösungsansätze für konstruktive, bauphysikalische und gestalterische Fragestellungen. Für deren bau-praktische Umsetzung sind auf technologischer und gestalterischer Seite umfangreiche weitergehende Untersuchungen erforderlich.

## 7 Fließende Materialübergänge

### 7.1 Einführung

Die Untersuchung fließender Materialübergänge ist ein wesentlicher Teil der Forschung im Bereich der Gradientenwerkstoffe. Hierbei wurden in der Vergangenheit vorzugsweise Stoffgradienten auf Basis von Pulvermetallen und -keramiken untersucht. Diese haben für das Bauwesen eine geringe Bedeutung.

Im Bauwesen ist die Idee des fließenden Materialübergangs vor allen Dingen als ein Konzept der Verbindungstechnik von Interesse. Sie bietet eine Alternative zu punktuellen, linearen oder flächigen Verbindungstechniken wie Schrauben, Schweißen oder Kleben. Bei diesen herkömmlichen Verbindungstechniken kommt es zu einem abrupten Übergang zwischen Bauteilen aus einem oder verschiedenen Materialien. Für zahlreiche Materialkombinationen stehen noch immer keine befriedigenden Verbindungstechnologien zur Verfügung. Probleme der Materialverträglichkeit, der thermischen Ausdehnung und der kraftschlüssigen Verbindung sind hierbei ungelöst.

Durch einen fließenden Materialübergang können diese Probleme reduziert oder ausgeschlossen werden. Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen behandeln exemplarisch den fließenden Übergang von Holz zu anderen Materialien. Abbildung 132 illustriert diese Vision.

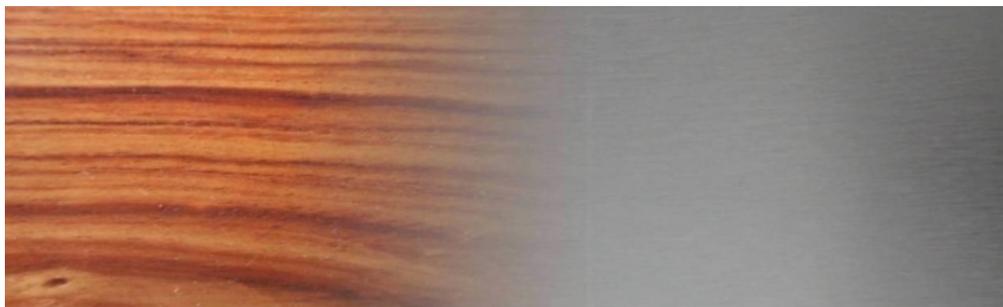


Abbildung 132: Konzeptillustration: Fließender Materialübergang Holz-Metall

### 7.2 Werkstoff Holz

Holz setzt sich aus verschiedenen Zelltypen zusammen – röhrenförmige Zellen in Stammlängsrichtung, die ca. 90 % des Holzes ausmachen, und die Markstrahlen, die quer zu den röhrenförmigen Zellen liegen [68].

Die chemischen Bestandteile sind Zellulose, Hemicellulose, Lignin, Extraktstoffe (Asche) und ein geringer Anteil an Mineralien. Zellulose und Hemicellulose fasst man auch unter dem Begriff Holozellulose zusammen [69].

Lignin, dessen Volumenanteil zwischen 20 bis 30 % beträgt, ist für Steifigkeit und Druckfestigkeit ursächlich. Es wird in den Zellwänden eingelagert und bewirkt eine Verholzung der Zelle.

Außerdem dient Lignin als Verbindungsmaterial für den Zellverbund über die Mittellamelle. Unter der Mittellamelle versteht man die dünne plasmaartige Schicht zwischen benachbarten Zellen.

### 7.3 Herstellungsansatz

Der Ansatz zur Herstellung eines fließenden Materialübergangs für den Werkstoff Holz beruht auf einem kontrollierten Freilegen und Konfektionieren der Holz-Fasern mit anschließendem Einbinden in eine zweite Phase.

Die Prozessschritte sind in der nachfolgenden Grafik beschrieben:



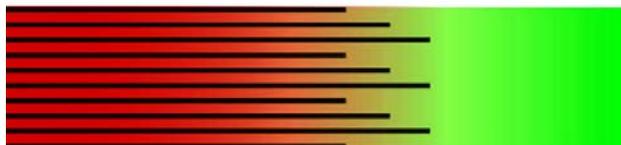
Holz als Faserverbundwerkstoff, schematisch:  
Zellulosefaser: schwarz, Ligninmatrix: rot



Lösen der Matrix (chemisch oder physikalisch)  
Freilegen der Fasern



Konfektionieren der Fasern



Einbinden der Fasern in ein zweites Material

Abbildung 133: Herstellungsverfahren: fließender Materialübergang von Holz zu anderen Materialien

### 7.4 Chemisches Freilegen der Fasern

Der Ansatz beruht darauf, dass Lignin der Mittellamelle chemisch zu lösen und somit den Zellverbund der Zellulosefasern lokal aufzuheben. Die Versuche erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Polymerchemie der Universität Stuttgart.

### 7.4.1 Lösungsmittel

Als theoretische Grundlage dienen Vorarbeiten von Toledano et al. [70],[71]. Es konnten drei mögliche Lösungsmittel definiert werden:

1. DMSO (Dimethylsulfoxid) und NMI (N-Methylimidazol)
2. Dioxan und Wasser
3. DMSO<sub>2</sub> (Dimethyl Sulfone).

Dioxan-Wasser wurde ausgewählt, da es gezielt das Lignin löst und die übrigen Holzbestandteile nicht angreift.

### 7.4.2 Holzarten

Es wurden Furniere (Dicke: 1mm) aus Esche, Fichte und Bambus untersucht. Teilweise wurden die Furnierstreifen mechanisch aufgeraut, um das Eindringen des Lösungsmittels in die Zellzwischenräume zu erleichtern (Abbildung 134).



Abbildung 134: Furnierstreifen: von links nach rechts: Esche aufgeraut, Esche unbehandelt, Fichte unbehandelt, Fichte aufgeraut, Bambus mit Längsfaserformat, Bambus mit Querfaserformat (Probekörper:  $l \times b \times h = 120 \times 50 \times 1 \text{ mm}$ )

### 7.4.3 Versuchsdurchführung

In Anlehnung an Sohir [72] wurden vier Versuchsreihen durchgeführt:

#### Versuch 1 und 2

Es wurden Esche- und Fichtefurnierstreifen jeweils einseitig aufgeraut und zur Hälfte in einen Glasbehälter mit Dioxan-Wassermischung eingetaucht. Dieser Behälter wurde in einem Ölbad zunächst für 90 Minuten auf 82,5 °C und anschließend für weitere 90 Minuten auf 98 °C erhitzt (Abbildung 135).



Abbildung 135: Versuchsaufbau, chemisches Lösen

### Versuch 3

Furnierstreifen und Aufbau wie bei Versuch 1 und 2, mit dem Unterschied des Haltens der Furnierstücke mit einer Klammer, um ein Berühren des Behälterbodens zu verhindern. Dies erlaubt den Einsatz eines Rührmagneten am Behälterboden um Siedeverzug in der Flüssigkeit zu verhindern. Bei diesem Versuch wurden die Proben für 180 Minuten auf 98 °C in Dioxan-Wasser erhitzt.

### Versuch 4

Esche- und Fichtenfurnierstreifen wurden beidseitig aufgeraut und in einen Rundkolben mit Rückflusskühler eingebracht. Durch diesen Aufsatz konnte das Gefäß luftdicht abgeschlossen und ein Verdampfen des Lösungsmittels vermieden werden. Ein weiterer Unterschied bei diesem Versuchsaufbau war, dass die Proben vollständig in die Flüssigkeit getaucht wurden und drei Wochen lang im Dauerversuch auf 98 °C erhitzt wurden.

#### 7.4.4 Versuchsergebnisse

Die Versuche zur chemischen Faserfreilegung erwiesen sich als wenig zielführend. Ein Freilegen der Zellulose-Fasern konnte bei keinem der Versuche beobachtet werden. Die Ligninlösung hätte zu einer Braunfärbung des Dioxan-Wassergemischs führen müssen. Da sich bei keinem der Versuche eine sichtbare Färbung einstellte, ist darauf zu schließen, dass nicht genügend Lignin gelöst werden konnte. Ursache hierfür können die noch intakten Zellwände sein, die den Kontakt des Lösungsmittels mit dem Lignin verhindern. Man könnte das Holz zu Sägemehl verarbeiten, um die Zellwände zu zerstören. Da dies jedoch mit der hier verfolgten Zielsetzung un-

vereinbar ist, muss ein Ansatz gefunden werden, der in einem zusätzlichen Arbeitsschritt zunächst die Zellwände zerstört, um die Ligninlösung zu ermöglichen. Ein Ansatz, der hierfür selektiv nur die Zellwände der Mittellamellen angreift, nicht aber die Zellwände der übrigen Zellen, konnte bisher nicht recherchiert werden.



Abbildung 136: Ergebnisse nach dem zweiten Versuch, zwei Esche-Proben (links), zwei Fichtefurniere (rechts)



Abbildung 137: Ergebnisse nach dem dritten Versuch



Abbildung 138: Ergebnisse nach dem vierten Versuch

## 7.5 Mechanisches Freilegen der Fasern

### 7.5.1 Verwendete Materialien

Es wurden Fichten-, Esche- und Bambusfurniere sowie frisch geschnittener Bambus untersucht. Als Bearbeitungswerkzeuge wurden eine Japanische Säge, Metallbürsten und ein Hammer eingesetzt.

### 7.5.2 Versuchsdurchführung

#### Holz-Furniere

Die Furnierstreifen wurden nacheinander in Faserrichtung mit einer Japanischen Säge oder einer Metallbürsten bearbeitet. Hierbei erwies sich die Holzfeuchte als ein wichtiger Parameter. Bei trocken bearbeiteten Furnierstücken konnte ein ungewolltes Ausreißen ganzer Furnierstücke nicht verhindert werden. Durch Einweichen der Furnierstreifen in Wasser konnte eine Erhöhung der Holzfeuchte erzielt werden.

Das Ausfasern der Furnierstreifen mit der Japansäge erwies sich erwartungsgemäß als schwierig. Auf Grund der Zahnbreite des Sägeblattes wurden zusammenhängende Faserbüschel entfernt und nicht, wie gewünscht, nur einzelne Fasern. Am schwierigsten stellt sich die Bearbeitung des Eschefurniers dar. Es zeigte sich, dass das Frühholz einfacher zu entfernen ist als das Spätholz mit dementsprechenden Unregelmäßigkeiten im Faserbild. Außerdem konnte eine deutliche Lückenbildung zwischen den einzelnen Jahresringen beobachtet werden.

Die Versuche mit Metallbürsten erwiesen sich als einfacher. Es konnte eine feingliedrigere Auffaserung erzielt werden. Vor allem bei Bambus wird der Unterschied deutlich.

Es konnte ein anschauliches Materialmuster hergestellt werden, das den Ansatz des fließenden Materialübergangs verdeutlicht. Das Bambusstück wurde hierfür exemplarisch in transparentes Polyesterharz eingelassen (Abbildung 141).

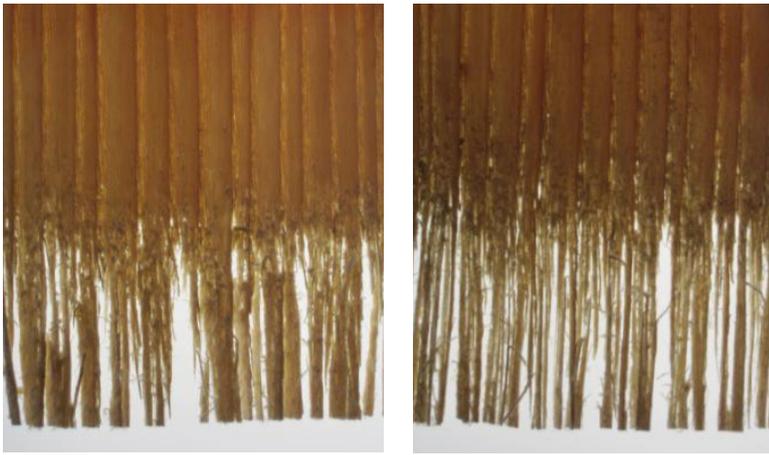


Abbildung: 139: Eschefurnier nach Bearbeitung mit Säge (links) und Metallbürste (rechts)

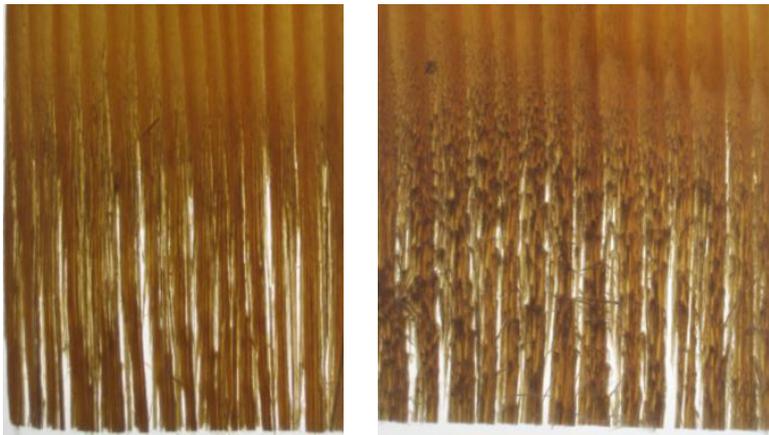


Abbildung 140: Fichtenfurnier nach Bearbeitung mit Säge (links) und Metallbürste (rechts)



Abbildung 141: Bambusfurnier: mit der Säge aufgeraut und zu mehreren Schichten verklebt (Probekörper:  $l \times b \times h = 140 \times 90 \times 7 \text{ mm}$ ) (links), mit Metallbürste bearbeitet und in Polyesterharz eingelassen (Probekörper:  $l \times b \times h = 120 \times 70 \times 5 \text{ mm}$ ) (rechts)

## Bambusrohre

Frisch geschnittene Bambusrohre wurden in Streifen geteilt und durch Hämmern zwischen Folienebenen aufgefasert. Die größere Faserlänge des Bambus im Vergleich zu Holz ermöglicht die einfache Bearbeitung der Faser. Nach der Bearbeitung mit dem Hammer konnten die separierten Faserstränge in ihrer Länge konfektioniert werden, um die eingangs beschriebene Abstufung der Fasern zu erreichen.

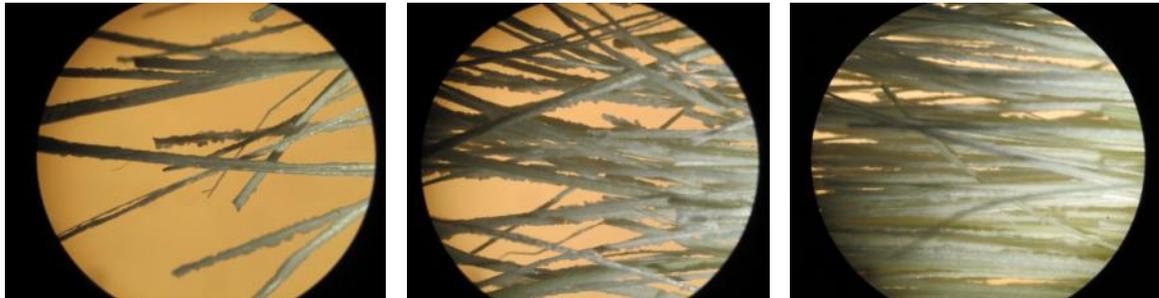


Abbildung 142: Durch Hämmern aufgetrennte Bambusfasern



Abbildung 143: Durch Hämmern aufgetrennte und abgestufte Bambusfasern (Probekörper  $b=10\text{ mm}$ )

### 7.6 Einbinden in eine zweite Phase

Die Holz- und Bambusmuster wurden exemplarisch in Polyesterharz eingebunden. Die Faserstruktur bleibt dabei sichtbar. Die Einbindung in andere Materialien (z.B. Beton) erscheint möglich, wobei die Alkaliresistenz der Zellulose-Fasern zu untersuchen wäre. Eine Begrenzung für die Einbindung in andere Materialien (z.B. Metalle) ist vor allem die Temperaturbeständigkeit der Zellulosefasern.

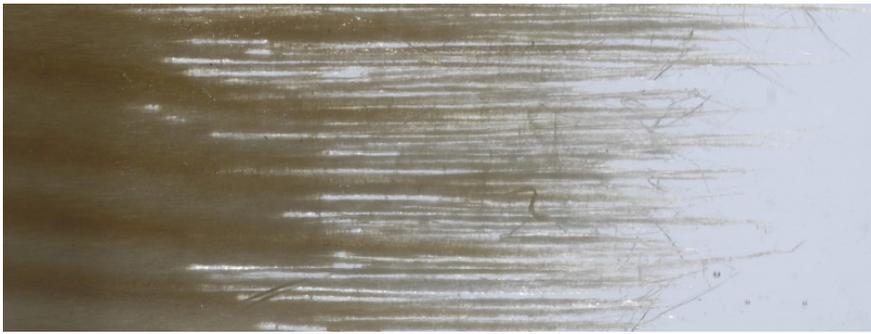


Abbildung 144: Fichtenfurnier in Polyesterharz eingebunden (Probekörper:  $l \times b \times h = 80 \times 45 \times 7 \text{ mm}$ )



Abbildung 145: Bambusfurnier in Polyesterharz eingebunden (Probekörper:  $l \times b \times h = 120 \times 70 \times 5 \text{ mm}$ )

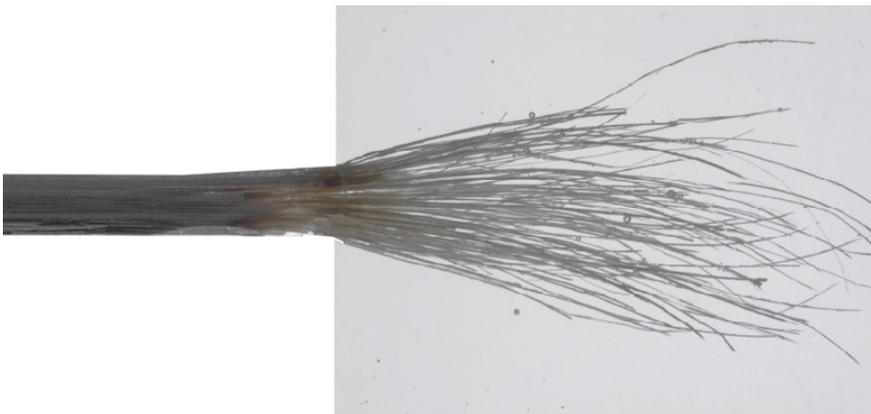


Abbildung 146: Bambusstreifen, aufgefasernd, in Polyesterharzplatte eingebunden (Probekörper:  $l \times b \times h = 80 \times 80 \times 3 \text{ mm}$ )

## 7.7 Zusammenfassung

Das Freilegen der Zellulose-Fasern gelang, mit mechanischen Bearbeitungsmethoden, für Bambus sehr gut. Ein chemisches Freilegen der Fasern konnte nicht erreicht werden, das Einbinden in eine zweite Phase gelang. Die erprobten Verfahren stellen noch keinen Herstellungsansatz für eine industrielle Anwendung dar. Dennoch erscheint der Ansatz interessant, da im Bereich der Verbindungstechnik von Holzbauteilen noch Entwicklungsbedarf besteht. Eine Gradierung auf Faserebene erscheint für das Bauwesen funktional nicht notwendig, eine gröbere Auflösung der Materialabstufung sollte der Fasergradierung gegenübergestellt werden.

## 7.8 Weitere Materialien

Zwei weitere Ansätze zur Herstellung fließender Materialübergänge im architektonischen Maßstab wurden in den vorangegangenen Kapiteln bereits angeführt: Zum einen durch die Verwendung gradierter Metallschäume (Kapitel 5.3.6), zum anderen durch Matrix-Verläufe bei Faser-verbundwerkstoffen (Kapitel 6.3). Fasst man diese Ansätze zusammen, so erscheinen unter Berücksichtigung der Temperaturbeständigkeit der jeweiligen Materialien funktionale Materialübergänge für verschiedene Materialien prinzipiell möglich:



Abbildung 147: Konzeptillustration: Fließende Materialübergänge für verschiedene Materialien

## 8 Ausblick

Gradientenwerkstoffe bzw. funktional gradierte Bauteile bergen große, bisher nicht erschlossene Optimierungspotentiale für verschiedene Anwendungen im Bauwesen.

Die größten Optimierungspotentiale hinsichtlich Ressourceneffizienz und Energieeinsparung sind im Bereich Betontechnologie zu erwarten. Die untersuchten Anwendungsbereiche Geschossdecke und Außenwand versprechen zum einen signifikante Masseneinsparungen und zum anderen die Realisierbarkeit rein mineralischer multifunktionaler Bauteile mit verbesserten Recyclingeigenschaften und geringeren Bauteilabmessungen. Nachdem die prinzipielle Herstellbarkeit und Vorteilhaftigkeit funktional gradierter Betonbauteile gezeigt werden konnte, müssen vertiefende Untersuchungen zur Praxistauglichkeit folgen. Die Weiterentwicklung wirtschaftlicher Herstellungsverfahren ist dabei von besonderer Relevanz. Die fokussierte Weiterentwicklung der Themengebiete Geschossdecke, Außenwand und Herstellungstechnik wird angestrebt.

Besonders interessant erscheint außerdem der Anwendungsbereich Verbindungstechnik. Fließende Materialübergänge, wie sie für Metallschäume, Holz und Faserverbundwerkstoffe gezeigt werden konnten, stellen einen neuartigen Ansatz der Fügetechnologie dar. Vor allem für Werkstoffe, die bisher nicht befriedigend verbunden werden konnten, bietet das Konzept der Gradierung eine zukunftsweisende Alternative. Die Kooperation mit Fachbereichen außerhalb der Bautechnik ist hierbei Voraussetzung für die Weiterentwicklung der genannten Ansätze.

Weitergehend kann die Anwendung gradierter Bauteile im Schallschutz (durch gradiert poröse Polymerschäume), in der Lüftungstechnik (durch gradiert permeable Membrane) und bei Sandwichbauteilen (durch optimierte Kernstrukturen) interessante Impulse für die Bautechnik geben. Eine Weiterverfolgung dieser Teilaspekte soll im Rahmen der Forschung im Bereich textiler Gebäudehüllen und adaptiver Leichtbaukonstruktionen erfolgen.

Nicht zuletzt ermöglichen gradierte Bauteile eine neuartige Herangehensweise bei der Gestaltung von Bauteilen und Objekten. Die nahtlose Variation des Härtegrades von Schaumstoffen sowie fließende Steifigkeitsverläufe in kontinuierlichen Flächen stehen beispielhaft für einen neuen Gestaltungsansatz. Hierbei können die Eigenschaften von Objekten unabhängig von der äußeren Form definiert werden. Dieses Konzept wird als „formgerechte Materialgebung“ bezeichnet und stellt eine Ergänzung zum etablierten Optimierungsprinzip der „materialgerechten Formgebung“ dar. Das Aufgreifen dieses Ansatzes eröffnet Architekten und Ingenieuren neue gestalterische Freiräume und leistet damit einen innovativen baukulturellen Beitrag.

## 9 Literatur

- [1] Sobek, W.: Zum Entwerfen im Leichtbau, *Bauingenieur*, (1995), 70, 7-8.
- [2] Heinz, P.F.: Gradientenwerkstoffe und Architektur, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart, April 2007.
- [3] Rödel, J.: Verfahren zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen, Patent DE 44 35 146 A 1, 1996, 2.
- [4] Nachtigall, W.: *Bau-Bionik: Natur, Analogien, Technik*, Berlin: Springer, 2003.
- [5] Speck, T.: Bionik - Potentiale für das Bauwesen, 1. Darmstädter Ingenieurkongress - Bau und Umwelt, 14. und 15. September 2009, Tagungsbeitrag, Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [6] Vogel, S.: *Von Grashalmen und Hochhäusern: mechanische Schöpfungen in Natur und Technik*, Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH, 2000.
- [7] Yamanouchi, M. et al.: *Proceedings of the 1st International Symposium on Functionally Gradient Materials*, Tokyo: FGM'90, 1990.
- [8] Kieback, B. Neubrand, A.; Riedel, H.: Processing techniques for functionally graded materials, *Materials Science & Engineering A*, (2003), A 362, 81-105.
- [9] Miyamoto, Y.; et al.: *Proceedings of the 11th International Symposium on Multiscale, Multifunctional and Functionally Graded Materials*, 2010.
- [10] Elsner, P.; Uhlmann, E.: *Gradierte Werkstoffeigenschaften - eine Herausforderung für die Fertigungstechnik*, Tagungsbeitrag, 3D-Erfahrungsforum Innovation Werkzeug- und Formenbau, Berlin, 2006, 17 ff.
- [11] Sobek, W. Trumpf, H.; Heinlein, F.: Recyclinggerechtes Konstruieren im Stahlbau, *Stahlbau*, 79 (2010), 6, 424-433.
- [12] Bergmeister, K.; Wörner, J.-D.: *Beton Kalender: Verkehrsbauten, Flächentragwerke*, Ernst & Sohn, Berlin, 1996.
- [13] Locher, F.W.: *Zement, Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, Bau und Technik Verlag, Düsseldorf, (2000).
- [14] Schlegel, E.; Boldt, R.: Die Wärmeleitfähigkeit hitzebeständiger Gasbetone SILTON-THERM in Abhängigkeit von der Rohdichte und Porengröße, *Silikattechnik*, 41 (1990), 12, 424-427.
- [15] Schulle, W.; Kutzendörfer, J.: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der Festigkeit vom mittleren Porendurchmesser bei Schamottenleichtsteinen, *Silikattechnik*, 39 (1988), 1, 3-5.
- [16] Spitzner, M.-H.: *Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit geschäumter Massen*, Claus-thal, 2001.
- [17] Luping, T.: A study of the quantitative relationship between strength and pore-size distribution of porous materials, *Cement and concrete research*, 16 (1984), 87-96.
- [18] Just, A.: *Untersuchungen zur Weiterentwicklung von chemisch aufgetriebenen, lufthärtenden, mineralisch gebundenen Schäumen*, Universität Dortmund, 2008.
- [19] Pott, J.U.: *Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume*, Hannover: Universität Hannover, 2006.
- [20] Thienel, K.-C.: *Werkstoffe des Bauwesens - Leichtbeton*, Universität München, 2006.
- [21] Faust, T.: *Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau*, Berlin: Ernst, 2003.
- [22] Bosold, D.: *Leichtbeton*, Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2008.
- [23] HeidelbergCement AG: *Betontechnologische Daten*, Leimen, 2009.
- [24] Middendorf, B.; Just, A.: Hochfester Schaumbeton - ein luftiger Konstruktionsbaustoff, *Betonwerk + Fertigteile-Technik*, 73 (2007), 2, 26-27.
- [25] Thienel, K.-C.: Fertigteile aus haufwerksporigem Leichtbeton mit porosierter Matrix, *Betonwerk + Fertigteile-Technik*, 66 (2006), 62-72.
- [26] Schlaich, M.; Zareef, M. el: *Infraleichtbeton*, *Beton- und Stahlbetonbau*, 103 (2008), 3, 175-182.

- 
- [27] Homann, M.: Porenbeton-Handbuch, Bauverlag, Gütersloh, 2008.
- [28] Radtke, L.: Herstellung und Eigenschaften eines neuen Leichtbetons: Aerogelbeton, Beton- und Stahlbetonbau, 103 (2008), 4, 236-243.
- [29] Jesse, F.; Curbach, M.: Verstärken mit Textilbeton, Beton-Kalender, Ernst & Sohn, Berlin, 2010, 458-565.
- [30] Hegger, J. et al.: Filigrane Tragstrukturen aus Textilbetonfertigteilen, Beton- + Fertigteil-Jahrbuch, 55 (2007), 82-86.
- [31] Brameshuber, W. (Hrsg.): State-of-the-art report of RILEM Technical Committee TC 201-TRC „Textile Reinforced Concrete“, Bagnex: RILEM, 2006.
- [32] Sika Deutschland GmbH: Sika Construction unter <[www.sika.com](http://www.sika.com)> Aufruf: 24.11.2010.
- [33] HeidelbergCement AG: Zement und Bindemittel - HeidelbergCement in Deutschland unter <[www.heidelbergcement.com](http://www.heidelbergcement.com)> Aufruf: 24.11.2010.
- [34] Cabot Corporation: Performance Materials and Advanced Fine Particle Science unter <[www.cabot-corp.com](http://www.cabot-corp.com)> Aufruf: 24.11.2010.
- [35] Stauss-Perlite GmbH: Europerl - Home unter <[www.europerl.com](http://www.europerl.com)> Aufruf: 24.11.2010.
- [36] Reinhardt, H.-W. Assmann, A.; Mönning, S.: Superabsorbent polymers (SAPs) - an admixture to increase the durability of concrete., Tagungsbeitrag, First International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, China: Bagnex, Oktober 2008, 312-322.
- [37] Assmann, A.: Bruchmechanische Untersuchungen des Einflusses kleiner, mittlerer und großer Kapillarporen auf die Betonfestigkeit., Diplomarbeit, IWB: Stuttgart, 2008.
- [38] BASF SE: Construction Chemicals BASF unter <[www.construction-chemicals.basf.com](http://www.construction-chemicals.basf.com)> Aufruf: 24.11.2010.
- [39] Plastoform GmbH: Plastoform - Dach, Fassade, Ausbau unter <[www.plastoform.de](http://www.plastoform.de)> Aufruf: 30.3.2011.
- [40] DIN EN 1015: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel, Oktober 1998.
- [41] DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit., Mai 2005.
- [42] DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton. Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper., Juni 1991.
- [43] DIN EN 12664: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät., Mai 2001.
- [44] Xella Deutschland GmbH: Ytong Silka Dämmsteine unter <[www.ytong-silka.de](http://www.ytong-silka.de)> Aufruf: 25.11.2010.
- [45] Lieb, H.: Berechnung und Produktion sehr schlanker Rundstützen, Bauingenieur, 75 (2000).
- [46] Quast, U.: Vorgespannte Stützen und Maste aus hochfestem Schleuderbeton, Beton- und Stahlbetonbau, 97 (2002), 6, 312-315.
- [47] Khoshnevis, B.: Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies, Automation in Construction, 13 (2004), 1, 5-19.
- [48] Dini, E.: D-Shape unter <<http://d-shape.com/>> Aufruf: 21.12.2010.
- [49] Schlaich, M.; Hillemeier, B.: Infraleichtbeton- Potenzial für den Sichtbetonbau?, Betonwerk + Fertigteil-Technik, (2007), 2, 118-119.
- [50] Thienel, K.-C. Dostmann, M.; Peck, M.: Anspruchsvolle Konstruktionen in Sichtleichtbeton.
- [51] BMBF: Öko-Zement reduziert CO<sub>2</sub>-Emissionen unter <<http://www.bmbf.de/press/2899.php>> Aufruf: 16.9.2010.
- [52] Hegger, J. et al.: Textilbewehrter Beton: Tragverhalten, Bemessung und Anwendung, Beton- und Stahlbetonbau, 102 (2007), 6, 362-370.
- [53] Burggrabe, A.-H.: Mirkobeton für modellstatische Untersuchungen: Grundlagen für die Anwendbarkeit bewehrter Betonmodelle kleinen Maßstabs zur experimentellen Untersu-
-

- chung von Stahlbetontragwerken, Berichte des Instituts für Modellstatik (Heft Nr. 1), Stuttgart, 1972.
- [54] DIN EN 12390 - 5: Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern, 2001.
- [55] DIN 53293: Prüfung von Kernverbänden - Biegeversuch, 1981.
- [56] Cichocki, F.R. Trumble, K.P.; Rödel, J.: Tailored Porosity Gradients via Colloidal Infiltration of Compression-Molded Sponges, *Journal American Ceramic Society*, 81 (1998), 1661-64.
- [57] m.pore GmbH: Metallschäume unter <<http://www.m-pore.de/>> Aufruf: 1.6.2010.
- [58] Wiedemann, J.: *Leichtbau : Elemente und Konstruktion*, Berlin: Springer, 2007.
- [59] Knippers, J.; Gabler, M.: Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen, *Stahlbaukalender*, Ernst & Sohn, Berlin, 2007, 455-498.
- [60] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [61] Spencer, D.B.: *Rheology of Liquid-Solid Metallic Alloys*, Cambridge, Massachusetts, 1971.
- [62] Tietmann, A.L.: Gießschmieden und Thixoschmieden von Aluminiumknetlegierungen, *Stahleisen, Tagungsbeitrag*, Düsseldorf, 1993.
- [63] Fan, Z.: Semisolid metal processing, *International Materials Reviews*, 47 (2002), 2, 49-85.
- [64] Kraler, A.; Kraly, A.: *Serienfertigung durch Thixogießen - Erfahrungsbericht*, Deutsche Forschungsgemeinschaft, RWTH Aachen, 2007.
- [65] Gadow, R. et al.: Leichtmetallmatrix-Faserverbundwerkstoffe und Verfahren zu deren Herstellung durch thixotrope Formgebungstechnik, *Internationale Patentanmeldung*, Patent 5404P106WO.
- [66] Liewald, M.; Unseld, P.: Bauteile auf Basis eines Hybridwerkstoffes, Patent 2020060041 18.4.
- [67] Zhang, H.; Wang, J.N.: Thixofforming of spray-formed 6066Al/SiCp composites, *Composites Science and Technology*, 2001, 1233 - 1238.
- [68] Götz, K.-H.: *Holzbau-Atlas*, München: Inst. fuer internat. Arch.-Dok., 1978.
- [69] Fengel, D.; Grosser, D.: Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubhölzern, *European Journal of Wood*, (1975), 33, 32-34.
- [70] Toledano, A. et al.: Lignin Separation and fractionation by ultrafiltration, *Separation and Purification Technology*, 71 (2010), 1, 38-43.
- [71] *Holzaufschluß mit dem Acetosolv-Verfahren unter* <[http://www.chemieunterricht.de/dc2/papier/dc2pt\\_1.htm](http://www.chemieunterricht.de/dc2/papier/dc2pt_1.htm)>.
- [72] Solár, R.; Kačík, F.: A comparative study of hard and softwood lignins alterations during treatment in dioxane-water-HCl agent, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 53 (1995), 1, 123-128.

## 10 Abbildungen

Abbildung 1:	Längsschnitt Oberschenkelhalsknochen (links) [4], Querschnitt Bambusrohr (rechts) [5] .....	5
Abbildung 2:	Gradierter Übergang von Zellen, Bärlappgewächs (links), menschliche Haut (rechts) [6] .....	6
Abbildung 3:	Sedimentationsverfahren, Detail Korngrößenverteilung (links) [7], Prinzipskizze Sedimentation (rechts).....	6
Abbildung 4:	Medizinisches Implantat mit gradierter Porosität [8] .....	7
Abbildung 5:	Einfluss des Wasserzementwerts und des Hydratationsgrades auf die Volumenanteile in Zementleim bzw. -stein [12] .....	13
Abbildung 6:	Wärmeleitfähigkeit der hitzebeständigen Gasbetone in Abhängigkeit von der Rohdichte bei 20, 200, 400, 600, 800 und 900 °C [14].....	15
Abbildung 7:	Wärmeleitfähigkeit der hitzebeständigen Gasbetone in Abhängigkeit von der Temperatur bei unterschiedlicher Porengröße [14] .....	16
Abbildung 8:	Wärmeleitfähigkeiten von Schamotteleichtsteinproben mit unterschiedlichem mittlerem Porendurchmesser in Abhängigkeit von der Temperatur [15].....	17
Abbildung 9:	Beitrag der Summanden zur äquivalenten Wärmeleitfähigkeit für eine Würfelpore mit 1mm innerer Kantenlänge [16] .....	18
Abbildung 10:	Relative Zunahme der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit beim Würfelporenmodell gegenüber 0 °C mit steigender Temperatur für verschiedene Porengrößen [16] .....	19
Abbildung 11:	Biegefestigkeit von Schamotteleichtsteinen bei Raumtemperatur in Abhängigkeit vom mittleren Porendurchmesser [15] .....	20
Abbildung 12:	Porenmodell mit zylindrischen, sich orthogonal kreuzenden Poren an der schwächsten Stelle [17].....	21
Abbildung 13:	Porengrößenverteilungen der betrachteten Proben [17].....	22
Abbildung 14:	Luftporen in zwei Schaumbetonen (Ausschnitt 800 x 600 µm): w/z = 0,60, kein Mikrosilica (links); w/z = 0,35, Mikrosilica-Gehalt = 10 % (rechts) [18].....	23
Abbildung 15:	Mittlere Rundheit verschiedener Luftporenklassen am Beispiel von vier ausgewählten Proben [18] .....	23
Abbildung 16:	Konstruktiver Leichtbeton (links); Haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix (mitte); haufwerksporiger Leichtbeton (rechts) [20] .....	25
Abbildung 17:	Kornrohddichte von verschiedenen leichten Zuschlagssorten [21].....	28

Abbildung 18:	Tragverhalten von Leicht- und Normalbeton, Verlauf der Hauptspannungslinien bei Druckspannung (blau: Druckspannungen, rot: Zugspannungen) [20] .....	29
Abbildung 19:	Dehnungsverteilung der Filamente eines Garns in Abhängigkeit der Homogenität und Steifigkeit der Sekundärbeschichtung .....	30
Abbildung 20:	Gekrümmter Faserverlauf kann zum Versagen der Betondeckung führen [29].....	31
Abbildung 21:	Gradientenbildung.....	32
Abbildung 22:	Darstellung der verwendeten Sieblinie.....	34
Abbildung 23:	Liaver-Korn, Korndurchmesser 4 mm [1] .....	35
Abbildung 24:	Fertiges Produkt und Herstellung von Aerogel Granulat [28],[34].....	36
Abbildung 25:	Drei-Punkt-Lastverfahren zur Biegezugermittlung von 4 x 4 x 16 cm Prismen.....	43
Abbildung 26:	Druckpresse mit Messeinrichtung .....	44
Abbildung 27:	Belastungs-Zeit-Diagramm für Elastizitätsmodul-Messung [42].....	45
Abbildung 28:	Wegaufnehmer an Zylinder (15 x 30 cm) zur Elastizitätsmodul-Prüfung .....	46
Abbildung 29:	Zweiplattengerät mit Versuchsaufbau (Platten: 20 x 20 x 3 cm) .....	47
Abbildung 30:	Systemaufbau des Zweiplattengeräts [43] .....	48
Abbildung 31:	Wasseraufnahmefähigkeit in Abhängigkeit der Ionenkonzentration .....	49
Abbildung 32:	Baumstruktur Mischungsentwicklung.....	53
Abbildung 33:	Kernmischung nach Thienel (Größtkorn 4 mm) [25] .....	55
Abbildung 34:	Bezeichnung Kernmischung KLS.....	57
Abbildung 35:	Kernmischung mit Liaver und Schaum (Prisma 4 x 4 x 16 cm).....	58
Abbildung 36:	Bezeichnung Kernmischung KLSAP .....	59
Abbildung 37:	Kernmischung mit Liaver und SAP (Prisma 4 x 4 x 16 cm).....	59
Abbildung 38:	Bezeichnung Kernmischung KLM .....	60
Abbildung 39:	Kernmischung mit Liaver und Mikrohohlkugeln (Prisma 4 x 4 x 16 cm).....	60
Abbildung 40:	Bezeichnung Kernmischung KAM.....	61
Abbildung 41:	Kernmischung mit Aerogel und Mikrohohlkugeln (Prisma 4 x 4 x 16 cm).....	62
Abbildung 42:	Bilderreihe zu Gradient 1 (Größtkorn 4 mm).....	63
Abbildung 43:	Erläuterung zu Gradient 2 .....	65
Abbildung 44:	Luftgehalt von Gradient 1 mit Liaver in Abhängigkeit der Rohdichte .....	68
Abbildung 45:	28-d Druckfestigkeit aller Mischungen .....	71
Abbildung 46:	Druckfestigkeiten mit Vergleich zu Porenbeton und Schaumbeton .....	71
Abbildung 47:	Festigkeitsentwicklung von vier Mischungen .....	72
Abbildung 48:	28-d Biegezugfestigkeit aller Mischungen.....	73
Abbildung 49:	Biegezugfestigkeiten der Kernmischungen und des zweiten Gradienten .....	73
Abbildung 50:	Zugfestigkeitsentwicklung über die Zeit .....	74

Abbildung 51:	Elastizitätsmodul über die Rohdichte .....	75
Abbildung 52:	Wärmeleitfähigkeit der Mischungen mit Vergleich zu Porenbeton und Schaumbeton.....	76
Abbildung 53:	Gradientenschritte und Verlauf der Eigenschaften (Größtkorn Blähglas 4 mm).....	78
Abbildung 54:	Quantitativer Vergleich von Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Trockenrohichte und Wärmeleitfähigkeit von zwei Kernmischungen mit Porenbeton .....	79
Abbildung 55:	Porositätsgradient, geschichtet, Zuschlag (Blähglas), Prisma 4 x 4 x 16 cm .....	81
Abbildung 56:	Porositätsgradient, geschichtet, Porenbildner (Aluminiumpulver), Prisma 4 x 4 x 16 cm .....	81
Abbildung 57:	Vertikale und horizontale Schichtungen zur Herstellung von Gradientenbauteilen .....	82
Abbildung 58:	Versuchsaufbau Gradientenbildung durch Rotation .....	83
Abbildung 59:	Kontrolliertes Entmischen in einer Zentrifuge (Durchmesser 10,5 cm, Wandstärke ca. 2 cm); Ansicht Probekörper (links), Ausschnitt (rechts) .....	85
Abbildung 60:	Platzhalter: EPS, chemisch herausgelöst (Porendurchmesser: 2 bis 4 mm).....	85
Abbildung 61:	Platzhalter: Pneumatische Inlay (Porendurchmesser: 40 bis 100 mm).....	86
Abbildung 62:	Platzhalter: Paraffin, thermisch herausgelöst (Porendurchmesser: 10 bis 50 mm) .....	86
Abbildung 63:	Alkalisch lösliche Trennlagen zwischen verschiedenen Betonmischungen (Prisma 4 x 4 x 16 cm) .....	86
Abbildung 64:	Beton-infiltrierte offenzellige Schaumstruktur.....	87
Abbildung 65:	Prinzip des Gradierten Mischens (links); Durchlaufmischer der Firma Putzmeister (rechts).....	87
Abbildung 66:	Ausgabevorrichtung, direkter Materialauftrag (links) [47], Bindemittel in Pulverbett (rechts) [48].....	88
Abbildung 67:	Pumpbare KLM Leichtbetonmischung .....	89
Abbildung 68:	Mehrschichtbauteil (Dicke 2 cm), mit folgendem Aufbau: Deckschicht – Leichtbetonkern – textile Bewehrung – Pigmentierte Oberfläche .....	90
Abbildung 69:	Mischen verschiedener Volumenströme im Sprühnebel .....	91
Abbildung 70:	Zuführung der Pigmente im Pumptrichter .....	91
Abbildung 71:	Gradierung der Pigmente über die Bauteillänge (Schnitt Zylinder 10 x 40 cm) .....	91
Abbildung 72:	Variation des Verhältnisses zweier Mischungen im Sprühnebel.....	92
Abbildung 73:	Gradientenspritzen durch Variation der Verhältnisse im Sprühnebel .....	92

Abbildung 74:	Gradientenprobekörper, die in 5 Mörtelprismen aufgeteilt werden können (links); gefüllte Schalungen (rechts).....	93
Abbildung 75:	Mittels zweier Sprühgeräte realisierter Porositätsgradient (Zylinder 10 x 40 cm) .....	93
Abbildung 76:	Mörtelprismen gesägt aus Gradientenprobekörper (4 x 4 x 16 cm) .....	94
Abbildung 77:	Rohdichten der Gradientensprühversuche .....	94
Abbildung 78:	Druckfestigkeiten der Gradientensprühversuche .....	95
Abbildung 79:	Biegezugfestigkeiten der Gradientensprühversuche .....	95
Abbildung 80:	Schichtauswahl für Musterbauteil .....	98
Abbildung 81:	Gradientenbetonwand mit Blähglaskern (Wandstärke 40 cm) .....	99
Abbildung 82:	Wandbauteil mit KLM als Dämmmaterial.....	100
Abbildung 83:	Variation mit KAM als Dämmmaterial .....	100
Abbildung 84:	Verteilung der Vergleichsspannung eines Balkens unter Gleichlast auf zwei Stützen isotropen Materials .....	101
Abbildung 85:	Vorgehen bei modellstatischen Versuchen.....	102
Abbildung 86:	Referenzobjekt Massivdecke mit Punktlasten.....	103
Abbildung 87:	Hauptausführung der Gradientendecke .....	104
Abbildung 88:	Skalierung der Bauteile und Anpassung an die Belastung bei der Prüfung .....	105
Abbildung 89:	Dehnkörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit der textilen Bewehrung im eingebauten Zustand; Prinzipskizze (links), Versuchsaufbau (rechts).....	107
Abbildung 90:	Prüfkörper der Vorversuche .....	108
Abbildung 91:	Gradientendecken Prüfkörper Vorversuch (Balken 10 x 10 x 120 cm) .....	108
Abbildung 92:	Herstellung der Bauteile (Balken 10 x 10 x 120 cm) .....	109
Abbildung 93:	Schema des Biegeversuchs.....	110
Abbildung 94:	Kraft-Verformungsdiagramm der Versuchsserie 3 (Querkraftversagen).....	111
Abbildung 95:	Kraft-Verformungsdiagramm der Versuchsserie 5 (Biegeversagen).....	112
Abbildung 96:	Polyurethanschaum vor und nach dem Retikulieren.....	115
Abbildung 97:	Prinzipskizze: Herstellung gradiert poröser PUR Filterschäume.....	116
Abbildung 98:	Porositätsgradient und dazugehörige Zuschnittsgeometrie (Probekörper: l x b x h = 110 x 40 x 5 mm).....	118
Abbildung 99:	Kompressionsverhalten bei zunehmender Eindringtiefe (Probekörper: l x b x h = 300 x 50 x 20 mm) .....	119
Abbildung 100:	Probekörper vor und nach der thermischen Konsolidierung.....	120
Abbildung 101:	Porositätsgradient nach Wärmebehandlung (Probekörper: l x b x h = 200 x 30 x 10 mm) .....	120
Abbildung 102:	Prinzipskizze: Herstellungsverfahren Infiltration .....	121

Abbildung 103:	Acrylharzinfiltrierter PUR-Schaum, 10 ppi (Porendurchmesser: 2 bis 3 mm).....	122
Abbildung 104:	Gradiert infiltrierter PUR-Schaum (Acrylharz) (Probekörper: l x b x h = 255 x 30 x 10 mm) .....	122
Abbildung 105:	Mit Zement infiltrierter PUR-Schaum, 10 ppi (Porendurchmesser: 2 bis 3 mm).....	122
Abbildung 106:	Gradiert infiltrierter PUR-Schaum (Zement) (Probekörper: l x b x h = 255 x 30 x 10 mm) .....	122
Abbildung 107:	Gradiertes PUR-Schaum in Polyesterharz (Probekörper: l x b x h = 210 x 55 x 15 mm) .....	123
Abbildung 108:	Metallschäume als Replikate von PUR-Schäumen [57] .....	124
Abbildung 109:	Prinzipskizze: Herstellungsverfahren von Metallschäumen als Replikate von PUR-Schäumen .....	125
Abbildung 110:	Prinzipskizze: Herstellung funktional gradierter Sandwichelemente.....	125
Abbildung 111:	Entwurfsskizze: Gradierte Liege [2] .....	126
Abbildung 112:	Prinzipskizze: Porositätsverlauf gradierte Liege [2] .....	126
Abbildung 113:	Varianten möglicher Schaumzuschnitte für die gradierte Liege.....	127
Abbildung 114:	Gradierungen der Schaumstruktur auf Basis verschiedener Zuschnitte.....	128
Abbildung 115:	Porositätsgradient: Gradierte Liege (Probekörper: l x b x h = 140 x 50 x 45 mm).....	128
Abbildung 116:	Gradierte Porosität, 10 ppi (Porendurchmesser: 2 bis 3 mm).....	129
Abbildung 117:	Konzeptmontage: PUR-Schaum als Vorform für die Umsetzung in Metall und Einbettung in Beton .....	130
Abbildung 118:	Materialübergang durch Einbetten einer gradierten Metall-Schaumstruktur in eine zweite Phase.....	130
Abbildung 119:	Gradierungspotentiale: Faser/Gewebe, Beschichtung/Matrix.....	131
Abbildung 120:	Unterscheidung: Beschichtung und Matrix (rot).....	131
Abbildung 121:	Auftragsgradient an Silikonbeschichtung (Glasfasergewebe 300 g/m <sup>2</sup> ) .....	133
Abbildung 122:	Permeationsgradient bei Belastung mit einer Wassersäule .....	133
Abbildung 123:	Gradiertes Steifigkeitsverlauf einer Membrane (Glasfasergewebe 300 g/m <sup>2</sup> ) .....	134
Abbildung 124:	Prinzipskizze: Vergleich lokales Lüftungsgerät und gradierte Permeabilität.....	135
Abbildung 125:	Aufbau von Öffnungssystemen – Tür im Vergleich zu gradiertem Öffnungselement .....	136
Abbildung 126:	Gradiertes Übergang harzgebundener (oben) und metallgebundener (unten) Glas-/Kohlefaser (Streifen 2 x 10 cm) .....	138

Abbildung 127:	Herstellen erster Probekörper mit einem gradierten Matrixübergang von Harz zu Metall .....	139
Abbildung 128:	Verbund Fasern - Metallmatrix.....	140
Abbildung 129:	Herstellungsprozess geschmiedeter Übergang CFK – MMC – Metall 1. Schichten von Kohlefasern und Metallblechen 2. Komprimieren und Infiltrieren beim Schmiedevorgang .....	140
Abbildung 130:	Geschichtetes Paket und Prepregs (11 x 15 cm) .....	141
Abbildung 131:	Übersicht: Eigenschaftsverläufe von Textilien und Faserverbundwerkstoffen .....	142
Abbildung 132:	Konzeptillustration: Fließender Materialübergang Holz-Metall .....	143
Abbildung 133:	Herstellungsverfahren: fließender Materialübergang von Holz zu anderen Materialien .....	144
Abbildung 134:	Furnierstreifen: von links nach rechts: Esche aufgeraut, Esche unbehandelt, Fichte unbehandelt, Fichte aufgeraut, Bambus mit Längsfaserformat, Bambus mit Quersfaserformat (Probekörper: l x b x h = 120 x 50 x 1 mm).....	145
Abbildung 135:	Versuchsaufbau, chemisches Lösen .....	146
Abbildung 136:	Ergebnisse nach dem zweiten Versuch, zwei Esche-Proben (links), zwei Fichtefurniere (rechts).....	147
Abbildung 137:	Ergebnisse nach dem dritten Versuch.....	147
Abbildung 138:	Ergebnisse nach dem vierten Versuch .....	147
Abbildung 139:	Eschefurnier nach Bearbeitung mit Säge (links) und Metallbürste (rechts).....	149
Abbildung 140:	Fichtenfurnier nach Bearbeitung mit Säge (links) und Metallbürste (rechts).....	149
Abbildung 141:	Bambusfurnier: mit der Säge aufgeraut und zu mehreren Schichten verklebt (Probekörper: l x b x h = 140 x 90 x 7 mm) (links), mit Metallbürste bearbeitet und in Polyesterharz eingelassen (Probekörper: l x b x h = 120 x 70 x 5 mm) (rechts) .....	149
Abbildung 142:	Durch Hämmern aufgetrennte Bambusfasern .....	150
Abbildung 143:	Durch Hämmern aufgetrennte und abgestufte Bambusfasern (Probekörper b=10 mm).....	150
Abbildung 144:	Fichtenfurnier in Polyesterharz eingebunden (Probekörper: l x b x h = 80 x 45 x 7 mm) .....	151
Abbildung 145:	Bambusfurnier in Polyesterharz eingebunden (Probekörper: l x b x h = 120 x 70 x 5 mm) .....	151
Abbildung 146:	Bambusstreifen, aufgefasernt, in Polyesterharzplatte eingebunden (Probekörper: l x b x h = 80 x 80 x 3 mm).....	151

---

Abbildung 147: Konzeptillustration: Fließende Materialübergänge für verschiedene Materialien .....	152
<b>Anhang</b>	
Abbildung 148: SV3: Kraft-Verformungsdiagramm.....	4
Abbildung 149: SV3: Bruchbilder der Prüfkörper .....	4
Abbildung 150: Bruch entlang des Spalts zwischen den Betonierlagen SV3.3 .....	5
Abbildung 151: SV4: Kraft-Verformungsdiagramm.....	6
Abbildung 152: SV4: Bruchbilder der Prüfkörper .....	6
Abbildung 153: Vergleich der Bruchflächen von SV4.1 (links) und SV4.3 (rechts).....	7
Abbildung 154: SV5: Kraft-Verformungsdiagramm.....	9
Abbildung 155: SV5: Bruchbilder der Prüfkörper .....	9
Abbildung 156: Bruchverlauf im Bereich der fehlerhaften KM2 bei SV5.2.....	9
Abbildung 157: SV6: Kraft-Verformungsdiagramm.....	11
Abbildung 158: SV6: Bruchbilder der Prüfkörper .....	11
Abbildung 159: Vergleich Bruchbild der Bewehrung bei SV6.2 (links) und SV6.3 (rechts).....	12

## 11 Tabellen

Tabelle 1:	Beton als 5-Stoff-System.....	11
Tabelle 2:	Ausgangseigenschaften der untersuchten Schamottleichtsteinproben .....	17
Tabelle 3:	Biegefestigkeiten von Schamottenleichtsteinproben mit gleichem Porenvolumenanteil, aber verschiedenem mittleren Porendurchmesser bei Raumtemperatur.....	20
Tabelle 4:	Abhängigkeit der Festigkeit von der Gestalt des Luftporenraums.....	22
Tabelle 5:	Klasseneinteilung von Leichtbeton nach der Rohdichte [23].....	25
Tabelle 6:	Eigenschaften eines Infralichtbetons [26].....	27
Tabelle 7:	Dimensionsvergleich Stahlbeton - Textilbeton .....	31
Tabelle 8:	Technische Daten von Sika Basismischung CR [32] .....	33
Tabelle 9:	Technische Daten von CEM I 52,5 R .....	33
Tabelle 10:	Zusammensetzung der Sieblinie .....	34
Tabelle 11:	Technische Daten von Liaver-Blähglas [1].....	35
Tabelle 12:	Technische Daten von Aerogel [34] .....	36
Tabelle 13:	Technische Daten von Thermo-Mix Europerl [35].....	37
Tabelle 14:	Technische Daten von Sika® ViscoCrete-1020 X.....	40
Tabelle 15:	Plastoform Glasseiden-Armierungsgewebe, Panzer – Reißfestigkeiten .....	40
Tabelle 16:	Vergleich der zwei Schaumbildner .....	50
Tabelle 17:	Wasserabsorption von Perlit.....	51
Tabelle 18:	Mischungszusammensetzung RA .....	55
Tabelle 19:	Zusammensetzung der Kernmischung nach Thienel .....	56
Tabelle 20:	Mischungszusammensetzung KLS .....	58
Tabelle 21:	Mischvorgang KLS .....	58
Tabelle 22:	Mischungszusammensetzung KLSAP.....	59
Tabelle 23:	Mischvorgang SAP .....	60
Tabelle 24:	Mischungszusammensetzung und Mischvorgang KLM .....	61
Tabelle 25:	Mischvorgang KLM.....	61
Tabelle 26:	Mischungszusammensetzung KAM .....	62
Tabelle 27:	Mischvorgang KAM .....	62
Tabelle 28:	Mischungszusammensetzung G0,77A.....	63
Tabelle 29:	Mischvorgang G0,77A .....	63
Tabelle 30:	Mischungszusammensetzung G0,53L .....	64
Tabelle 31:	Mischvorgang G0,53L .....	64
Tabelle 32:	Mischungszusammensetzung und Mischvorgang G0,30L.....	64
Tabelle 33:	Mischvorgang G0,30L .....	64
Tabelle 34:	Mischungszusammensetzung G0,1LM .....	66

---

Tabelle 35:	Mischvorgang G0,1LM .....	66
Tabelle 36:	Mischungszusammensetzung G0,2LSAP .....	66
Tabelle 37:	Mischvorgang G0,2LSAP .....	66
Tabelle 38:	Vergleich der Soll- und Ist-Frischbetonrohichten.....	69
Tabelle 39:	Verarbeitbarkeit und Konsistenzklassen der Mischungen.....	70
Tabelle 40:	Anpassung der Prüfparameter .....	75
Tabelle 41:	Übersicht Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen .....	77
Tabelle 42:	Mischungsbestandteile Rotationsversuch .....	83
Tabelle 43:	Übersicht über die Versuchsserien.....	84
Tabelle 44:	Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten des Musterbauteils.....	99
Tabelle 45:	Variation des Musterbauteils .....	100
Tabelle 46:	Belastung des Referenzobjekts.....	103
Tabelle 47:	Belastung der Hauptausführung.....	104
Tabelle 48:	Skalierte Belastung der Modelle.....	105
Tabelle 49:	Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen der verwendeten Mischungen .....	106
Tabelle 50:	Allgemeine Daten der Bewehrung in den Dehnkörperversuchen.....	107
Tabelle 51:	Versuchsserien 3 bis 6 .....	110
Tabelle 52:	Ergebnisse Bemessung der Versuchsserie 5.....	112
Tabelle 53:	Bauteilversuche der Versuchsserie 5 .....	112
Anhang		
Tabelle 54:	Ergebnisse der Dehnkörperversuchsserie 2 .....	1
Tabelle 55:	Messwerte und Auswertung SV2 .....	2
Tabelle 56:	SV3: Ergebnisse der Bauteilprüfung .....	3
Tabelle 57:	SV4: Ergebnisse der Bauteilprüfung .....	5
Tabelle 58:	SV5: Ergebnisse der Bauteilprüfung .....	8
Tabelle 59:	SV6: Ergebnisse der Bauteilprüfung .....	10
Tabelle 60:	Versuchsergebnisse Versuche gradiertes Sprühen .....	13

## Anhang

### 1 Vorversuche funktional gradierte Deckenelemente

Tabelle 54: Ergebnisse der Dehnkörperversuchsserie 2

	DV2.1	DV2.2	DV2.3	DV2.4	DV2.5	Mittelwert	
Messwerte	$F_{cr}$ [N]	1246,5	1351,2	1158,1	1302,2	1309	1273,4
	$\Delta l_{cr}$ [mm]	0,06	0,17	0,19	0,22	0,21	0,2
	$F_{t,v}$ [N]	2747,2	2637,1	2566,3	2732,2	2499,7	2636,5
	$\Delta l_{t,v}$ [mm]	1,34	1,54	1,52	1,55	1,31	1,45
berechnete Werte	$f_{cr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,77	4,24	3,42	3,49	3,95	3,77
	$\varepsilon_{cr}$ ‰	-0,253	0,686	0,764	0,872	0,841	0,791
	$f_{t,fil,v}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	476,94	457,83	445,54	474,34	433,98	457,73
	$\varepsilon_{t,v}$ ‰	5,355	6,147	6,076	6,219	5,253	5,81
	$k_{1,50mm}$	0,2782	0,267	0,2599	0,2767	0,2531	0,267

Mit:

$F_{cr}$	Bruchkraft des Betons
$\Delta l_{cr}$	Längenänderung beim Erreichen der Bruchkraft des Betons
$F_{t,v}$	Bruchkraft der textilen Bewehrung im Dehnkörperversuch
$\Delta l_{t,v}$	Längenänderung beim Erreichen der Bruchkraft der textilen Bewehrung
$f_{cr} = \frac{F_{cr}}{A_{Messbereich}}$	Zugfestigkeit des Betons
$f_{t,fil,v} = \frac{F_{t,v}}{n_v \times A_F}$	Dehnung des Verbundquerschnitts bei Erreichen der Bruchkraft des Betons
$\varepsilon_{cr} = \frac{\Delta l_{cr}}{l_{Messbereich}}$	Filamentzugfestigkeit der textilen Bewehrung im Dehnkörperversuch
$\varepsilon_{t,v} = \frac{\Delta l_{t,v}}{l_{Messbereich}}$	Dehnung des Verbundquerschnitts bei Erreichen der Bruchkraft der textilen Bewehrung im Dehnkörperversuch
$k_{1,50mm}$	Beiwert

Tabelle 55: Messwerte und Auswertung SV2

Nr.		SV2.1	SV2.2	SV2.4
Messwerte	$w_{1kN}$ [mm]	0,1	0,1	0,12
	$w_{2kN}$ [mm]	0,22	0,22	0,31
	$w_{3kN}$ [mm]	0,34	0,33	0,5
	$F_{cr}$ [kN]	3,5	5,3	3,4
	$w_{cr}$ [mm]	0,45	1	0,74
	$F_{Traglast}$ [kN]	8,5	8,6	9,6
	$w_{Traglast}$ [mm]	-	9,14	-
abgeleitete Werte	$M_{Rk}$ [kNm]	1,06	1,08	1,2
	$F_t$ [kN]	11,4	11	12,5
	$k_{fl}$	1,297	1,252	1,422
	$V_{Rk}$ [kN]	4,25	4,3	4,8
Querkrafttragfähigkeit	$V_{Rk1,(4.75)}$ [kN]	2,17	2,24	2,2
	Abw. [%]	-48,97	-47,98	-54,23
	$V_{Rk1,(4.76)}$ [kN]	3,7	3,86	3,76
	Abw. [%]	-12,92	-10,25	-21,56
StaR	$w_{1kN}$ [mm]	0,1021	0,1157	0,1443
	Abw. [%]	2,1	15,7	20,3
	$w_{2kN}$ [mm]	0,2043	0,2314	0,2886
	Abw. [%]	-7,1	5,2	-6,9
	$w_{3kN}$ [mm]	0,3064	0,3472	0,4329
	Abw. [%]	-9,9	5,2	-13,4

## 2 Hauptversuche funktional gradierte Deckenelemente

### 2.1 Versuchsserie SV3

Tabelle 56: SV3: Ergebnisse der Bauteilprüfung

		Bemes- sung	SV3.1	SV3.2	SV3.3	SV3.4	Mittelwert
Messwerte	$W_{1,0kN}$ [mm]	-	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11
	$W_{2,0kN}$ [mm]	-	0,24	0,23	0,25	0,26	0,25
	$W_{3,0kN}$ [mm]	-	0,41	0,39	0,41	0,45	0,42
	$F_{cr}$ [kN]	-	3,54	3,65	3,66	3,63	3,62
	$w_{cr}$ [mm]	-	0,69	1	0,8	0,99	0,87
	$F_{Traglast}$ [kN]	7,48	8,86	8,79	8,22	8,03	8,47
	$w_{Traglast}$ [mm]	-	12,14	12,89	11,16	11,12	11,83
abgeleitete Werte	$M_{Rk}$ [kNm]	1,04	1,11	1,1	1,03	1	1,06
	$F_t$ [kN]	10,99	12,14	12,08	11,16	10,92	11,58
	$k_{fl}$	1,25	1,38	1,37	1,27	1,24	1,32
	$V_{Rk}$ [kN]	-	4,43	4,39	4,11	4,02	4,24
Querkraft- tragfähigkeit	$V_{Rk1,(4.75)}$ [kN]	2,19	2,18	2,14	2,18	2,15	2,16
	Abw. [%]	-	-50,7	-51,3	-47	-46,5	-48,9
	$V_{Rk1,(4.76)}$ [kN]	3,74	3,74	3,64	3,73	3,66	3,69
	Abw. [%]	-	-15,6	-17,2	-9,2	-8,9	-12,7
StaR	$w_{1,0kN}$ [mm]	0,16	0,1	0,12	0,12	0,13	0,11
	Abw. [%]	-	-10,5	11,6	1,1	2,3	1,1
	$w_{2,0kN}$ [mm]	0,32	0,19	0,24	0,23	0,25	0,23
	Abw. [%]	-	-19,6	4	-7,1	-4	-6,7
	$w_{3,0kN}$ [mm]	0,47	0,29	0,36	0,35	0,38	0,34
	Abw. [%]	-	-28,7	-8,8	-16,1	-16,2	-17,5
Versagen infolge		-	Querkraft	Querkraft	Querkraft	Querkraft	-

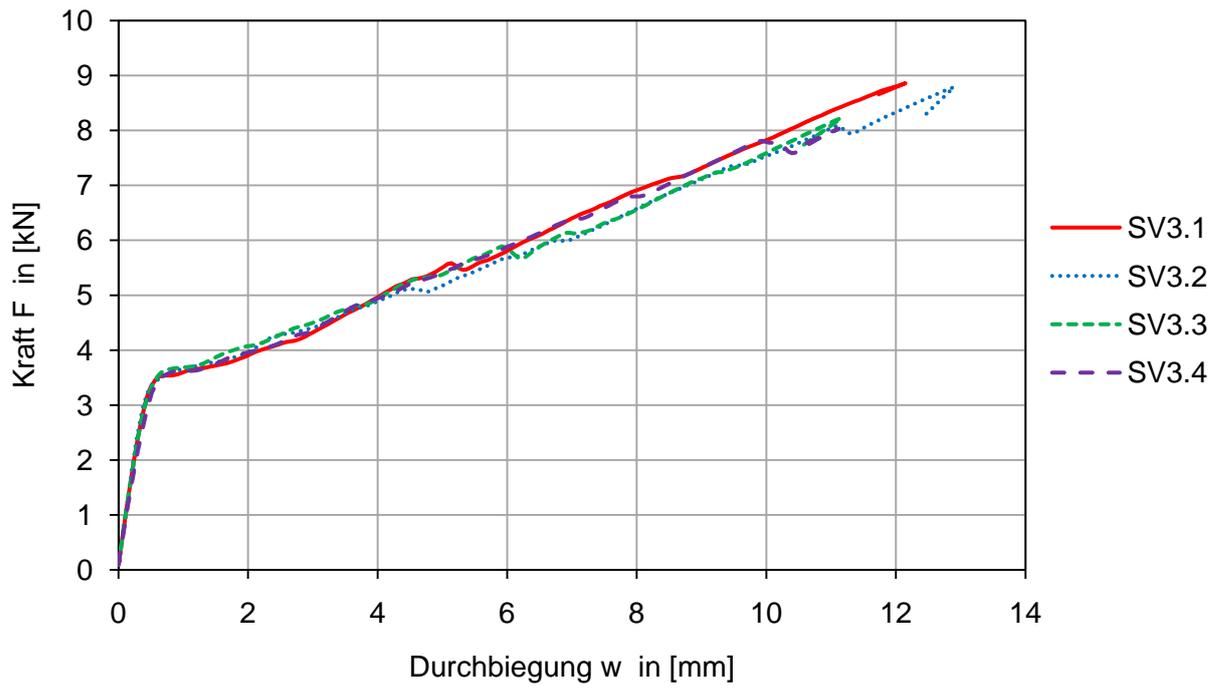


Abbildung 148: SV3: Kraft-Verformungsdiagramm



Abbildung 149: SV3: Bruchbilder der Prüfkörper

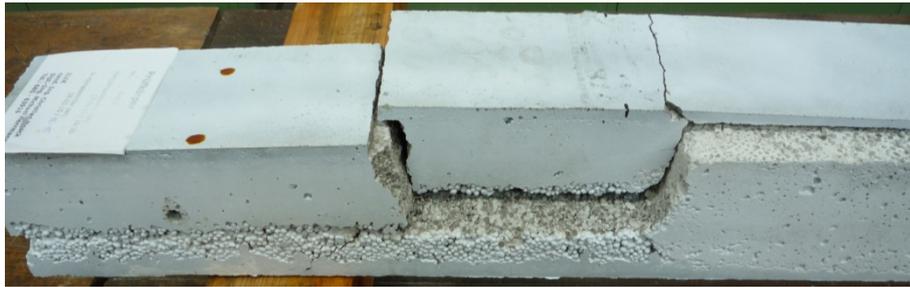


Abbildung 150: Bruch entlang des Spalts zwischen den Betonierlagen SV3.3

## 2.2 Versuchsserie SV4

Tabelle 57: SV4: Ergebnisse der Bauteilprüfung

		Bemes- sung	SV4.1	SV4.2	SV4.3	SV4.4	Mittelwert
Messwerte	$W_{1,0kN}$ [mm]	-	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	$W_{2,0kN}$ [mm]	-	0,29	0,28	0,27	0,29	0,28
	$W_{3,0kN}$ [mm]	-	0,52	0,48	0,48	0,52	0,5
	$F_{Cr}$ [kN]	-	3,3	3,37	3,34	3,26	3,32
	$W_{Cr}$ [mm]	-	0,78	0,88	0,68	0,73	0,77
	$F_{Traglast}$ [kN]	7,48	8,61	8,27	-8,15	8,93	8,6
	$W_{Traglast}$ [mm]	-	11,11	10,62	11,21	12,42	11,34
abgeleitete Werte	$M_{Rk}$ [kNm]	1,04	1,08	1,03	1,02	1,12	1,06
	$F_t$ [kN]	10,99	12	11,43	11,46	12,44	11,83
	$k_{fl}$	1,25	1,37	1,3	1,3	1,42	1,35
	$V_{Rk}$ [kN]	-	4,31	4,13	-4,07	4,46	4,3
Querkraft- tragfähigkeit	$V_{Rk1,(4.75)}$ [kN]	2,19	2,15	2,14	2,15	2,14	2,14
	Abw. [%]	-	-50,2	-48,3	(-47,2)	-52,1	-50,2
	$V_{Rk1,(4.76)}$ [kN]	3,74	3,65	3,63	3,66	3,64	3,65
	Abw. [%]	-	-15,2	-12,1	(-10,0)	-18,4	-15,2
StaR	$W_{1,0kN}$ [mm]	0,16	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11
	Abw. [%]	-	-9,2	-9	-14,8	-8	-10,3
	$W_{2,0kN}$ [mm]	0,32	0,23	0,23	0,21	0,23	0,23
	Abw. [%]	-	-21,8	-16,6	-21,4	-19,2	-19,7
	$W_{3,0kN}$ [mm]	0,47	0,34	0,34	0,32	0,35	0,34
	Abw. [%]	-	-34,8	-27,8	-33	-32,8	-32,1
Versagen infolge		-	Querkraft	Querkraft	Biegezug	Querkraft	-

Werte in Klammern werden bei der Berechnung des Mittelwertes nicht berücksichtigt.

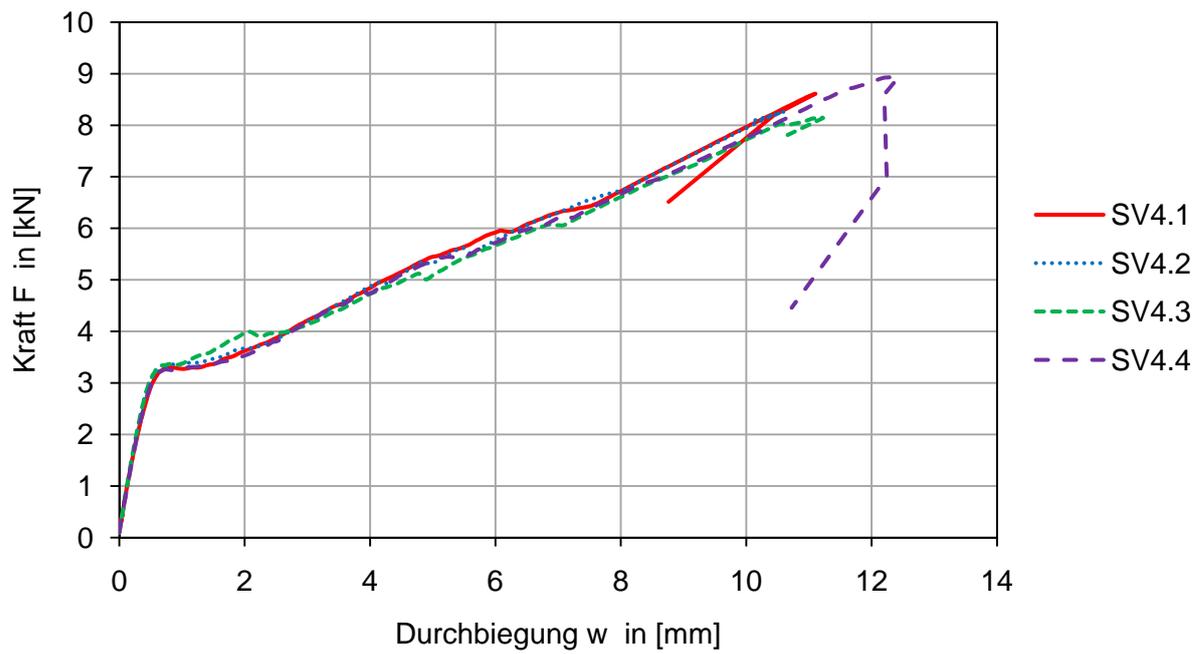


Abbildung 151: SV4: Kraft-Verformungsdiagramm



Abbildung 152: SV4: Bruchbilder der Prüfkörper



Abbildung 153: Vergleich der Bruchflächen von SV4.1 (links) und SV4.3 (rechts)

## 2.3 Versuchsserie SV5

Tabelle 58: SV5: Ergebnisse der Bauteilprüfung

Nr.		Bemes- sung	SV5.1	SV5.2	SV5.3	SV5.4	Mittelwert
Messwerte	W <sub>1,0kN</sub> [mm]	-	0,32	0,15	0,16	0,16	0,19
	W <sub>1,5kN</sub> [mm]	-	0,55	0,24	0,28	0,25	0,33
	W <sub>2,0kN</sub> [mm]	-	1,07	0,5	0,46	0,4	0,61
	F <sub>cr</sub> [kN]	-	2,04	2,03	2,34	2,37	2,2
	w <sub>cr</sub> [mm]	-	1,18	0,63	0,72	0,66	0,79
	F <sub>Traglast</sub> [kN]	4,59	4,76	4,64	4,44	4,68	4,63
	w <sub>Traglast</sub> [mm]	-	8,46	7,75	7,26	7,71	7,79
abgeleitete Werte	M <sub>Rk</sub> [kNm]	0,57	0,59	0,58	0,55	0,58	0,58
	F <sub>t</sub> [kN]	6,04	6,59	6,38	5,9	6,16	6,26
	k <sub>fl</sub>	1,25	1,36	1,32	1,22	1,27	1,29
	V <sub>Rk</sub> [kN]	-	2,38	2,32	2,22	2,34	2,31
Querkraft- tragfähigkeit	V <sub>Rk1,(4.75)</sub> [kN]	2,22	2,19	2,18	2,26	2,24	2,22
	Abw. [%]	-	-8,1	-6,3	1,8	-4	-4,2
	V <sub>Rk1,(4.76)</sub> [kN]	3,75	3,68	3,65	3,84	3,8	3,74
	Abw. [%]	-	54,5	57,3	73,1	62,6	61,9
StaR	W <sub>1,0kN</sub> [mm]	0,16	0,13	0,13	0,12	0,14	0,13
	Abw. [%]	-	-58,4	-13,7	-26,8	-12,7	-27,9
	W <sub>1,5kN</sub> [mm]	0,24	0,2	0,19	0,18	0,2	0,19
	Abw. [%]	-	-63,9	-21,1	-36,1	-17,6	-34,7
	W <sub>2,0kN</sub> [mm]	0,32	0,26	0,25	0,24	0,27	0,26
	Abw. [%]	-	-75,6	-49,6	-48,3	-31,3	-51,2
Versagen infolge		-	Biegezug	Biegezug	Biegezug	Biegezug	-

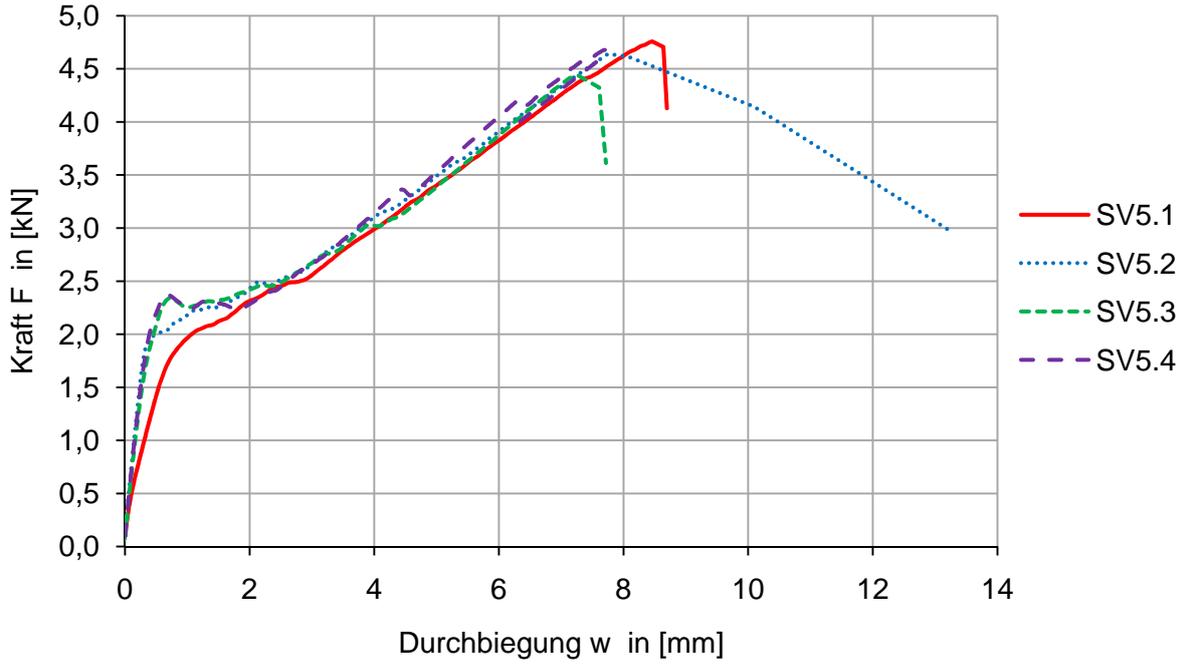


Abbildung 154: SV5: Kraft-Verformungsdiagramm



Abbildung 155: SV5: Bruchbilder der Prüfkörper



Abbildung 156: Bruchverlauf im Bereich der fehlerhaften KM2 bei SV5.2

## 2.4 Versuchsserie SV6

Tabelle 59: SV6: Ergebnisse der Bauteilprüfung

Nr.		Bemes- sung	SV6.1	SV6.2	SV6.3	SV6.4	Mittelwert
Messwerte	W <sub>1,0kN</sub> [mm]	-	0,16	0,19	0,13	0,14	0,16
	W <sub>1,5kN</sub> [mm]	-	0,26	0,3	0,21	0,23	0,25
	W <sub>2,0kN</sub> [mm]	-	0,42	0,52	0,31	0,36	0,4
	F <sub>cr</sub> [kN]	-	2,24	1,99	2,52	2,4	2,29
	w <sub>cr</sub> [mm]	-	0,56	0,52	0,57	0,59	0,56
	F <sub>Traglast</sub> [kN]	4,59	3,88	4,28	4,65	4,36	4,29
	w <sub>Traglast</sub> [mm]	-	5,64	6,95	7,56	6,92	6,77
abgeleitete Werte	M <sub>Rk</sub> [kNm]	0,57	0,49	0,54	0,58	0,55	0,54
	F <sub>t</sub> [kN]	6,04	5,07	5,72	6,11	5,76	5,67
	k <sub>fl</sub>	1,25	1,05	1,18	1,26	1,19	1,17
	V <sub>Rk</sub> [kN]	-	1,94	2,14	2,33	2,18	2,15
Querkraft- tragfähigkeit	V <sub>Rk1,(4.75)</sub> [kN]	2,22	2,28	2,23	2,26	2,24	2,25
	Abw. [%]	-	17,4	4,1	-2,9	2,9	5,4
	V <sub>Rk1,(4.76)</sub> [kN]	3,75	3,88	3,77	3,84	3,81	3,82
	Abw. [%]	-	100	76,1	65	74,4	78,9
StaR	W <sub>1,0kN</sub> [mm]	0,16	0,11	0,12	0,13	0,14	0,12
	Abw. [%]	-	-29,4	-38,9	-1,7	-1,3	-17,8
	W <sub>1,5kN</sub> [mm]	0,24	0,17	0,17	0,19	0,21	0,19
	Abw. [%]	-	-34,8	-42	-9	-8	-23,4
	W <sub>2,0kN</sub> [mm]	0,32	0,23	0,23	0,26	0,28	0,25
	Abw. [%]	-	-45,5	-55,4	-16,8	-23,1	-35,2
Versagen infolge		-	Biegezug	Biegezug	Biegezug	Biegezug	-

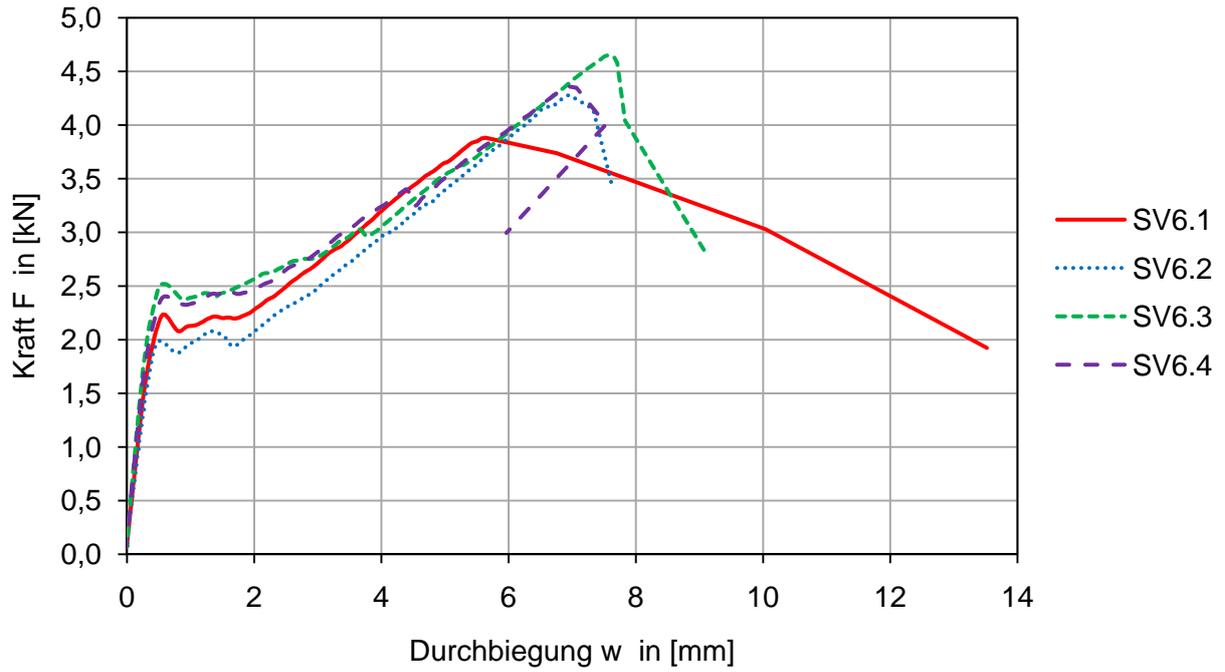


Abbildung 157: SV6: Kraft-Verformungsdiagramm



Abbildung 158: SV6: Bruchbilder der Prüfkörper

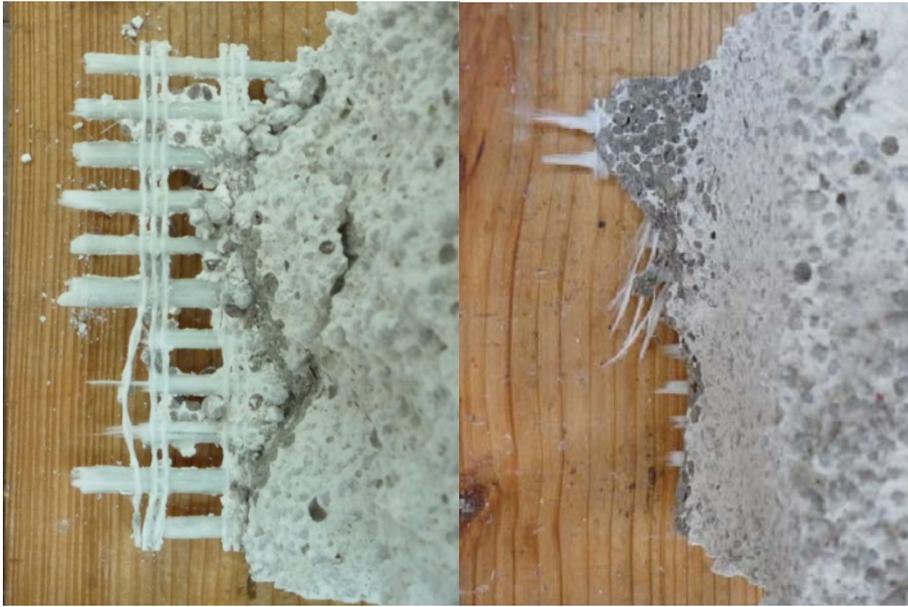


Abbildung 159: Vergleich Bruchbild der Bewehrung bei SV6.2 (links) und SV6.3 (rechts)

### 3 Versuchsergebnisse Versuche gradiertes Sprühen

Tabelle 60: Versuchsergebnisse Versuche gradiertes Sprühen

Nr.	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit Hälfte 1 [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit Hälfte 2 [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit Durchschnitt [N/mm <sup>2</sup> ]	Gewicht [g]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
2.1+	6,5	33,7	25,2	29,45	445	1,738
2.2+	6,8	14	11,9	12,95	416	1,625
2.3+	2,7	8,7	4,3	6,5	311	1,215
2.4+	1,6	2,3	1,6	1,95	224	0,875
2.5+	0,5	0,8	0,8	0,8	149	0,582
4.1+	5,8	18,1	20,4	19,25	429	1,676
4.2+	8,9	12,6	21,4	17	448	1,75
4.3+	4,3	10,5	18,2	14,35	442	1,727
4.4+	2,1	5,6	9,3	7,45	347	1,355
4.5+	1,55	3,5	4,3	3,9	236	0,922
6.1+	8,4	20,36	22	21,18	411	1,605
6.2+	6,1	15,2	14,3	14,75	413	1,613
6.3+	7,7	19,3	11,3	15,3	435	1,699
6.4+	6,7	7,5	11,9	9,7	413	1,613
6.5+	2,3	2,2	4,6	3,4	253	0,988
8.1+	8,9	19,46	20,69	20,08	432	1,688
8.2+	8,8	15,2	16,04	15,62	424	1,656
8.3+	6,9	16,03	10,6	13,32	415	1,621
8.4+	5,1	9,9	10,5	10,2	372	1,453
8.5+	1,55	1,78	3,49	2,64	228	0,891