

BBSR-
Online-Publikation
18/2021

Textiler Leichtbau

Gewebt, gewirkt, geschäumt: 3D Textilien für die Gebäudehülle (ge3TEX)

Autorinnen und Autoren

Prof. Claudia Lüling
Dr. Hans-Jürgen Bauder
Johanna Beuscher
Andreas Maier
Dominik Nagel
Prof. Petra Rucker-Gramm
Prof. Jens Schneider
Prof. Agnes Weilandt
Timo Weimer

Textiler Leichtbau

Gewebt, gewirkt, geschäumt: 3D Textilien für die Gebäudehülle (ge3TEX)

Gefördert durch:



Bundesministerium
des Innern, für Bau
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
F O R S C H U N G S F Ö R D E R U N G

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.03

Projektlaufzeit: 10.2018–04.2021

Impressum

Herausgeber

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

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“
Daniel Wöffen
daniel.woeffen@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Bauder
hans-juergen.bauder@ditf.de

Johanna Beuscher, M. A.

Prof. Claudia Lüling (Projektleitung)
clue@fb1.fra-uas.de

Dipl.-Ing. Andreas Maier, M. Eng.
maier@ismd.tu-darmstadt.de

Dominik Nagel, M. Eng.
dominik.nagel@fb1.fra-uas.de

Prof. Dr.-Ing. Petra Rucker-Gramm
petra.rucker@fb1.fra-uas.de

Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider
schneider@ismd.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. Agnes Weilandt
agnes.weilandt@fb1.fra-uas.de

Timo Weimer, M. Sc.
timo.weimer@ditf.de

Stand

April 2021

Bildnachweis

Titelbild: Alle drei Einzelbilder vom Fotografen Christoph Lison
Alle weiteren Bildnachweise siehe Anhang Seite 180

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

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

Zitierweise

Lüling, Claudia; Bauder, Hans-Jürgen; Beuscher, Johanna; Maier, Andreas; Nagel, Dominik; Rucker-Gramm, Petra; Schneider, Jens; Weilandt, Agnes; Weimer, Timo: Textiler Leichtbau – Gewebt, gewirkt, geschäumt: 3D Textilien für die Gebäudehülle (ge3TEX).
BBSR-Online-Publikation 18/2021, Bonn, Oktober 2021.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung /Abstract	2
Projekt	
1 Einführung	5
1.1 Themenfeld	5
1.2 Untersuchungsgegenstand	6
2 Problemstellung	7
2.1 Stand der Forschung/ Baupraxis	7
2.2 Forschungslücke/ Entwicklungsbedarf	12
3 Zielstellung	13
3.1 Konkrete Projektziele im Kontext übergeordneter Ziele	13
3.2 Arbeitshypothese	13
4 Forschungsdesign	15
4.1 Methodischer Ansatz	15
4.2 Projektteam und -organisation, Kooperationspartner	15
4.3 Arbeitspakete und Meilensteine	18
Projektverlauf	
5 Dreidimensionale Textilgeometrien und Befüllstrategien	19
5.1 Einführung 3D Textilien - Verlorene Schalungen und lastflussgerechte Formgebung	19
5.2 Makrostruktur: Steuerung des Verformungsverhaltens von 3D Textilien	20
5.3 Mesostruktur: Definition der inneren Strukturgeometrie befüllter 3D Textilien	22
5.4 Resümee, Makro- und Mesostrukturen im räumlichen Zusammenhang	23
6 Schäum- und Textiltechnologien im Verbund, Haftung	25
6.1 Übersicht über werkstoffspezifische Besonderheiten und durchgeführte Versuchsreihen	25
6.2 Basaltfasern bzw. Basalttextilien in Kombination mit Zementschaum	27
6.3 Glasfasern bzw. Glastextilien in Kombination mit Bläh-/Wasserglas	47
6.4 PET Fasern bzw. PET Textilien in Kombination mit PET Schäumen	75
6.5 Resümee, Haftung Textil/Befüllung im Werkstoffvergleich	102
7 Testfertigung erster Demonstratoren aus ausgeschäumten 3D Textilien	103
7.1 Fertigung von 3D Textilien aus Basalt- und Glasrovings sowie PET Bändchen	103
7.2 Ausschäumen / Befüllen der 3D Textilien	115
7.3 Resümee, denkbare Makro- und Mesogeometrien von Wand- und Dachbauteilen	127
8 Zwischenauswertung	129
8.1 Konzeption und Tragwerksabschätzung für mögliche Demonstratoren im Wand- oder Dachbereich	129
8.2 Resümee	140

9	Zusätzliche Bauteilfunktionalisierungen	143
9.1	Textilbasierte Funktionserweiterungen (Licht, Energiespeicherung, Temperaturmanagement)	143
9.2	Schaumbasierte Funktionserweiterungen (Temperaturmanagement)	146
9.3	Bauteilfügungen	147
9.4	Resümee	148

Projektergebnisse

10	Fertigung finaler Demonstratoren, Zusammenführung der Zwischenergebnisse	149
10.1.	Fertigung finaler Demonstratoren	149
10.2	Bewertung / Zielerreichung - Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext	161
11	Fazit, Ausblick	169
11.1	Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	170
11.2	(Bau-) praktische Anschlussfähigkeit über den Abschlussbericht hinausgehender Output	173

Anhänge

12	Verzeichnisse	174
	Mitwirkende	174
	Kurzbiographien	175
	Literaturverzeichnis	177
	Abkürzungsverzeichnis	179
	Tabellenverzeichnis	179
	Abbildungsverzeichnis	180
	Publikationsliste	181
	Veranstaltungsliste	181
	Preise	181

13 Anlagen

- Anlage 1, Gesamtkapitel 6.2, Basaltfasertextilien und Zementschaum
- Anlage 2, Gesamtkapitel 6.3, Glasfasertextilien und Bläh-/Wasserglasmatrix
- Anlage 3, Gesamtkapitel 6.4, PET Textilien und PET Schäume
- Anlage 4, Teilkapitel 7.1, Fertigung von 3D Textilien aus Basalt- und Glasrovings
- Anlage 5, Gesamtkapitel 8.1, Berechnung möglicher Dach- und/oder Wanddemonstratoren

Kurzfassung

Ge3TEX beschäftigt sich mit sortenreinen Verbundwerkstoffen für neue Leichtbauteile aus technischen Textilien bzw. Abstandstextilien, im Zusammenhang mit geschäumten Materialien. Im Fokus des Projekts stehen zwei mineralische und eine polymerbasierte Verbundmaterialvarianten aus jeweils gleichen Werkstoffgruppen. Die Textilien werden zur Stabilisierung und Dämmung mit leichten, geschäumten Werkstoffen kombiniert und dienen u.a. als verlorene Schalung und als strukturelles Element zur Aufnahme von Zugkräften. Untersucht wurden folgende Möglichkeiten:

- Basaltfaser-Abstandstextilien in Kombination mit mineralisiertem Schaum und hochfestem Beton
- Glasfaser-Abstandstextilien in Kombination mit einer Bläh-/Wasserglasmatrix
- rPET Abstandstextilien in Kombination mit rPET Partikelschaum

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) unterstützt und koordiniert durch die Frankfurt University of Applied Sciences. Akademische Partner waren die Technische Universität Darmstadt und die Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung, Denkendorf (DITF). Zusätzlich involviert waren eine Reihe von Industriepartnern, die das gesamte Spektrum der Herstellung und Verarbeitung von technischen Textilien und geschäumten Materialien abdecken, die im Kontext des Projekts benötigt werden. Projektziele waren:

- die Entwicklung kompatibler Faser- und Schaumwerkstoffrezepturen mit einem ausreichenden Haftverbund untereinander für geometrisch optimierte Last- und Dämmszenarien
- die Untersuchung und Konzeption funktionsadäquater Textilgeometrien in Abhängigkeit von Anwendungen in der Gebäudehülle, wobei die befüllten Textilien als verlorene Schalung ebenso wie als lastabtragendes und gestaltgebendes Element verstanden werden
- die Realisierung von je einem Leichtbaudemonstrator je Verbundmaterial im Maßstab 1:1

Die realisierten Demonstratoren sind vielversprechend. Es wurden unterschiedlich dichte Bläh-/Wasserglasmatrizen entwickelt, die mit Glasgeweben aus AR-Glas verbunden werden konnten. Ebenso wurden mit der neuen Glasmatrix einfach gekrümmte, formaktive Elemente aus Abstandsgewirken realisiert. In Bezug auf den PET-Werkstoff konnten neue Herstellprozesse und Partikelschaumrezepturen mit der Industrie entwickelt werden, dies in Kombination mit haftungsoptimierten PET-Abstandstextilien. Die komplette Prozesskette besteht hier aus recycelten und erneut recycelbaren Werkstoffen, die zu neuartigen, formaktiv gefalteten PET-Leichtbauteilen ausgebildet werden konnten. Es wurden außerdem neue verwebbare und alkalibeständige Basaltrovings entwickelt, die bei den DITF erstmalig zu ein- bzw. zweifachgekrümmten Abstandstextilien verarbeitet wurden. Gefüllt mit mineralisiertem Schaum ergeben die Textilien eine formaktive, verlorene und gedämmte Schalung, die mit einer Aufbetonschicht aus ultrahochfestem Beton und durch Nutzung der lastflussoptimierten Basalttextilien zu deren zusätzlicher Unterspannung dienen. Es entstehen nicht brennbare, sortenreine Leichtbauelemente für die Gebäudehülle.

Zusätzlich konnten Möglichkeiten zur in-situ Herstellung der neuen sortenreinen Leichtbauteile zur Reduktion von Transportvolumen /-gewicht nachgewiesen werden und weitere Optionen gezeigt werden, wie die Verbesserung des Temperaturamplitudenmanagements durch PCM basierte Faserstoffe und die Verbesserung der Lichtdurchlässigkeit durch lichtleitende Fasern.

Abstract

Ge3TEX's focus is on monomaterials for lightweight, architectural applications, based on spacer fabrics. The project explores three material combinations for new composite components, two of them mineral based and one polymer based. The spacer fabrics are used in three variations as lost formwork for foamed fillings as well as structural elements for tension forces:

- basalt fibre-based spacer fabrics in combination with foamed concrete,
- glass fibre-based spacer fabrics in combination with foamed glass from recycling resources,
- spacer fabrics made from PET-fibres from recycling in combination with PET-based particle foams, also from recycling material.

The project is supported by the Federal Ministry of the Interior, Building and Community (BMI) and is coordinated by Frankfurt University of Applied Sciences. The academic partners are the DITF Denkendorf for woven spacer fabrics and Technical University Darmstadt for foamed concrete. The industrial partners involved cover the full range of other expertise required in terms of textile and foam and in terms of material, processing and building aspects. The project aims are:

- to develop, establish and improve fibre as well as foam materials and improve the bond between the foamed and textile materials,
- to investigate appropriate textile technologies and geometries, depending on different applications in the building skin, and to use the textiles as lost formwork and structural as well as functional and design element,
- to design and build demonstrators from each of the three envisioned monomaterials in a 1:1 scale.

The final demonstrators show promising results. Foamed glass fillings in different densities have been combined with a special glass-based matrix and formactive, single curved mock-ups have been realised. The whole process of foaming up particle foams from recycled PET in a textil from recycled PET has been set up and form-active, folded demonstrators have been realised, that can be recycled again. By using foamed concrete as an insulation layer in combination with spacer-fabrics from basalt fibre, not only a new kind of lost formwork has been developed. Also the basaltfibres of the lost formwork work as an underspan for a layer from mrUH-PC, which supplements the component with a pressure-stable top layer. Here the DITF developed not only conventional plane-parallel spacer fabrics from basalt fibres but also for the first time double-curved fabric structures from basalt rovings. Basalt rovings have been developed that can be woven and which have equally sufficient alkali resistance.

Overall, ge3TEX could demonstrate new monomaterial options for circular economy and lightweight, form-active building elements. Also further options so as the reduction of transportation volume and weight through in-situ production and the implementation of additional textile-based functions such as low-tech absorption and release of thermal energy and passive lighting could be demonstrated.

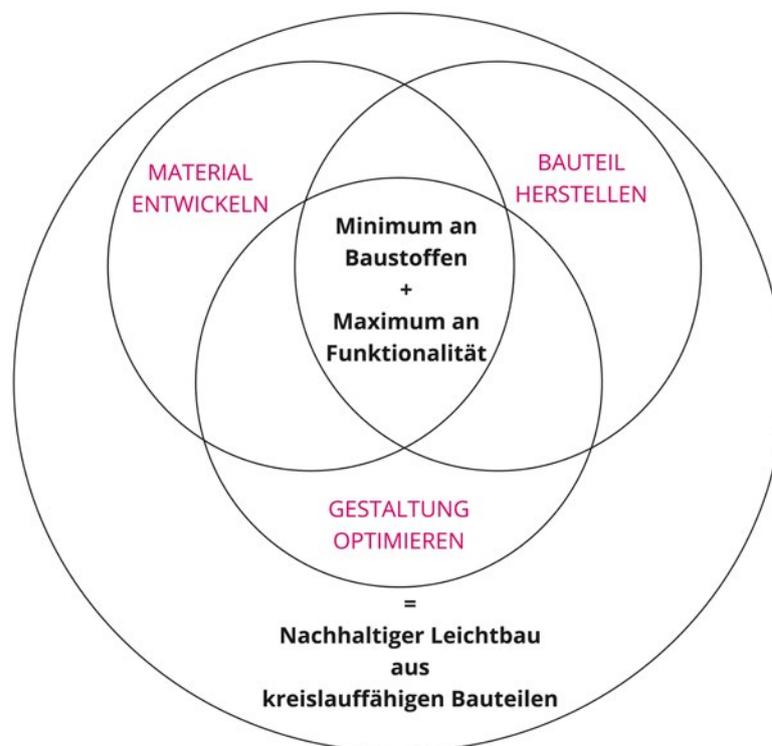
1 Einführung

Das Projekt ge3TEX führt die vorangegangenen Forschungen aus dem Projekt „3dTEX – Textile Leichtwandelemente“ weiter (Innovationsprogramm Zukunft Bau, 2015 - 2017). Während im Vorgängerprojekt zunächst textile Formfindungsprozesse für zukunftsweisende Leichtbauelemente aus geschäumten Textilien im Vordergrund standen, geht es in ge3TEX jetzt um die Entwicklung sortenreiner Verbundmaterialien aus Textilien und Schäumen gleicher Werkstoffgruppen. Das Ziel sind textilbasierte, formaktive und damit materialreduzierte und kreislauffähige Leichtbauteile.

1.1 Themenfeld

Der Leichtbau zählt in nahezu allen Technikbereichen wie z.B. der Automobil-, Luftfahrt-, Transport- Freizeit-, Sport- und Bauindustrie zu den Schlüssel- und Zukunftstechnologien. Mit durchdachter Funktionsintegration, einer last- und werkstoffoptimierten Konstruktion sowie minimiertem Materialeinsatz vereint Leichtbau moderne Produktionsprozesse und geringere Herstellkosten mit einem schonenden Umgang mit Ressourcen und verbesserter Funktionalität. Leichtbau kann in idealer Weise drei Dimensionen der Nachhaltigkeit vereinen, da hier ökonomische, ökologische und soziokulturelle Anforderungen in Einklang gebracht werden: Eine moderne, digitale Produktentwicklung und Produktion mit geringeren Kosten einhergehend mit dem verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen, Energie und Klima und nicht zuletzt einer hohen Funktionalität. Oder einfacher: Leichtbau ist per se nachhaltig, wenn nur so viel Material eingesetzt wird wie nötig, das Material kreislauffähig ist und neue Produktionstechniken zu weiteren Ressourcen-/Energieeinsparungen genutzt werden. Im Zusammenspiel mit Digitalisierung und Bionik eröffnen sich neue Zukunftsmärkte. Die hohe Relevanz der Leichtbautechnologie für den Industriestandort Deutschland wird durch die Anfang 2021 veröffentlichte Leichtbaustrategie¹ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie in Form eines 8-Punkte-Maßnahmenpaketes verdeutlicht.

Abbildung 1.100



¹ BMWi: Leichtbaustrategie für den Industriestandort Deutschland, 2021 (https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/leichtbaustrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=8)

Derzeit sind im traditionell geprägten Bauwesen immer noch klassische Bauweisen mit Beton, Stahlbeton und Mauerwerk vorherrschend. Tatsächlich kreislauffähige Bauarten mit minimiertem Materialeinsatz aus z.B. Holz, Stahl oder auch neuen Materialkombinationen fallen mengenmäßig weit ab. Durch Bautätigkeiten mit traditionellen Bauweisen werden 50 % des deutschlandweiten Müllaufkommens verursacht und 40 %² der weltweiten Ressourcen verbraucht. Leichtbautechnologien, unter Berücksichtigung der verwendeten Materialien, können in erheblichem Umfang zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes und des Energie- sowie Ressourcenverbrauchs von Baukonstruktionen während ihres gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Betrieb, Abriss/ Recycling) im Bauwesen beitragen. Der Leichtbau ist somit im Bauwesen eine der Game-Changer-Technologien, die eine Steigerung von Wachstum und Wettbewerbsfähigkeit ebenso fokussieren wie eine Sicherung des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit, um die Klima-, Umwelt-, Ressourcenschutz- und Nachhaltigkeitsziele der Bundesregierung zu erreichen.

1.2 Untersuchungsgegenstand

Konkreter Untersuchungsgegenstand von ge3TEX ist die Entwicklung von Leichtbauteilen aus mineralischen und polymerbasierten Monomaterialien, die im Verbund von jeweils faser- und porenbasierten Werkstoffstrukturen tragwerksoptimiert wie bauphysikalisch optimiert eine maximale Funktionalität bei reduziertem, nachhaltigen Materialverbrauch aufweisen.

Wie in Abb. 1.100 dargestellt beeinflussen hierbei die Parameter „Materialentwicklung“, „Bauteilherstellung“ und „Gestaltoptimierung“ im Zusammenspiel die Entwicklung nachhaltiger Bauteile. Erst die Quantität und Qualität der verwendeten Werkstoffe, die Reduktion von Energie- und Materialaufwand inkl. Transportvolumen und Transportgewicht bei der Herstellung und nicht zuletzt die geometrische Gestaltung des Gesamtbauteils, inklusive seiner inneren strukturellen Geometrie bzw. Morphologie, ergeben zusammen mit einem gestalterisch ansprechenden, finalen optischen Erscheinungsbild sortenreine, multifunktionale Bauteile der Zukunft.

² <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2018/09/kapitel-1-4-ressourcenschonendes-bauen.html>

2 Problemstellung

2.1 Stand der Forschung/ Baupraxis

Die energetische Bilanzierung einzelner Werkstoffe und Materialien reicht nicht aus für das nachhaltige Bauen der Zukunft. Materialströme müssen reduziert werden, in Kreislaufverfahren rückgeführt werden, es müssen Transportvolumen bzw. Transportgewicht eingepreist werden und ebenso Herstellverfahren z. B. in Bezug auf Schalungsaufwand oder sonstige sekundäre Materialströme überprüft werden - ob in der Vorfertigung oder in situ. Entscheidend dabei ist die Betrachtung ganzer Bauteile. Die TU München hat in Ihrem Leitfaden 01, „Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile“, dazu zusammenfassend festgestellt¹: „... dass Baustoffe letztendlich in einem funktionalen Zusammenhang betrachtet werden müssen. In vielen Fällen werden sie gefügt oder kraftschlüssig zu Bauteilen verbunden. Dies wirkt sich wiederum auf die Lebenszyklusbetrachtung eines gesamten Gebäudes aus“. Ergänzend wird hinzugefügt, dass: „ ... die Auswahl und Fügungsart der verbauten Materialien direkten Einfluss auf den zukünftigen Energieaufwand der Erneuerung (hat).“ Wichtig ist dabei an der Studie auch für ge3TEX die Gegenüberstellung und Untersuchung von unterschiedlichen Baustoffen im Zusammenhang mit ihrer Anwendung in funktionierenden Wandaufbauten.

Um also nicht absolute Materialkenndaten ohne Kontext im Bauen zu verhandeln, spielt die Funktionalität der Bauteile wie z.B. Trag- und Dämmfähigkeit eine entscheidende Rolle. Greift man unter diesen Aspekten aus der Studie zwei vergleichbare Beispiele mit gleichem U-Wert heraus, sind dies - in klassischer Massivbau- und Skelettbauweise - eine selbsttragende Mauerwerk- und eine Holzskelettbauwand mit MW Dämmung. Beide haben ähnliche U-Werte von 0,238 W/m²K bzw. 0,237 W/m²K. Funktional gleichwertig offenbaren sich die Unterschiede dann z. B. in Wandstärken von 40 cm gegenüber 21,5 cm der Massivwand gegenüber der Skelettbauwand und einem GWP von ca. 60 gegenüber einem GWP von ca. 25. Dazu kommt der gewichts- und volumenbedingte höhere bzw. niedrigere Transportaufwand der Massivbauwand gegenüber der Skelettbauwand, der nicht mitbetrachtet wird. Eine Bewertung der Bauteile über rein quantifizierbare Daten scheint so also nur auf den ersten Blick möglich. Versucht man darüber hinaus andere qualifizierende Aspekte mit in die Bewertung einzubringen wie die höhere Brandschutzklassifizierung der Massivbauwand, ihr Potenzial für einen positiven Temperaturamplitudenausgleich, ihre Robustheit und Langlebigkeit, oder kommen im Gegenteil evtl. unterschiedliche lokale Verfügbarkeiten des jeweiligen Werkstoffs mit ins Spiel, kann sich die Einschätzung auch verändern.

Die o. g. Studie schließt mit den Worten „Mit dem Aufzeigen von Materialeigenschaften und deren Kennwerten sowie dem Vergleich von Außenbauteilen soll ein Nachdenken angeregt werden, klassische Bauweisen kritisch zu betrachten und ggf. Neues auszuprobieren“. In ge3TEX wird in Anlehnung daran untersucht, wie material- und funktionsoptimierte, sortenreine Bauteile aus leichten, geschäumten, faserbasierten Materialien aussehen können, die zudem mit geringen Transportgewicht bzw. -volumen zur Nachhaltigkeit beitragen und ohne Schalungsaufwand auch zur Reduktion sekundärer Materialkreisläufe beitragen. Nachfolgend wird entsprechend der Stand der Forschung in Bezug auf reduziertes Materialdesign, Bauteilherstellung und integrale Gestaltung betrachtet.

2.1.1 Materialentwicklung

2.1.1.1 Gewichtsoptimierte Bauteile, Textilbetone

Zur Gewichtsreduktion und zur Erhöhung der Lebensdauer werden seit langem für tragende Betonkonstruktionen schon Textilbewehrungen untersucht. Die seit ca. 120 Jahren verwendete Betonstahlbewehrung wird dabei zur Aufnahme von Biege- und Zugbeanspruchungen durch technische Textilien aus Glas, Basalt und

¹ Schneider, S., Poh, P., Grimm, F. (2015) Leitfaden 01 Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile Projektplattform Energie — www.ppe.tum.de, S. 21

Carbon mit vielfach höherer Tragfähigkeit und ohne Korrosionserscheinungen substituiert. Hierdurch sind die Bauteildicken und korrespondierende Betonverbräuche um bis zu 80 %² reduzierbar. Es lassen sich leichte und dennoch sehr leistungsstarke Tragwerke z.B. in Form von dünnwandigen Fassadenelementen^{3/4}, Sandwichbauteilen und Brücken⁵ erzeugen, die auch im Hinblick auf Lebensdauer und Instandhaltungsbedarf als sehr nachhaltig zu bewerten sind. Die Forschungsarbeiten zum Carbonbeton zielen explizit auf den vollständigen Ersatz von Betonstahlbewehrungen durch Carbonbewehrung für Hochbauten, d.h. insbesondere Decken, Balken, Wände und Stützen ab. Grundsätzlich werden hierzu technische Textilien aber auch Stäbe aus Carbontextilien und faserverstärkten Kunststoffen (FVK) bzw. Basaltfasern eingesetzt.

2.1.1.2 Gewicht- und lastflussoptimierte Bauteile, Meso-/Mikrogradierungen

a.) **Gradientenwand** ILEK Stuttgart: In dem Forschungsprojekt wurde durch die Meso- und Mikrogradierung des verwendeten Betonmaterials eine Gewichtsreduktion gegenüber herkömmlichen Massivwänden mit Wärmedämmverbundsystem angestrebt, die lt. Studie auch erreicht werden konnte. Die Probewand konnte auch alle Anforderungen an den Schall- und Brandschutz erfüllen und ist rezyklierbar (downcycling).

Allerdings wurden keine ausreichenden Dämmwerte erreicht: „Im Bereich der Wärmedämmung konnte durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Betone leider kein zufriedenstellender U-Wert für das Nassspritzverfahren erreicht werden. Ein gradiertes Bauteil mit einem nass gespritzten Leichtbetonkern würde somit nicht den gültigen energetischen Anforderungen entsprechen. Auch bei anderen untersuchten leichten Betonen ..., die durch das Gießen einbaubar sind, wäre eine Ausführung mit den Abmessungen 6 cm – 14 cm – 6 cm kritisch zu hinterfragen. Die Mischung MIIL, IWB(AP) hat zwar eine Wärmeleitfähigkeit von 0,090 W/m*K ... in Kombination mit dem entwickelten Normalbeton MI wäre bei gleichbleibender Stärke der MI- Schichten von 6 cm eine Kernschicht von 40 cm notwendig“⁶ Es erfolgte auch keine Abschätzung des PEI bzw. des GWP. Interessant wäre in dem Zusammenhang ein Vergleich mit der von der TU München untersuchten Porotonwand s.o., wobei zusätzlich das Gewicht als Vergleichskriterium herangezogen werden sollte. Technisch komplex ist zudem das Herstellverfahren mit Guss- und Gradientsprühtechnik, s. Abbildung 2.100, wobei insbesondere Schalungsaufwand sowie der nachfolgende Transport auf die Baustelle weiter mit betrachtet werden sollten.

Abbildung 2.100



links und mitte: Applikationssystem (links) mit Stewart-Gough-Plattform zur automatisierten Herstellung von gradierten Betonbauteilen; rechts: Mesogradierter Wandaufbau und mikrogradierter Wandaufbau

2 Horstmann, M.: Zum Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textilbewehrtem Beton. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2010.

3 Molter, M.: Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2005

4 Voss, S.: Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2008.

5 Kulas, C.: Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2014.

6 Schmeer, D., Schönemann, B., Arkhipkina, O., Haase, W., Garrecht, H., Sawodny, O., Sobek, W. (2020) Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton, Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3194 ISBN 978-3-7388-0499-7, S. 95

b.) Fibrtech Buga Pavillon⁷: Während die Gradientenwand des ILEK den Stand der Forschungen im Bereich des materialreduzierten Massivbaus aufzeigt, demonstriert der Buga Fibre Pavilion s. Abb. 2.101 die neuesten Möglichkeiten material- und textilbasierter, formaktiver Sklettbautechniken, basierend auf den Forschungsarbeiten des ICD, des ITKE und realisiert durch die FibR GmbH. Aus Glas- und Kohlenstofffasern mit einer Polymermatrixbeschichtung, robotisch gefertigt und über Erhitzung /Verschmelzung der Polymerbeschichtung ausgesteift, entstehen zwischen drei und fünf Meter große, hyperboloide Faserkörper. Zu einem kuppelförmigen Skelettsystem zusammengesetzt, tragen sie die Last direkt in das Betonfundament ab. Eine vorgespannte ETFE Membran formt die transparente Gebäudehülle.

Die lastflussgerecht, digital konzipierten und in einem robotergestützten Faserwickelprozess gefertigten Einzelbauteile schöpfen maximal das Leichtbaupotential von räumlich gefügten, textilbasierten Legetechniken aus. Die Glas- und Carbonfasern werden dabei graduell verdichtet oder entzerrt. Die textile Struktur kann trotz ihres geringen Gewichtes von 7,6 kg/m² mehr als 23 Meter weit spannen. Das Gewicht der gesamten Struktur beträgt nur 4,8 Tonnen, bei einer Grundfläche von 400 m². Gleichzeitig bieten die Elemente außer optimiertem Tragverhalten bei größtmöglicher Gewichtsreduktion keinerlei weitere Funktionalität. Der Wetterschutz muss über die zusätzliche Membran erreicht werden, Dämmung müsste zusätzlich ergänzt werden, Aussagen zum GWP oder dem PEI liegen soweit wir wissen nicht vor, ebenso wenig zur Kreislauffähigkeit.

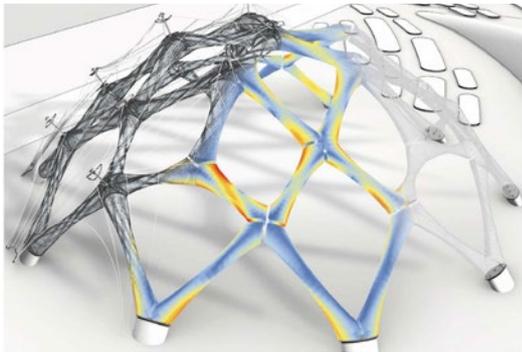


Abbildung 2.101

Globales Modell in digitaler Umgebung, das verschiedene Informationen in einem Bild zusammenführt: (links) Detaillierung; (mitte) Finite-Element-Analyse, rot zeigt Zonen mit höherem Stresslevel an; (rechts) abstrakte geometrische Darstellung

2.1.2. Bauteilherstellung

Bereits die Gradientenwand des ILEK mit ihrer innovativen Guss- und Gradientsprühtechnik bzw. der robotergestützte Faserwickelprozess des ITKE /ICD zeigt, wie mit neuen Verfahren Material in Bauteilen reduziert werden kann. Hinzu kommen zwei weitere Themen: die notwendige Reduktion von Transportaufwand und die Reduktion von Schalungsaufwand, insbesondere bei Massivbauelementen.

2.1.2.1 Reduktion von Transportaufwand

Um Transporte zu reduzieren, ist die Aktivierung lokaler Ressourcen essentiell. Bereits seit fast 20 Jahren beschäftigt sich das holländische Unternehmen Superuse Studios mit Plattformen zum Austausch von Material und nutzt sie auch selbst als Materialbezugsquelle für seine Architektur- und Designprojekte. Sogenannte „**Harvest MAPs**“⁸ bilden die Grundlage Ihrer Projekte. MAP steht hier auch für Material-Austausch-Plattform, die als Open-Source-Software auch andere zur Teilnahme einlädt, s. Abbildung 2.102. In einem definierten Umkreis um das jeweilige Projekt wird „geerntet“: Neu- oder Altmaterialien, d.h. Recycling- oder Reuse-Materialien bzw. Reuse-Bauteile. Insbesondere letztere bestimmen nicht selten maßgeblich die originelle Gestaltung der durch diesen Prozess definierten Projekte, wie schon „Duchi“ zeigt, eines der ersten Projekte von Superuse Studios.

⁷ Jane Burry, Jenny E. Sabin, Bob Sheil, and Marilena Skavara(2020, Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture, ISBN: 9781787358119, Seite 234 ff

⁸ <https://www.superuse-studios.com/>

Abbildung 2.102



Superuse Studios, Beispiel einer Harves MAP für ein Grundstück in Amsterdam

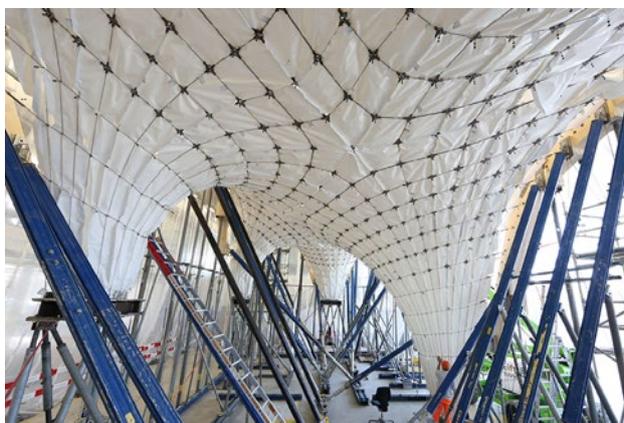
2.1.2.2 Reduktion von Schalungsaufwand

Das Thema Schalungsaufwand in Bezug auf Kosten wurde 2012 von Hoffmann, Motzko, Corsten in der Veröffentlichung „Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren“⁹ untersucht. Der dort ermittelte mittlere Schalungsaufwand je m² geschaltete Fläche hat sich in den letzten 20 Jahren nicht reduziert und steigt gerade bei Freiformen deutlich an. Um den Schalungsaufwand zu verringern gibt es im Grundsatz drei Optionen: Schalungen mehrfach zu verwenden, sie nachhaltig zu gestalten oder sie so einzusetzen, daß sie als verlorene Schalungen für das fertige Bauteil Funktionsoptimierungen bieten:

a) Ein Beispiel für FuE Initiativen zum Thema **nachhaltige Schalungen** ist das Projekt „Industriell nutzbare, nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung von doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen für energieeffizientes, ressourcenschonendes und klimagerechtes Bauen“¹⁰ der Uni Kassel. In dem Forschungsvorhaben werden nachhaltige, skalierbare und wiederverwendbare Schalungen in einem Zero-Waste-Verfahren für die industrielle Fertigung von präzisen digital/parametrisch entworfenen, komplexen, dünnen und doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen entwickelt.

b) Für in situ Verfahren und zur Reduktion des Transportaufwands für komplexe formaktive Bauteile untersucht die ETH Zürich im Rahmen des Projekts DFAB House zusammen mit Industriepartnern die Eignung von einlagigen, wiederverwendbaren **Flächentextilien als Schalung**. Abbildung 2.103 zeigt beispielhaft, wie die

Abbildung 2.103



ETH Zürich, DFAB House, textile Schalung

⁹ Hoffmann, F., Motzko, C., Corsten, B. (2012) Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren, Zeittechnik Verlag

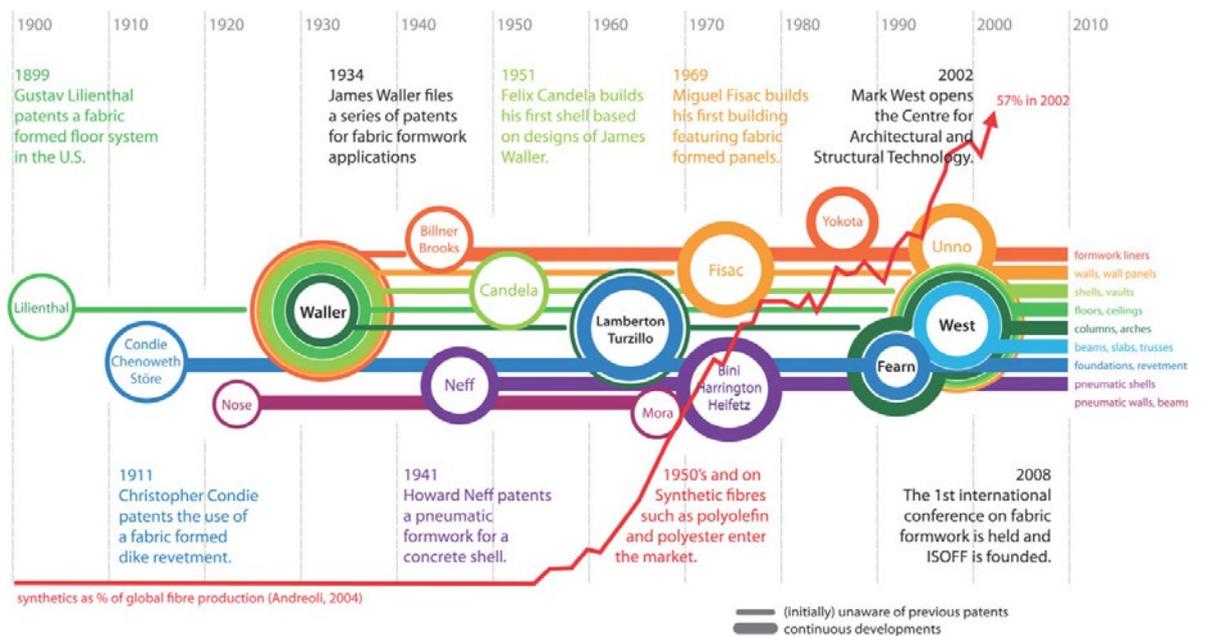
¹⁰ <https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsprojekte/forschungsfoerderung/1008187-1830>

leichten Textilschalungen gleichzeitig eine in einer Gerüstkonstruktion aufgespannte, aufwendige Seilnetzunterspannung erfordern. Auf diesem Netz liegt das Textil aus Polymer, das dem Beton als Schalung dient. Nach Aussage der Projektpartner¹¹ wird so massiv an Baumaterialien gespart.

2.1.2. Gestaltung optimieren

Die Themen Material reduzieren und Herstellung optimieren finden erst mit dem Ziel zusammen, insgesamt und ganzheitlich die Gestaltung zu optimieren. Erst die integrale Gestaltung form- und funktionsoptimierter Bauteile kann nachhaltige Bauweisen befördern. Dabei kommt dem letztgenannten Thema, textile Schalungen, eine besondere Bedeutung zu. Eine Übersicht dazu zeigt Abb. 2.104. Die farbigen Linien zeigen einzelne Anwendungen, das zunehmende Interesse daran wird über die Linienstärke indiziert. Die Kreise (Namen) weisen auf Patente, Projekte oder Publikationen einzelner Personen hin. Deutlich ablesbar ist das zunehmende Interesse an textilen Schalungstechniken. Dabei handelt es sich generell um einlagige Flächentextilien.

Abbildung 2.104



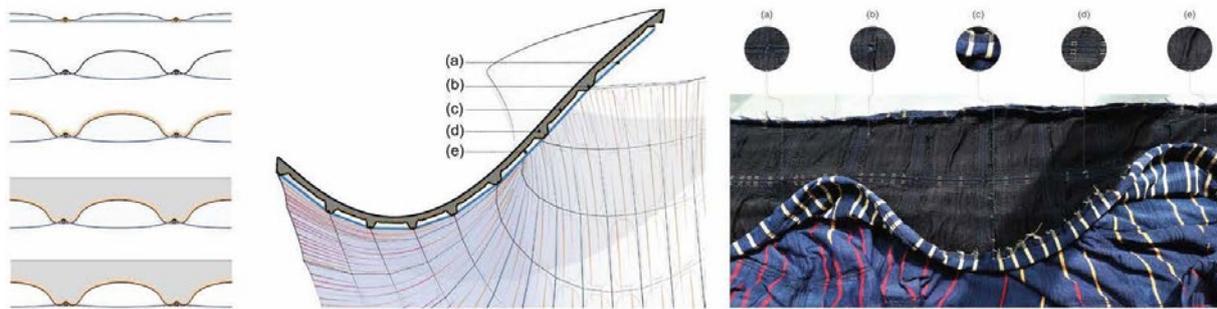
Entwicklungstendenz im Bereich textiler Schalungen

a) Mit dem Projekt „**Knit Candela**“ der ETH Zürich wurden 2018 erstmalig mehrlagige Textilien¹² als Schalung genutzt und eine integrale Gestaltung formaktiver Bauteile in Form eines Versuchspavillons demonstriert. Das Textil dient nicht nur als verlorene Schalung. Es fungiert als dreidimensionaler Formgeber über schachbrettartig in das doppellagige Textil eingefügte, aufblasbare Kissen. Die manuell aufgebrachte, drei Zentimeter dicke Glasfaserbetonschicht resultiert als Gegenform entsprechend in Gestalt lastoptimierter, 4 cm hoher Rippenstrukturen. Die farbige Strickschalung verbleibt als verlorene Schalung und bestimmt so zudem Haptik und Optik der Oberfläche (s. Abb. 2.105). Die Textilschalung mit dem zuvor integrierten Kabelnetzwerk wurde innerhalb von 36 Stunden aus vier langen Streifen auf einer standardmäßigen Nähmaschine zusammen genäht und wiegt lediglich 55 kg, die in zwei Koffern aufgeteilt und verschickt werden konnte. Als tragendes Element dienen die Kabel in dem 3D-Textil.

11 <https://bieri.ch/referenzen/textil-als-schalung-fuer-beton/>

12 Jane Burry, Jenny E. Sabin, Bob Sheil, and Marilena Skavara (2020), *Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture*, ISBN: 9781787358119, Seite 194 ff

Abbildung 2 105



Schnitt - Arbeitsschritte um die KnitCandela Betonschale herzustellen (von oben nach unten): (a) Spannen des 3D-Textils und Kabelnetz; (b) Aufblasen der Taschen; (c) Beschichtung der Decklage mit spezieller Zementpaste; (d) Gießen des Glasfaserbetons; (e) Luft aus den Taschen raus lassen um Hohlräume zu bilden

b) Die HFG Offenbach hat das Thema „Gestaltung optimieren“ mit technischen Textilien um weitere funktionale Aspekte erweitert. „Paul“ (2004-2009, ILEK, Markus Holzbach), besteht aus einer 1,4 cm textilen „Wand“ bzw. dreischichtigen Haut. Sie integriert zusätzlich zum Wetterschutz Dämmfähigkeit und Beleuchtungsoptionen. Die textile Hülle setzt sich aus acht Kilometern Glas-Lichtleitfasern und 1.200 Lichtpunkten zusammen. Unter ihr liegt eine mit hochisolierenden Keramiken beschichtete Membran als Wärmedämmschicht. Den inneren Raumabschluss bilden 60.000 Phase Change Materials zur Wärmespeicherung auf einer Unterschale aus Glas-Kohlestofffasern (Abb 2.106). Der gesamte Multilayeraufbau wird mit Klettverschlüssen an tragenden Edelstahlrippen befestigt.



Abbildung 2.106

Innenraumansicht „Paul“: Dreischichtiges Textil mit integrierten Lichtfasern und PCM-Elementen auf Glas-Kohlestofffaser Unterkonstruktion

2.2 Forschungslücke/ Entwicklungsbedarf

Materialentwicklung Im Bereich Verbundmaterialien fehlen weitere Untersuchungen zu sortenreinen, in Dichte und Struktur je nach funktionaler Anforderung ausdifferenzierbaren Materialrezepturen. Entwicklungsbedarf sind gezielt herstellbare strukturdifferenzierte Monomaterialstrukturen mit hoher Funktionalität inkl. Brandschutzanforderungen.

Bauteilherstellung Forschungslücken bestehen im Bereich der Nachhaltigkeit von Herstellverfahren, begonnen mit der Frage ob, wo und wie Vorfertigung oder in situ Produktionen sinnvoll Transportaufwand und z. B. Schalungsaufwand minimieren können. Schalungen mit Funktionsintegration aus technischen Textilien müssen hier weiter untersucht werden.

Gestaltung optimieren Entwicklungsbedarf besteht in der Konzeption textilbasierter Makro- und Mesostrukturen von Bauteilen, die last-, werkstoff-, funktionsgerecht und ästhetisch überzeugend gestaltet sind.

3 Zielstellung

3.1 Konkrete Projektziele im Kontext übergeordneter Ziele

Im Kontext der Leichtbaustrategie des Bundes ist das Ziel von ge3TEX, leichte, nachhaltige und kreislaufgerechte Bauteile für die Zukunft herzustellen. In ge3TEX sollen dabei insbesondere die Möglichkeiten innovativer textiler Technologien wie dreidimensionales Weben oder Wirken genutzt werden und Integrationsoptionen von für Bauanwendungen sinnvollen Entwicklungen aus dem Bereich technische Textilien bzw. Smart Textiles geprüft werden.

3.2 Arbeitshypothese

Wir möchten beweisen, dass sortenreine, kreislaufgerechte, multifunktionale Bauteile aus textilbasierten Verbundwerkstoffen mit minimalem Materialeinsatz hergestellt werden können. Dies zudem mit minimalem Schalungs- und Transportaufwand, wobei das innere strukturelle Gefüge der Leichtbauteile wie die äußere Form entscheidend aus ihrer räumlichen Wirkung resultieren¹.

Grundlage der Untersuchungen bildet das Vorgängerprojekt „3dTEX - Textile Leichtwandelemente“. Hier wurden zunächst Polyestertextilien mit PU Schaum gefüllt und vor allem das plastische Verhalten unterschiedlicher 3D Textiltechnologien wie 3D Gewirke und 3D Gewebe untersucht. Ziel in ge3TEX ist es jetzt konkret zwei mineralische und eine polymerbasierte Werkstoffgruppe so weit zu entwickeln, dass zumindest eines der entwickelten Verbundmaterialien zur Herstellung von Bauteilen für die Gebäudehülle verwendet werden kann. Dazu wird in einem iterativen Prozess das Zusammenspiel von Befüllung (Dichte, Konsistenz, Aufschäumverhalten) und 3D Textil (Faserart, Geometrie der textilen Struktur) entwickelt, analysiert und verglichen. Untersucht werden dabei die Materialrezepturen, die jeweiligen Befüll- und Verformungsprozesse, die Haftung zwischen Textil und Befüllung und die geometrisch-gestalterische Optimierung des Trag- wie Dämmverhaltens.

In ge3TEX soll so gezeigt werden, dass ein Verbund aus faser- wie schaubasierten Materialien aus derselben Werkstoffgruppe entwickelt werden kann, bei dem die zum Einsatz kommenden 3D Textilien gleichermaßen formgebend als verlorene Schalung wie als lastabtragender Bestandteil für Zugkräfte wirken. Die Füllstoffe sollen im Verbund synergetisch lastabtragende Funktionen (Druckkräfte) übernehmen, sowie die Dämmwirkung erhöhen. Bewertet werden dabei auch Herstellungskomplexität, Kreislaufpotential und klimatische wie energetische Auswirkungen anhand des GWP bzw. der PEI soweit möglich und in qualifizierenden Vergleichen.

¹ Siegel, Curt (2006) Strukturformen der modernen Architektur, Callwey

4 Forschungsdesign

4.1 Methodischer Ansatz

Drei Werkstoffgruppen wurden gem. Abb. 4.100 zunächst parallel entwickelt und dann vergleichend untersucht, Basalttextilien und Zementschaum, Glastextilien in Verbindung mit einer Bläh-/Wasserglasmatrix sowie PET Textilien und PET Schäume. Der Ansatz konnte trotz u.a. auch pandemiebedingter Herausforderungen beibehalten werden.

Anders als im Antrag konzipiert waren insbesondere für die letztgenannten zwei Werkstoffgruppen wesentlich umfangreichere Entwicklungsarbeiten als die reine Untersuchung der Haftung zwischen Textil und Schaum in AP 1 nötig. Bestehende Rezepturen für Bläh-/Wasserglas Platten mussten für die Befüllung zusammen mit den beteiligten Firmen Poraver und Wöllner intensiv weiterentwickelt werden. Themen waren die Herstellung ausreichender Festigkeiten bei gleichzeitig größtmöglicher Dämmfähigkeit unter Berücksichtigung von Wasserfestigkeit, Verarbeitbarkeit zum Befüllen und pH-Wert der Befüllung bzw. Alkalibeständigkeit des Glastextils. Auch im PET Bereich war der erst kurz zuvor auf den Markt gebrachte PET Partikelschaum in der Kombination mit Textilien und formwerkzeugfreier Verschweißung nicht direkt anwendbar. Hier mussten zusammen mit den Partnern Armacell und Propex gemeinsame umfangreiche Entwicklungsarbeiten vorangetrieben werden. Thema war insbesondere die Herstellung eines ausreichend festen Partikelschaums in der textilen Schalung unter Verzicht auf Formwerkzeuge, bei gleichzeitig zufriedenstellender Haftung mit dem Textil in einem möglichst 1-stufigen Verfahren. Ansonsten zeigte sich, daß die laststoffgerechte Konzeption des formgebenden Textils wie unter AP 8 beschrieben (Stabilitätserhöhung durch plastische Verformung) wesentlich früher mit in die Untersuchungen einbezogen werden musste. Entsprechend wurde AP 8 vorgezogen. Abb. 4.100 zeigt die Vorgehensweise entsprechend der iterativ angelegten, vergleichenden und experimentellen Methodik.

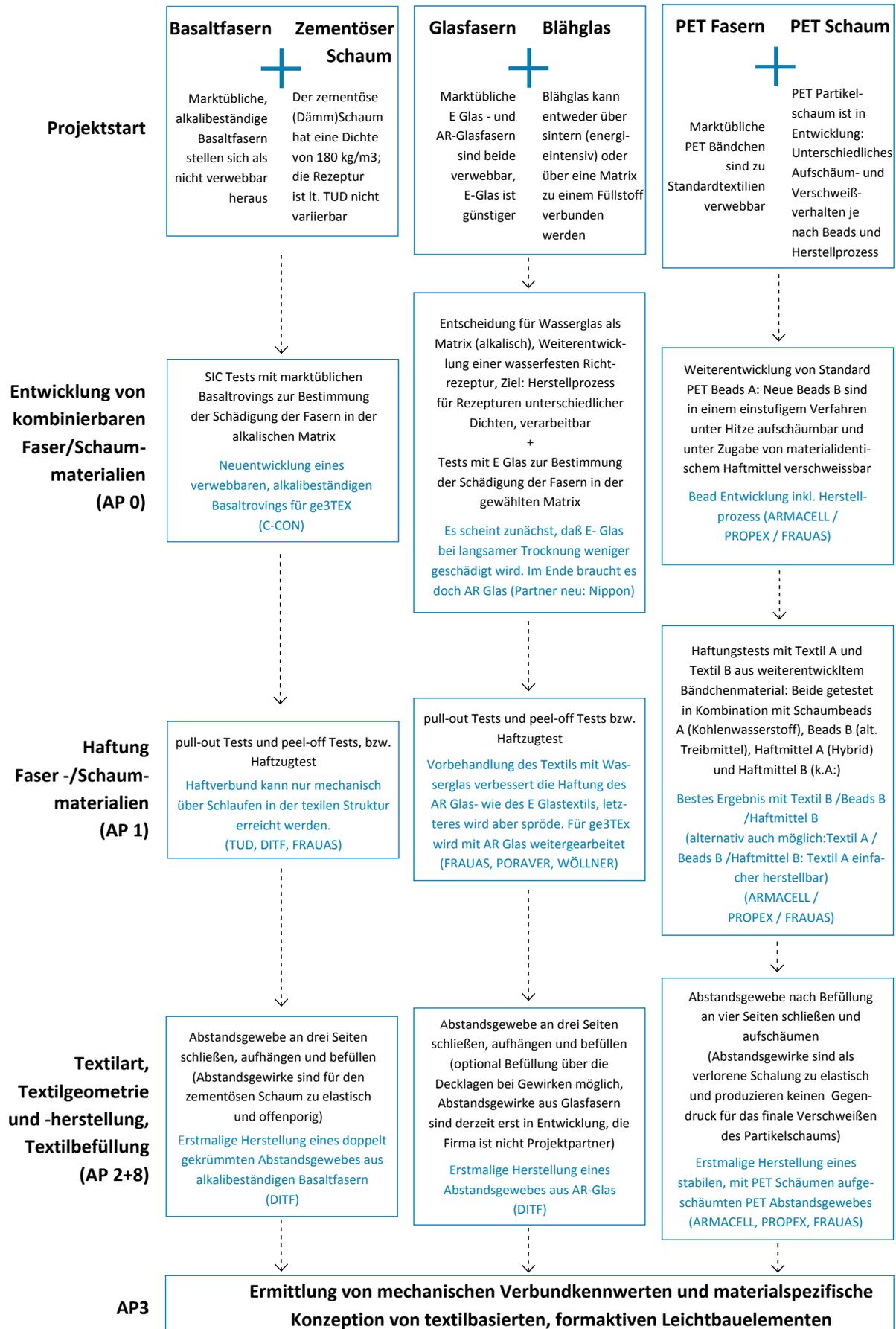
4.2 Projektteam und –Organisation, Kooperationspartner

Federführende Hochschule war die Frankfurt UAS und das Labor Textiler Leichtbau des Frankfurter Forschungsinstituts FFin. Wissenschaftliche Kooperationspartner des Projekts waren zum einen die DITF, die Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf und hier insbesondere das Webereitechnikum. Zum anderen die Technische Universität Darmstadt und das ISM+D (Institute of Structural Mechanics and Design).



Industriepartner zu Projektstart waren für den Bereich Technische Textilien die Firmen C-CON, John Manville und Gerster. Die Firmen Schoepf und MAGEBA sind im Laufe des Projekts u. a. coronabedingt ausgeschieden. Neu hinzugekommen sind dafür die Firmen Nippon und Pile Fabrics. Für den Bereich mineralische Werkstoffe waren die Firmen Poraver und Röser Ingenieurbau am Projekt beteiligt. Neu hinzugekommen nach Projektstart war die Firma Wöllner. Für den Bereich polymerbasierte Werkstoffe haben die Firmen Armacell und Propex die Forschung zusammen mit der FRA-UAS vorangetrieben.





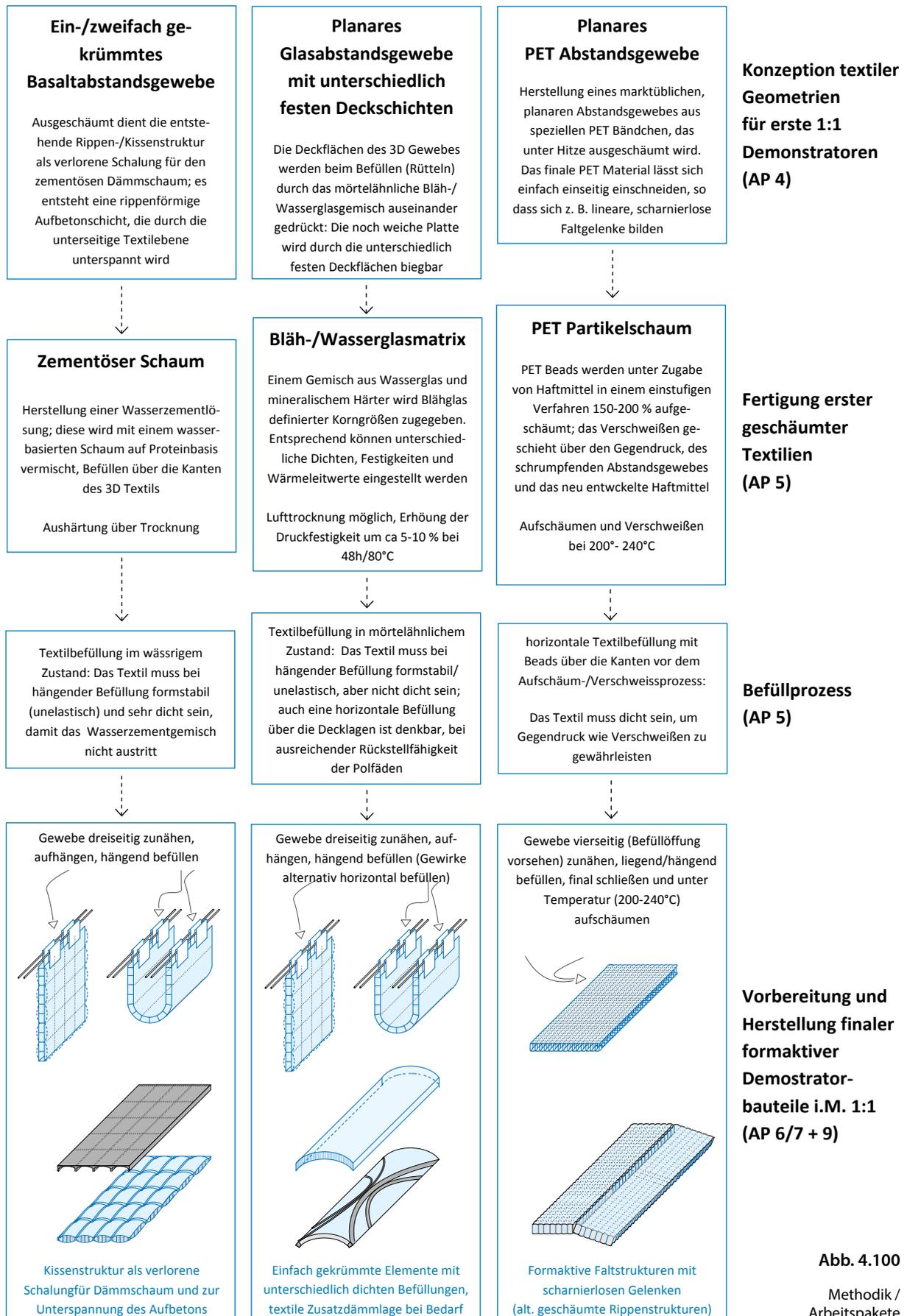


Abb. 4.100

Methodik / Arbeitspakete

4.3 Arbeitspakete und Meilensteine

Abbildung 4.100 zeigt die Methodik, die Arbeitspakete und die letztendlich schrittweise erreichten Ziele, die den gesteckten Meilensteinen entsprechen. Letztere sind blau gekennzeichnet.

Hier waren - wie unter 4.1 bereits ausgeführt - insbesondere das AP 1 und die damit verbundenen Rezeptur-entwicklungen der Befüllungen im PET Bereich wie im Bereich der Blähglasfüllung weitaus umfangreicher als erwartet. Mit den Rezeptur- und Herstellvarianten der Befüllungen waren hier zusätzliche Herausforderungen zu bewältigen. So mussten im Basaltbereich zunächst Rovings entwickelt werden, die an den Textilmaschinen trotz der notwendigen Schlichte zur Erhöhung der Alkalibeständigkeit verarbeitbar sind. Im Glasbereich mussten die gewählten Fasern bzw. Textilien nach der finalen Entscheidung für eine Wasserglasmatrix statt sintern ebenfalls auf Alkalibeständigkeit untersucht werden. Die zunächst angenommene Reduktion der Schädigung durch einen schnellen Erhitzungsprozess beim Trocknen trifft nicht zu. So konnte mit der Klärung der notwendigen Haftung zwischen Textilien und Befüllmaterial in diesen beiden Werkstoffgruppen jeweils erst verzögert begonnen werden. Im Bereich PET verzögerte sich dieser Schritt ebenfalls. Die erst kurz vor Projektstart auf den Markt gebrachten Partikelschäume konnten zunächst in der textilen Schalung ohne Formwerkzeuge nicht verschweißt werden. Zuletzt konnte aber erfolgreich gemeinsam mit der Industrie ein komplett neuer Prozess entwickelt werden, der die Anforderungen an die Haftung erfüllt.

Nicht mehr leistbar war durch die o.g. Herausforderungen am Ende die reale Einbindung von Konzepten zur zusätzlichen Bauteilfunktionalisierung in die Demonstratoren im Maßstab 1:1. Die aufbauend auf der Analyse textilbasierter Technologien angedachten, zusätzlichen Funktionalisierung der Bauteile (Licht/ Wärme) ebenso wie deren Fügung (Klettverschlüsse, Reißverschlüsse) konnten aber zumindest zeichnerisch präsentiert werden. Entsprechend konnte auch die Zusammenarbeit mit der Firma Gerster nicht mehr ausreichend aktiviert werden.

Generell hat die Coronapandemie durch Kurzarbeit vor allem einen der wichtigen Textilpartner, die Firma Schoepf, dazu gezwungen die Zusammenarbeit aufzukündigen. Die eigentlich zugesagten 3D Glasgewebe konnten nicht fristgerecht hergestellt werden. Die DITF konnten aber zumindest Ersatzgewebe in wesentlich kleineren Abmessungen fertigen, die zumindest für erste Versuche geeignet waren. Ein neuer Partner (Pile Fabrics) wurde trotz Pandemie gefunden und in das Projekt integriert. Die ersten Webversuche haben sich schwierig gestaltet, die Rovings wurden deshalb nochmals mit einer Drehung versehen. Ergebnisse sind erst nach Projektende zu erwarten. Die FRA-UAS wird dann unabhängig vom offiziellen Projektende die Befülltests auf jeden Fall noch zu Ende führen, vorausgesetzt die 3D Glasgewebe lassen sich auch in größerem Maßstab herstellen. Ebenso konnte coronabedingt und aufgrund von Kurzarbeit der Textilpartner Poraver die konzipierten PET Abstandsgewebe nicht mehr fertigen. Geliefert wurden an die FRA-UAS immerhin Flächentextilien aus dem korrekten Material sowie Rollen von Einzelbändchen. Mit einem erheblichen Zusatzaufwand von Tutorenstunden wurden die PET Abstandstextilien dann von Hand in verschiedenen Varianten gefertigt und letztendlich erfolgreich beim Firmenpartner Armacell ausgeschäumt, s. auch Kapitel 6.4 und Kapitel 10.

5 Dreidimensionale Textilgeometrien und Befüllstrategien

5.1 Einführung 3D Textilien - Verlorene Schalungen und lastflussgerechte Gestaltung

Um multifunktionale Verbundbauteile mit minimalem Materialeinsatz für nachhaltige Gebäudehüllen herzustellen, müssen generell mindestens zwei Anforderungen erfüllt werden: Angemessene Dämmfähigkeit und lastflußgerechte Formgebung. Vor allem letztere spielt in Bezug auf den Materialeinsatz eine wesentliche Rolle und bestimmt zudem letztendlich die äußere wie auch die innere Geometrie und Formgebung der Bauteile. Abb. 5.100 zeigt, wie sich ausgehend von der Standardsituation (links) über die Wahl klassische Tragwerksgeometrien der Materialeinsatz über zunehmende Formaktivierung reduzieren läßt.

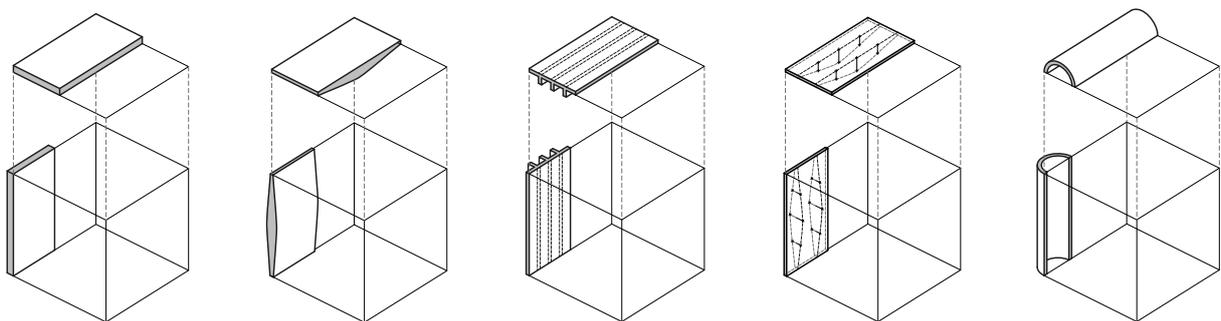


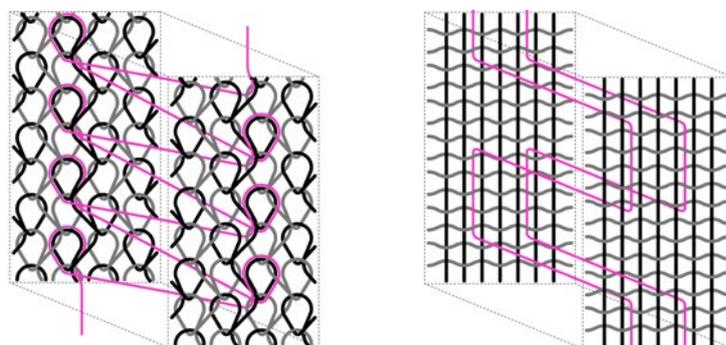
Abbildung 5.100

Lastflussgerechte Formgebung im Fassaden und Dachbereich, von links nach rechts Standardsituation, momentengerechte Ausbildung, Plattenausbildung, Unter- bzw. Hinterspannung, formaktive Ausbildung,

Formaktive Geometrien lassen sich derzeit meist nur kosten- und arbeitsaufwendig herstellen. Zudem werden sie wenn meist in Fertigteilwerken gefertigt, was wiederum Transportvolumen und -energie verursacht. In ge3TEX wird untersucht, ob sich diese komplexeren Geometrien über dreidimensionale textile Schalungen und evtl. in situ herstellen lassen. Die Textilien sollen dabei nicht nur als „verlorene“ Schalung dienen, sondern zudem aktiv zur Übernahme von z. B. Zugkräften genutzt werden. Ein wesentlicher Parameter ist dabei die Auswahl adäquater Textilherstellungsverfahren.

Abb. 5.101 zeigt die wesentlichen Unterschiede. Gewebe mit linearen Faserstrukturen sind nicht drapierbar, dafür aber zur Aufnahme von Zugkräften geeignet. Gewirke sind durch Ihre Maschenstrukturen drapierbar, können aber ohne Vorspannung keine Zugkräfte aufnehmen. Die Wahl des textilen Herstellungsverfahrens entscheidet also über die sich einstellende Bauteilgeometrie beim Befüllprozess, sowie das Tragverhalten.

Abbildung 5.101



Typologien von Abstandstextilien, rot markiert die die Deckschichten verbindenden Polfäden
links, Abstandsgewirke: Maschenstruktur, drapierbar, ohne Vorspannung keine Aufnahme von Zugkräften
rechts, Abstandsgewebe: lineare Faserstrukturen, gute Aufnahme von Zugkräften, nicht drapierbar

5.2 Makrostruktur: Steuerung des Verformungsverhaltens von 3D Textilien

5.2.1 Einfluss des Verformungsverhaltens durch die gewählte Textilgeometrie

Unabhängig davon, ob 3D Gewebe oder 3D Gewirke befüllt werden, stellen sich über das Befüllen ähnliche Formen ein. Allerdings fallen sie bei den drapierbaren Gewirken entsprechend plastischer aus als bei den Geweben. Abb. 5.102 zeigt Konzepte, wie durch unterschiedliche Textilgeometrien definiert lastflussgerechte Formen zu erreichen sind. Die obere Zeile zeigt unbefüllte Abstandstextilien. Links das Schema einer marktüblichen Ausführung mit erhöhter Polfadendichte (rot markiert) für z.B. Matratzenauflagen und entsprechendem Rückstellverhalten. Rechts daneben textile Geometrien, die sinnvoll für Leichtbauteile im Wand- und Dachbereich sein könnten. Neben diesen Möglichkeiten zeigt die unterste Reihe in Abb. 5.102 weitere

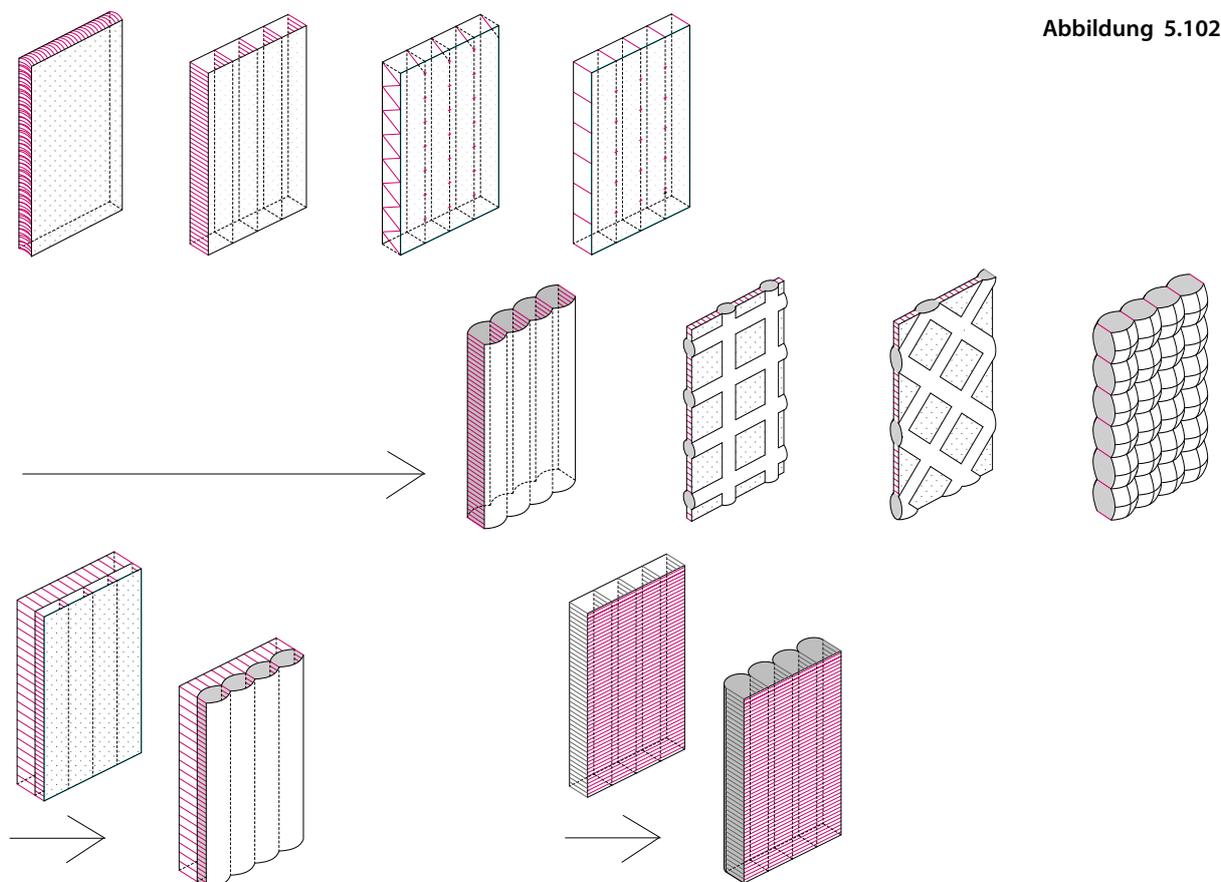


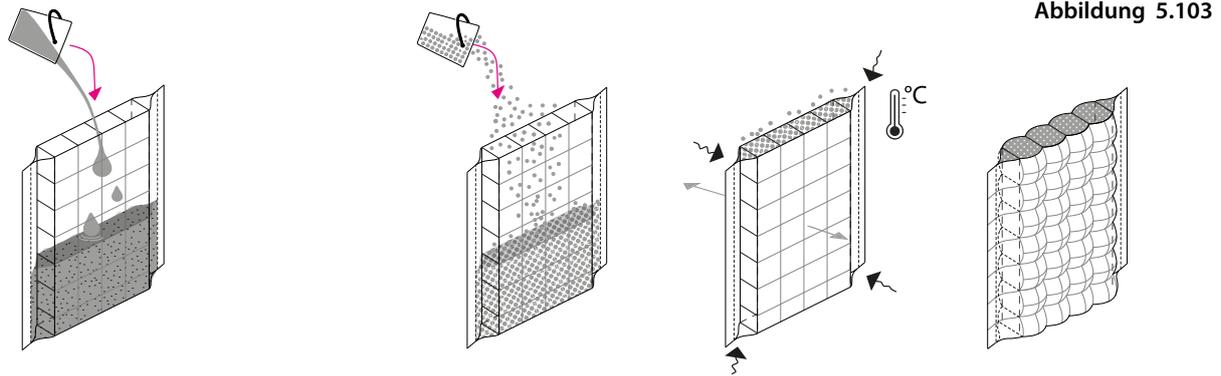
Abbildung 5.102

Verformungsverhalten unterschiedlicher textiler 3D Geometrien:

Unbefüllte (oben) und befüllte Abstandstextilien für potentielle Bauanwendungen (mitte)

Unten: Sonderbauteile aus dreilagigen 2-Kammergeweben (links) und Gewirken mit Schusseinträgen in einer Deckfläche zur gezielten Behinderung der Verformung an dieser Seite

Sondersituationen. Wie bereits im Projekt 3dTEX mit PE Abstandsgeweben demonstriert, können zum einen über spezielle, dreilagige 2-Kammergewebe mehrlagige Bauteile generiert werden, mit individueller Definition der einzelnen Schichten in Bezug auf Funktionalität und Dichte. Zum anderen gibt es zuletzt noch die Möglichkeit in der Herstellung die Vorteile von Geweben und Gewirken zu kombinieren. Die Abbildung zeigt in der untersten Reihe rechts ein unbefülltes Abstandsgewirke mit Schusseinträgen (rot) in einer Decklage. Beim Befüllen verformt sich diese Seite entsprechend deutlich weniger als die gegenüberliegende Decklage, die durch die reine Maschenstruktur elastischer und dadurch verformbarer ist.



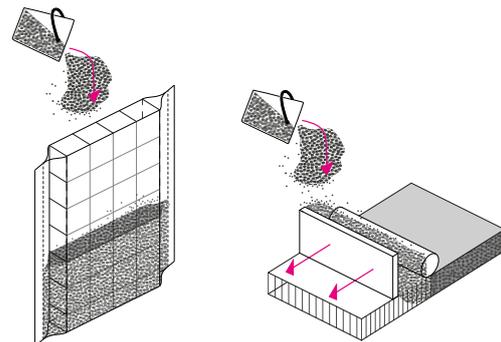
links: Befüllen mit flüssigem, vorexpanziertem Material
rechts: Befüllen mit Partikelmaterial, das erst im Textil z.B. unter Hitze expandiert

5.2.2 Einfluss des Befüllmaterials auf die Textilgeometrie

Für die textile Geometrie spielt zudem die Konsistenz des Füllmaterials eine Rolle. Je flüssiger das Befüllmaterial, desto dichter müssen die Decklagen sein. Hierfür sind Gewebestrukturen geeigneter als Gewirke. Das Befüllen erfolgt dann über die Kanten. Ebenso geeigneter sind Gewebe für Füllmaterialien, die beim Befüllen noch nicht expandiert sind und in Partikelform vorliegen. Auch hier braucht es dichte, gewebte Decklagen, damit die Füllung zu Beginn nicht entweicht. Darüberhinaus braucht es gewebte Decklagen auch, damit das 3D Textil beim Expandieren des Materials nicht unendlich nachgibt, sondern eine Grundfestigkeit zur Formgebung hat (Abb. 5.103).

Abbildung 5.104

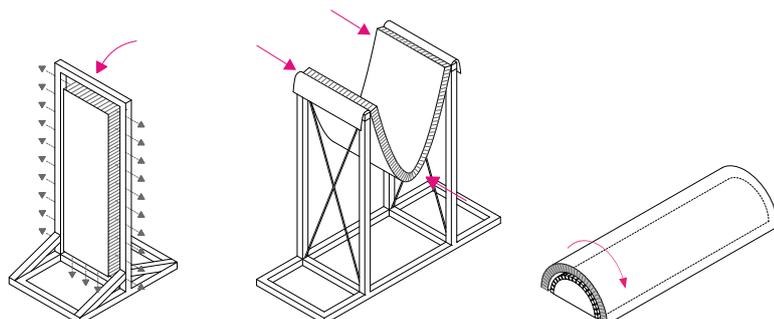
Befüllen mit vorexpanziertem Material, mörtelartige Konsistenz
links einfüllen über die Kanten, rechts über die Deckflächen



Eine Sondersituation nehmen mörtelartige, vorexpanzierte Materialkonsistenzen ein. Sie ermöglichen neben dem Befüllen über die Kanten auch das Befüllen über die Decklagen, s. Abb 5.104. Letzteres kann händisch über Einrakeln oder auch maschinell über einen kontinuierlichen Prozess erfolgen. Zuletzt kann die Gesamtform über das Befüllen selbst definiert werden. Das Dehnen des Textils beim Befüllen erzeugt eine Vorspannung und behindert die Verformung (Abb 5.105, links). Es entstehen flache Platten. Gekrümmte Elemente entstehen, wenn entweder in Hängeposition getrocknet wird oder alternativ über eine Form getrocknet wird, s. Abbildung 5.105.

Abbildung 5.105

Formgebungskonzepte durch Befüll- und Trocknungsoptionen



5.3 Mesostruktur: Definition der inneren Strukturgeometrie befüllter 3D Textilien

Neben der Gesamtform ergeben sich auf der Detailebene (Mesoebene) und im konkreten Zusammenspiel von Polfäden, Decklagen und unterschiedlich weit aufgeschäumtem Befüllmaterial sehr unterschiedliche Möglichkeiten, die Geometrie im Inneren der Bauteile gezielt zu definieren. So kann neben der Gesamtform (Makroebene) auch auf der Mesoebene gestaltend eingegriffen und können Bauteile optimiert werden. Abb. 5.106 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten anhand von zweilagigen 1-Kammerngeweben (oben), dreilagigen 2-Kammerngeweben (mitte) und zweilagigen 1-Kammerngewirken (unten). Man sieht deutlich die große theoretische Bandbreite an Optionen. Im Inneren der Bauteile sind homogen aufgebaute Befüllmaterial- und Faserdichten denkbar, die bis hin zu sehr differenzierten und graduell einstellbaren Verläufen reichen können. Sie können lastflussgerecht oder/und dämmtechnisch optimiert werden. Ebenso können Haptik, Optik und weitere Funktionen der Bauteile über Zuschlagstoffe des Befüllmaterials oder Faserarten variiert werden.

Abbildung 5.106

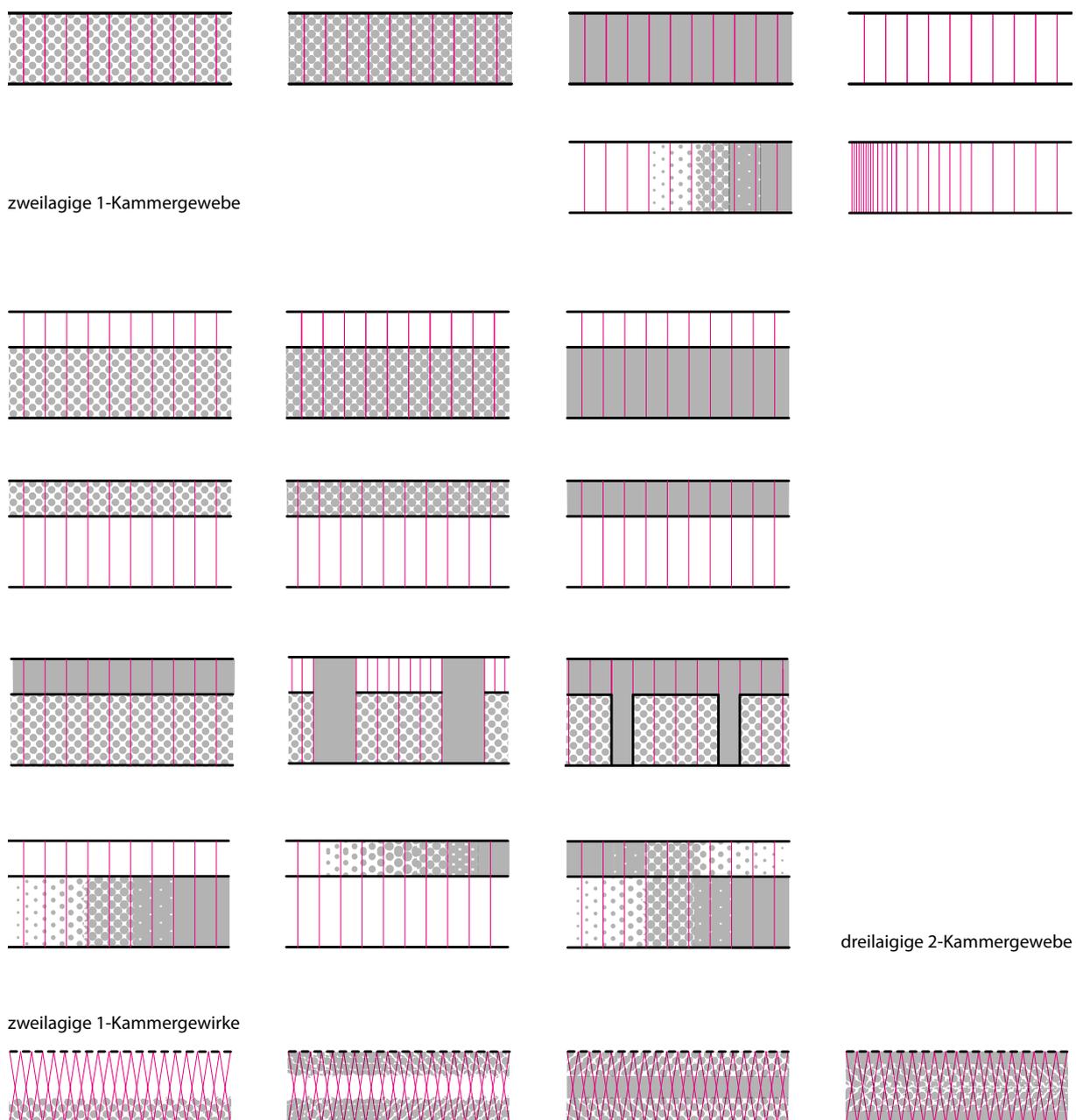
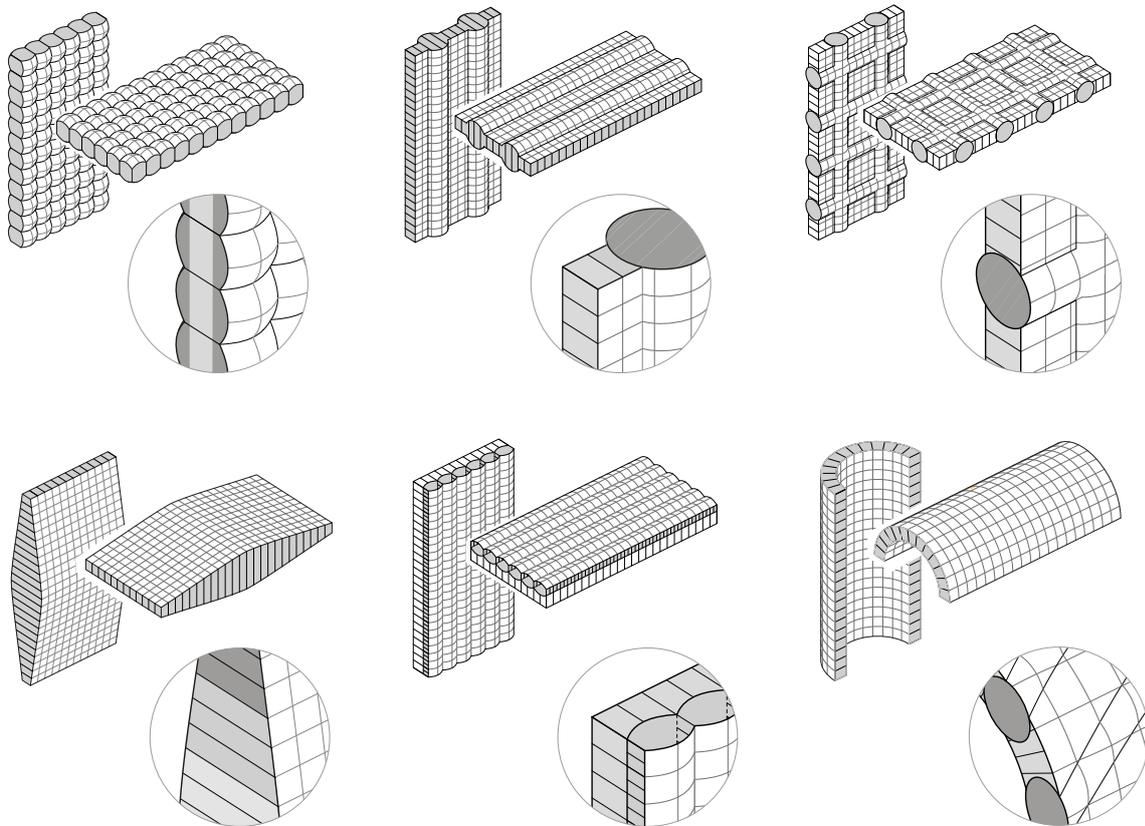


Abbildung 5.107



Lastflussgerechte Geometrien geschäumter 3D Textilien mit homogener Befüllstruktur, close-up: Optional, differenzierte Befüllstruktur mit inhomogener Befüllung

5.4 Resümee, Makro- und Mesostrukturen im räumlichen Zusammenhang

Für ge3TEX ergibt sich im Resümee, dass sich lastflussoptimierte Geometrien und entsprechende Gesamtformen der Bauteile im Zusammenspiel von Makro- und Mesostruktur einstellen lassen.

Denkbar sind alle Tragssysteme von Platten, Trägern, Rahmen, Stützbögen, Schalen bis hin zu freigeformten Bauteilen, s. Abb 5.107. Unter zusätzlicher Beachtung der textilen Herstelltechniken, der Materialität von Faser- und Füllmaterialien, der Konsistenzen des Befüllmaterials und der sich daraus ableitenden Befülltechniken ergeben sich Gestaltungsoptionen, die in sich und im Zusammenspiel graduell und je nach Anforderungsprofil lokal unterschiedlich differenzierte Bauteile denkbar erscheinen lassen. In Kapitel 6 und 7 werden diese Optionen in Bezug auf die gewählten drei Werkstoffkombinationen und textilen Geometrien hin untersucht, in Kapitel 8 rechnerisch Bauteilgeometrien abgeschätzt, in Kapitel 9 Funktionsoptimierungen untersucht und in Kapitel 10 die finalen Demonstratoren gezeigt die realisiert werden. Diese werden zum Schluß in Bezug auf Funktionalität und Nachhaltigkeit und unter Berücksichtigung der individuell herstellbaren Bauteilgeometrien verglichen.

6 Schäum- und Textiltechnologien im Verbund, Haftung

6.1 Übersicht über werkstoffspezifische und herstellbedingte Besonderheiten

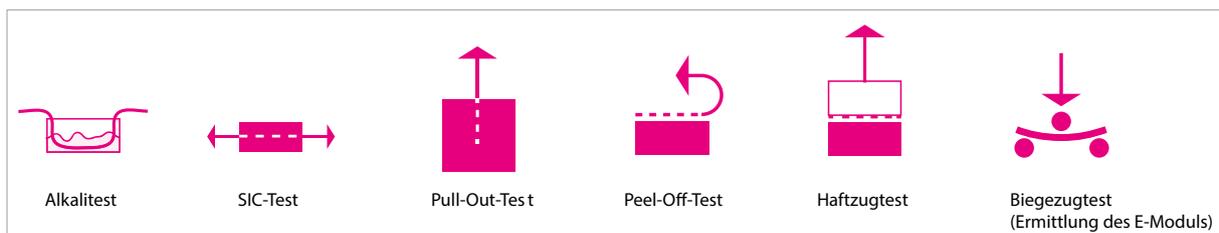
Tabelle 6.100

Werkstoff	Anforderungen /Eigenschaften Werkstoff	Eigenschaften Befüllprozess	Herausforderungen allgemein
Basaltfasern	alkalibeständige, verwebbare Rovings	der Zementschaum wird vor dem Befüllen hergestellt und ist voll expandiert	Herstellung verwebbarer alkalibest. Basaltrovings + Verbundwirkung (mechanisch/chemisch) des Ze- mentschaums mit dem Textil, unter Beachtung des Schrumpfverhaltens des Zementschaums
Zementschaum	alkalische, wässrig-flüssige Konsistenz,		
Glasfasern-/- textil	alkalibeständige verwebbare Rovings	das Bläh-/Wasserglasgemisch wird vor dem Befüllen herge- stellt und ist voll expandiert	verarbeitbare Rezepturen unterschied- licher Dichten entwickeln + Verbund- wirkung (mechanisch/chemisch) der Matrix mit dem Textil, unter Beach- tung des evtl. Schrumpfverhaltens der Bläh-/Wasserglasmatrix
Bläh-/Wasserglasmatrix	alkalische, mörtelartige Konsistenz,		
PET Fasern /PET Textil	PET Bändchenmaterial	der Partikelschaum expandiert final im PET Textil	Verbundwirkung, Verschweißen des Partikelschaums (Rezepturen- entwicklung) in sich und mit dem Textil erreichen, bei einem materialbedingt sehr kleinen Temperaturdelta und in einem robusten Gesamtprozess
PET Partikelschaum	PET Partikelschaum, unverbundene Partikel		

Übersicht der je Werkstoffgruppe gewählten Ausgangsmaterialien sowie Materialanforderungen aufgrund von Herstellprozess und angestrebter Verbundwirkung

Die sortenreinen Verbundwerkstoffe, die entwickelt werden sollen, unterscheiden sich sowohl in Bezug auf das Textil wie das geschäumte Material und den Herstellprozess. Tabelle 6.100 zeigt dies in einer grafischen Übersicht. Generell werden für alle drei Werkstoffgruppen sowohl Faseroptimierungen wie Befüllrezepturenentwicklungen/-optimierungen durchgeführt und final mechanische und bauphysikalische Kennwerte der neuen Verbundwerkstoffe ermittelt. Dies unter Berücksichtigung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Eine Zusammenstellung der erreichten Werte zeigt Abschnitt 10.2, Tabelle 10.200. Im Wesentlichen wurden dazu jeweils die in Abb. 6.100 aufgeführten Versuche durchgeführt. Sie werden in den nachfolgenden Kapiteln je Werkstoffgruppe individuell beschrieben und die Ergebnisse dokumentiert.

Abbildung 6.100



Übersicht über die je Werkstoffgruppe durchgeführten Versuchsreihen

6.2 Basaltfasern bzw. Basalttextilien in Kombination mit Zementschaum (s. auch Anlage 1, Autor Maier, Andreas)

Ziel ist die Entwicklung eines nachhaltigen, sortenreinen Verbundmaterials aus Zementschaum und Basaltfasern für Anwendungen in der Gebäudehülle. Für ge3TEX stellt dazu die Firma Beton Röser GmbH + Co. KG einen gemeinsam mit der TU Darmstadt entwickelten Zementschaum bereit. Die Firmengruppe C-Con ist im Projekt für das Thema Basaltfasern zuständig.

6.2.1 Schaumbeton

6.2.1.1/2 Allgemeines, Kategorisierung und Eigenschaften

Die Begriffe Schaumbeton, Zellenbeton oder Porenleichtbeton beschreiben ein zementgebundenes Material ohne grobe Gesteinskörnung, dessen Bindemittelmatrix mit geeigneten Mitteln in höherem Maße als bei Luftporenbeton künstlich und gleichmäßig porosiert wurde. Im Gegensatz zu dampfgehärteten Porenbeton verfestigt Schaumbeton durch Zementhydratation. Daneben weisen die beiden Materialtypen aufgrund von Unterschieden in der Mikrostruktur voneinander abweichende Festbetoneigenschaften auf. Verschiedene Schaumbetontypen lassen sich am einfachsten nach ihrer Trockenrohddichte bzw. Mischungszusammensetzung unterscheiden, s. Tabelle 6.201. Alle bezüglich der Rohddichte unter 400 kg/m^3 liegenden Materialien werden den leichten mineralisierten Schäumen zugerechnet. Auch der in diesem Projekt verwendete Schaum gehört zu diesem Bereich und wird erst in neueren Veröffentlichungen verstärkt verfolgt. Der Einsatz ist bisher auf füllende und dämmende Zwecke beschränkt. Neben der Minimierung der Rohdichten konzentrieren sich aktuelle Forschungen im Bereich hochporöser Betone auf eine Festigkeitssteigerung sowie Schwindreduzierung mittels granulometrischer Optimierung oder Fasereinsatz.

Tabelle 6.201

Rohdichtebereich [kg/m^3]	Bezeichnung
1.400 - 1.800	Schaumbeton
800 - 1.400	Schaummörtel
400 - 800	Mineralisierter Schaum
< 400	Leichter, mineralisierter Schaum

Rohdichtebereiche und verwendete Bezeichnungen für Materialien mit Schaumzusatz und Gesteinskörnung $D < 2 \text{ mm}$.

6.2.1.3/4 Rechnerischer Mischungsentwurf / Mischungszusammensetzung und Inhaltsstoffe

Der Mischungsentwurf bzw. die Mischungszusammensetzung des verwendeten Zementschaums beruht auf den Erkenntnissen von vorangegangenen Projekten. Die bisher produzierten Probekörper sind hier mit einer Zielrohddichte von $190 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ hergestellt worden und mit der Absicht, Wärmeleitfähigkeiten von ca. $0,06 \text{ W/mK}$ zu erreichen.

Es wurde bei den vorgenommenen Untersuchungen Portlandzement des Typs CEM I 42,5 R und CEM II 42,5 R eines definierten Zementwerkes verwendet. Der im Projekt verwendete Schaumbildner Pantapor FA stammt genau aus der Gruppe von Proteinen aus der Keratinhydrolyse und wird in einer Menge von 2,5 % der Masse des Schaumwasser zugegeben. Die mit diesem Schaumbildnertypus hergestellten wässrigen Schäume sind fest und besitzen elastische Eigenschaften. Der verwendete Erhärtungsbeschleuniger Pantaquick wurde zu 2% der Zementmasse zugegeben. Für die Befüllung der textilen Bauteile ist eine erhöhte Fließfähigkeit des Schaumes erforderlich, wie erste Befüllversuche ergeben haben. Somit wurde als Fließmittel *PowerFlow* (Polycarboxylatether) in einer Dosierung von 0,3 % der Zementmasse zugegeben, s. Tabelle 6.202.

Tabelle 6.202

Inhaltstoffe	Masse in 1 m ³ [kg]	Volumen in 1 m ³ [m ³]
Zement	128,8	0,042
Schaum	59,0	0,907
Zugabewasser für Schaum und Zementleim	108,9	0,108
Schaumbildner	1,4	0,001
Erhärtungsbeschleuniger	2,6	0,002
Fließmittel	0,4	4,0e-4

Standardmischungsentwurf des mineralisierten Schaums ($w/z = 0,4$).

6.2.1.5 Herstellung des mineralisierten Schaumes

Im Rahmen des vorangegangenen Forschungsprojektes ETA-Fabrik wurden verschiedene Herstellungsverfahren untersucht und final ein mehrstufiges Verfahren entwickelt, das auch für die Herstellung des Schaumes in ge3TEX zur Anwendung kommt. Hierbei werden ein wässriger Schaum und ein Bindemittleim in zwei getrennten Verfahren hergestellt und miteinander vermengt entsprechend Abbildung 6.201. Das Erhärten von mineralischem Schaum erfolgt, im Gegensatz zu Porenbeton, an der Luft unter normalen atmosphärischen Bedingungen, was eine maximale Flexibilität hinsichtlich Geometrie und Bauteilgröße ermöglicht. Wie für Leichtbeton üblich, wird das vorliegende Material mit besonderer Sorgfalt unter Verwendung von Adhäsionsfolien nachbehandelt, da aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit die Gefahr von Spannungsrissbildung erhöht ist.

Abbildung 6.201



Herstellungsprozess von mineralisiertem Schaum im semikontinuierlichen Verfahren.

6.2.1.6 Eigenschaften von mineralisiertem Schaum

a) Druckfestigkeit: Die charakteristische Druckfestigkeit ist für eine Rohdichte von 180 kg/m^3 $0,12 \text{ N/mm}^2$ (5 %-Quantil bei 90 % Aussagewahrscheinlichkeit) bei einem Mittelwert von $0,18 \text{ N/mm}^2$. Damit liegt der mineralisierte Schaum im Bereich von druckfester Wärmedämmung, was auch seinem ursprünglich konzipierten Anwendungsfeld entsprechend genügt.

b) Zugfestigkeit: Die charakteristische Zugfestigkeit ist für eine Rohdichte von 180 kg/m^3 $0,051 \text{ N/mm}^2$ (5 %-Quantil bei 90 % Aussagewahrscheinlichkeit) bei einem Mittelwert von $0,072 \text{ N/mm}^2$. Sie liegt damit erwartbar deutlich unterhalb der uniaxialen Druckfestigkeit.

c) Schubfestigkeit: Die charakteristische Schubfestigkeit ist für eine Rohdichte von 180 kg/m^3 $0,028 \text{ N/mm}^2$ (5 %-Quantil bei 90 % Aussagewahrscheinlichkeit) bei einem Mittelwert von $0,046 \text{ N/mm}^2$.

d) Biegezugfestigkeit: Die charakteristische Biegezugfestigkeit für eine Rohdichte von 180 kg/m^3 beträgt $0,031 \text{ N/mm}^2$ (5 %-Quantil bei 90 % Aussagewahrscheinlichkeit) bei einem Mittelwert von $0,092 \text{ N/mm}^2$.

e) E-Modul und G-Modul: Die E-Module wurden aus uniaxialen Druck- und Zugversuchen ermittelt. Auffallend dabei waren die großen Streuungen innerhalb der Messserien. Die Ermittlung erfolgte mittels DIC auf Basis einer sogenannten Grau-Wert-Korrelation. Die Mittelwerte lagen hierbei im Bereich von 50 bis 150 MPa. Ermittelt man anstelle der E-Module der Lamellen einen verschmierten Steifigkeitswert aus der Stauchung bzw. Dehnung der Proben, so liegt man im Bereich von 5 bis 10 MPa.

Der Schubmodul wurde aus den Traversenverschiebungen von Biegezugversuchen und den daraus rückgerechneten Schubverformungen ermittelt. Dieser liegt im Bereich von 10 MPa als Mittelwert und 4,5 MPa als 5 %-Quantilwert. Damit liegt der Schaum hier z.B. im vergleichbaren Bereich zu brennbarem Polyurethan.

f) Schwinden: Der Hauptgrund für den allenfalls allgemein bauaufsichtlich unregelmäßigen Einsatz von Schaumbeton und mineralisiertem Schaum ist seine hohe Schwindneigung, sie liegt für das Gesamtschwindmaß ϵ_{tot} bei ca. 4 mm/m und ist somit ungefähr 10-mal höher als von Normalbeton.

g) Wärmedämmeigenschaften: Für die im vorliegenden Forschungsprojekt untersuchte Zielrohddichte von 180 kg/m^3 ergibt sich der Nennwert zu $\lambda_{10, \text{dry}} (180 \text{ kg/m}^3) = 0,056 \text{ W / (mK)}$. Die Steigerung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund seiner Temperaturabhängigkeit beträgt zwischen $10 \text{ }^\circ\text{C}$ und $23 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bemessungstemperatur) ca. 5 % (Berechnung siehe Tabelle Anhang B.4). Somit ergibt sich $\lambda_{23, \text{dry}} (180 \text{ kg/m}^3) = 0,060 \text{ W / (mK)}$.

h) Feuchteigenschaften: Untersuchungen am Schaum zeigen, dass ein Durchdringen des Wassers bis an die Oberseite der Probekörper ausgeschlossen werden kann. Vielmehr besteht ein anfängliches kapillares Saugen, das ab einer bestimmten Höhe, vermutlich aufgrund der Grobporigkeit des Materials, stark abgeschwächt wird. Der mittlere w_{24} -Wert liegt bei ca. $0,21 \text{ kg / (kgH}_0,5)$.

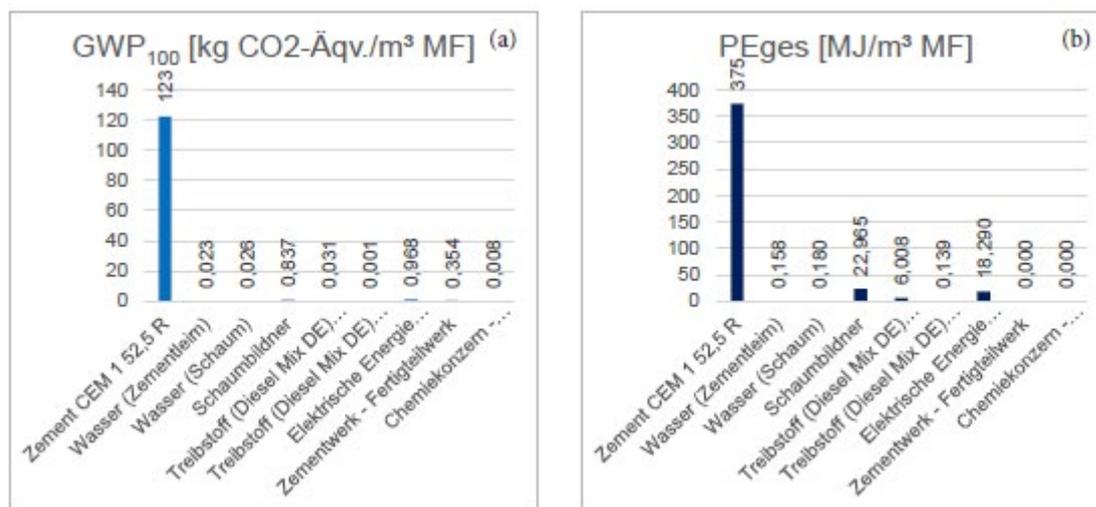
i) Brandverhalten: Der Zementschaum kann der Klasse A1 zugeordnet werden, wie die unterschiedlichen Betonsorten sowie die mineralischen Betonausgangsstoffe, zu denen auch Zement und Wasser, der Zementstein bildende Ausgangsstoffe zählen.

j) Morphologie: Mineralisierter Schaum besteht aus einer Mischung von Polyederporen und Kugelporen, entsprechend dem jeweiligen Abbindegrads des Zementleims. Die Poren sind weiterhin teilweise offen- und teilweise geschlossenzellig, wobei letztere Porenstruktur überwiegt. Das Porenspektrum reicht von den Gelporen des Zementsteines bis hin zu 2 mm großen Makroporen des Schaums

k) Nachhaltigkeit: Für mineralisierten Schaum sind Daten im Rahmen einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO

14040 und DIN EN ISO 14044 ermittelt worden. Abbildung 6.202 zeigt die absoluten Ergebnisse und Tabelle 6.203 die Ergebnisse im Vergleich zu anderen Dämmstoffen.

Abbildung 6.202



Ökobilanzierung von mineralisiertem Schaum: (a) GWP; (b) Primärenergiebedarf gesamt.

Tabelle 6.203

Parameter	Mineralisierter Schaum	EPS	XPS
λ [W/mK]	0,060	0,035	0,035
derf [m]	0,250	0,146	0,146
GWP [kg CO ₂ -Äqv./m ²]	31,230	6,840	8,680
PE _e [MJ/m ²]	15,190	3,600	3,110
PE _{ne} [MJ/m ²]	90,400	196,880	263,960
PE _{ges} [MJ/m ²]	105,590	200,480	267,060

Vergleich mineralisierter Schaum mit EPS und XPS bei einem Vergleichs- U- Wert von 0,24 W/m²K.

I) Untersuchungen zur Karbonatisierungsneigung: Über das Karbonatisierungsverhalten zementöser Schäume gibt es bisher in der Literatur keinerlei Untersuchungen. Für eine Verwendung von Textilien aus Basalt innerhalb des Schaumes hat die Karbonatisierung des Schaumes bzw. das Vorhandensein des alkalischen Milieus eine Bedeutung. Bei der Hydratation des Zements entsteht Calciumhydroxid Ca(OH)₂. Dieses ist verantwortlich für die hohe Alkalität des Zementsteins mit einem pH-Wert ≥ 12 . Das Calciumhydroxid nimmt jedoch im Lauf der Zeit Kohlendioxid CO₂ aus der Luft auf und wird in Calciumcarbonat CaCO₃ und Wasser H₂O umgewandelt, was ein Absenken des pH-Werts auf kleiner 9 zufolge hat. Im Hinblick auf die Verwendung von Basalttextilien im Schaum und der Tatsache, dass dieser unbewehrt ist, wäre eine vollständige Karbonatisierung des Materials von Nutzen, wenn man auf diese Weise auf alkaliresistente Basaltfasern verzichten könnte.

Dazu wurden Phenolphthaleintests und letztendlich thermogravimetrische Analysen (TGA) durchgeführt, wobei zwischen Laborbedingungen und einer Exponierung im Aussenraum (Normalbedingungen) unterschieden wurde. Es zeigt sich durch die TGA Analysen, dass bei der exponierten Probe der Massenverlust von CaCO₃ deutlich stärker ausfällt als bei der Probe, die nicht den Umweltbedingungen frei ausgesetzt war. Der Vergleich mit den Referenzmessungen von Zementstein zeigt, dass der mineralisierte Schaum, sofern er den Umweltbedingungen ausgesetzt wird, eine deutliche Karbonatisierung erfährt. Diese ist zudem ca. 3-mal stärker als

die von Zementstein. Die beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass der Schaum schnell und stark karbonatisiert, jedoch nicht über die komplette Bauteildicke, sondern nur im oberflächennahen Bereich. In tieferen Schichten herrscht auch bei entsprechenden, die Karbonatisierung begünstigende Umweltbedingungen, ein stark alkalisches Milieu vor, s. Abbildung 6.203. Dennoch können sich Wechselwirkungen zwischen dem stark alkalischen Milieu in einem Material und einem anderen, in das alkalische Material eingebettetem Stoff geben, die eine zerstörende Wirkung unterbindet (Thema Polfäden der Abstandstextilien). Daher wird die Frage hinsichtlich der Notwendigkeit von alkaliresistenten Basalttextilien auf direktem Wege mit der sogenannten SIC-Test Methode beantwortet, s. Abschnitt 6.2.2.3

Abbildung 6.203



links: Ergebnis des Phenolphthalein Tests nach 28 Tagen im Kern und an der Oberfläche. rechts: Karbonatisierungstiefe von 0,9 cm.

6.2.2 Basaltfasern (Autor 7)

6.2.2.1 Allgemeines

Basaltfasern werden aus vulkanischem Basaltgestein gewonnen, was einen Anteil von circa 13 % an der Erdkruste besitzt und somit fast unbegrenzt als Rohstoff zur Verfügung steht. Zur Herstellung der Basaltfasern muss das Gestein auf 1450 °C erhitzt werden und anschließend, zum Erspinnen der Faser, durch haarfeine Düsen geleitet werden. Der Querschnitt der einzelnen Basaltfasern liegt bei 8 – 13 µm und damit nicht im kanzerogenen Bereich.

6.2.2.2 Übersicht über die untersuchten Fasern

Tabelle 6.204 zeigt eine Übersicht über die Basaltfasern, die für die Zugversuche und die Verbundversuche (vgl. Abschnitt 6.2.3.) verwendet wurden und für eine Fertigung späterer Flächentextilien in Fragen kommen. Die Verfügbarkeit von Basaltfasern stellt keine Schwierigkeiten dar. Es gibt nationale und internationale Hersteller von Basaltfasern, von denen auch im Rahmen dieses Projektes Muster auf ihre Verarbeitbarkeit auf der Webmaschine hin getestet wurden. Dabei zeigte sich, dass das Garn eines internationalen Herstellers, welches für das Projekt von der Fa. C-CON GmbH bereitgestellt wurde, die besten webtechnologischen Eigenschaften besitzt. Getestete Konkurrenz-Produkte erzielten schlechte Lauf- und Gewebeeigenschaften, da sie für den Prozess entweder zu spröde oder zu steif sind. Die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Basaltfasern liegen in der Verarbeitbarkeit an der Webmaschine. Die Materialwahl für die Herstellung der Versuchsbauteile fiel auf das Garn Nr. 19, da es sehr gute Laufeigenschaften und keinen Faserabrieb an der Webmaschine aufweist. Dieses Garn konnte durch den Projektpartner C-Con GmbH bereitgestellt werden, die bereits Erfahrungen damit gesammelt hatten.

Nach Rybin, Utkin und Baklanova werden Basaltfasern von einer alkalischen Umgebung angegriffen. Ist dies der Fall, kann die Korrosion der Basaltfasern durch eine Zirconiumbeschichtung verlangsamt werden. Das unterschiedliche Verhalten der Basaltfasern in alkalischem Milieu wurde in der Untersuchung zeitabhängig über 2 Monate betrachtet. Das alkalische Milieu ist eine Natronlauge mit einem pH-Wert von 13. Die Lagerung ist bei

Tabelle 6.204

Garn-nr.	Garn-material	Hersteller	Schlichte	Garn-feinheit (tex)	Drehung (T/m)	Menge	UD-Drehergewebe	Bemerkung
1	Basaltroving	DBF GmbH, durch DITF	k.A.	1.200	ohne	k.A.	/	k.A., gute Laufeigenschaften sind anzunehmen
2	Basaltgarn, verzwirnter Strickfaden	Fa. Alterfil GmbH / über SEAL Peterseim Strick	Avivage, k.A.	440 (110 x4)	k.A.	k.A.	/	/
3	Basaltgarn, verzwirnter Strickfaden	Fa. Alterfil GmbH	Schlichte unbekannt, ohne Avivage	800	k.A.	k.A.	/	/
4	Basaltroving, beschichtet, alkaliresistent, hart	DBF GmbH	neue Schlichte, alkaliresistent	1.200	ohne	k.A.	gefertigt	sehr steifes Garn, sehr schlechte Laufeigenschaften und Gewebeansatz
5	Basaltroving, beschichtet, alkaliresistent, weicher(Spule 18)	DBF GmbH über DITF	neue Schlichte, alkaliresistent	1.200	ohne	15	gefertigt	gute Laufeigenschaften, kaum Abrieb, weicher durch weniger Schlichte als BF 4
6	Basaltgarn, gedreht	DBF GmbH über DITF	neue Schlichte, alkaliresistent	600	k.A.	k.A.	/	/
7	Basaltroving	C-Con GmbH	Epoxysschlichte 0,2%	1.800	ohne	k.A.	/	/
8	Basaltroving	/	PVA Schlichte, alkaliresistent	/	/	/	/	/
9	Basaltroving	DBF GmbH	Silan	1200	ohne	k.A.	gefertigt	k.A.
10	Ersatzfaser Filava	Fa. Gruschwitz	k.A.	/	ohne	/	/	nicht geliefert
11	Basaltroving, texturiert	basalt fibertec	Silan	2.400, 13µ	/	k.A.	/	/
12	Basaltgarn, verzwirnt	basalt fibertec	TPU Coating	150	k.A.	k.A.	/	/
13	Basaltroving (GEWEBE-AUSZUG)	Incotology GmbH	Silan-Schlichte f. Epoxidharz	110	ohne	k.A.	/	/
14	Basaltroving, hart (Spule 9)	DBF GmbH über DITF	neue Schlichte, alkaliresistent, Typ CF	600	ohne	15	gefertigt	gute Laufeigenschaft, etwas mehr Abrieb
15	Basaltroving (Spule 10)	DBF GmbH über DITF	Silan	600	ohne	15	gefertigt	sehr steif und schwer verarbeitbar
16	Basaltgarn, gedreht	DBF GmbH über DITF	Silan	600	k.A.	k.A.	/	/
17	Basaltroving (Spule 19)	C-Con GmbH	Schlichte alkalibeständig	600	ohne	15	gefertigt	sehr gute Laufeigenschaften, kein Faserabrieb
18	Basaltroving, gedreht (Spule 21)	C-Con GmbH	Schlichte alkalibeständig	600	30T/m	15	/	sehr gutes Laufverhalten, kein Faserabrieb

Getestete Basaltfasern und gefertigte Flächentextilien

Raumtemperatur durchgeführt worden¹. Erst durch die Beschichtung wird die Korrosion deutlich verlangsamt. Mit zunehmender Korrosion verringert sich der Querschnitt der Basaltfaser. Am Ende bricht die Korrosionsschicht ab, und die verbleibende Faser ist einer weiteren Zersetzung ausgesetzt, s. Abbildung 6.204. Das Verhalten einer Basaltfaser mit und ohne Zirkonium Beschichtung kann in Abbildung 6.205 eingesehen werden. Es ist zu erkennen, dass beide Basaltfasertypen (ohne und mit Zirkonium Beschichtung) das Einbetonieren relativ unbeschadet überstehen. Die Variante b) mit Zirkonium Beschichtung wird fast nicht durch das alkalische Milieu angegriffen, Variante a) ohne Beschichtung nur gering. Die visuelle Beobachtung wird auch durch einen Test der Zugfestigkeit (Abbildung 6.206) bestätigt. Einer Anwendung von Basaltfasern in Kombination mit Beton spricht somit nichts entgegen.

Abbildung 6.204 Korrosionsverhalten von Basaltfasern

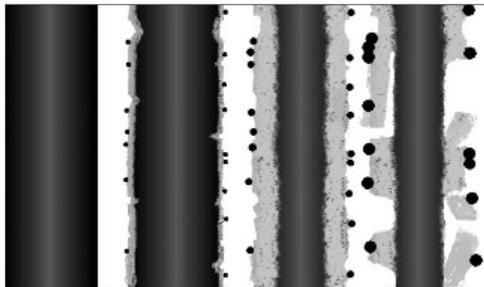


Abbildung 6.205 Basaltfaser in Beton a) ohne Zirkonium Beschichtung b) mit Zirkonium Beschichtung

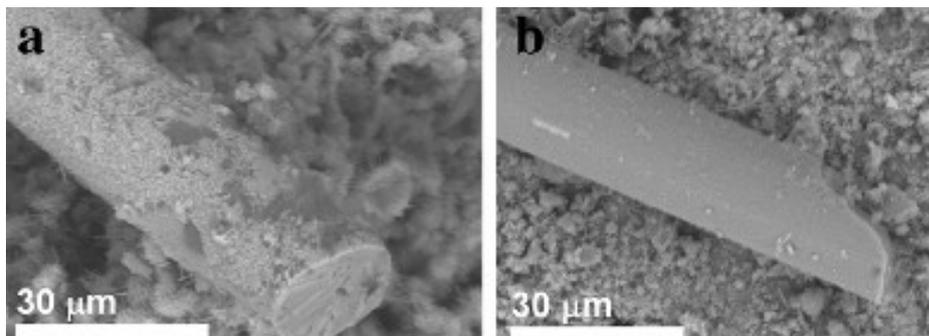
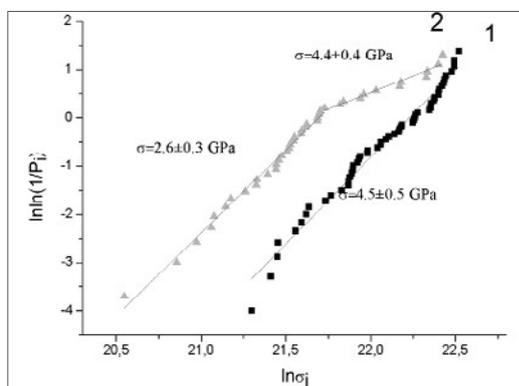


Abbildung 6.206 Zugfestigkeit von Basaltfasern (in Logarithmuskoordinaten) nach 8 Tagen im alkalischen Milieu 1) ohne Beschichtung; 2) mit Zirkonium Beschichtung.

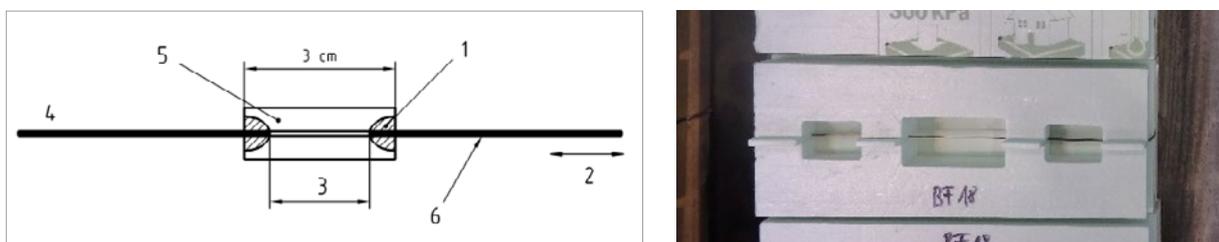


¹ Rybin, A. Utkin und N. Baklanova, „Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers,“ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Novosibirsk, 2012.

6.2.2.3 Faserschädigung im alkalischen Milieu – Strand in Concrete (SIC) Test

Ziel der SIC Tests auf Basis von DIN EN 14649:2005 ist es festzustellen, inwiefern der Kontakt von mineralisiertem Schaum mit Basaltfasern in einem alkalischen Milieu die Faser schädigen kann. Aufgrund der Schwierigkeiten einer Vorhersage der Restalkalität im Schaumbeton mittels Phenolphthaleintest kann mit diesem Versuch eine qualitative Aussage über eine mögliche Wechselwirkung von Schaum und Fasern getroffen werden. Die Basaltfasern werden im SIC Test in einen Schaumbetonkörper einbetoniert und die beidseitig herausragenden Faser- bzw. Rovingenden unter Zugspannung gesetzt. Gleiches wird mit Fasern ohne Kontakt zum Schaumbeton und damit ohne potentiell Alkalischädigungsrisiko gemacht, indem hieran einfache, uniaxiale Zugversuche getätigt werden. Abbildung 6.207 stellt links den genormten Versuchsaufbau dar, der modifiziert auch im Rahmen von ge3TEX verwendet wurde. Rechts zu sehen, die für den mineralisierten Schaum vorbereiteten Schalungen.

Abbildung 6.207



links: Probekörper für SIC-Test nach EN 14649:2005. 1: Modellierton, 2: Klemmlänge, 3: Frei liegender Prüfabschnitt des Faserbündels, Länge 20mm, 4: Harzimpregniertes Faserbündel, 5: Zementmörtelblock mit den Maßen $L*B*D = 30*10*10$ mm, 6: 30 mm
rechts: Schalungen für ge3TEX in leicht abgewandelten Maßen

Der detaillierte Versuchsaufbau, die Probekörperherstellung, die Versuchsdurchführung sowie die Einzelauswertungen sind der ausführlichen Anlage 1 (Abschnitt 6.2.2.3) zu entnehmen.

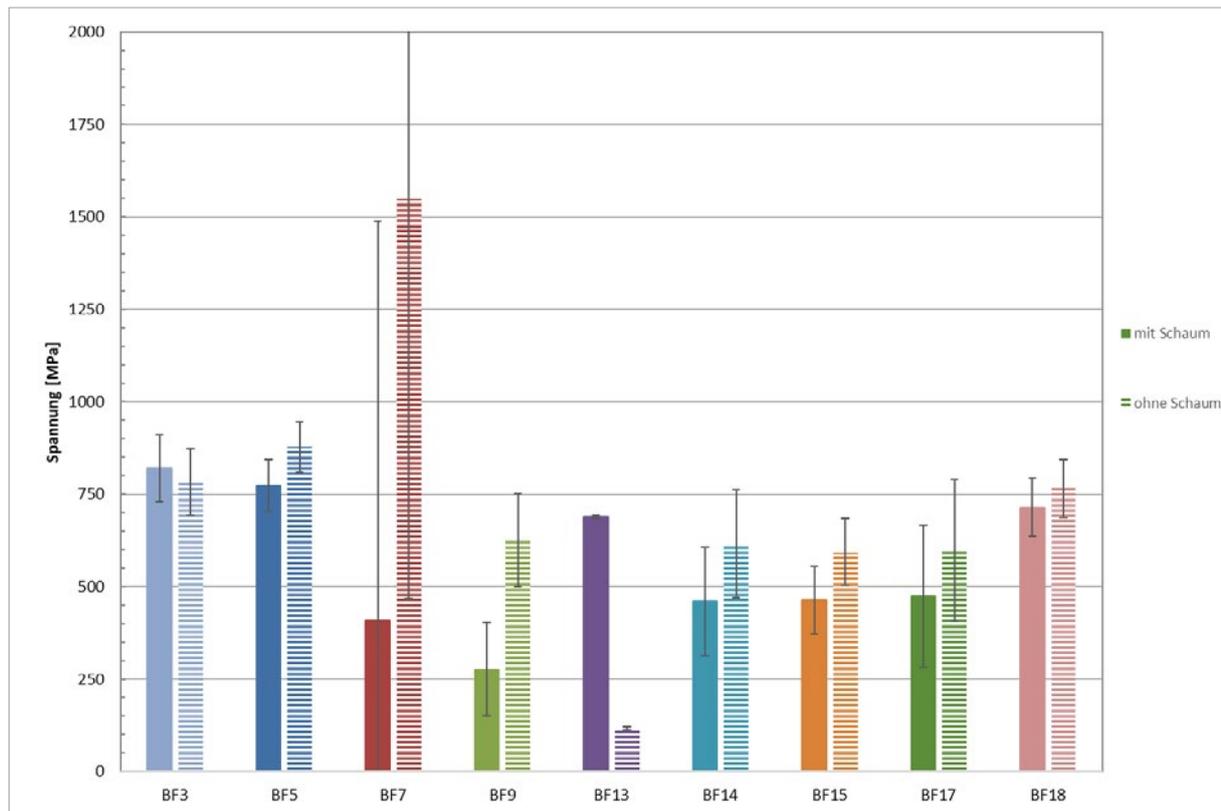
Versuchsauswertung und Schlussfolgerung Als Ergebnisse der SIC Versuche wurden durch den jeweiligen Messrechner der Prüfmaschine Kraft-Weg Kurven der einzelnen Rovings erstellt. Diese geben bereits einen ersten Eindruck der statistischen Güte der Ergebnisse. Grundsätzlich kann bei der geringen Probenzahl gesagt werden, dass die Ergebnisse der Einzelrovings jeweils gut beisammen liegen und wenig Streuung aufweisen.

Es zeigt sich, dass bei allen alkalibeständigen/alkaliresistenten Rovings (BF5, BF14, BF17, BF18) die mittlere Spannung der Rovings, welche längeren Kontakt mit mineralisiertem Schaum hatten, ein wenig unterhalb dem Spannungsniveau liegt, welches Rovings ohne Zementschaumkontakt haben (Abb. 6.208). Die Standardabweichung liegt jedoch in allen Fällen auf einem ähnlichen Niveau. Die Abweichungen nach unten und oben zeigen, dass die im Mittelwert sichtbaren Spannungsunterschiede statistisch nicht signifikant sind. Eine eindeutige Schlussfolgerung, dass Rovings in Kontakt mit mineralisiertem Schaum eine niedrigere Zugfestigkeit besitzen und dies eine Folge des Faserschädigung durch Alkaliangriff sei, kann nicht gezogen werden. Dies liegt vielleicht auch daran, dass die Fasern eben einen gewissen Widerstand gegenüber dem alkalischen Milieu aufweisen. Allerdings zeigen auch die Rovings vom Typ BF15 ohne alkalischützende Schlichte diesen Zusammenhang nicht, die Fasern des BF3 verhalten sich sogar entgegen der Annahme eine Faserschädigung im alkalischen Milieu. Einzig der Rovingtyp BF9 lässt diesen Schluss zu. Jedoch liegt auch hier die Schwäche der Aussagekraft im sehr geringen Probenumfang von nur 4 Einzelrovings.

Die Probekörpergrößen selbst könnten im Hinblick auf die fortschreitende Karbonatisierungstiefe problematisch sein, da der Abstand der Fasern von der Schaumoberfläche bei einer Abmessung von 4 cm x 4 cm relativ gering ist, verglichen mit dem Karbonatisierungsfortschritt s. Abschnitt 6.2.1.6, Anlage 1. Dem entgegen steht jedoch die Tatsache, dass die Proben aufgrund ihrer Lagerungsbedingungen im Innenraum keinem karbona-

tisierungsbegünstigendem Milieu ausgesetzt waren, wie die Ergebnisse der Untersuchungen an Proben von Schaum im Innenraum im Vergleich zur Lagerung im Freien (Anlage 1) zeigen. Im Hinblick auf eine spätere Nutzung müsste man Fasern, die über einen gewissen Zeitraum tiefer in der Schaummatrix eingebettet waren, mikroskopisch untersuchen und deren Morphologie mit solchen Fasern ohne Schaumkontakt vergleichen. Für ge3TEX wurde schließlich auch unter Berücksichtigung der Verarbeitbarkeit der Roving BF 17 gewählt.

Abbildung 6.208



Mittelwerte und Standardabweichung der Rovings mit (Vollfarbe) und ohne Schaumkontakt (Streifenmuster)

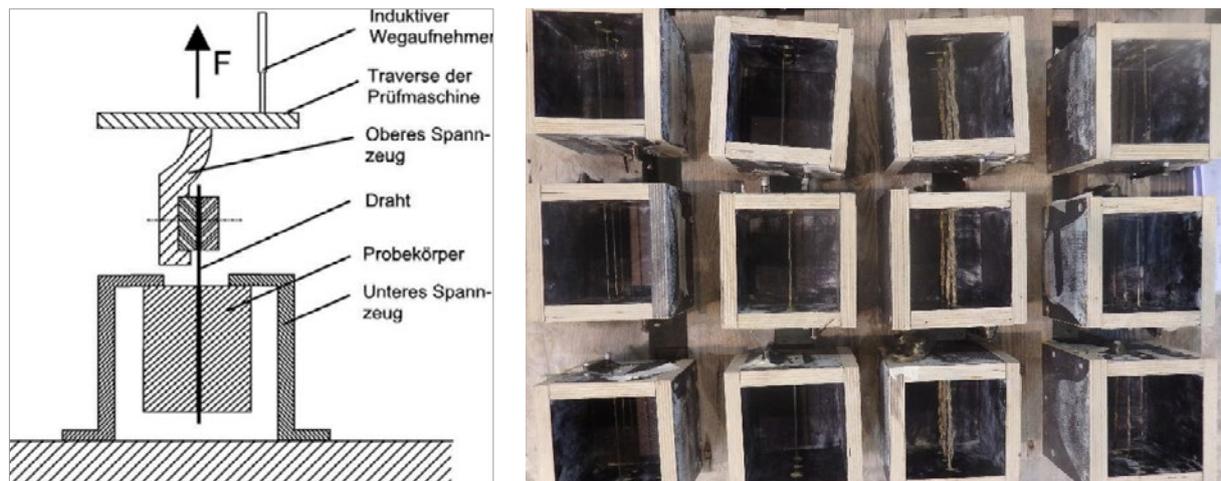
Basaltgarn 3 / Fa. Alterfil GmbH /Schlichte unbekannt, ohne Avivage / 800 tex
 Basaltroving 5 / DBF GmbH über DITF /neue Schlichte, alkaliresistent /1.200 tex
 Basaltroving 7 / C-Con GmbH / Epoxyschlichte 0,2%, / 1.800 tex
 Basaltroving 9 / DBF GmbH / Silan / 600 tex13
 Basaltroving 13 / Incotology GmbH /Silan-Schlichte f. Epoxidharz / 110 tex
 Basaltroving 14 / DBF GmbH über DITF / Neue Schlichte, alkaliresistent, Typ CF / 600 tex
 Basaltroving 15 / DBF GmbH über DITF / Silan / 600 tex
 Basaltroving 17 / C-Con GmbH /Schlichte alkalibeständig / 600 tex
 Basaltroving 18 / DBF GmbH / alkaliresistent/ 1.200 tex

6.2.3 Versuche zum Verbundverhalten zwischen Basaltrovings/Basalttextil und mineralisiertem Schaum

6.2.3.1 Allgemeines

Im Leichtbau haben sich zwei wesentliche Strategien zur effizienten Bauteilgestaltung herauskristallisiert: zum einen die Kompositbauweise mit gewichtssparsamen Materialien in den jeweils physikalisch sinnvollen Ebenen von Laminat- oder Sandwichbauteilen und zum anderen die dem Kraftfluss folgende Geometrieoptimierung und der daraus resultierenden Massenbelegung. Im Forschungsprojekte ge3TEX werden diese beiden Strategien durch die Zusammenführung von Schäumen und Textilien in Laminatbauteilen, sowie der gezielten Strukturausbildung mit Polfäden zwischen den Deckschichten, kombiniert. Wesentliche Vorausset-

Abbildung 6.209



links: Versuchsaufbau für Pull-Out nach Sauer et al., rechts: Holzwürfelschalungen mit einer Kantenlänge von 10 cm und jeweils drei Rovings des gleichen Typs mit einem vertikalen Abstand von 2 cm untereinander.

zung hierfür sind ausreichende Verbundeigenschaften zwischen den textilen und den matrixbildenden Materialien. Eine dem Brandschutz sehr zuträgliche Bauweise ist die Kombination von Textilien auf Basaltbasis mit einem zementgebundenen mineralisierten Schaum. Hierzu muss unterschieden werden zwischen der Verbundfestigkeit einer einzelnen Basaltfaser und dem zementösen Schaum, da dies für das Zusammenwirken des dämmenden Schaumes im Kern mit eventuell erforderlichen Polfäden als Schubverbinder zwischen den Deckschichten den maßgebenden Fall darstellt, und dem Oberflächenhaftverbund von zwei- oder dreidimensionalen Gewirken oder Geweben in den Deckschichten mit dem im Kern befindlichen Schaum. Hierzu wurden und werden Basalttextilien mit unterschiedlicher Geometrie und unterschiedlichen Beschichtungen in ihrer mechanischen Wirkung mit dem mineralisierten Schaum versuchstechnisch untersucht und die jeweiligen Ergebnisse ausgewertet und interpretiert mit dem Ziel, für beide Verbundarten die ideale Kombination zu detektieren. Derartige Versuche sind nicht standardisiert und mussten folglich im Rahmen des Projektes entwickelt werden. Orientierung bieten hierbei die Erfahrungen der Projektpartner mit ihren jeweiligen Materialien sowie Literatur aus den Bereichen Textilbeton und textiler Leichtbau.

Die Versuchsaufbauten wurden in gemeinsamer Arbeit der Projektpartner entwickelt und gemeinschaftlich durchgeführt und ausgewertet. Die Probekörper wurden allesamt beim Projektpartner Wilhelm Röser Söhne GmbH & Co. KG Betonwerk Dorfmerkingen hergestellt. Der Schalungsbau erfolgte überwiegend in Frankfurt an der FRA-UAS und die Versuche ebenfalls an der FRA-UAS und der TU Darmstadt. Das Textilmaterial wurde über die FRA-UAS von den Projektpartnern bzw. Textilherstellern entsprechend Tabelle 6.204 beschafft.

6.2.3.2 Pull-Out Versuche

Ziel der sogenannten Pull-Out Versuche ist es, die Verbundfestigkeit bzw. Verbundspannung zwischen einer einzelnen Basaltfaser und dem mineralisierten Schaum als Matrixmaterial zu ermitteln. Dies ist innerhalb von dreidimensionalen Textilelementen für die Verbindung zwischen dem Schaum und den, zwischen den textilen Oberflächen, befindenden Polfäden von Bedeutung. Als Orientierung dienten hierbei Veröffentlichungen aus dem Bereich der textilfaserverstärkten Betone¹. Hierbei wird eine in das Matrixmaterial eingebaute Faser unter zentrischem Zug an einem freien Ende gezogen und dessen Verhalten unter Zugbeanspruchung in Relation zum umgebenden Matrixmaterial beobachtet entsprechend dem Prinzip nach Abbildung 6.209. Rechts zu sehen die für das Füllen mit Zementschaum

¹ Z.B. Saur W., Kustermann A., Keuser M., Thienel K.C. Pullout-Tests mit glatten, dünnen und biegeweichen Stahlfasern. In: Nothnagel R., Twelmeier H. (eds) Baustoff und Konstruktion (2012), Springer, Berlin, Heidelberg.

Abbildung 6.210



links: Auszug eines Garns aus dem Schaumwürfel,
rechts: Visuelle Untersuchung der Kontaktflächen von Faser und Schaum eines im Versuch gebrochenen Würfels.

vorbereiteten Schalungen. Insgesamt wurden 60 Würfel in drei Serien hergestellt, was einer einzelnen Garnanzahl von 180 Einzelfäden entspricht. Abbildung 6.210 zeigt den Auszugsversuch in Nahaufnahme

Die Auszugskraft besitzt jedoch bei diesem Versuch eine quantitative Aussagekraft über den Haftverbund. Entscheidend ist letztendlich für eine spätere Bemessung einer Konstruktion die Verbundspannung bezogen auf die Mantelfläche der von Matrix umgebenden Faser. Hierzu wurden zunächst entsprechend Tabelle 6.204 aus der längenbezogenen Masse der Rovings in der Einheit tex zusammen mit deren Dichte die Mantelfläche entsprechend nachfolgender Formel ermittelt.

$$A_M = 2 \times \sqrt{(T_t / (1000 \times \rho \times \pi))} \times \pi \times h$$

AM: Mantelfläche der Faser in mm².

Tt: Feinheit der Faser in tex.

ρ: Dichte der Faser in g/cm³.

h: Länge der Faser in der Probe.

Die längenbezogenen Massen in tex sowie die Dichte der Roving wurden von den Garnlieferanten genannt. Die Länge der Faser innerhalb der Matrixprobe betrug einheitlich 10 cm. Auf Basis der Mantelflächen und der maximalen Auszugskräfte konnten somit maximale Verbundspannungen τ_{max} in MPa ermittelt werden. Der Zusammenhang der Auszugskräfte mit den Verbundspannungen ist nachfolgend gegeben zu:

$$\tau_{\max} = F_{\max} / A_M$$

F_{max}: maximale Auszugskraft je Roving in N.

τ_{max}: maximale Verbundspannung in MPa.

Statistisch ausgewertet wurden nur Serien, deren Probenanzahl mindestens 4 betrug. Es zeigte sich eine starke Streuung der Ergebnisse trotz des sehr ähnlichen Kraft-Weg-Zusammenhangs aller Einzelproben bezogen auf die maximalen Spannungen, also den Punkt, ab dem der Roving aus der umgebenden Matrix herausgezogen wird und lediglich die Mantelreibung noch geringfügig entgegenwirkt. Ursächlich ist hierfür die bei Kleinstproben deutlich inhomogenere Schaumstruktur. Die Wahrscheinlichkeit einer morphologischen Fehlstelle im Schaum ist bei kleinen Probekörpern mit viel Wandungsfläche und somit potentiellen Störstellen bezogen auf das Gesamtvolumen (A/V-Verhältnis) deutlich größer als bei großformatigeren Probekörpern. Somit bedarf es zukünftig einer deutlich größeren Probekörperanzahl für eine statistische Auswertung mit dem Ziel einer

Quantilwertermittlung. Ein Vergleich von Mittelwerten erscheint im Rahmen des Projektes mit der verhältnismäßig geringen Anzahl von untersuchten Probekörpern ein probates Mittel für die Feststellung von qualitativen Unterschieden im Faser-Schaum Verbundverhalten. Nichtsdestotrotz wurden die 5%-Quantilwerte auch hier mitausgewertet, um ein Gefühl für die Größe eines möglichen aktuellen Quantilwertes zu bekommen.

Ergebnis: Es zeigt sich, dass insgesamt das Verbundspannungsniveau ca. 5 bis 10 % der Verbundspannung von geripptem Betonstahl in Stahlbeton bei mäßigem Verbund entspricht. Die Streuung ist relativ hoch, das Zusammenwirken von Fasern und mineralisiertem Schaum müsste durch eine deutlich höhere Grundgesamtheit an Proben abgesichert werden aus den oben bereits genannten Gründen im Hinblick auf das Gefüge von mineralisiertem Schaum und dessen Auswirkungen auf Kleinstproben. Die Rovings BF5 und BF14 sind alkaliresistent, die Rovings BF17 und BF18 alkalibeständig. Eine deutliche Verbesserung der Verbundspannungen gegenüber den nichtalkaliresistenten und vermeintlich angegriffenen Fasern ist dabei bei der geringen Grundgesamtheit nicht feststellbar.

Die Garne BF17 und BF18 sind laut Herstellerangaben alkalibeständig und aufgrund der vormals genannten Thematik daher von besonderem Interesse. Für beide Garne gilt, dass sie verhältnismäßig hohe Spannungen im Maximum (0,13 – 0,12 MPa), im Mittel (0,08-0,07 MPa) und sogar im 5%-Quantilbereich (0,03 MPa) aufweisen und eine akzeptable Streuung von knapp 35% Standardabweichung haben. Die Spannungs-Auszugs-Diagramme sind sehr homogen bzgl. des Verlaufs und bzgl. einer geringen Auszugsdehnung (s. Abb. 6.211). Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit der Garne in der Webmaschine wird BF17 entsprechend 6.2.2.2 Anlage 1 leicht favorisiert, da es zu keinem Faserabrieb in der Maschine kommt.

Bei Ansicht der Probekörper nach dem Versuch fällt im übrigen auf, dass die meisten Rovings rein optisch einen Verbund zum mineralisierten Schaum herstellen. Die Garne sind dabei auch nach der Prüfung noch überwiegend vollflächig mit Matrixmaterial umhüllt (Abbildung 6.211) Somit ist das Versagen durch Auszug weniger auf mangelnden Verbund zwischen Faser und Schaum denn mehr auf eine mangelnde Schubfestigkeit des Schaumes selbst zurückzuführen. Anscheinend lösen sich die mit der Faser verbundenen Zementsteinlamellen von den Umgebenden bei einer gewissen Scherkraft (bezogen auf den Kontakt Schaum – Schaum) ab, so dass das Faserpaket umgeben mit einer dünnen Schaumschicht als Ganzes ausgezogen werden kann.

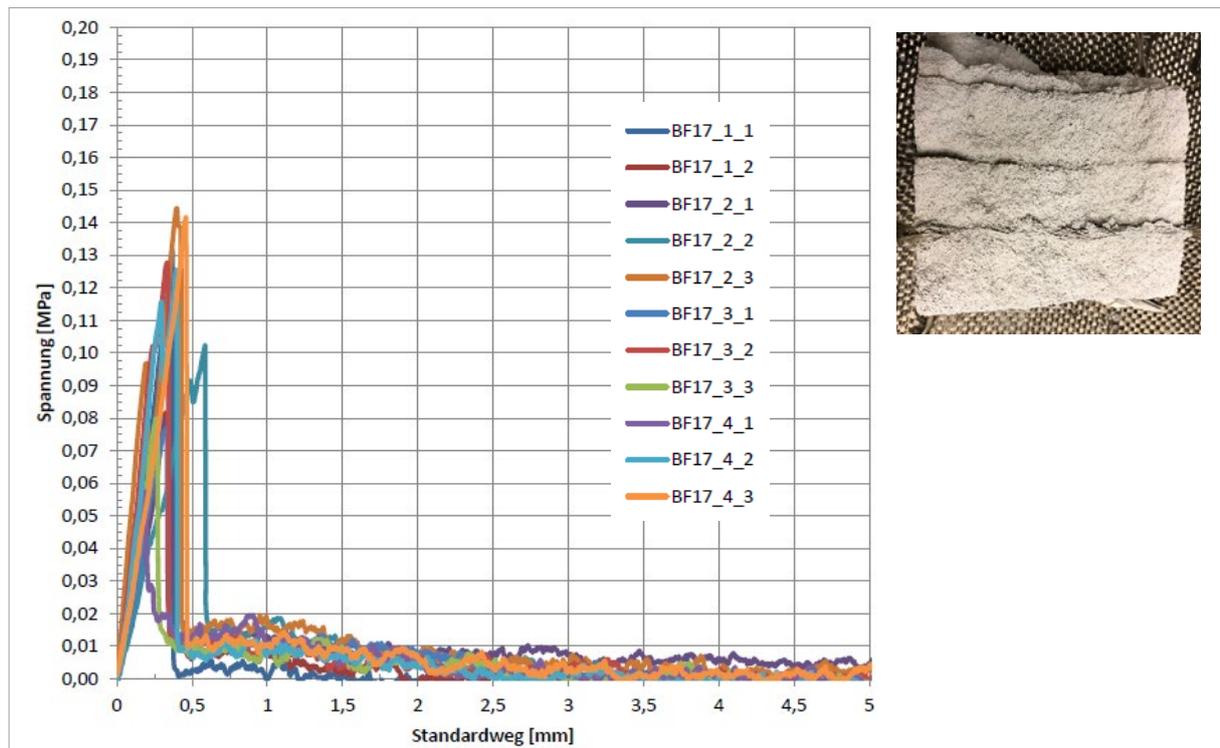
Zusammenfassend kann für die Anwendung als Kett- und Schussfäden innerhalb der Decklagen sowie als Polfäden aufgrund der oben genannten Erkenntnisse BF17 als am besten geeignet angesehen werden.

Tabelle 6.205

Nummer	n	F _{max} in N	F _m in N	F _{frak} in N	Stabw in %	τ _{max} in MPa	τ _m in MPa	τ _{frak} in MPa	Stabw in %
BF2	8,00	16,62	11,05	4,11	35,67	0,12	0,08	0,03	35,67
BF3	8,00	25,17	16,07	1,55	42,81	0,13	0,08	0,01	42,81
BF5	8,00	14,96	7,43	1,42	60,99	0,06	0,03	0,01	60,99
BF7	10,00	17,28	12,18	4,27	25,38	0,06	0,04	0,02	25,38
BF9	9,00	30,86	20,36	6,32	25,35	0,13	0,09	0,03	25,35
BF11	4,00	17,92	14,40	7,11	25,52	0,05	0,04	0,02	25,53
BF13	11,00	6,38	4,72	2,75	22,01	0,09	0,07	0,04	22,01
BF14	6,00	10,55	8,12	4,82	22,06	0,06	0,05	0,03	22,06
BF15	8,00	11,26	8,73	4,27	23,81	0,07	0,05	0,03	23,81
BF17	11,00	24,16	17,48	6,81	29,35	0,13	0,08	0,03	35,50
BF18	11,00	21,46	15,64	8,34	25,62	0,12	0,07	0,03	34,11

Zusammenstellung aller Roving-Serien für Pull-Out Probekörper Herstellung, mit maximalen Kräften und Verbundspannungen, sowie Mittelwerten und 5 % Quantilwerten.

Abbildung 6.211



Spannungs-Weg Kurven des Rovings BF17., oben rechts: Visuelle Untersuchung des Schaum - Faser -Kontakts nach durchgeführten Pull-Out Untersuchungen

6.2.3.3 Peel-Off Versuche

Für die Bestimmung des Oberflächenhaftverbunds flächiger Bauteile zwischen einer textilen Deckschicht und einer porösen und damit oberflächenreduzierten Grundstruktur wurde zunächst an die klassischen Abreißversuche an mineralischen und organischen Baustoffen gedacht. Grundsatz all dieser genormten Versuchsdurchführungen² ist, dass auf die obere Lage eines im Verbund stehenden Bauteils ein Prüfstempel aufgeklebt wird, der dann mittels einer Zugkraft nach oben abgezogen werden kann. Im Falle von Textilien sollte der Bereich, auf dem der Stempel aufgeklebt ist, vom Rest des Textils abgetrennt sein, was beispielsweise durch einen Schnitt um die Prüffläche herum erfolgen kann, s. auch Kapitel 6.3.2.2. Weiterhin ist zu beachten, dass einerseits die Biegesteifigkeit des Stempels ausreichend hoch ist, damit er keine einflussnehmende Biegung erfährt und andererseits die Haftzugfestigkeit des Klebers auch ausreichend groß ist, damit das Versagen nicht als Adhäsionsbruch zwischen Stempel und flächigem Textil erfolgt. Für diesen Fall würden sich beispielsweise ein Stempel aus Stahl sowie Epoxidharz als Kleber eignen.

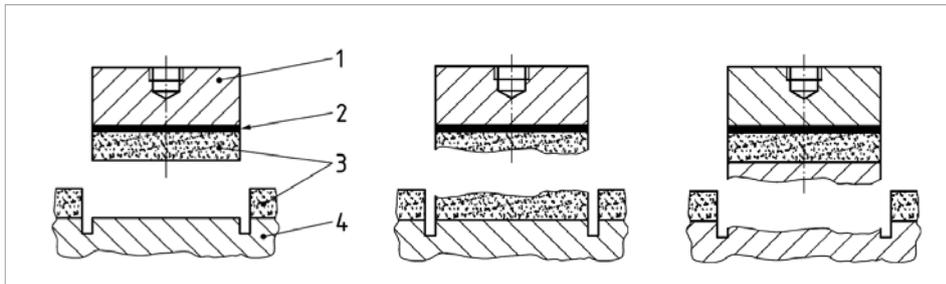
Das Versagen kann dann in theoretisch drei Ebenen erfolgen (Abbildung 6.212):

- Im Textil (aufgrund der sehr geringen Dicke ist dies sehr unwahrscheinlich)
- Im mineralisierten Schaum
- In der Kontaktzone zwischen Textil und Schaum

Die beiden ersten Versagensarten zeugen dabei von einem guten Haftverbund, der dritte Fall zeigt den Haftverbund als die Schwachstelle des Verbundbauteils auf. Die Haftverbundfestigkeit wird in allen Fällen als Quo-

² Prüfverfahren für Abdichtungssystem auf Beton nach DIN EN 13596:2004; Prüfverfahren zu Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch nach DIN EN 1542:1999; Prüfverfahren für Mörtel an Mauerwerk nach DIN EN 1015-12:2016; Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Klebemasse/Klebemörtel und Wärmedämmstoff sowie zwischen Unterputz und Wärmedämmstoff nach DIN EN 13494:2017; Abreißversuch zur Beurteilung der Haftfestigkeit nach DIN EN ISO 4624:2014; Prüfverfahren für Klebstoffe für das Kleben von Parkett nach DIN EN 14293:2006

Abbildung 6.212

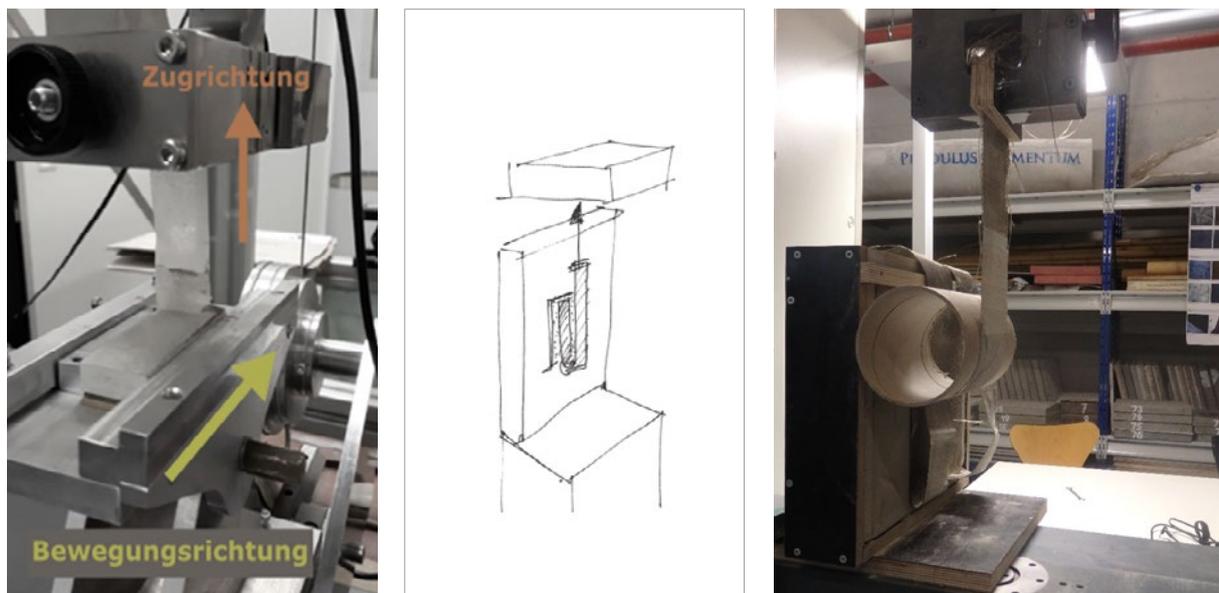


Haftzugfestigkeit nach DIN EN 1015-12: 2016, 1: Zugplatte, 2: Klebeschicht, 3: Mörtel, 4: Untergrund

tient aus der aufgebrachten Zugkraft und der Bruchfläche ermittelt. Problematisch an den Abreissversuchen unter Verwendung des mineralisierten Schaums als Haftgrund sind seine geringen Festigkeiten und seine Kompressibilität. Die Aufstellung eines Dreibeins mit Aufnahme der Zugführung für das Abziehen des Stempels bedingt große Probekörperflächen, um die Pressung des Dreibeins auf der Schaumoberfläche gering zu halten. Eine Einspannung mit Rückhaltevorrichtung von oben, also ein Ziehen des gesamten Probekörpers gegen eine starre Halterung an der Oberseite des Schaums ist nicht möglich, da sich der Schaum bei entsprechend großen Zug- bzw. Haftverbundkräften gegen die starre Halterung stützt und dort aufgrund der geringen Druckfestigkeiten komprimiert wird. Alternativ müssten die Probekörperflächen besonders klein sein, um die Versuchsapparatur außerhalb der Probe aufstellen zu können.

Daher wurde es im Projekt als sinnvoll erachtet, die Fixierung des Untergrundes, in diesem Fall also des mineralisierten Schaumes, von der Krafteinleitung der Abzugskraft zu entkoppeln. Eine Orientierung an derartigen Versuchsaufbauten bieten beispielsweise die ETAG 002 für die Haftzugfestigkeit von Silikonen auf Glas sowie ISO 2411:2017 für den Haftverbund zweier, miteinander verklebter, kunststoffbeschichteter Textilien. Für das vom BMWi über den Projektträger Jülich geförderte Projekt KOMPAP (Förderkennzeichen 03ET1414A) wurden Versuche zur Ermittlung des Haftverbundes zwischen einem zementösen Schaum und Papieren anhand der in

Abbildung 6.213



links, Peel-Off Versuch von Papier auf Zementstein (MAP, TU Darmstadt),
 mitte: Konzeption von Peel-Off Versuchen an Textilien auf mineralisiertem Zementschaum zur Ermittlung der Haftverbundfestigkeit.
 (Quelle: Beuscher, J.; FRA-UAS)
 rechts: Versuchsaufbau für Peel-Off im Rahmen von Ge³TEX.

der Papierindustrie verbreiteten Normen FINAT FTM 2 und FTM 10 entwickelt. Hierzu wurden Prismen mit den Maßen 4 cm x 4 cm x 16 cm aus Zementleim und mineralisiertem Schaum mit an der Oberfläche befindlichen Papierstreifen hergestellt und nach einer Aushärtezeit von 28 Tagen mit einer Geschwindigkeit von 300 mm / min abgezogen (Abbildung 6.214, links). Für ge3TEX wurde der Versuch in der Art modifiziert, als dass die Probekörper größer wurden, um den Randeinfluss auf den Haftverbund zu minimieren. Weiterhin wurden die Probekörper senkrecht gestellt und allseitig begrenzt. Die flächig aufgetragenen Textilien aus Basalt sollten dabei nicht unter 90 ° zur Haftoberfläche abgezogen werden (Abbildung 6.213, mitte und rechts).

Probekörperherstellung: Die Probekörper aus mineralisiertem Schaum wurden in Schalungen der Größe von 34 cm x 30 cm x 7 cm hergestellt, diese wurden mit den jeweiligen Textilien ausgelegt, s. Anhang 1 und 6.2.3.3. Zur Verbesserung des Haftverbundes wurden einige Textilien mit einem Feinstmörtel vorbehandelt. Dieser Feinstzement wurde mit einem speziellen Mischer hergestellt und bestand aus Wasser, Fließmittel und dem Mikrodur genannten Zement. Hierdurch sollte eine vollständige Benetzung aller im Gewebe vermaschten Fasern im Vorfeld erzielt werden, da die Vermutung bestand, dass der Schaum eventuell nicht tief genug in das Gewebe eindringen könnte. Der W/Z-Wert der Haftbrücke lag bei 0,46. Das Aufbringen erfolgte mit einem Quast unmittelbar vor dem Schäumvorgang.

Tabelle 6.206

Garnnummer	Gewebenummer	Bemerkungen
13	08 BF_TEX	hat sich beim Ausschalen gelöst
14	09 BF_TEX	hat sich beim Ausschalen gelöst
15	10 BF_TEX	es stehen zwei Proben zur Verfügung
17	11 BF_TEX	mit Haftbrücke aus Feinstzement; hat sich nach einem Tag gelöst
5	12 BF_TEX	mit Haftbrücke aus Feinstzement; hat sich nach einem Tag gelöst
18	13 BF_TEX	mit Haftbrücke aus Feinstzement; hat sich nach einem Tag gelöst
9	04 BF_TEX	es stehen zwei Proben zur Verfügung

Übersicht der hergestellten Probekörper bzw. Flächentextilien für Peel- Off Versuche und Ergebnisse

Abbildung 6.214



Flächentextil abgelöst vom mineralisierten Schaum nach dem Peel-Off Versuch.

Ergebnis: Insgesamt wurden entsprechend Tabelle 6.206 Probekörper in zwei Serien hergestellt, was einer einzelnen Streifenanzahl von 21 entspricht. Da davon überhaupt nur 4 Streifen abgezogen werden konnten, da alle anderen sich bereits nach dem Ausschalen oder spätestens beim Einbau in die Prüfmaschine lösten, macht eine statistische Auswertung der Peel-Off Versuche keinen Sinn. Als Ergebnisse der Peel-Off Versuche ergaben sich durch den jeweiligen Messrechner der Prüfmaschine Kraft-Weg Kurven der einzelnen Flächen-textilstreifen. Sie geben einen ersten Eindruck hinsichtlich des Haftverbundes.

Für die Textilien der Charge 10_BF_TEX ergab sich keine nennenswerte Haftkraft. Für die Textilien 04_BF_TEX wurden im Vergleich zu 10_BF_TEX deutlich höhere Haftzugkräfte gemessen. Hierbei kann auch von tatsächlicher Haftung gesprochen werden. Die maximale Kraft lag bei 04_BF_TEX_1 bei 3,19 N.

Die Peel-Off Versuche erwiesen sich im Nachhinein als nicht zielführend. Dies lag zum einen am Versuchsaufbau selbst. Die Textilien mussten unabhängig von ihrer eigenen Steifigkeit um 180 ° gebogen werden, damit sie in die Maschine eingespannt werden konnten und der Versuch starten konnte. Sehr biegeeweiche Textilien ermöglichen dies problemlos, jedoch steifere oder im Nachgang versprödete Textilien erlauben dies nicht, ohne eine Zugspannung in den Probekörper einzubringen, die bereits die Haftspannung deutlich übersteigt. Da dies bereits zum Einbau der Textilien in die Schalung erforderlich war und einige sich bereits beim Ausschalen wieder lösten, liegt der Verdacht nahe, dass sich hier aufgrund der hohen Eigenspannung der Textilien niemals ein Haftverbund eingestellt haben könnte. Verstärkt wird dies noch durch die sehr geringe Zugfestigkeit des mineralisierten Schaums aufgrund seiner sehr geringen Oberfläche. Einige der sowohl vor dem Versuch bereits losen Textilien als auch die 4 abgezogenen Streifen zeigen eine deutliche Benetzung des Textils mit Schaum, s. Abb. 6.214. Das Aufbringen einer Haftbrücke aus Feinstzement hatte ebenfalls keinen Erfolg gebracht. Es trat lediglich eine Versteifung des Textils auf, was in Kombination mit der Zugfestigkeit des Schaumes wie oben erläutert den Haftverbund eher erschwert als erleichtert.

Als **Ergebnis** muss eine bessere mechanische Haftung angestrebt werden, z.B. durch Oberflächenvergrößerung der Textilstruktur, ähnlich der Weitmaschigkeit von Gewirken, um einen besseren Verbund zu erzielen. Ein Versuch im Vorfeld von ge3TEX mit einem Basaltgewirk lässt derartiges vermuten, da sich hierbei ein enormer Verbund einstellte, der nicht ohne weiteres durch händisches Abreißen des Textils gelöst werden konnte.

Das DITF konnte entsprechend die Idee einer Oberflächenvergrößerung der Textilstruktur realisieren, durch nach innen gewebte Schlaufen, welche einen mechanischen Verbund zum Schaum ermöglichen sollten. ausdehnen können Daher wird im weiteren Verlauf s. Abschnitt 7.1.2.1 für die Abstandsgewebe eine textile Geometrie entwickelt, welche den Haftverbund zwischen Schaum und Textil über eine geänderte textile Struktur erhöhen soll.

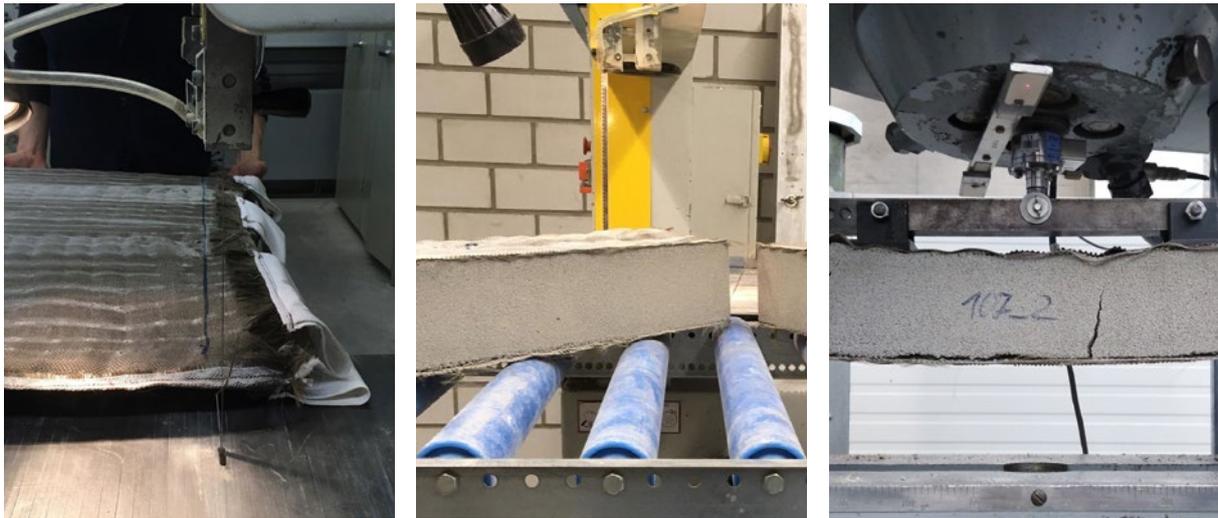
6.2.3.4 Erste Befülltests s. unter Abschnitt 7.2.1

6.2.3.5 Ermittlung der Biegezugwerte des Basaltfaser - Zementschaumverbunds

Ziel der Biegezugversuche ist es festzustellen, ob das in 6.2.3.3 (Peel-Off Tests) angedachte Konzept zutreffend ist, über innenliegende Schlaufen einer Verbesserung der Oberflächenhaftung von Basaltflächentextilien auf mineralisiertem Schaum mittels mechanischer Oberflächenvergrößerung zu erreichen. Hierzu wurden im Rahmen der Befülltest (s. Anlage 1 6.2.3.4 bzw. Hauptbericht 7.2.1) zwei mit Schaum gefüllte Textiltaschen hergestellt, davon eine mit den ca. 30 mm in den Schaum hineinreichenden Schlaufen und eine ohne. Aus beiden wurden 5 Balken herausgeschnitten und einer 4 – Punkt – Biegebelastung unterzogen und die Kraft – Verformungskurven als Maß für die maximale Kraftaufnahme unter Biegung sowie als Maß für die Steifigkeit der Elemente ausgewertet. Somit konnte eine qualitative Aussage darüber getroffen werden, ob und gegebenenfalls wie hoch der Effekt der mechanischen Oberflächenvergrößerung sei.

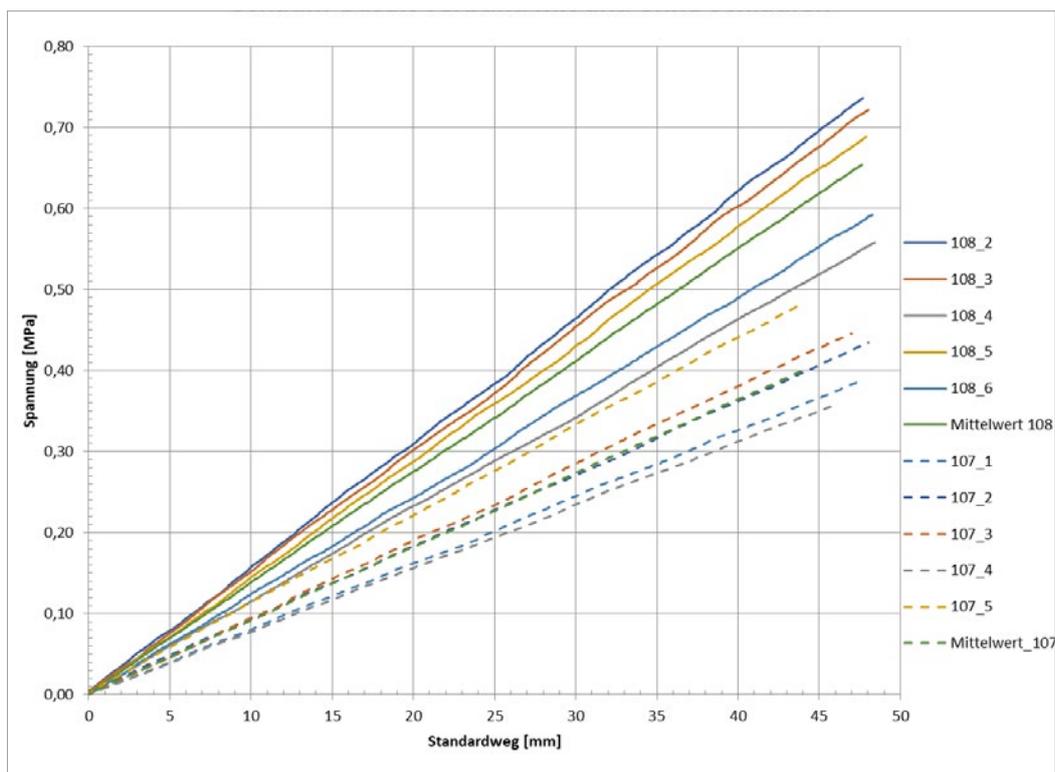
Abbildung 6.215 zeigt die Herstellung der Probekörper aus den gefüllten Basalt-Abstandstextilien sowie den Testaufbau für Biegezugversuche, Abbildung 6.216 zeigt die Ergebnisse zusammengefasst.

Abbildung 6.215



links: Abschneiden der Randbereiche mittels Bandsäge
 mitte: Probekörperstreifen von jeweils ca. 15,5 cm Breite herausgeschnitten aus einem Flächenelement
 rechts: Deformationsmessung mittels optischer Wegaufnehmer.

Abbildung 6.216



Schaum-Basalt-Verbund mit und ohne Schlaufen, Kraft-Weg-Zusammenhang beider Probenserien.

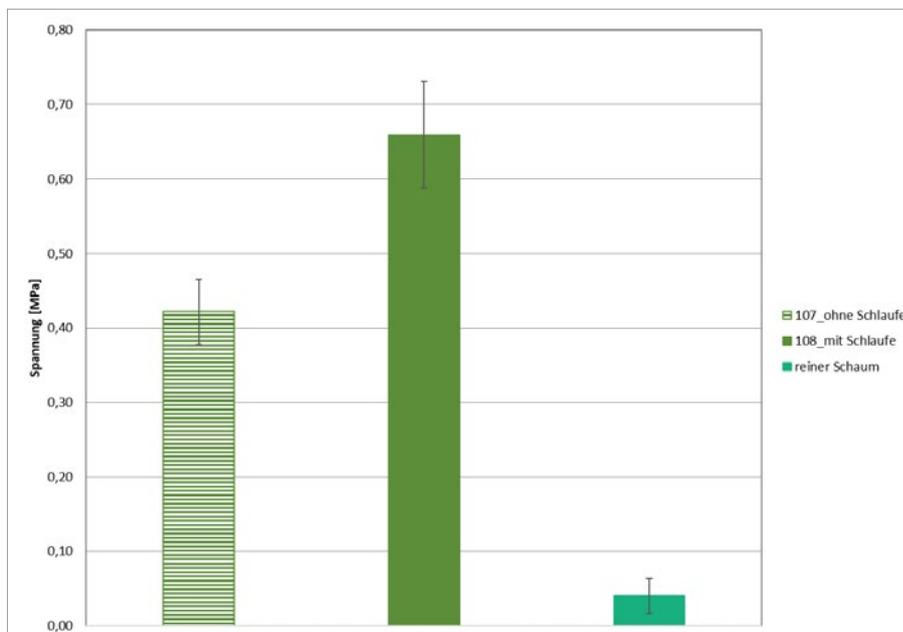
Ergebnis: Dargestellt ist in Abbildung 6.216 der Zusammenhang zwischen aufgebrachtener Maschinenkraft in Feldmitte der Balken und deren Durchbiegung im Bereich der Lasteinleitungspunkte, also in den Drittpunkten des Probekörpers für je 5 Probekörper einer jeden Serie. Weiterhin ist der Mittelwert jeder Serie dargestellt. Gut zu erkennen ist ein relativ linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Verformung bis zum Abbruchkriterium, d.h. das Delaminationsvorgänge und Rissbildung im Schaum sofort zu einer Kraft- bzw. Spannungs-

umlagerung führt, der Probekörper also nach einem sehr kurzen und nicht sichtbaren Steifigkeitsabfall sofort wieder eine Belastung aufnehmen kann. Aufgrund des geringen Probenumfangs erfolgt hier keine dezidierte statistische Auswertung, es werden lediglich zum Vergleich die Mittelwerte beider Serien dargestellt.

Über das Schnittprinzip der Statik sowie die Festigkeitslehre können aus dem 4-Punkt-Biegezugversuch sowie den Abmessungen der einzelnen Probekörper die Spannungen ermittelt werden, die jeder Probekörper einer Serie aufnehmen kann, ehe der Versuch, für einen qualitativen Befund ausreichend aussagekräftig, abgebrochen werden konnte. Abb. 6.217 zeigt die Mittelwerte der Biegezugspannungen in Bezug auf die Wirksamkeit von Schlaufen zur Verbesserung der mechanischen Haftspannung mit einem eindeutigen Ergebnis, da die Werte der Serie 108 im Mittel um 56% über denen der Serie 107 liegen. Die Standardabweichungen beider Serien sind im Vergleich auch mit maximal 7% verhältnismäßig gering entsprechend.

Zusammenfassend kann somit eine Verbesserung der mechanischen Haftspannung zwischen Schaumoberfläche und Basaltflächentextil eindeutig bejaht werden und die Ausführung entsprechend der Befülltests nach Kapitel 6.2.3.4. empfohlen werden.

Abbildung 6.217



Schaum-Basalt-Verbund: Biegezugfestigkeiten von reinem Schaum sowie von Schaum mit Basaltgewebe in den Decklagen sowie, im Falls von Serie 108, mit Schlaufen zur Oberflächenvergrößerung.

6.2.4 Zusammenfassung

Die vorgestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass die Materialkombination aus mineralisiertem Schaum und Basaltfasern mechanisch große Herausforderungen mit sich bringt. Dies liegt in besonderem Maße auch an den Eigenschaften des mineralisierten Schaums hinsichtlich Schwindneigung und seiner geringen Rohdichte und den daraus folgenden, für tragende Zwecke geringen mechanischen Widerständen. Der Schaum wurde allerdings auch nie für tragende Zwecke konzipiert, sondern primär als regional verfügbare, nichtbrennbare, mineralische und damit leicht zu entsorgende Wärmedämmung, die überall auf Baustellen und in Fertigteilwerken hergestellt werden kann und lastweiterleitende Eigenschaften (Stichwort: druckfeste Wärmedämmung) besitzt. Gemäß diesem Herstellungsgrundsatz des Schaums müssen im weiteren Projektverlauf die

Bauteilanwendungen so konzipiert werden, dass der Schaum aus mechanischer Sicht lediglich stützende und lastweiterleitende Eigenschaften aufweist. Die volle Tragfähigkeit muss hier aus der Kombination aus Flächentextil und einem weiteren mineralischen Baustoff, bspw. UHPC, abgeleitet werden. Vorteil bei der Verwendung von UHPC ist, dass man aufgrund dessen mechanischer Eigenschaften (sehr druckfest, teilweise auch sehr biegefest i.a. der verwendeten Bewehrung) sehr dünn konstruieren kann.

Die Frage nach dem Alkalieeinfluss auf die Materialkombination aus zementösem Schaum und Basaltfasern kann aufgrund der geringen Probenzahl nicht beantwortet werden. Es zeigen sich geringe Unterschiede im Spannungsniveau zwischen Rovings, die einer Alkalibelastung ausgesetzt waren und denen, die keinen Kontakt zu einer zementösen Matrix hatten. Diese geringen Spannungsunterschiede können aufgrund der Alkalibeständigkeit so gering ausfallen, jedoch müssten dann bei den nichtalkalibeständigen Rovings die Spannungsunterschiede deutlich stärker ausfallen. Dies ist jedoch nur bei einem Roving in stärkerem Maße der Fall, bei anderen hingegen sogar genau andersherum. Die Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert schließen eher auf eine statistische Ungenauigkeit und keine Signifikanz in der Aussage. Aufgrund der Lagerungsbedingungen kann eine vollständige Karbonatisierung der Proben ausgeschlossen werden, wenngleich sie von der Bauteilgröße über die Zeit vollständig karbonatisiert hätten sein können.

Die Pull-Out Versuche weisen eine leichte Verbundspannung mancher Rovings zum mineralisierten Schaum auf. Oberflächenhaftverbund konnte im Zuge der Peel-Off Versuche nicht in ausreichendem Maße erzielt werden. Da chemische Haftverbesserer meistens die Steifigkeit einer der Komponenten maßgeblich erhöht, wirken somit größere Eigenzugspannungen in den Decklage. Diese wiederum können die Zugfestigkeit des Schaumes überwinden und somit vorzeitig zum Abreißen der Oberflächentextilien führen. Hier wurde durch eine Oberflächenmodifizierung der Gewebestruktur versucht, den Haftverbund deutlich zu erhöhen. Die an die Unterseite der beiden Decklagentextilien eingewebten Schlaufen mit einem Stichmaß von 30 mm verbessern den Haftverbund deutlich, was sich in höheren Biegezugfestigkeiten in einem Vergleichsversuch mit einem Probenumfang von 5 Proben je Serie durch eine Erhöhung der Festigkeit um über 50 % niederschlägt.

Für die späteren Elemente muss im Hinblick auf das Befüllen selbiger mit mineralisiertem Schaum beachtet werden, dass Bauteildicken unter 4,5 cm sowie Polfädenabstände unter 4,0 cm unbedingt vermieden werden. Dies aufgrund der derzeitigen Maschinenbedingungen. Eine Befüllung von wandähnlichen Strukturen mit einer Höhe von bis zu 3,70 m sowie einer Bauteildicke von 15 cm sind realisierbar. Größere Bauteildicken und -höhen bedürfen einer weiteren Untersuchung. Ebenfalls sind Querschnittsvariationen von ebenen Querschnitten hin zu gerippten Querschnitten und solchen mit kissenähnlicher Struktur möglich. Letztere bedürfen allerdings einer größeren Kissenabmessung als im Projekt erprobt, damit sich die Polfäden beim Befüllen dann entsprechend ausdehnen können, s. Abschnitt 7.1.

6.3 Glasfasern bzw. Glastextilien in Kombination mit Bläh-/Wasserglas (s. auch Anlage 2, Autoren Nagel, Dominik und Rucker-Gramm, Petra)

Ziel ist die Entwicklung eines nachhaltigen, sortenreinen Verbundmaterials aus Blähglas aus Glasrecyclat und 3D Glasfaser Textilien, für Anwendungen in der Gebäudehülle. Anforderungen an das Material sind optimale Verarbeitbarkeit und eine Herstellung möglichst in situ, die einen fehlerstellenfreien Einbau in ein Glasfaserabstandstextil ermöglicht, um so die Potentiale des Verbundwerkstoffs auszunutzen zu können. Zudem soll für die unterschiedlichen Anwendungsfälle je ein optimierter Werkstoff unterschiedlicher Dichten bereitstehen. Das Blähglas wird mit dem Bindemittel Wasserglas gebunden. Von den beteiligten Firmen werden dazu vier verschiedener Korngruppen aus Blähglas der Firma Poraver und zwei verschiedener Wassergläser der Firma Wöllner bereitgestellt.

Abbildung 6.300



Blähglas in unterschiedlichen Körnungen: 2 – 4 mm, 1 – 2 mm, 0,5 – 1 mm und 0,25 – 0,5 mm

Ausgangsbasis für die anwendungsbezogenen Rezepturenentwicklungen ist die Größenordnung des Massenverhältnisses Blähglasgranulat/Wasserglas von ca. 80/20 sowie Trocknungsszenarien nach Herstellerangaben (Betol: Lufttrocknung, Geosil/Stabilisil: thermische Aktivierung für > 30 Minuten bei 80 – 150°C). Diese beruhen auf den Erfahrungen der Hersteller für andere Anwendungen. Die Anforderungen an die Verarbeitbarkeits- und Materialeigenschaften in diesem Projekt werden damit jedoch nicht erfüllt, so dass umfangreiche Entwicklungsschritte zur Rezepturoptimierung erforderlich sind.

Für Bauteile, die auch für Außenanwendungen einsetzbar sind, werden **im ersten Schritt Rezepturen** aus einem zweikomponentigen Bindemittelslurry, aufbauend aus einer Wasserglastype auf Basis eines hochalkalischen Kaliumsilikates („Geosil 14517“) und einem rein anorganischen Härtepulver („Stabilisil 40“) Firma Wöllner verwendet. Durch die Verwendung solch eines Bindemittelslurrys ist im Normalfall eine wasserfeste Aushärtung der Bindung nach Endtrocknung gegeben. Für den chemischen Erhärtungsprozess benötigt das System aber - laut Herstellerangaben - eine thermische Aktivierung. Damit ein aus ökologischer, baupraktischer und wirtschaftlicher Sicht optimiertes Herstellungsszenario (thermische Nachbehandlung) festgelegt werden kann, werden Versuche zum Einfluss von Trocknungsdauer und Lagerungstemperatur durchgeführt. Zusätzlich zu Rezepturvarianten mit Einkorngemischen wird für die Anwendungen im Außenbereich eine gefügedichte Rezeptur entwickelt und optimiert. Beide Rezepturen werden auf ihre Reproduzierbarkeit hin geprüft.

Im zweiten Schritt werden ausgewählte, auf dem Markt und bei den Forschungspartnern (Deutsches Institut für Textil- und Faserforschung Denkendorf, John Manville, Nippon, etc.) **verfügbare Glasfasern** aus AR-Glas (alkaliresistent) und E-Glas (nicht alkaliresistent), mit verschiedenen Querschnittsstärken (tex), variierender Struktur und mit verschiedenen Schichten vorbehandelt, auf ihre Eignung als Füllmaterial einer Matrix aus Bläh- und Wasserglas für von Abstandstextilien aus Glasfaser überprüft. Entscheidendes Kriterium für die Wahl der Fasern ist dabei nicht nur der Erhalt der Zugfestigkeit der Fasern, sondern zudem der Verbund zwischen Faser und Matrix. Das Verbundverhalten wird mittels Pull-Out-, Haftzug-, Peel-Off- und Biegezugversuchen untersucht. Durch die Vorbehandlung der Glasfasern wird das Verbundverhalten optimiert.

Da die hohe Alkalität der Bläh-/Wasserglasmatrix das Verbundverhalten negativ beeinflusst, werden zudem Zugversuche an Glasfasern im alkalischen Milieu des Wasserglases durchgeführt, um festzustellen, mit welchen Festigkeitsverluste bei der gewählten Materialkombination zu rechnen ist. Ergebnis des zweiten Entwicklungsschritts ist die Wahl einer geeigneten Faser zur Herstellung von Abstandstextilien bei unserem Verbundpartner, dem Deutschen Institut für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF).

In einem **letzten Schritt** werden Abstandstextilien mit den in Schritt 1 entwickelten Bläh-/Wasserglas-Matrices gefüllt, um die für die Dimensionierung erforderlichen mechanischen Eigenschaften, d.h. die Biegezugfestigkeit des neuen Verbundwerkstoffs zu ermitteln. Auf dieser Basis soll ein Demonstrator-Bauteil hergestellt werden, welches sämtliche Vorteile der Kombination der Eigenschaften der gewählten Materialien in einem Glasfaserabstandstextil mit Bläh-/Wasserglasfüllung verdeutlicht.

Das Untersuchungsprogramm wird unter der Leitung von Frau Prof. Dr.-Ing P. Rucker-Gramm im Labor für Baustoffe, Bauphysik und Bauwerksprüfung der Frankfurt-University of Applied Sciences (FRA-UAS) bearbeitet. Die durchgeführten Untersuchungen werden intensiv durch den Labormitarbeiter M. Eng. D. Nagel begleitet und durch die hilfswissenschaftlichen Mitarbeiterinnen Frau Genzel und Frau Mocke unterstützt. In Teilen entstammen die dargestellten Ergebnisse aus studentischen Arbeiten s. Anlage 2. So enthalten die beschriebenen Untersuchungen Ergebnisse aus Abschlussarbeiten des Forschungsprojekts Leichtbau, Studiengang Master Zukunftssicher Bauen, von Frau Bartl und Frau Skubella sowie von Frau Landgraf, Herr Völker und Frau Weber. Zudem sind Untersuchungsergebnisse aus der Bachelorarbeit von Herrn Jochmann enthalten. Parallel zu den an der FRA-UAS durchgeführten Untersuchungen werden ergänzende Untersuchungen im Labor der Firma Poraver durchgeführt, auf die nachstehend Bezug genommen wird.

6.3.1 Blähglas, Rezeptentwicklung einer Blähglas-/Wasserglasmischung

6.3.1.1 Ausgangsstoffe

Das Blähglasgranulat von Poraver wird zum Großteil aus Altglas hergestellt, welches keine Verwendung mehr in der Behälter- und Flaschenproduktion findet. Es wird gesammelt, anschließend gereinigt, im nächsten Schritt zu Glasmehl zermahlen und mit Zusätzen wie Wasser, Bindemittel und Blähmittel versehen und zu sogenannten Grünkorn verarbeitet. Dieses wird im Ofen auf 800 bis 900 °C erhitzt, wo sich das Granulat aufbläht. Nachdem erkalten werden diese über sechs Korngrößen von 0,04 bis 4 mm aufgeteilt (s. Abb 6.300 / Tab. 6.300). Durch den hohen Anteil von Altglasscherben sinkt der Energiebedarf im Herstellungsprozess. Im Vergleich zu anderen Perliten, die in der Herstellung einen Energieverbrauch von ca. 9,5 MJ/kg haben, zeigt das Blähglas mit 2,0 MJ/kg ein Bruchteil davon¹. Blähglas beinhaltet keine toxischen und umweltschädlichen Stoffe und kann somit wie jede andere Glassorte sehr leicht entsorgt bzw. recycelt werden.

Tabelle 6.300

Korngruppe mm	Schüttdichte kg/m ³	mittl. Kornrohndichte kg/m ³	mittl. Kornfestigkeiten N/mm ²
2 - 4	190	320	≥ 1,4
1 - 2	230	400	≥ 1,6
0,5 - 1	270	500	≥ 2,0
0,25 - 0,5	340	700	≥ 2,6

Mineralischen Leichtzuschlag Blähglas, Kennwerte unterschiedlicher Korngruppen

¹ Reyer, E.; Schild, K.; Völkner, S.: Kompendium der Dämmstoffe. Fraunhofer IRB-Verl., Stuttgart, 2002.

Wasserglas: Zur Herstellung der Bläh-/Wasserglasmatrix wird ein Silikatbindemittel benötigt, welches das Blähglasgranulat für die Anwendung im Innenbereich ausreichend bindet. Hierzu hat Wöllner ein Natriumsilikat mit einem sehr geringen Anteil eines speziellen Netzmittels - zur Absenkung der Oberflächenspannung - unter der Produktbezeichnung „Betol 50 T1“ ausgewählt und zur Verfügung gestellt. Die Erhärtung erfolgt über Trocknung unter Umgebungsbedingungen. Für ge3TEX und das Thema Gebäudehülle ist das zweite zur Verfügung gestellte Wasserglas interessanter. Im Gegensatz zur einkomponentigen Wasserglastype „Betol 50 T1“ ist das zweikomponentige Bindemittelsystem aus den Produkten „Geosil 14517“ und „Stabilisil 40“ durch den Stabibilanteil nach Abschluss des Reaktionsprozesses auch im Wasser stabil und somit grundsätzlich für Außenanwendungen geeignet. Das in diesem Projekt von Wöllner eingesetzte Kaliumsilikat „Geosil 14517“ ist eine alkalische Lösung, aus einem Gemisch aus sehr reinem Quarzsand und Alkalicarbonaten. Das in unserem Fall verwendete „Geosil 14517“ ist eine wässrige Lösung von modifiziertem Kaliumsilikat. Der pH-Wert liegt bei ca. 12,5. Durch die Kombination mit alkalisch aktivierbaren Füllstoffen kann solch eine Wasserglastype eine feste Bindung eingehen. Zu diesem Zweck wird der pulverförmige und rein anorganische Härter „Stabilisil 40“ in Verbindung mit dem „Geosil 14517“ verwendet. „Stabilisil 40“ ist eine Härterkomponente auf Basis von Alumosilikaten, die für Silikat-Bindemittel entwickelt wurde. Die Erhärtung/ Festigkeitsentwicklung des Bind-

Abbildung 6.301



von links nach rechts: Geosil 14517, Stabilisil 40 und Slurry aus Geosil/Stabilisil

mittelslurrys Geosil/Stabilisil erfolgt nach Angabe des Herstellers durch thermische und alkalische Aktivierung. Wasserglas reagiert als mineralisches Bindemittel auf Basis von Kalium- und Alkalisilikaten chemisch mit dem Untergrund und verbindet sich dauerhaft. Der Hersteller empfiehlt ein Mischungsverhältnis von zwei Masse-Teilen Geosil und einem Masse-Teil Stabilisil. Abbildung 6.301 zeigt die verwendeten Bindemittelkomponenten. Die Dichte von „Geosil 14517“ wird vom Hersteller mit ca. $1,50 \text{ g/cm}^3$ angegeben, wobei der Feststoffanteil rd. 45,0 % beträgt. Die Schüttdichte des „Stabilisil 40“ liegt bei $0,5 \text{ g/cm}^3$

6.3.1.2 Untersuchungsmethoden

Aus den in Abschnitt 6.3.1.1 beschriebenen Ausgangsmaterialien für die Füllung des Abstandstextils werden Rezepturen entwickelt, bei denen folgende Kenngrößen (Mittelwerte) ermittelt werden:

a) Frisch- und Trockenrohichte: Die Frischrohichte des Bläh-/Wasserglasgemischs wird integral an drei Probekörpern zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Abmessung je $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) ermittelt. Das frische Bläh-/Wasserglasgemisch wird in der Schalung nach dem Abziehen der Oberfläche durch leichten Druck mittels Kelle verdichtet. Die „Trocken“-Rohichte wird an ausgeschalteten Probekörpern zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit mit den Maßen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ unmittelbar vor der Prüfung bestimmt.

b) Ausbreitmaß (Verarbeitbarkeit): In diesem Projekt wird ein üblicherweise für Mörtel verwendetes Prüfverfahren nach DIN EN 1015-3 angewendet

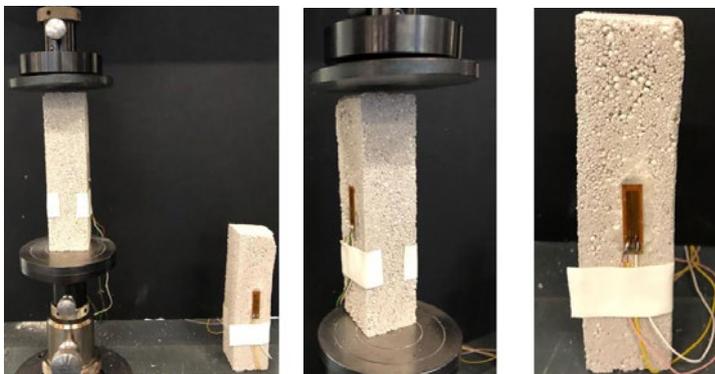
c) Biegezugfestigkeit: In diesem Projekt wird ein üblicherweise für Mörtel verwendetes Prüfverfahren nach DIN EN 1015-3 angewendet. Der Abstand der Auflager beträgt 100 mm. Die Proben mit den Abmessungen 40

$\times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ werden mit den geschalteten Seiten nach oben/unten zeigend auf den Auflagern mittig platziert

d) Druckfestigkeit: Auch die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgt in Anlehnung an DIN EN 1015-11 für Mörtel

e) E-Modul: Der Versuch zur Bestimmung des E-Moduls erfolgt in Anlehnung an DIN EN 12390-13 (für Beton), Verfahren A. Die Abmessungen der Probekörper betragen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$. Je Prüfung werden zwei Dehnungsmessstreifen pro Probe mittig auf die Seitenflächen angebracht (vgl. Abbildung 6.302). Hierfür kommt ein für diesen Anwendungszweck vorgesehener Zweikomponentenkleber zum Einsatz. Je Prüfung wird ein aktiver und ein passiver Probekörper benötigt. Die aktive und passive Probe wird an die Messkabel gelötet und mit einem Messverstärker verbunden. In diesem Versuch wird ein Messverstärker der Firma HBM (Modell Quantum Mx410) und die kompatible Software catman verwendet. Der passive Probekörper bleibt für alle Versuche einer Serie angeschlossen. Die aktiven Proben werden ausgetauscht. Die verkabelten Proben werden mittig auf der Druckplatte der Prüfmaschine platziert. Der final ermittelte Wert wird als Materialkenngröße (statischer) E-Modul angegeben.

Abbildung 6.302



Probekörper und Versuchsaufbau zur Bestimmung des E-Moduls

f) Wärmeleitfähigkeit: Die Ermittlung der Kennwerte erfolgt über die Abschätzung über die Rohdichte. Die Bestimmung der versuchstechnischen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ an ausgewählten Proben zur Einordnung der Werte, die durch Abschätzung über die Rohdichte bestimmt werden, erfolgt durch die TU Darmstadt am Plattenapparat nach DIN EN ISO 8302.

g) Wasserbeständigkeit und Wassereindringverhalten: Zur Einordnung des Materials bezüglich dessen kapillaren Wasseraufnahmeverhaltens wird der Wasseraufnahmekoeffizient w -Wert nach DIN EN ISO 15148 bestimmt. Die Wasserbeständigkeit wird visuell überprüft, indem Prismen mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ nach festgelegtem Trocknungsregime für einen Zeitraum von bis zu 5 Wochen in ein Wasserbad gelagert und beobachtet werden. Zudem wird durch den Verbundpartner Poraver der Festigkeitsverlust nach einer rd. 280 tägigen Wasserlagerung ermittelt.

h) Alkalität: Um zu überprüfen, ob und wie schnell sich der pH-Wert des Bläh-/Wasserglasgemisches während der Erhärtung reduziert, wird der pH-Wert mittels Phenolphthalein untersucht. Der verwendete Indikator Phenolphthalein ist bei einem pH-Wert von 0 bis etwa 8 farblos und färbt sich ab einem höheren Wert rosa-violett.

6.3.1.3 Einstellung der Verarbeitbarkeit und Probekörperherstellung

S. auch Kapitel 7.2 Ausschäumen / Befüllen der 3D Textilien: Ziel ist eine zur Befüllung von Abstandstextilien geeignete Konsistenz des Bläh-/Wasserglasgemisches zu erreichen und eine Ausgangsrezeptur für die weitere Rezepturoptimierung bereitzustellen. Dazu werden erste Mischungen im Befüllversuch getestet s. Tab. 6.301.

Tabelle 6.301

Kategorie	Feuchtigkeit	Konsistenz	Verarbeitbarkeit
A	nass	sehr weich	Schlechte Verarbeitbarkeit, keine homogene Masse, bluten
B	sehr feucht	weich	sehr gute Verarbeitbarkeit, homogene Masse, sehr klebrig
C	trocken	steif	akzeptable Verarbeitbarkeit, keine homogene Masse
D	sehr trocken	sehr steif	schlechte Verarbeitbarkeit, keine homogene Masse

Übersicht über die Kriterien zur Erfüllung der Verarbeitbarkeit des Bläh-/Wasserglasgemischs

Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird angestrebt, den Bindemittelgehalt auf ein mögliches Minimum zu begrenzen. Mit dem Ausbreitmaß in Anlehnung an DIN EN 1015-3 wird für die jeweiligen Mischungen ein Laborversuch angewendet, der für alle weiteren Mischungsvarianten als Maß für die erforderliche **Verarbeitbarkeit** dient. Da der Ausbreitkegel sich beim Übergang vom optimalen Mischungsverhältnis zum Mischungsverhältnis mit zu steifer Konsistenz aufgrund des Zusammenhaltevermögens nur geringfügig ändert, ist eine Beurteilung auf Basis eines ermittelten Ausbreitmaß in cm nicht zielführend. Aus diesem Grund erfolgt die Beurteilung der Konsistenz nach optischen bzw. haptischen Kriterien im Anschluss. Kategorie B in Tabelle 1 stellt für die geforderte Anwendung das Optimum der Verarbeitbarkeit dar.

Herstellung des Bläh-Wasserglasgemischs und Probekörperherstellung: Die Abbildung 6.303 zeigt die Herstellung der Wasserglasmatrix (Slurry) aus „Geosil 14517“ und „Stabilil 40“ im Massenverhältnis 2:1, die für 60 Sekunden vorgemischt wird. Nach Zugabe des Blähglas wird für weitere 120 Sekunden gemischt, s. Abb 6.303. Im Anschluss an die Fertigstellung der Mischung wird die frische Bläh-/Wasserglasmatrix in Styropor Schalungen eingebracht und die geschalteten Proben gewogen, um die Frischrohddichte zu bestimmen. Anschließend beginnt die thermische Aktivierung des Bindemittels mit einer Lagerung im Ofen bei definierter Temperatur und definiertem Zeitraum.

Abbildung 6.303



Einwaage der Korngruppe 0,5-1 mm, Mitte: Slurry aus Geosil/Stabilil im Massenverhältnis Geosil/Stabilil von 2:1, rechts: verwendeter Mischer, rechts außen: angestrebte Konsistenz

6.3.1.4 Haufwerksporige Einkornmischungen, Rezepturoptimierung für Innenraumanwendungen (Bindemittel Betol), s. Anlage 2

6.3.1.5 Haufwerksporige Einkornmischungen für Innen- und Außenanwendungen (Bindemittel Geosil/Stabilisil),

6.3.1.5.1 Erste orientierende Versuche haufwerksporige Einkornmischungen

a) Rezepturoptimierung: Es werden nachfolgend aufgeführte Parameter betrachtet mit dem Anspruch an optimale Verarbeitbarkeit, Festigkeit und möglichst geringen Wasserglasanteil:

- Mischungsverhältnis von Blähglas zu Wasserglas mit den Komponenten Geosil/Stabilisil, nachfolgend immer gekennzeichnet in Masseprozenten Blähglas / Geosil / Stabilisil. Für das Blähglas stehen 4 Kornmischungen s. Abb 6.3100 zur Verfügung. Das Massenverhältnis Geosil/Stabilisil wird nach Herstellerangaben mit 2/1 festgesetzt
- Trocknungsregime: Es werden zwei Varianten untersucht, Ofentrocknung 45 Minuten bei 80 °C oder 30 Minuten bei 150 °C, Lagerung anschließend 7 Tage bis zur Prüfung unter Laborklimabedingungen

Als Anhaltspunkt im Hinblick auf die Beständigkeit bei Wasserbeanspruchung wird ein Probensatz nach der Trocknung in einem Wasserbad gelagert.

b) Materialkennwerte: Es wurden je Blähglaskörnung jeweils vier unterschiedliche Rezepturen in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen untersucht. Dies jeweils ausgehend von einem Mischungsverhältnis von Blähglas / Geosil / Stabilisil = 70 / 20 / 10. Die Abbildungen 6.304 und 6.305 zeigen die Ergebnisse grafisch im Überblick und in Bezug jeweils auf die beste der vier Mischungsvarianten der jeweiligen Kornmischung.

Ergebnis: Mit zunehmendem Bindemittelgehalt steigt die Rohdichte des Verbundwerkstoffs innerhalb der einzelnen Korngruppen an. Dies resultiert in einer steigenden Druck- und Biegezugfestigkeit mit zunehmender Rohdichte, der in den Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt ist. Der Einfluss der Rohdichte, d.h. der steigende Bindemittelgehalt, wirkt sich dabei stärker auf die Druckfestigkeitssteigerung als, auf die Zunahme der Biegezugfestigkeit. Die Ergebnisse der unterschiedliche Trocknungsszenarien deuten darauf hin, dass durch eine Veränderung des Trocknungsregimes (Dauer und Höhe der Aktivierungsenergie) tendenziell eine Auswirkung festzustellen ist, wobei der Einfluss bei den feineren Korngruppen ausgeprägter ist.

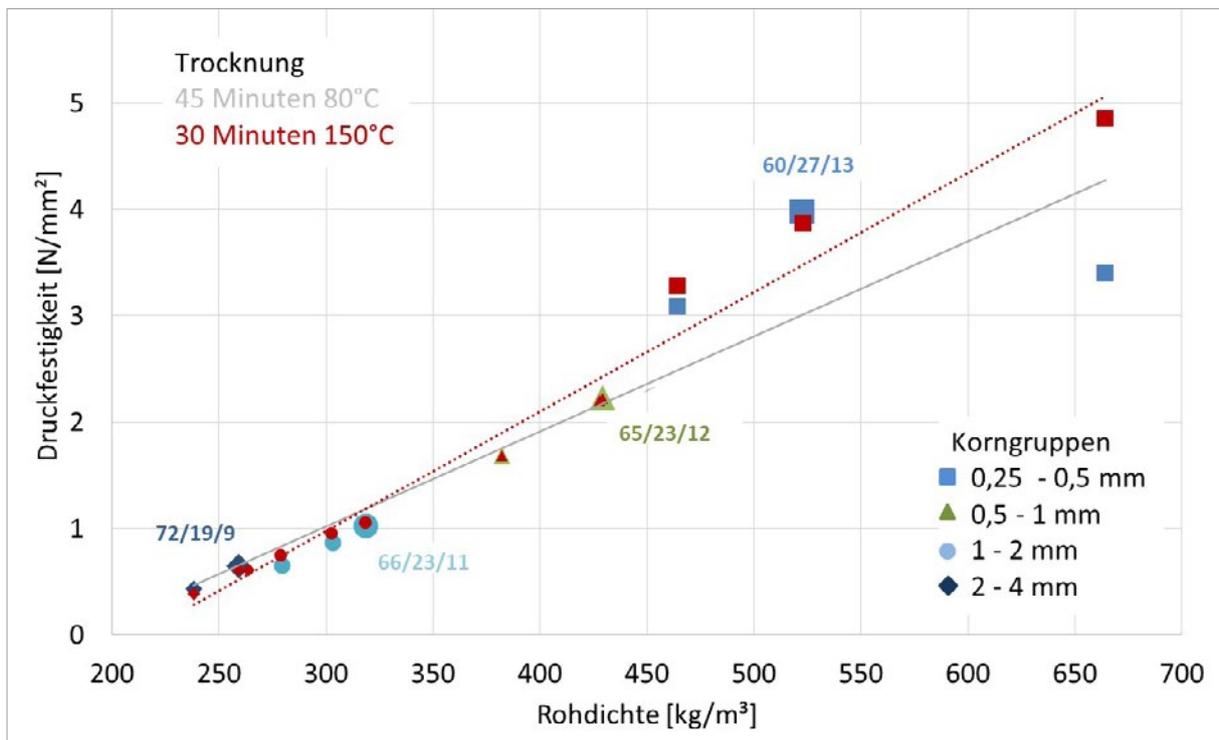
c) Einfluss des Trocknungsregimes auf die mechanischen Eigenschaften: Im Labor des Verbundpartners Poraver werden vergleichende Untersuchungen durchgeführt, wobei je Korngruppe an der optimierten Mischung sowie an der Mischung mit minimalem Bindemittelanteil die mechanischen Eigenschaften geprüft werden. Je Mischung werden hier 2 Trocknungsszenarien variiert:

- Trocknung bei 40°C für 24 Stunden, anschließend 3 Tage bei 105°C,
- Trocknung unter Pressdruck in der Heißpresse für 5 Minuten bei 180°C.

Die Prüfung der Biegezug- und Druckfestigkeit erfolgt nach Abkühlen der Probekörper. Die ermittelten Festigkeitswerte sind unter Berücksichtigung der Trocknungsintensitäten mit den Festigkeitswerten der FRA-UAS vergleichbar. Auch diese Untersuchungen ergeben die höheren Festigkeitswerte für die an der FRA-UAS optimierten Rezepturen.

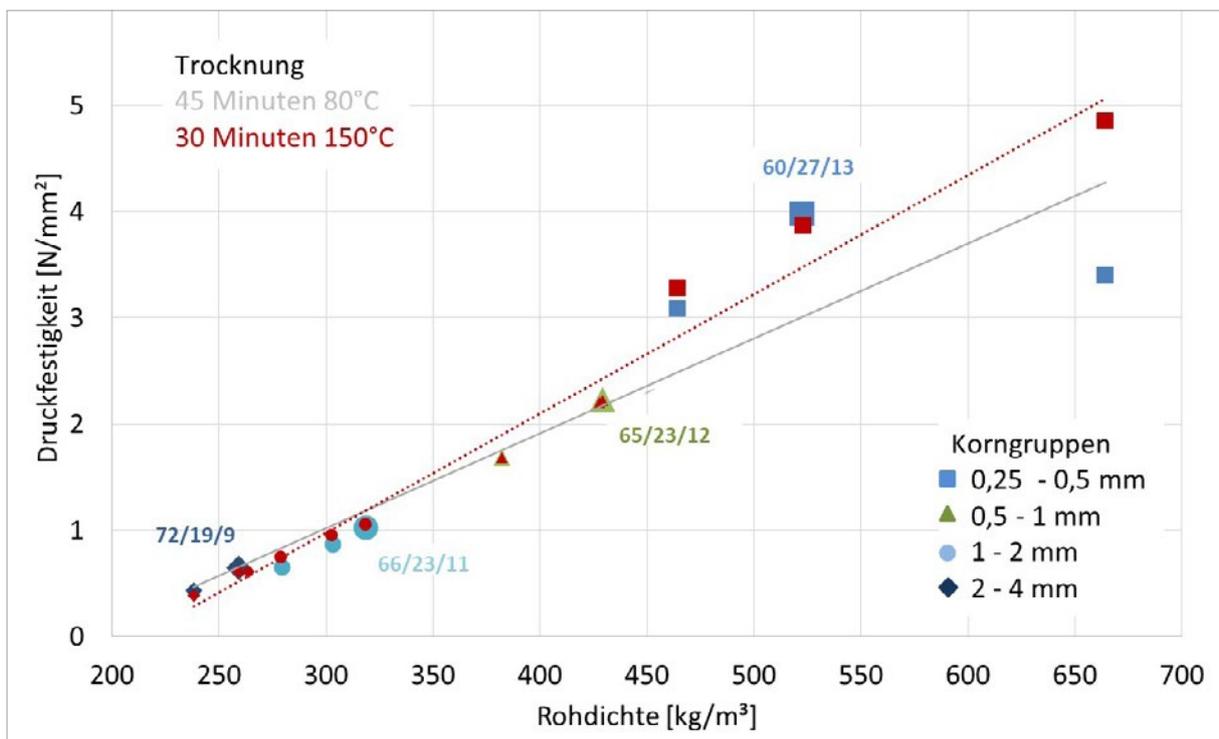
d) Wasserbeständigkeit Abbildung 6.306 links zeigt Probekörper der Korngruppen 0,25 – 0,5 mm, 0,5 – 1 mm und 1 – 2 mm nach Ofentrocknung von 45 Min / 80°C und nach Einlagerung in ein Wasserbad. Die Prismen lösen sich unmittelbar nach Wasserzugabe auf. Abbildung 6.306 rechts zeigt Probekörper der Korngruppen 0,25 – 0,5 mm und 2 – 4 mm nach Ofentrocknung von 30 Min / 150 °C. Hier ist visuell kein Entfestigen des Gefüges durch die Wasserzugabe feststellbar.

Abbildung 6.304



Druckfestigkeiten der 4 Korngruppen mit unterschiedlichen Blähglas/Geosil/Stabilis – Verhältnissen, Geosil/Stabilis 2/1

Abbildung 6.305



Biegezugfestigkeiten der 4 Korngruppen mit unterschiedlichen Blähglas/Geosil – Verhältnissen

Abbildung 6.306



links und mitte: Wasserlagerung von Prlsmen mit 45 Min. / 80° C Ofentrocknung, unmittelbar nach Wasseraufschlag
rechts außen: von Prlsmen mit 30 Min. / 150° C Ofentrocknung, 24 Stunden nach Wasserlagerung

Ergebnis: Damit die Verwendbarkeit der Rezepturen für Innen- wie Außenanwendungen angewendet werden können, sind weitere Untersuchungen erforderlich:

- Bestimmung von Materialkennwerten als Basis für die Bauteildimensionierung
- Untersuchung des Einflusses des Trocknungsregimes (Materialeigenschaften / Energieaufwand)
- Überprüfung der Stabilität der Rezeptur bei Kontakt mit Wasser zur Überprüfung der Einsatzbarkeit im Außenbereich

6.3.1.5.2 Optimierung der Materialkennwerte haufwerksporiger Einkornmische

a) **Materialkennwerte** Optimierung Rohdichte, Biege- und Druckfestigkeit sowie die Wärmeleitfähigkeit für die ausgewählten optimierten Rezepturen aus Absch. 6.3.1.5.1 werden auf Basis eines erweiterten Probenumfangs erneut ermittelt. Für die Biege- und Druckfestigkeit werden neben dem Mittelwert das 5%-Quantil, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient angegeben. Zudem wird an diesen Rezepturen der E-Modul bestimmt. Exemplarisch wird mit den Ergebnissen an je einer Druckfestigkeitsprüfung der Korngruppen 0,25-0,5 mm und 2-4 mm eine Auswertung in Anlehnung an die Druckfestigkeitsbestimmung von Dämmstoffen durchgeführt. Um das mit diesen Rezepturen erreichbare Maximum an Festigkeiten anzugeben, werden die Proben für einen Zeitraum von 48 Stunden bei 80°C gelagert, bevor diese nach weiteren 7 Tagen geprüft werden.

Tabelle 6.33

Korngruppe (mm)	Massenverhältnis (Blähglas / Geosil/ Stabisil)	Frischrohdichte (kg/m ³)	Rohdichte (kg/m ³)	Biegezugfestigkeit (N/mm ²)	Druckfestigkeit (N/mm ²)	E-Modul (N/mm ²)	Wärmeleitfähigkeit (W/(mK))
0,25 - 0,5	60 / 27 / 13	534	486	1,08 (0,97)	2,94 (2,42)	1.400 *	0,11 (0,12)
0,5 - 1	65 / 23 / 12	421	379	0,65 (0,57)	1,53 (1,26)	947 *	0,10 (0,10)
1 - 2	66 / 23 / 11	377	335	0,53 (0,47)	1,03 (0,86)	776 *	0,09 (0,09)
2 - 4	72 / 19 / 9	268	244	0,24 (0,19)	0,49 (0,40)	447*	0,07 (0,12)

Eigenschaften der haufwerksporigen Einkornmische in Kombination mit dem Bindemittel Geosil/Stabisil, Mittelwerte der Einzelprüfungen, Trocknungsregime 48 h / 80 °C, Ofentrocknung, 7 Tage Raumklima (5% Quantilwert in Klammern, * = Laborwert Poraver, Zahlen invers Werte an der TUF mit Plattenapparat)

b) Einfluss des Trocknungsregimes auf die mechanischen Eigenschaften Da das den Ergebnissen zugrundeliegende Trocknungsregime mit einer 48-stündigen Lagerungsdauer bei 80 °C aus baupraktischer und ökologischer und ökonomischer Sicht kein Optimum darstellt, wird in weiteren Schritten untersucht, inwiefern sich die Trocknungsdauer reduzieren lässt. Zudem wird untersucht, wie sich die fertigen Gemische nach variablen Trocknungsdauern bei Kontakt mit flüssigem Wasser verhalten.

Abfolge Versuchsreihe 1

- zunächst Ofentrocknung 80°C in Styroporschalung zwischen 30 Min und 45 Min
- im Anschluss Ofentrocknung 80°C / 160°C ohne Styroporschalung zwischen 5 Min und 60 Min
- zuletzt 7-tägigen Lagerung unter Raumklimabedingungen im Labor.

Abfolge Versuchsreihe 2

- zunächst Ofentrocknung 80°C in Styroporschalung 24 Min, 48 Min und 96 Min
- danach 7-tägigen Lagerung unter Raumklimabedingungen im Labor (20°C)
- Kontrollreihe, ohne Ofentrocknung unter Raumklimabedingungen im Labor (20°C) in Styroporschalung 2, danach 7 Tage ohne Schalung

Tabelle 6.302

Dauer Trocknung bei 80°C	anschl. Lagerung bei 20°C	Korngruppe (mm)	Rohdichte (kg/m ³)	Biegezugfestigkeit Mittelwert (N/mm ²)	5% Quantil (N/mm ²)	Druckfestigkeit Mittelwert (N/mm ²)	5% Quantil (N/mm ²)
0	7	0,25 - 0,5	486	0,77	0,66	2,32	1,98
		0,5 - 1	393	0,60	0,51	1,44	1,17
		1 - 2	340	0,45	0,42	0,89	0,83
		2 - 4	252	0,16	0,16	0,32	0,3
24	7	0,25 - 0,5	476	1,03	0,87	2,82	2,26
48	7	0,25 - 0,5	478 (610)	1,08 (1,6)	0,97	2,94 (6,7)	2,42
		0,5 - 1	379 (440)	0,65 (1,2)	0,51	1,53 (3,3)	1,24
		1 - 2	335 (370)	0,52 (0,8)	0,47	1,03 (2,3)	0,86
		2 - 4	244 (310)	0,24 (0,8)	0,19	0,49 (1,7)	0,39
96	7	0,25 - 0,5	473	1,00	0,83	2,64	1,94

statistische Werte der Biegezug und Druckfestigkeit der optimierten haufwerksporigen Einkornmische der verschiedenen Korngruppen in Kombination mit dem Bindemittel Geosil/Stabilis in Abhängigkeit der Trocknungszeit bei 80 °C
(Werte in Klammern /Invers: Untersuchungen bei Poraver mit Heißpresse, das frische Gemisch wird für 5 Minuten bei 180 °C verpresst)

Die Ergebnisse der Prüfung der mechanischen Eigenschaften für die Korngruppe 0,25 – 0,5 mm zeigen, dass sich die Festigkeiten bis zu einer Trocknungsdauer von 48 h im Vergleich zu kürzeren Trocknungsdauern steigern lassen. Eine darüberhinausgehende Festigkeitssteigerung bei einer 96-stündigen Trocknung bei 80 °C kann nicht festgestellt werden. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass die geprüften Prismen aller Korngruppen auch ohne thermische Aktivierung Festigkeiten erreichen, die über die Werte der „Kurzzeit“-thermischen Aktivierung hinausgehen (s.Tab 6.302). Es ist jedoch auf Basis der Tests zur Wasserbeständigkeit davon auszugehen, dass in diesem Fall aufgrund fehlender thermischer Aktivierung keine Wasserstabilität erreicht wird, vgl.

Abschnitt 6.3.1.5.1. Bei Anwendung einer Heißpresse zur Probenherstellung, in der das frische Gemisch für 5 Minuten bei 180 °C verpresst wird, ist eine deutliche Festigkeitssteigerung gegenüber Trocknung für 48 Stunden bei 80 °C zu beobachten. Die Tabelle 6.302 zeigt die im Labor der Firma Poraver ermittelten Kennwerte im Vergleich zu den mittleren Festigkeiten nach Trocknung über 48 Stunden bei 80 °C (s Tab. 6.302, Werte invers).

Fazit: Sofern keine Heißpresse verwendet werden kann, was aufgrund der geplanten Anwendungen der optimierten Mischungsrezepturen als Füllstoff in frei verformbaren Abstandstextilien der Fall ist, werden mit einer Trocknung der Bläh-/Wasserglasmatrix für 48 Stunden bei 80 °C die größten Festigkeitswerte erreicht. Durch eine darüberhinausgehende Trocknung werden die Festigkeiten reduziert.

c) Wasseraufnahme und Wasserbeständigkeit Nachdem sich im Rahmen von ersten Versuchen zur Wasserbeständigkeit zeigt, dass diese offensichtlich erst nach einer Mindestaktivierung infolge Temperatur erreicht wird (vgl. Abschnitt 6.3.1.5.1), werden haufwerksporige Einkornmischungen der Korngruppen 0,25 – 0,5 mm und 2 – 4 mm mit den jeweils optimierten Bindemittelgehalten (vgl. Abschnitt 6.3.1.5.2) auf ihre Wasserbeständigkeit getestet.

Abbildung 6.307



Probekörperzustand der Prismen nach fünfwöchiger Wasserlagerung in einem Wasserbad

Abweichend von der normativ vorgegebenen Vorgehensweise wird hier zur Ermittlung des w -Wertes nicht der 24 Stunden-Wert herangezogen, sondern bereits der erste Messwert nach 5 Minuten. Zu diesem Zeitpunkt sind die maximal aufnehmbaren Wassermengen bereits kapillar aufgesaugt. Bei den in Tabelle 12 s. Anlage 2 unter 6.3.1.5.4 dargestellten Wasseraufnahmekoeffizienten handelt es sich daher um einen Mindestwert, der voraussichtlich überschritten wird. Es lässt sich jedoch bereits auch auf Basis dieser Ergebnisse ableiten, dass die haufwerksporigen Einkornmischungen mit w -Werten von $w > 2,0$ [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$] als stark saugend einzustufen sind und daher die Kriterien für den Regenschutz nach DIN 4108-3 nicht erfüllen (wasserabweisend $w \leq 0,5$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$). Somit ist wie auch bei den meisten anderen Werkstoffen, wie z.B. Ziegel (ca. 3-25 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$), Kalksandstein (ca. 3-8 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$), Natursandstein (ca. 1-160 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$), Gipsbauplatten (ca. 35-70 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$), Porenbeton (ca. 4 - 8 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$) eine wasserabweisende Außenhaut aufzubringen, wenn Schlagregenbeanspruchung zu erwarten ist, d.h. bei frei bewitterten Bauteilen. Dabei ist die kapillare Wasseraufnahme der Gemische aus kleineren Korngruppen stärker ausgeprägt, als bei den Gemischen größerer Korngruppen, was sich auch in der aus der freien Wassersättigung, ermittelt aus den Wägedaten nach Erreichen der Massenkonstanz, widerspiegelt. Die maximale freie Wasseraufnahme infolge kapillaren Saugens (vgl. Berechnung) bzw. die kapillaraktive Porosität liegt im Vergleich zu der Korngruppe 2 – 4 mm bei der Korngruppe 0,25 – 0,5 mm um das Vierfache höher.

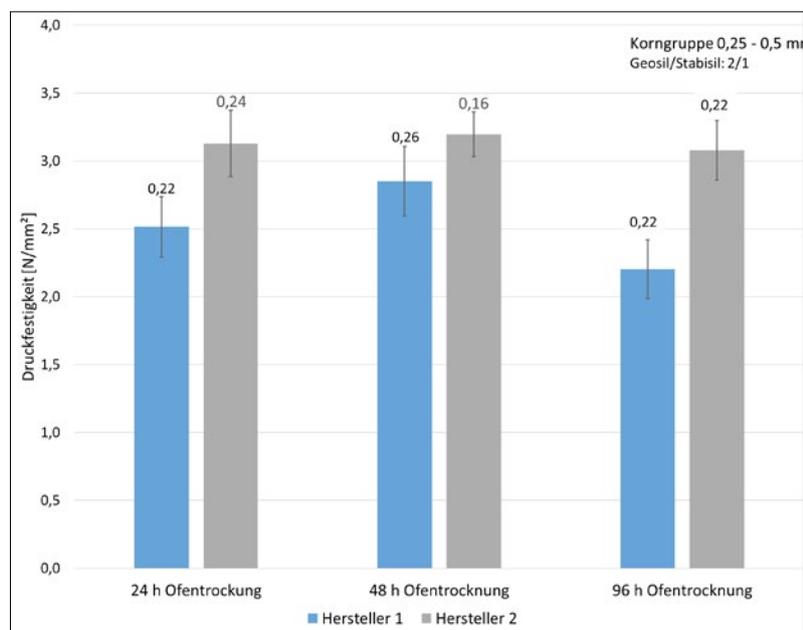
Im Anschluss an die Versuche zur Wasseraufnahme werden die Proben für einen weiteren Zeitraum von 5 Wochen in einem Wasserbad gelagert (Abb. 6.307). Es zeigt sich, dass alle Proben ihre Form behalten, d.h. die Trocknung bei > 75 Minuten bei 80 °C bzw. > 50 Minuten bei 80 °C ausreichend ist, um zumindest visuell

feststellbar die Raumbeständigkeit beizubehalten. Die Auswirkung der Wasserbeaufschlagung auf die mechanischen Eigenschaften wird an diesen Proben nicht weiter untersucht. Im Labor des Verbundpartners Poraver werden die optimierten Einkornmischungen im Anschluss an die Herstellung mittels Heißpresse (Verpressung 5 Minuten bei 180 °C) für einen Zeitraum von rd. 280 Tagen in einem Wasserbad gelagert. Auch nach diesem Zeitraum wird visuell keine Veränderung der Probekörper festgestellt. Im Anschluss an die Wasserlagerung werden an den wassergesättigten Proben Biege- und Druckfestigkeit ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wassersättigung mit erheblichen Festigkeitsverlusten zwischen 50 -70% einhergeht. Vergleichsuntersuchungen an Proben mit einem geringeren Bindemittelanteil zeigen bei geringeren Festigkeiten im „trockenen“ Zustand geringere Festigkeitsverluste nah Sättigung. Dies lässt darauf schließen, dass der Festigkeitsverlust nach Wasserlagerung auf das Bindemittel zurückzuführen ist.

Fazit: Die haufwerksporigen Einkornmischungen mit dem Bindemittel Geosil/Stabilisil sind im Hinblick auf ihre kapillare Wasseraufnahme als stark saugend einzustufen. Da damit die Kriterien für den Regenschutz nach DIN 4108-3 nicht erfüllt werden, ist bei freier Bewitterung des Materials eine wasserabweisende Außenhaut aufzubringen. Ab einer thermischen Aktivierung von 75 Minuten bei 80 °C (Korngruppe 0,25 – 0,5 mm) bzw. > 30 Minuten bei 80 °C + 5 Minuten bei 160 °C (Korngruppe 2 – 4 mm) wird eine Raumbeständigkeit der Proben nach Wasserbeaufschlagung im Alter von 7 Tagen festgestellt. Bei Wassersättigung über einen längeren Zeitraum werden erhebliche Festigkeitsverluste festgestellt, so dass auch aus diesem Grund das Material vor anstehendem flüssigen Wasser zu schützen ist.

d) Reproduzierbarkeit der Ergebnisse Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde die Herstellung der optimierten haufwerksporigen Einkornmischung mit der Korngröße 0,25 - 0,5 mm durch 2 verschiedene Personen nach Vorgabe von Mischungszusammensetzung, Mischabfolge und Trocknungsregime durchgeführt. Abbildung 6.308 zeigt die entstandenen Abweichungen

Abbildung 6.308



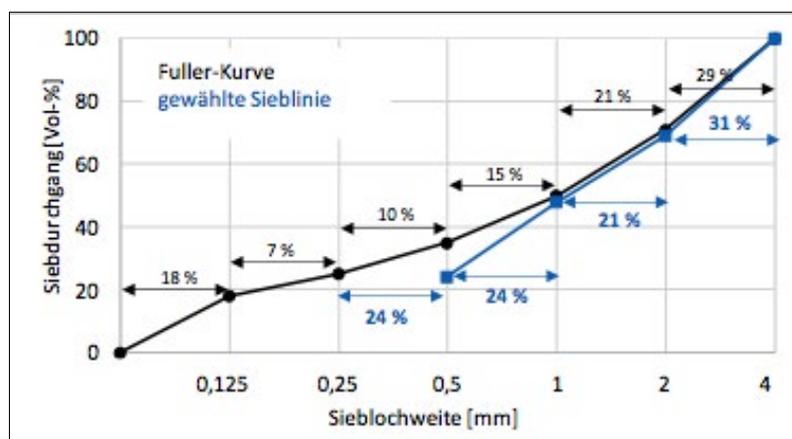
Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an optimierten haufwerksporigen Einkornmischungen der Korngruppe 0,25 – 0,5 mm, Herstellung von Mischung und Probekörpern durch 2 verschiedene Personen.

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Mischungen unterliegt trotz Einhaltung vorgegebener Rezeptur, Mischungs- und Nachbehandlungsanweisungen Streuungen. Diese sind in den Materialkennwerten, die mit statistischen Kenngrößen in Abschnitt 6.3.1.5.2 und in Abschnitt 6.3.1.5.3 angegeben werden, enthalten.

6.3.1.6 Gefügedichte Mehrkornmischungen für Innen- und Außenanwendungen (Bindemittel Geosil/Stabilisil), erste orientierende Versuche

a) **Entwicklung einer Sieblinie für ein gefügedichtetes Mehrkornmisch:** Mit dem Ziel neben den haufwerksporigen Einkornmischungen ein gefügedichtetes Mehrkornmisch als Füllung für die Abstandstextilien bereitzustellen, welches bessere mechanische Eigenschaften aufweist, wird in einem ersten Entwicklungsschritt eine Sieblinie für das Blähglas entwickelt. Die Sieblinie, bestehend aus definierten Anteilen der vier Korngruppen 0,25 – 0,5 mm, 0,5 – 1 mm, 1 – 2 mm und 2 – 4 mm wird dahingehend optimiert, dass die Zwikel zwischen Körnern der größeren Korngruppe durch die nächstkleinere Korngröße gefüllt wird. Dabei wird auf die aus der Betontechnologie bekannte Idealsieblinie nach Fuller/Thompson „Fuller-Kurve“ zurückgegriffen. Anzumerken ist, dass die Fuller-Kurve für Gesteinskörnungen im Verbund mit dem Bindemittel Zement entwickelt wurde. Bei den hier zum Einsatz kommenden Ausgangsstoffen weichen die Eigenschaften davon ab. Die gewählte Sieblinie liegt für die beiden größeren Korngruppen im Bereich der Idealsieblinie nach Fuller. Für die beiden kleineren Korngruppen wird aufgrund der Erfahrungen im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit und den Bindemittelbedarf der kleineren Korngruppen der Anteil an der Korngruppe 0,25 – 0,5 mm zugunsten der Korngruppe 0,5 – 1 mm reduziert. (Abb. 6.309)

Abbildung 6.309



Sieblinien für das Kornmisch 0,25 – 4 mm, schwarz: Idealsieblinie nach Fuller, blau: für das Bläh-/Wasserglas-Gemisch entwickelte Sieblinie

Entsprechend der unterschiedlichen Kornrohdichten der einzelnen Körnungen ergeben sich aus den für die gewählte Sieblinie definierten volumetrischen Anteile die massebezogenen Anteile in M-% „Siebversuch“, die Resultat des Siebversuchs sind. Für die Herstellung der Mischung im Labor sind die Anteile in M-% „Einwaage“ zu verwenden, um das Siebergebnis zu erhalten (Tab. 6.303):

Tabelle 6.303

Korngruppe (mm)	Anteil (Vol %)	Kornrohdichte (kg/m ³)	Anteil Siebversuch (M-%)	Anteil Einwaage (M-%)
0,25 - 0,5	24	700	36	45
0,5 - 1	24	500	25	15
1 - 2	21	400	18	18
2 - 4	31	320	21	21

Zusammensetzung der für das Bläh-/Wasserglas-Gemisch entwickelte Sieblinie 0,25 – 4 mm

b) Gefügedichtetes Mehrkornmisch mit einem Bindemittelverhältnis Geosil/Stabilisil 2/1

Rezepturoptimierung: Bindemittelverhältnis Geosil/Stabilisil 2/1: In Analogie zur Vorgehensweise bei den haufwerksporigen Einkornmischungen, wird durch Variation des Mischungsverhältnisses Blähglasgranulat zu Wasserglas eine Rezeptur entwickelt, die das Optimum aus Verarbeitbarkeit und mechanischen Eigenschaften erzielt. Für die gefügedichtete Rezepturvariante werden 11 Varianten der Zusammensetzung mit Mischungsverhältnissen Blähglas/Geosil/Stabilisil im Bereich von 34/44/22 bis 60/27/13 untersucht. Die Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit zeigen, dass Mischungsverhältnisse mit einem höheren Bindemittelgehalt zu Entmischungen neigen (Abbildung 6.37, links) ein geringerer Bindemittelgehalt ist zu trocken (Abbildung 6.310, rechts). Die Rezepturvarianten 38/41/21 bis 43/38/19 zeichnen sich durch eine sehr gute Verarbeitbarkeit (Kategorie B, Tabelle 6.32) und eine homogene Masse mit sehr gutem Zusammenhaltevermögen aus, vgl. Abb. 6.310, mitte.

Abbildung 6.310



Ergebnisse des Ausbreitmaßversuchs am Beispiel einer gefügedichten Mischung mit Massenverhältnis Blähglas/Wasserglas(Geosil/Stabilisil): links-34/44/22, Mitte-41/39/20, rechts-60/27/13, das Wasserglas Geosil/Stabilisil wird im Gewichtsverhältnis 2/1 beigefügt

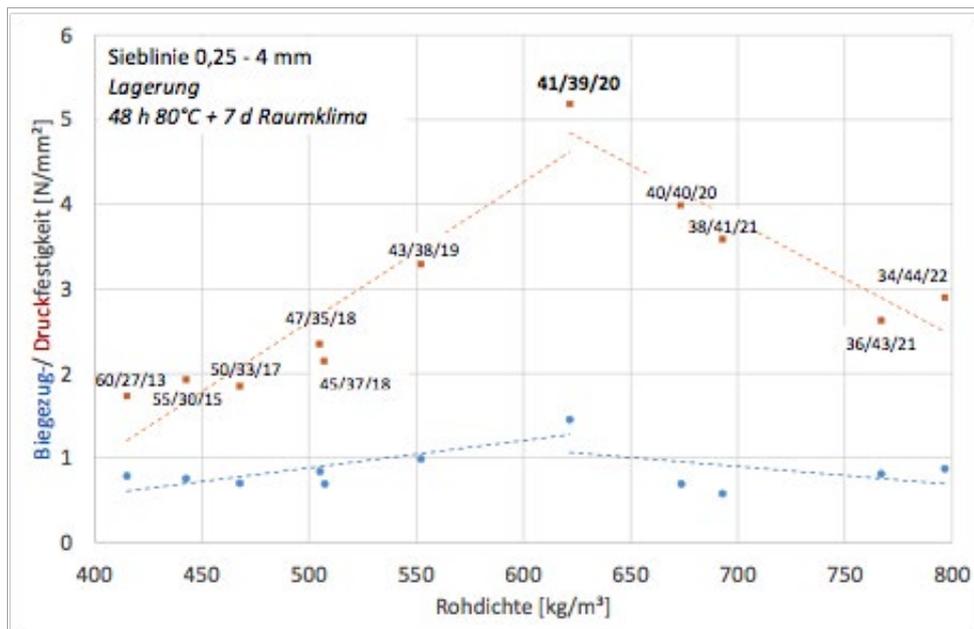
Die Prüfung der Biegezugfestigkeit erfolgt an 3 Prismen, die Prüfung der Druckfestigkeit an 6 Prismenhälften. Die Wärmeleitfähigkeit wird anhand der mittleren Rohdichte von 3 Prismen abgeschätzt. Abbildung 6.38 zeigt die grafische Aufbereitung der Ergebnisse der Biegezug- und Druckversuche.

Fazit: Auf Basis der vorangestellten Ergebnisse wird bei Verwendung der Sieblinie 0,25 – 4 mm eine Rezeptur Blähglas/Geosil/Stabilisil von 41/39/20 als Optimum zwischen Verarbeitbarkeit, Bindemittelgehalt und Materialeigenschaften festgelegt. Die Verarbeitbarkeit dieser Mischung ist mit einer weichen Konsistenz sehr gut. Die hergestellten Prismen zeichnen sich durch eine homogene Oberflächenstruktur mit gleichmäßig dichtem Gefüge aus. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,14 W/(mK). Die mittlere Biegezugfestigkeit beträgt 1,45 N/mm², die mittlere Druckfestigkeit wird zu 5,2 N/mm² ermittelt. Es ist damit zu rechnen, dass der E-Modul einen Wert in der Größenordnung von 1400 N/mm² einnimmt. Für das Mischungsverhältnis 40/40/20, welches vergleichsweise geringere Festigkeiten aufweist als das optimierte von 41/39/20, wird an drei Prismen in den Laboratorien des Verbundpartners Poraver ein mittlerer E-Modul von 1389 N/mm² ermittelt.

Mit dem Ziel, ein möglichst dichtes Gefüge mit höheren Festigkeitseigenschaften der Bläh-/Wasserglasmatrix zu erreichen, wird für die Sieblinie (0,25 – 4 mm) mit Blick auf die Verarbeitbarkeit und die mechanischen Eigenschaften eine optimierte Rezeptur unter Verwendung des Bindemittels Geosil/Stabilisil entwickelt. Damit die Verwendbarkeit der Rezeptur für Innen- wie Außenanwendungen angewendet werden kann, sind weitere Untersuchungen erforderlich (s. 6.3.1.6.2.):

- Bestimmung von Materialkennwerten als Basis für die Bauteildimensionierung
- Untersuchung des Einflusses des Trocknungsregimes auf die Eigenschaften, zur Minimierung des Energieaufwands bei der Herstellung
- Wasseraufnahme

Abbildung 6.311



Biegezug- und Druckfestigkeiten der gefügedichten Mischungsvarianten mit unterschiedlichen Blähglas/Geosil – Verhältnissen in Abhängigkeit der Rohdichte, Bindemittelverhältnis Geosil/Stabilis: 2/1

Materialkennwerte des optimierten gefügedichten Mehrkorngemischs:

(Bindemittelverhältnis Geosil/Stabilis 2/1)

Mit dem Ziel für die Dimensionierung von Bauteilen verlässliche Materialkennwerte bereitzustellen, werden Rohdichte, Biege- und Druckfestigkeit sowie die Wärmeleitfähigkeit für die ausgewählte optimierte Rezeptur mit dem Masseverhältnis Blähglas/Geosil/Stabilis von 41/39/20 aus Abschnitt 6.3.1.6. auf Basis eines erweiterten Probenumfangs erneut ermittelt. Für die Biege- und Druckfestigkeit werden neben dem Mittelwert, die Standardabweichung, der Variationskoeffizient und das 5%-Quantil angegeben. Um das mit diesen Rezepturen erreichbare Maximum an Festigkeiten anzugeben, werden die Proben für einen Zeitraum von 48 Stunden bei 80 °C gelagert, bevor diese nach weiteren 7 Tagen geprüft werden (Abb. 6.311).

Fazit: Neben den haufwerksporigen Einkornmischungen steht zur Befüllung des Glasfaser-Abstandstextils eine weitere gefügedichte und verarbeitbare Rezepturvariante mit zugehörigen Materialkenngrößen nach 48-stündiger Trocknung bei 80 °C bereit, die je nach statischen und bauphysikalischen Anforderungen gezielt angewendet werden kann. Die Materialkenngrößen sind in Tabelle 6.36 bereitgestellt. Nach einer Trocknungsdauer von 48 h bei 80 °C und einer 7-tägigen Lagerungsdauer ergibt die mittlere Biegezugfestigkeit einen Wert von 1,45 N/mm², diese liegt um rd. 34 % höher, als der vergleichbare Wert des haufwerksporigen Einkornmischs mit der größten Festigkeit (1,08 N/mm² bei Korngruppe 0,25 – 0,5 mm). Die mittlere Druckfestigkeit liegt mit 5,18 N/mm² rd. 76 % oberhalb der Maximalwerte (2,94 N/mm²), die mit den haufwerksporigen Einkornmischungen erzielt werden. Der E-Modul liegt bei rd. 1.400 N/mm² (Mischung 40/40/20, Messungen Dennert Poraver) mit dem entsprechenden Maximalwert der Einkornmischungen vergleichbar. Entsprechend der vergleichsweise höheren mittleren Rohdichte von 618 kg/m³ erhöht sich das Eigengewicht des Materials um rd. 16 %, die Wärmeleitfähigkeiten mit 0,14 W/(mK) um rd. 27 % im Vergleich zum Einkornmisch (Korngruppe 0,25 – 0,5 mm).

Einfluss des Trocknungsregimes auf die mechanischen Eigenschaften: Im Hinblick auf baupraktische, ökonomische und ökologische Aspekte macht es Sinn, die erforderliche Aktivierungsenergie für die Bläh-/Wasserglasmatrix auf ein nötiges Minimum zu reduzieren. Um die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Trocknungsregime zu ermitteln, wird daher mit der optimierten Rezeptur im Massenverhältnis Blähglas/Geosil/Stabilis von 41/39/20 eine weitere Versuchsreihe durchgeführt, in der die Dauer der Trocknungsstemp-

ratur bei 80 °C variiert wird: 24 h, 48 h, und 96 h. Vergleichend werden die mechanischen Eigenschaften von Prismen untersucht, die ohne thermische Aktivierung im Ofen im Raumklima des Labors bei rd. 20 °C lagern.

Die Ergebnisse der Prüfung der mechanischen Eigenschaften für die Korngruppe /-packung 0,25 – 4,0 mm zeigen zusammenfassend, dass sich die mittleren Festigkeiten bis zu einer Trocknungsdauer von 48 h geringfügig steigern lassen, vgl. Tabelle 6.304. Eine darüberhinausgehende Festigkeitssteigerung bei einer 96-stündigen Trocknung bei 80 °C kann nicht festgestellt werden. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass die geprüften Prismen auch ohne thermische Aktivierung Festigkeiten erreichen, die über die Werte der „Kurzzeit“-thermischen Aktivierung hinausgehen. Aufgrund der über die Prüfkörper hinweg gleichmäßige Trocknung entstehen vermutlich geringere Eigenspannungen in den Prüfkörpern, so dass bei deutlich geringeren Streuungen die höchsten 5-% Quantilwerte erreicht werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in diesem Fall aufgrund fehlender thermischer Aktivierung keine Wasserstabilität erreicht wird, vgl. Abschnitt 6.3.1.5

Die Ursache für die Abnahme der Festigkeit bei einer über 48 Stunden hinausgehenden Ofentrocknung bei 80 °C könnte darin begründet sein, dass der Matrix durch die Trocknung so viel Flüssigkeit entzogen wird, dass eine weitere Reaktion des Bindemittels unterbunden wird. Eine weitere Untersuchung zeigt für die unterschiedlichen Trocknungsintensitäten die Rohdichten im frischen Zustand, unmittelbar nach der Trocknung sowie kurz vor der Prüfung. Alle Proben weisen eine Gewichtszunahme zwischen der Trocknung im Ofen und der Festigkeitsprüfungen, d.h. nach Lagerung im Raumklima des Labors, auf. Es ist daher davon auszugehen, dass das in den Proben verbleibende Flüssigkeitsvolumen im Abbindeprozess während des Trocknungsprozesses „verbraucht“ wird und keine überschüssige Feuchte vorhanden ist. Ein Vergleich des Flüssigkeitsverlusts zwischen Raumlagerungen und 24 stündiger Ofentrocknung bei 80 °C zeigt, dass 72 % bzw. 59 % der eingebrachten Flüssigkeit ($260,3 \text{ kg/m}^3 \times 0,55 = 143 \text{ kg/m}^3$) aus den Prüfkörpern entwichen ist. Nach 48 stündiger Trocknung sind bereits 78 % entwichen, nach 96 Stunden Trocknung erhöht sich die verdampfte Flüssigkeitsmenge auf 85 %. Offensichtlich ist damit ein Maß erreicht, welches dazu führt, dass der Abbindeprozess nicht vollständig stattfinden kann.

Tabelle 6.304

Dauer Trocknung bei 80°C	anschl. Lagerung bei 20° C	Massenverhältnis (Blähglas 0,25-0,4/ Geosil/ Stabilisil)	Rohdichte (kg/m ³)	Biegezugfestigkeit Mittelwert (N/mm ²)	5% Quantil (N/mm ²)	Druckfestigkeit Mittelwert (N/mm ²)	5% Quantil (N/mm ²)
0	7	41 / 39 / 20	618	0,87	0,75	3,44	2,81
24	7	41 / 39 / 20	627	0,43	0,25	3,43	3,06
48	7	41 / 39 / 20	618	1,45	1,04	5,18	4,25
96	7	41 / 39 / 20	609	1,21	9,96	3,55	3,14

Biegezug- und Druckfestigkeit des optimierten Mehrkorn gemisches (Korngrößen 0,25 - 4 mm) - in Kombination mit dem Bindemittel Geosil/Stabilisil (2/1) und in Abhängigkeit der Trocknungszeit bei 80 °C

Fazit: Ein Optimum der Festigkeit wird nach einer Trocknungsdauer von 48 Stunden bei 80 °C erreicht. Dies ist baupraktisch mit einem hohen Aufwand verbunden, so dass die Luftlagerung mit einer im Vergleich um rd. 34 % geringeren mittleren Druckfestigkeit und einer um rd. 40 % geringeren mittleren Biegezugfestigkeit eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Alternative darstellen könnte. Zu beachten ist dabei allerdings, dass auf Basis der Versuche zur Wasserbeständigkeit der haufwerksporigen Einkorn gemische unter Verwendung der Bindemittelmischung Geosil/Stabilisil keine Wasserbeständigkeit zu erwarten ist, vgl. Abschnitt 6.3.1.5.4

Reproduzierbarkeit der Ergebnisse: Vergleichbar wie bei den Einkorngemischen unter Abschnitt 6.3.1.5.2 wird auch für das Mehrkorngemisch die Reproduzierbarkeit des Herstellverfahrens untersucht. Im Ergebnis ist festzustellen, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Mischungen unterliegt trotz Einhaltung vorgegebener Rezeptur, Mischungs- und Nachbehandlungsanweisungen Streuungen. Je nach Trocknungsregime ergeben sich bei der Ermittlung der Druckfestigkeiten Variationskoeffizienten von 17,9 %, 13,4 % und 12% .

Wasseraufnahme: Vergleichbar wie bei den Einkorngemischen unter Abschnitt 6.3.1.5.2 wird auch für das Mehrkorngemisch das Wasseraufnahmeverhalten geprüft. Die Probekörper sind aus einer gefügedichten Mehrkornmischung (Sieblinie 0,25 – 4 mm, Blähglas/Geosil/Stabilisil: 441/39/20, 48 h Ofentrocknung bei 80 °C und 7 Tage bei Raumtemperatur). Es ergibt sich ein Wasseraufnahmekoeffizient nach Norm w_{24} von im Mittel 3,0 kg/(m²*√h). dies ist etwas weniger als im Vergleich zu Porenbeton (ca. 4 - 8 kg/(m²*√hc) , erfüllt aber nicht die Kriterien für den Regenschutz nach DIN 4108-3 (wasserabweisend $w \leq 0,5$ kg/(m²*√h)

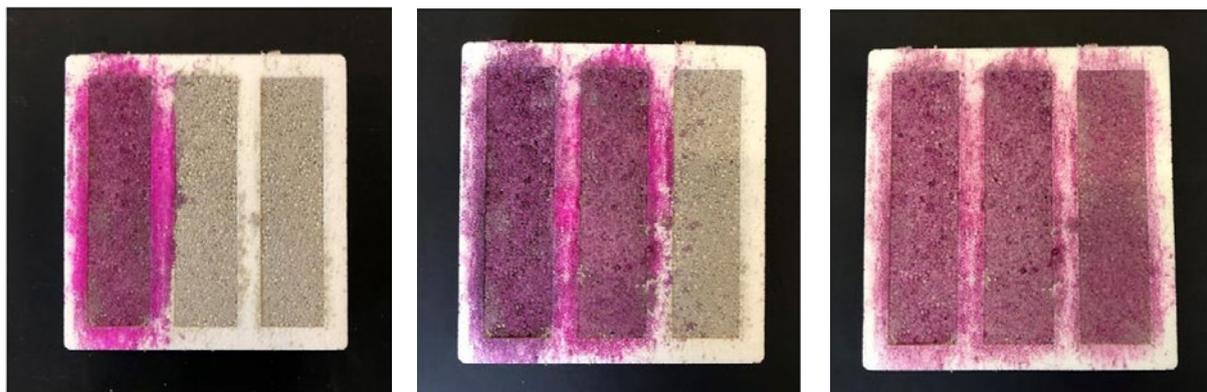
c) Gefügedichtetes Mehrkorngemisch mit einem Bindemittelverhältnis Geosil/Stabilisil 6/1 (s. Anlage 2 unter 6.6.3.1.6)

Der Vergleich der Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen zeigt, dass bei einer Abweichung des Bindemittelverhältnisses Geosil/Stabilisil nach Herstellerangaben von 2/1 auf 6/1 durch Erhöhung der Flüssigkomponente Geosil nicht mit Festigkeitseinbußen zu rechnen ist. Während die mittlere Druckfestigkeit der verarbeitbaren Mischungen mit rd. 4,96 N/mm² vergleichbar ist, erhöht sich die mittlere Biegezugfestigkeit um rd. 60%. Allerdings ist infolge des fehlenden stabilisierenden Anteils des Bindemittels keine Wasserbeständigkeit gegeben.

6.3.1.7 Orientierende Versuche zur pH-Wert-Reduzierung in Abhängigkeit der Trocknungsdauer

Durch die Kombination mit einem Abstandstextil aus Glasfasern wird Tragfähigkeit gesteigert. Hierfür ist ein Verbund zwischen Füllung und Glasfasern relevant. Infolge des hohen pH-Werts des Wasserglases weist die nicht fertig abgebundene Füllung einen hohen pH-Wert auf. Um evtl. auf AR-Glas verzichten zu können wird untersucht, ob sich der pH-Wert nach relevanten Zeiträumen durch Variation des Trocknungsregimes effektiv reduzieren lässt um die Glasfaserschädigung auf ein vertretbares Maß zu reduzieren (Abb.. 6.312)

Abbildung 6.312

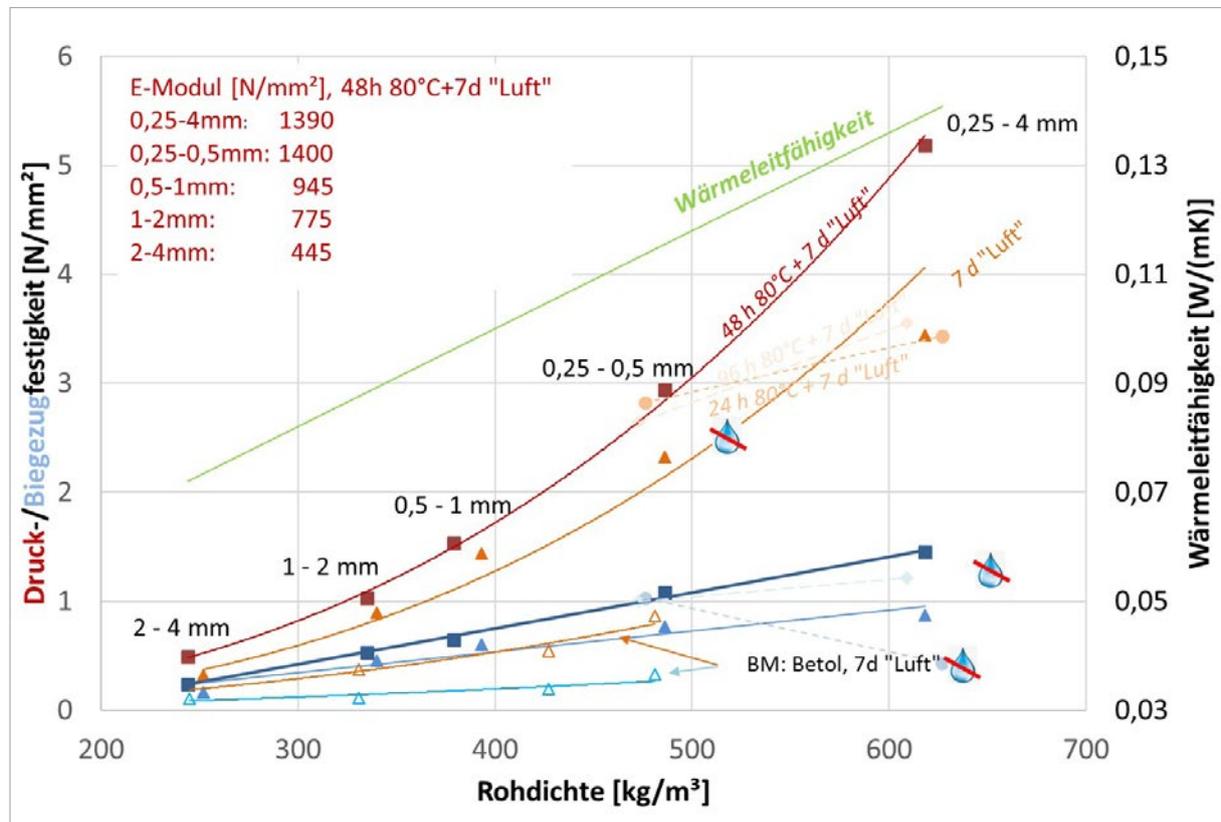


Phenolphthaleintests nach 24, 48 und 72 Stunden Trocknung bei 80 °C, Ergebnisse: alkalisches Milieu auch nach 72 h

Fazit: Der pH-Wert der wässrigen Lösung des Porensystems lässt sich auch mit Trocknungsdauern bis zu 72 Stunden nicht auf ein für E-Glasfasern unkritische Maß reduzieren, so dass voraussichtlich eine Verwendung von AR-Glas für die Produktion der Abstandstextilien unumgänglich ist.

6.3.1.8 Zusammenfassung - Rezepturenentwicklung der FRA-UAS

Abbildung 6.313



Mittlere Kennwerte optimierter Mischungsrezepturen
 Rottöne: Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Trocknungsszenarien
 Blautöne: Biegezugfestigkeiten bei unterschiedlichen Trocknungsszenarien,
 ausgefüllte Markierungen: Bindemittel Geosil/Stabisil (2/1)
 umrahmte Markierungen: Bindemittel Betol 50 T1

Abbildung 6.313 fasst die Mittelwerte der wesentlichen Kenngrößen inkl. den Rezeptur- und Mischungsanweisungen der im Hinblick auf Verarbeitbarkeit und Festigkeit optimierten Mischungsrezepturen zusammen. Die statistisch ermittelten Kenngrößen beinhalten das Fehlerpotential, das durch die Herstellung unterschiedlicher Personen gegeben ist. Eine Steigerung der Festigkeiten geht dabei mit einer für wärmeschutztechnische Aufgabenstellungen relevanten Steigerung der Wärmeleitfähigkeit einher. So weist die haufwerksporige Einkornmischung mit dem Korndurchmesser des Blähglases 2 – 4 mm nach Messung im Plattenapparat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,09 W/(mK) auf, die gefügedichte Mischung resultiert in einer doppelt so hohen Wärmeleitfähigkeit von 0,14 W/(mK). Vergleichend dazu liegt z.B. die Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton liegt zwischen 0,06 und 0,21 W/(mK), bei Dichten von 200 - 1.000 kg/m³.

Abbildung 6.313 zeigt nicht auf die Werte, die mit einer Heisspresse erreicht werden konnten, obwohl sie parallel bei Poraver ermittelt wurden. In ge3TEX steht das Verbundverhalten mit Glasfasern und Materialeinsparungen durch formaktive Geometrien im Vordergrund. Ohne Aktivierung in einer Heißpresse werden die optimalen Festigkeiten nach einer Trocknungsdauer des frisch hergestellten Füllstoffs von 48 Stunden bei 80 °C erreicht. Diese können auch ohne thermische Aktivierung erreicht werden, wahrscheinlich dann aber ohne Wasserbeständigkeit und mit Festigkeitsverluste durch die Wassersättigung. Die Festigkeiten der ebenfalls abgebildeten haufwerksporigen Einkornmischungen mit dem einkomponentigen Bindemittel Betol liegen deutlich unterhalb der vergleichbaren Einkornmischungen mit dem Bindemittel Geosil.

Tabelle 6.37

6.3.2 Glasfasern im Verbund mit der Blähglas/Wasserglas-Matrix (Autoren, soweit nicht anders gekennzeichnet: Nagel, Dominik; Rucker-Gramm, Petra)

Glasfasern werden durch ein Ziehverfahren aus einer Glasschmelze gewonnen. Die größte Bedeutung hat dabei das Düsenziehverfahren, durch welches 90 % aller Glasfasern ersponnen werden. Das Gemenge wird bei einer Temperatur von ca. 1400 °C geschmolzen. An den Spinddüsen hat das Glas noch eine Temperatur von ca. 1200 °C. Die dadurch erzeugten Filamente haben einen Durchmesser von 5 - 24 µm und sind damit nicht im kanzerogenen Bereich

6.3.2.1 Ausgangsmaterialien (Autor: Weimer, Timo)

a) Übersicht der untersuchten Fasern

Zu den wichtigsten Glasfasertypen zählen C-Glas, D-Glas, E-Glas, R-Glas, S-Glas und AR-Glas. Im Projektraum der Vorversuche E-Glasfasertypen und AR-Glasfasertypen untersucht (Tabelle 6. 305). E-Glasfasertypen wurden aufgrund ihres hohen Marktanteils (von ca. 90 % aller Textilglasfilamente) und der zu erwartenden guten Verwebbarkeit als potentielle Faser in Betracht gezogen. AR-Glas verspricht u.a. deshalb Erfolg, da die Fasern im Vergleich zu anderen Glasfaserarten sehr alkaliresistent ist.

Tabelle 6.305

Garn-nr.	Garn-material	Bezeichnung	Hersteller	Schlichte	Garn-feinheit (tex)	Drehung (T/m)	Menge	UD-Dre-hergewebe	Bemerkung
1	E-Glasroving	StarRov 086	John Mans-vile	Silanschlichte f. Epoxiharz	1.200	ohne	Restrovong	gefertigt	gute Laufeigenschaft, relativ starker Abrieb
2	E-Glasroving	StarRov 086	John Mans-vile	Silanschlichte f. Epoxiharz	600	ohne	mehrere Rovings	gefertigt	gute Laufeigenschaft, normaler Abrieb
3	E-Glasroving	SE 4535	3B	Schlichte für Polyamid 6.	600	ohne		/	/
4	E-Glasroving	886	John Mans-vile	Schlichte für Polyamid 6.	2400		/	/	/
5	E-Glasroving gezwirnt	EC-9 136X5 S135 TD37 C	Culimeta	nicht bekannt	136*5=680	135 S	1 Spule	gefertigt	gute Laufeigenschaft (auch mit 630 Glasgarn lufttexturiert)
6	AR Glas roving	/	Owens Corning	alkaliresistent	640	ohne	1 Roving ca. 6 kg	gefertigt	starke Filamentierung (nicht geeignet für Kette)
7	AR Glas-roving	/	Owens Corning	alkaliresistent	1.200	ohne	1 Roving ca. 7,5 kg	gefertigt	starke Filamentierung (nicht geeignet für Kette) Schusseintrag musste 4x abgesaugt werden
8	E-Glasroving lufttexturiert	k.a.	über Firma Essers, Lieferant k.A	k.A.	630	ohne	/	gefertigt	gute Laufeigenschaft,
9	AR Glas-roving	AR640S-920	Nippon Electric Glass	alkaliresistent	640	ohne	1 Roving ca. 6,9 kg	gefertigt	gute Laufeigenschaft, normaler Abrieb
10	AR Glas-roving	AR1200S-920	Nippon Electric Glass	alkaliresistent	1.200	ohne	1 Roving ca. 8,6 kg	gefertigt	gute Laufeigenschaft, normaler Abrieb

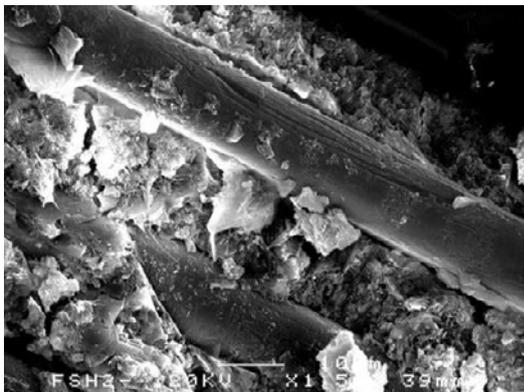
Getestete Glasfasern

Die Garne aus Tabelle 6.305 wurden einzeln und verwebt zu Flächengeweben für Verbundtests s. 6.3.2.3 genutzt. E-Glasfasertypen sind ohne Schwierigkeiten in großen Mengen verfügbar. Nachdem die Vorversuche

gezeigt haben, dass die alkalische Umgebung der Bläh-/Wasserglasrezeptur die E-Glasfasern zu stark angreift wurde am Ende für AR-Glasfasern entschieden. Sie halten eine solche alkalische Umgebung aus ohne größeren Schaden zu nehmen, jedoch ist die Verfügbarkeit von AR-Glasfasern auf dem Weltmarkt deutlich geringer, der Preis entsprechend höher. AR-Glasfasern sind speziell für den Bausektor hergestellte Glasfasern, sie werden vor allem als Faseranteil dem Beton zugemischt und zeichnen sich durch eine überlegene Alkali-Resistenz aus. Aufgrund der durchgeführten Vorversuche ist dabei die Auswahl auf die AR-Glasfaser AR640S-920 von Nippon electric glass gefallen. Alle E-Glasfasern sind aufgrund der oben beschriebenen Problematik nicht verwendbar. Aufgrund einer daraus folgenden Zusammenarbeit mit Nippon electric glass gelang es, die für die Herstellung der Versuchsmuster nötige AR-Glasfasermenge bereitgestellt zu bekommen.

b) Alkali-Resistenz von AR-Glasfasern

Abbildung 6.314



AR Glasfasern der Firma Saint Gobain Vetrotex mit einem Gewichtsanteil von 16,6% ZrO₂ in CEM II 32.5R Zement, Einwirkdauer 14 Tage²

Um Glasfasern gegenüber einer alkalischen Umgebung eine Resistenz zu verleihen, wird Zirkonium Oxid als Additiv verwendet. Das lässt die Widerstandsfähigkeit der Glasfasern gegenüber einer alkalischen Umgebung (zum Beispiel Beton) ansteigen². Dennoch kann die Faser noch nach langer Zeit durch alkalische Lösungen korrodieren und die Festigkeit nimmt ab³. Der Einsatz von AR-Glasfaserverstärkten Beton z.B. wird aufgrund der starken Festigkeitsabnahme durch die stattfindende Korrosion in Meerwasserumgebung komplett abgeraten. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass der alkalische Beton auch eine AR-Glasfaser angreift, jedoch diese deutlich resistenter dagegen ist als zum Beispiel eine E-Glasfaser. Nach ca. 90 Tagen scheinen die Effekte des alkalischen Betons auf die AR-Glasfaser soweit abgeschlossen zu sein, dass sich kaum noch nennenswerte Unterschiede in der Biegefestigkeit zeigen. Abbildung 6.314 ist zu entnehmen, dass eine Schädigung der AR-Glasfasern durch den Beton oberflächlich stattfindet, jedoch sieht die Faser für sich genommen relativ intakt aus. Die Veränderungen der Biegefestigkeit sind deshalb vermutlich auf die Verbindung zwischen Faser und Beton zurückzuführen.

6.3.3 Verbundverhalten zwischen Basaltrovings/Basalttextil und Schaumbeton

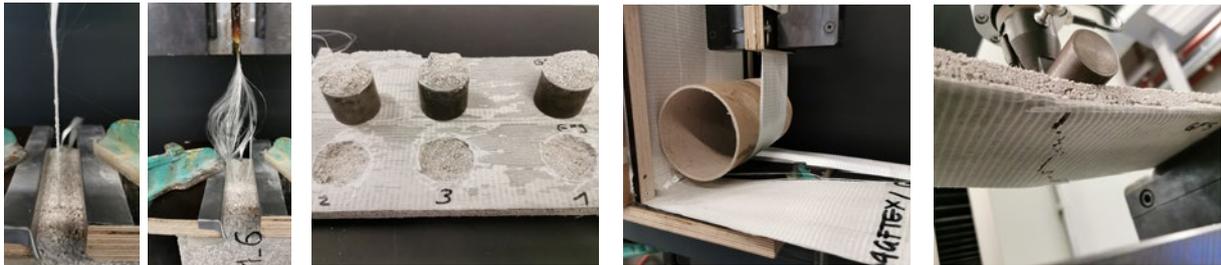
Ziel ist die Auswahl einer geeigneten Faser für die Anwendung als Fasermaterial in Kombination mit der alkalischen Matrixfüllung aus Bläh- und Wasserglas. Bei den für die Auswahl der Fasern notwendigen Versuchen wird besonderes Augenmerk auf das für den Lastabtrag relevante Verbundverhalten zwischen Füllstoff und Glas-Roving bzw. Glasfasertextil gelegt. Die Größe der Zugfestigkeit aller untersuchten Fasern ist bei allen Faservarianten für die vorgesehenen Anwendungen ausreichend. Das Ver-

² A. NOURREDINE, „Influence of curing conditions on durability of alkali-resistant glass fibres in cement matrix,“ Université de Annaba, Algérie, 2010.

³ T. Kokubo und H. Takagi, „Alkali-Resistant BaO TiO₂-SiO₂ Glasses,“ Bulletin of the Institute for Chemical Research, KyotoUniversity, 1981.

bundverhalten wird anhand von Pull-Out-, Haftzug-, Peel-Off- und Biegezugversuchen in Kombination mit einer Füllrezeptur und insgesamt 10 verschiedenen Glas-Roving-Varianten untersucht. Abbildung 6.315 zeigt die Übersicht der durchgeführten Prüfungen zur Bestimmung des Verbundverhaltens. Nicht abgebildet sind die ausserdem durchgeführten Zugversuche und Untersuchungen zur Faserschädigung unter dem Mikroskop mit dem Auflichtmikroskop-System Eclipse LV 100D von Nikon. Zur genaueren Beschreibung des Versuchsaufbaus und der verwendeten Prüfmaschinen s. Anlage 2, Abschnitt 6.3.2.2

Abbildung 6.315



Übersicht über die durchgeführten Verbundprüfungen im Labor für Baustoffkunde, Bauphysik und Bauwerkserhaltung der FRA-UAS, von links nach rechts Pull-Out-, Haftzug-, Peel-Off und Biegezugversuche

Auf Basis der Ergebnisse der nachfolgend dokumentierten und durchgeführten Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen Glasfaser-Rovings und Bläh-/Wasserglas-Matrix werden für die nachfolgende Produktion der Abstandstextilien am Deutschen Institut für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF) und für die Dimensionierung des Demonstrator-Bauteils Materialkombinationen ausgewählt.

6.3.3.1 Pull-Out-Versuch

Untersuchungsziel ist die Verbesserung der Verbundwirkung mit der Befüllmatrix, dies wird in drei Schritten mit allen Glasrovings ausser GF 3 durchgeführt, Abb. 6.316 zeigt die Probekörperherstellung exemplarisch für die Versuchsreihe A

- Auszugversuche an unbehandelten Rovings (Versuchsreihe A-Betol und B-Geosil/Stabilisil)
- Auszugversuche an mit Geosil/Sand vorbehandelten Rovings (Versuchsreihe C)
- Auszugversuche an vorbehandelten Rovings gemäß 2.) und zusätzlicher Temperaturbehandlung

Abbildung 6.316



Probekörperherstellung für Pull-Out-Versuche

Auszugversuche an unbehandelten Rovings (Versuchsreihe A-Betol und B-Geosil/Stabilisil) Das Verbundverhalten unbehandelter Rovings wird mit Einkornmischungen der Korngruppen 2-4 mm bzw. 1-2 mm untersucht. Es wurden die Fasern GF 1, 2 und 4 verwendet. Fazit: Der Verbund zwischen Matrix und eingebetteten Glasfasern liegt auf einem extrem niedrigen Niveau. Die maximal aufnehmbare Kraft liegt maximal in der Größenordnung von 15 N (σ_{\max} ca. 35 N/mm²). Das Versagen erfolgt ohne visuell wahrnehmbare Schädigung der Glasfasern infolge des Versagens des Verbunds zwischen Glasfaser und Matrix. Es ist davon auszugehen, dass das Bindemittel der Matrix nicht ausreichend tief in den Glas-Roving eindringt und demzufolge kein ausreichender Verbund stattfindet. In einer weiteren Versuchsreihe C sollen daher die Glas-Rovings vorbehandelt werden.

Auszugversuche an mit Geosil/Sand vorbehandelten Rovings (Versuchsreihe C) Die Optimierung des Verbundverhaltens durch Vorbehandlung der Rovings mit dem Bindemittel Geosil bzw. Sand wird an einer gefüggedichten Mehrkornmischung unter Verwendung des Bindemittels Geosil/Stabilisil (Mischungsverhältnis: Blähglas/Geosil/Stabilisil: 45/47/8) untersucht (Versuchsreihe C). Zum Einsatz kommen 2 AR-Glasfasern der Feinheit 1200 tex (GF7, GF10), 2 AR-Glasfaser der Feinheit 640 tex (GF6, GF9), sowie 3 E-Glasfasern (GF2: 600 tex, GF5: 680 tex, gezwirnt, GF8: 630 tex lufttexturiert). Die Fasern werden vorbehandelt, um das Eindringen bis ins Innere des Glas-Rovings zu erreichen, eine Aktivierung der inneren Filamente zu bewirken und einen besseren Verbund zwischen Roving und Füllmatrix zu erzielen. Das Einfüllen der Matrix erfolgt „frisch in frisch“, d.h. unmittelbar nach der Vorbehandlung der Glasfasern. Im Anschluss an die Befüllung werden die Probekörper für einen Zeitraum von 24 Stunden bei 80 °C gelagert, ausgeschalt und nach Auskühlen geprüft. Die Ergebnisse zeigt Tabelle Tabelle 6.306.

Variante 1: Vorbehandlung der Fasern mit dem Bindemittel Geosil/Stabilisil

Variante 2: Vorbehandlung s.o und Abstreuerung der Rovings mittels Blähglas 0,25 – 0,5 mm

Tabelle 6.306

Garn-nr.	Garn-material	Garnfeinheit	Befüllmaterial (Blähglas 0,25-0,4 mm / Geosil / Stabilisil)	Mittlere max. Kraft (F max in N)	Standard- abweichung (N)	Zugspannung (σ_{\max} = N/mm ²)
GF 7	AR Glas- roving	1.200	45 / 47 / 8	103,3 (116,4)	39,2 (7,8)	235 (264)
GF 10	AR Glas- roving	1.200	45 / 47 / 8	124,3 (129,4)	45,8 (12,2)	282,3 (294,3)
GF 6	AR Glas- roving	640	45 / 47 / 8	34 (35,9)	8,7 (11,3)	144,7 (152,6)
GF 9	AR Glas- roving	640	45 / 47 / 8	37,3 (nicht untersucht)	25,8 (nicht untersucht)	158,6 (nicht untersucht)
GF 2	E-Glasroving	600	45 / 47 / 8	Versagen vor Prüfung (nicht prüfbar)		
GF 5	E-Glasroving gezwirnt	36*5=680	45 / 47 / 8	Versagen vor Prüfung (nicht prüfbar)		
GF 8	E-Glasroving lufttexturiert	630	45 / 47 / 8	6,5	4,9	28,3

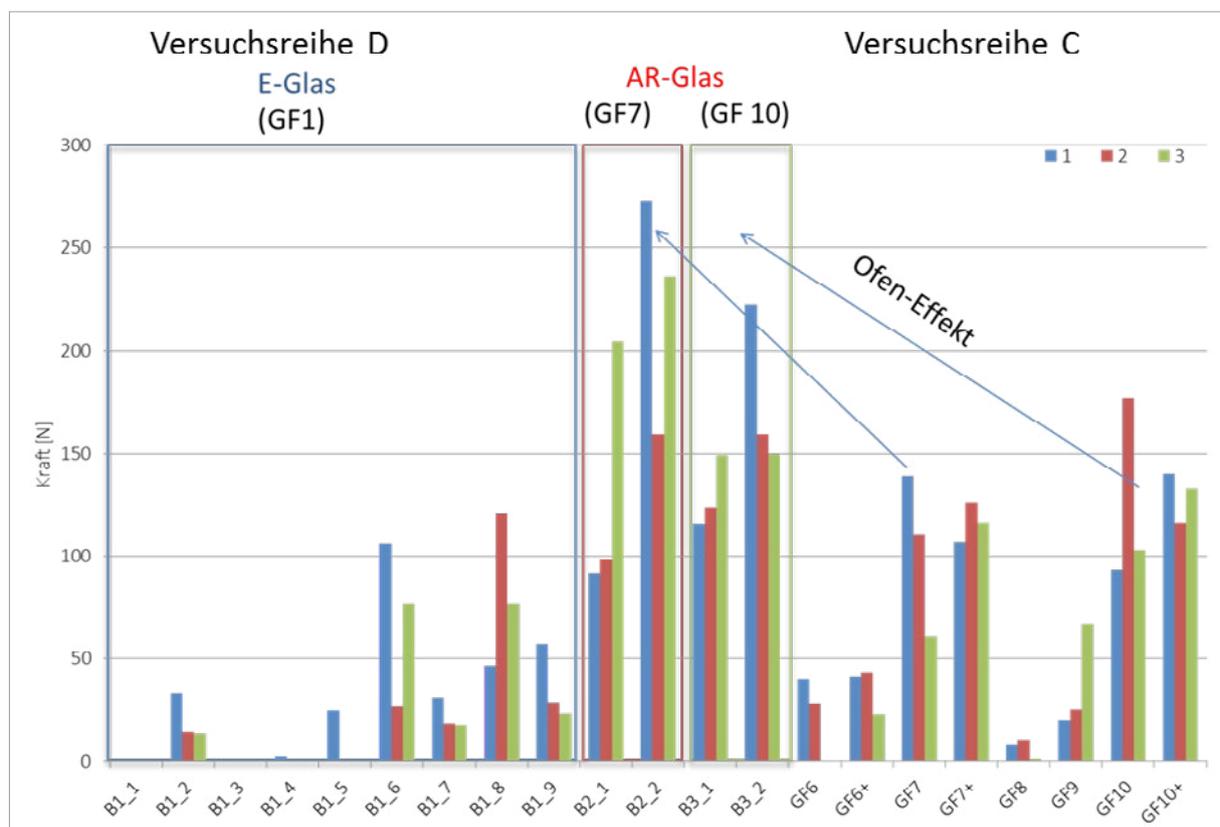
Prüfergebnisse Versuchsreihe C, Ergebnisse zu den vorbehandelten Rovings gem. Variante 1 und Variante 2 (Variante 2 dargestellt invers und in Klammern)

Ergebnis: Bei den mittels Bindemittel vorbehandelten Glas-Rovings aus AR-Gläsern werden zufriedenstellende Ergebnisse im Pull-Out-Versuch erreicht. Eine zusätzliche Abstreuerung resultiert lediglich in einer geringfügigen Steigerung der aufnehmbaren Zugkräfte. Das Versagen tritt außerhalb der Proben im Glasroving auf und erreicht bei einer Feinheit des Rovings von 1200 tex eine Zugspannung σ_{\max} in der Größenordnung von > 250 N/mm² (GF7, GF10). Bei geringerer Feinheit des Rovings von 640 tex (GF6, GF9) erreicht die Zugspan-

nung σ_{\max} Werte in der Größenordnung von $> 140 \text{ N/mm}^2$. Ob die Verbesserung des Verbundverhaltens der AR-Glasfasern auf die Vorbehandlung zurückzuführen ist oder auf die Alkaliresistenz der hier untersuchten Gläser, muss weiter geklärt werden. Die E-Gläser werden durch die Vorbehandlung derart geschädigt, dass Sie keine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen.

Auszugversuche an vorbehandelten Rovings gemäß Variante C und zusätzlicher Temperaturbehandlung (Versuchsreihe D) Zuletzt ist das Ziel herauszufinden, ob einer potentiellen Schädigung von Glasfasern durch den Kontakt mit dem hochalkalischen Bindemittel Geosil/Stabilisil entgegengewirkt werden kann. Zu diesem Zweck wird der Erhärtungsprozess des Bindemittels in unmittelbarer Umgebung der vorbehandelten Fasern durch eine Temperaturbehandlung beschleunigt („Ofeneffekt“), s. Abb 6.317. In dieser Versuchsreihe wird die gleiche Rezeptur wie in der vorangegangenen Versuchsreihe C verwendet. Hier kommen Glasfasern der Feinheit 1200 tex zum Einsatz: 1 E-Glasfaser (GF1), an der zahlreiche Trocknungszeiträume untersucht werden sowie vergleichend dazu zwei AR-Glasfasern verschiedener Hersteller: (GF7, GF10).

Abbildung 6.317



Probekörperherstellung für Pull-Out-Versuche

B1_1 E-Glas- Roving unbehandelt direkt von der Matrix ummantelt und unmittelbar bei 80 °C thermisch aktiviert

B1_2 E-Glas- Roving vorbehandelt: Ummantelung bei 80 °C thermisch aktiviert, befüllt und bei 80 °C die Matrix aktiviert

B1_3 E-Glas- Roving vorbehandelt wird, befüllt und im Anschluss die Aktivierung bei 80 °C

B1_4 E-Glas- Roving vorbehandelt, befüllt und im Anschluss die Aktivierung bei 180 °C

B1_5 bis B1_9 E-Glas- Roving vorbehandelt, befüllt nach 5 Min / 15 Min / 45 Min / 60 Min und 180 min und im Anschluss die Aktivierung bei 180 °C

B2_1 und B3_1 AR-Glas-Roving unbehandelt , befüllt und im Anschluss die Aktivierung bei 80 °C

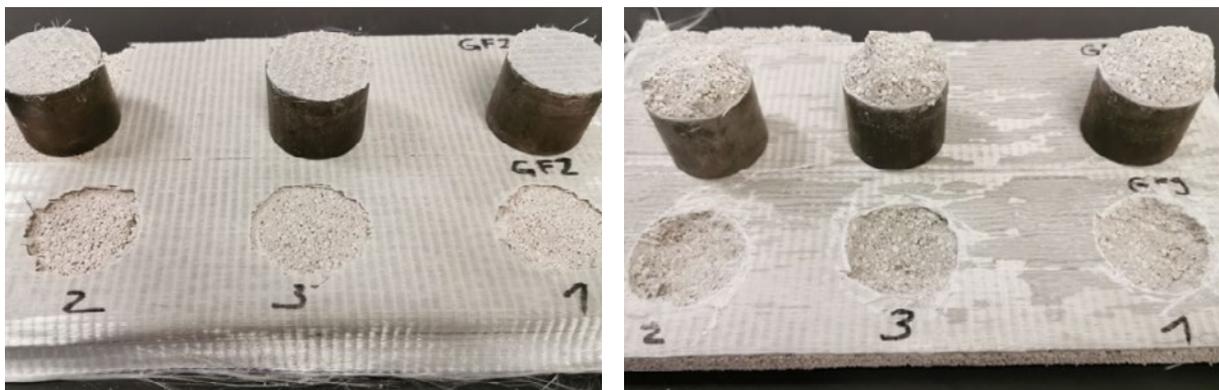
B2_2 und B3_2 AR-Glas-Roving behandelt , befüllt und im Anschluss die Aktivierung bei 80 °C

Ergebnis: Die Pull-Out-Versuche der Versuchsreihe zeigen, dass sich bei den AR-Gläsern der Feinheit 1200 tex (GF 7, GF 10) ein sehr gutes Verbundverhalten im Auszugversuch einstellen lässt, wenn die Vorbehandlung der Fasern mit Wasserglas vor Befüllen der Matrix zusätzlich durch thermische Aktivierung erfolgt („Ofeneffekt“).

6.3.3.2 Haftzugversuche

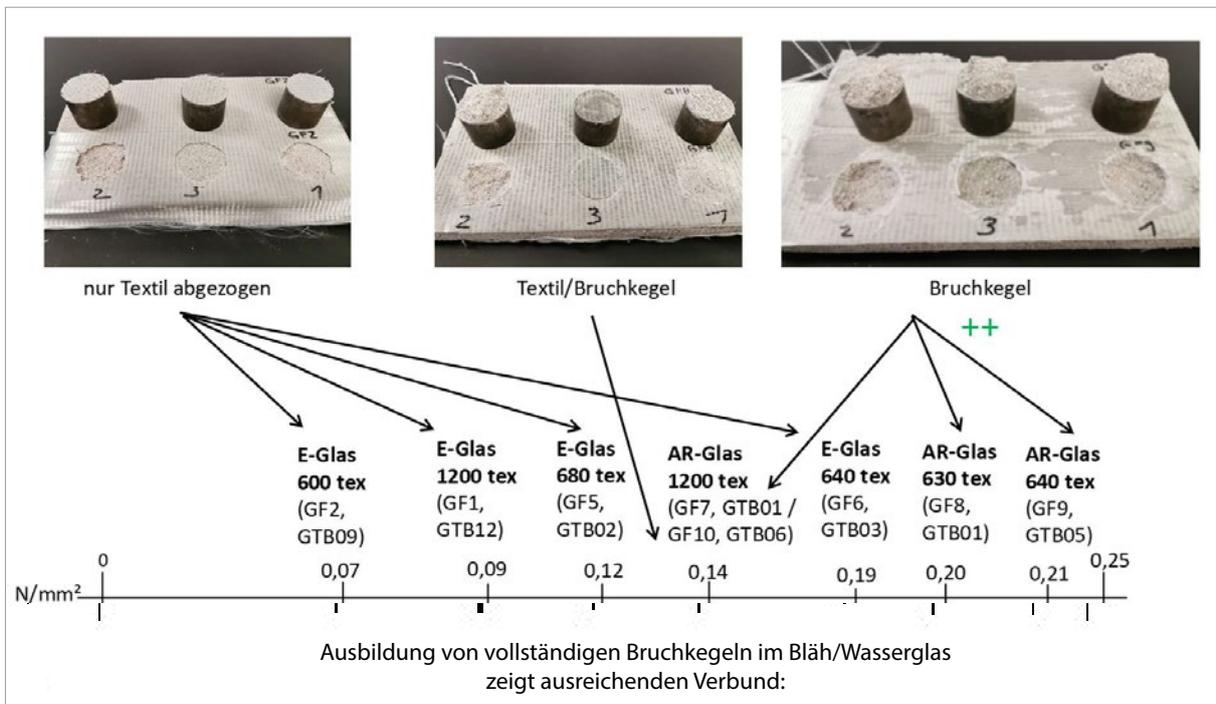
Bei den Pull-Out-Versuchen wird der Verbund der Rovings in der Matrix betrachtet - entsprechend der späteren Position der Polfäden bei befüllten Abstandstextilien. Bei den Haftzugversuchen steht im Gegensatz dazu die Haftung der Decklagen der Abstandstextilien im Fokus. Untersucht wird entsprechend, welches Textilgewebe die größte Haftzugfestigkeit aufweist.

Abbildung 6.318



Versagensbilder nach einem Haftzugversuch, links: Versagen zwischen Faser und Matrix bei „geringem“ Verbund; rechts: Versagen in der Matrix bei gutem Verbund

Abbildung 6.319



Ergebnisübersicht – Haftzugversuche

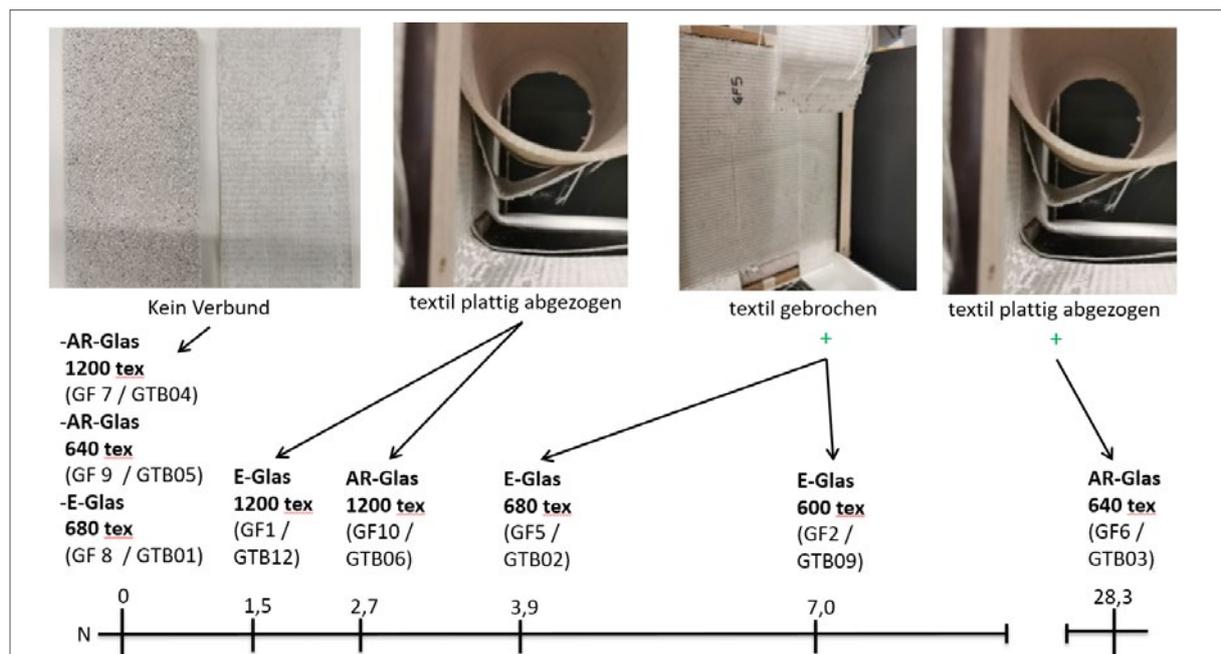
Zur Vorbereitung der Probekörper werden die Textilgewebe in eine Schalung (34 x 30 x 2 cm) eingelegt, diese mittels Geosil/Stabilisil (6/1) vorbehandelt und im Anschluss „frisch in frisch“ eine dichte Kornpackung im Mischungsverhältnis Blähglas/Geosil/Stabilisil 45/47/8 mit der Kelle eingefüllt. Im Anschluss erfolgt die thermische Aktivierung des Bindemittels bei 80 °C für eine Zeitdauer von 24 Stunden. Die Haftzugversuche (gilt auch für Peel-Off-, sowie die Biegezugversuche) werden unmittelbar nach der Ofentrocknung durchgeführt. Nach den Versuchsdurchführungen zeigen sich zwei Versagensarten: 1.) Versagen zwischen Textil und Blähglasmatrix (vgl. Abbildung 6.318, links) und 2.) Versagen in der Blähglasmatrix, Ausbildung eines Bruchkegels (vgl. Abbildung 6.318, rechts). Das Versagensbild „Versagen zwischen Textil und Blähglasmatrix“ weist auf einen eher geringen Verbund zwischen Decklage und Füllmaterial hin. Das Versagensbild „Ausbildung eines Bruchkegels“ zeugt von einem sehr guten Verbund zwischen Decklage und Füllmaterial und stellt den Optimalfall dar.

Abbildung 6.319 zeigt eine Ergebnisübersicht der Haftzugversuche und ordnet die Festigkeiten Bruchbildern zu. Festzuhalten ist, dass das AR-Glasgewebe mit der Feinheit 640 tex (GF9) die höchste maximale Haftzugfestigkeit mit 0,21 N/mm² und als Versagensbild ein Bruchkegel aufweist. Auf Basis dieser Ergebnisse empfiehlt sich für die Auswahl der Glasfasern für das Abstandstextil die AR-Glasfaser der Feinheit 1200 tex des Herstellers Owens Corning (GF7), die AR-Glasfaser der Feinheit 640 tex des Herstellers Nippon (GF9) sowie das lufttexturierte E-Glas der Feinheit 630 tex (GF 8).

6.3.3.3 Peel-Off-Versuche

Der Verbund zwischen Textilgeweben aus unterschiedlichen Glasrovings als Decklage und der Matrix wird, neben den Haftzugversuchen, auch mittels Peel-Off Versuchen überprüft. Die Probenherstellung entspricht jener der Herstellung der Proben für die Haftzugprüfung. Die Probekörpermaße sind 34 x 10 x 2 cm³. Mit einem Probekörper werden 3 Peel-Off-Versuche durchgeführt. Für die Durchführung der Peel-Off-Versuche werden die Probekörper nach der thermischen Lagerung ausgeschalt, gedreht (damit das Glastextil frei liegt) und wieder in die Schalung eingesetzt. Die Gesamtbreite von 30 cm wird in 10 cm Streifen aufgeteilt. Für die Prüfung selbst verbleiben die Proben in der Schalung. Abbildung 6. 320 zeigt die Ergebnisse und Einordnung der geprüften Textilien. Auch hier bestätigt sich das positive Ergebnis für AR-Glas mit 640 tex.

Abbildung 6.320

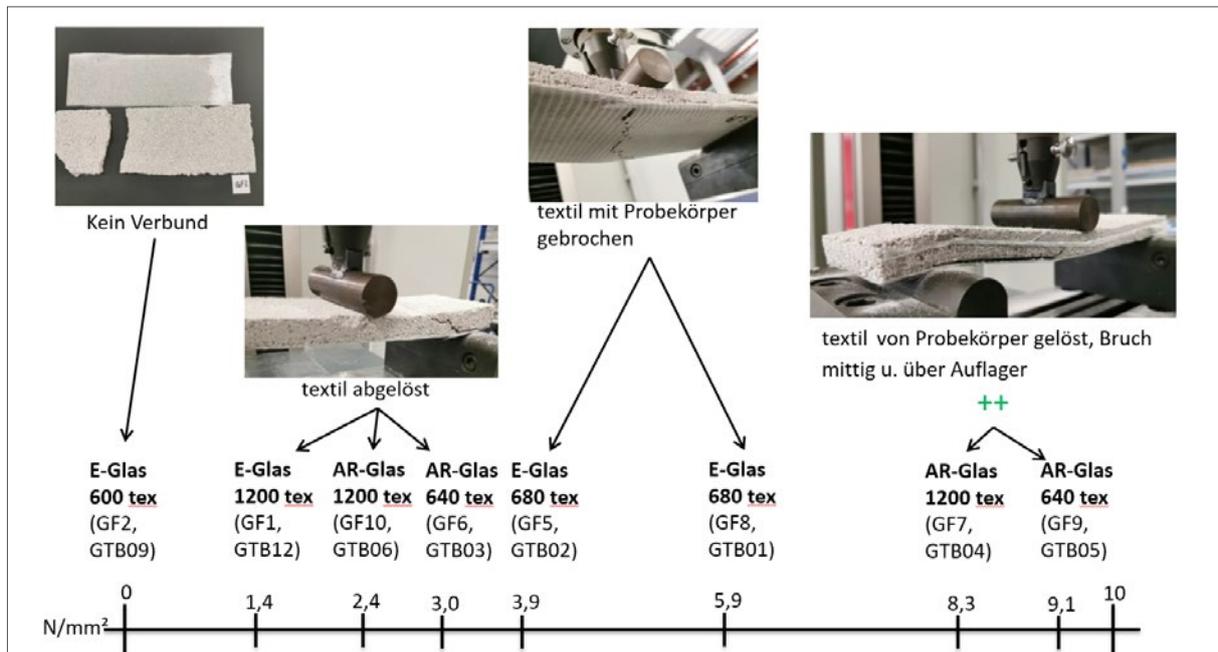


Ergebnisübersicht Peel-Off Versuche

6.3.3.4 Biegezugversuche

Ergänzend zu den zuvor beschriebenen Versuchen wird der Verbund zwischen Textilgeweben aus unterschiedlichen Glasrovings als Decklage und der Matrix im 3-Punkt-Biegezugversuche untersucht. Die Probenherstellung erfolgt analog der zuvor beschriebenen Haftzug- und Peel-Off-Versuche. Die höchsten Lastaufnahmen können bei den Textilien GF7 (AR-Glas, 1200 tex) sowie GF9 (AR-Glas, 640 tex) erreicht werden. Die Probekörper brechen mittig und anschließend über dem Lager, wodurch sich die Textilien von den Probekörpern lösen, eine Gesamtübersicht zu den Versuchen zeigt Abb. 6.321.

Abbildung 6.321



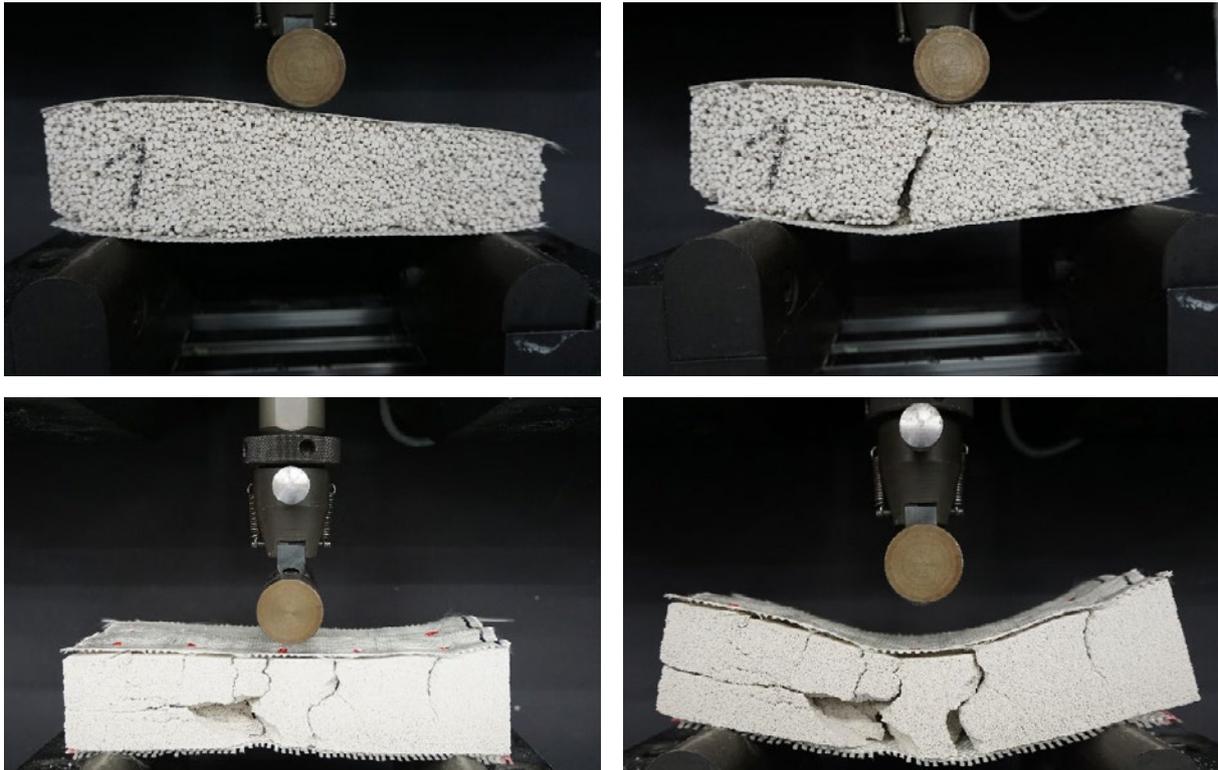
Ergebnisübersicht Biegezugversuche

Fazit der Verbundversuche: Für die Herstellung des Abstandstextils zur Fertigung erster mittelgroßer Deminstratoren wird auf Basis der durchgeführten Untersuchungen angestrebt, die AR-Glasrovings der Feinheit 1200 tex des Herstellers Owens Corning (GF7) und die AR-Glasfaser der Feinheit 640 tex des Herstellers Nippon (GF9) zu wählen. Aufgrund der sehr guten Verbundeigenschaften sind die AR-Glasrovings der Feinheit 640 tex besonders für die Verwendung in der Decklage geeignet. Im Pull-Out-Versuch, der entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Polfäden ist, schneidet dieser Roving jedoch aufgrund der geringen Feinheit nicht optimal ab. Für die Verwendung der Polfäden wird daher der AR-Glasroving der Feinheit 1200 tex vorgeschlagen, der sich durch die besten Ergebnisse in diesem Versuch auszeichnet.

6.3.4 Erste Bauteiltests, Abstandsgewebe Glas mit finaler Füllrezeptur aus Bläh-/Wasserglas Zusammenfassung

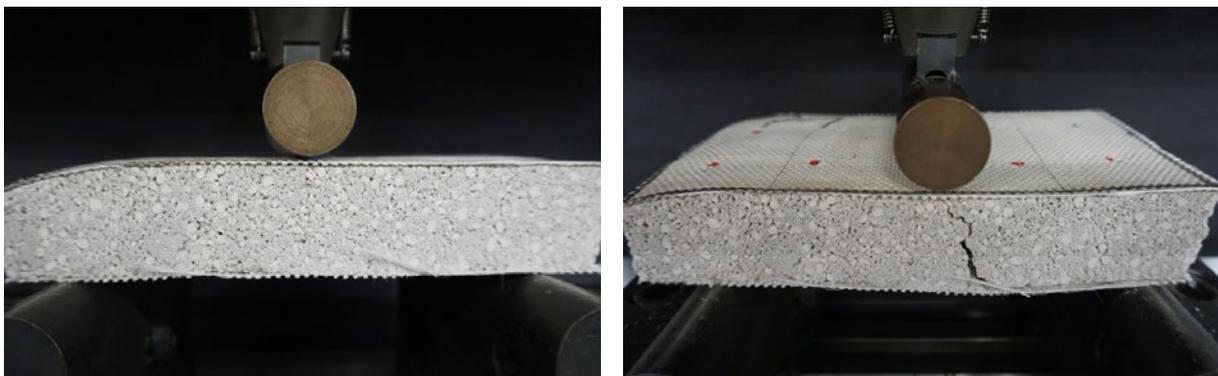
In einem letzten Entwicklungsschritt werden Abstandstextilien mit den in Schritt 1 entwickelten Bläh-/Wasserglas-Matrices (vgl. Abschnitt 6.3.1) gefüllt. Die Herstellung der Abstandstextilien erfolgt auf Basis der im Schritt 2 (vgl. Abschnitt 6.3.2) gewonnenen Erkenntnisse. Der Roving mit 1.200 tex kann allerdings aufgrund von Verarbeitungsbedenken beim Einsatz als Polfaden (maximale Knickbeanspruchung) noch nicht verwendet werden. Das Abstandstextil wird aus AR-Glas der Firma Nippon Electric Glass mit der Feinheit 640 tex hergestellt (GF9 aus Abschnitt 6.3.2). Die Glas-Abstandsgewebe werden von den DITF (Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung) in Denkendorf hergestellt.

Abbildung 6.321



Biegezugprobekörper vor und nach dem Biegezugversuch
 oben: haufwerksporiges Einkornmischung 2 - 4 mm, links: vor der Prüfung, rechts: nach der Prüfung
 unten: haufwerksporiges Einkornmischung 0,25 - 0,5 mm, links: vor der Prüfung, rechts: nach der Prüfung

Abbildung 6.322



Biegezugprobekörper vor und nach dem Biegezugversuch, Mehrkornmischung 41/39/20,
 rechts: Probekörper 1 nach durchgeführten Biegezugversuch

Befüllt werden die Taschen mit:

- > Einkornmischung 0,25 - 0,5 mm im Massenverhältnis Blähglas/Geosil/Stabilisil von 60/27/13
- > Einkornmischung 2 - 4 mm im Massenverhältnis Blähglas/Geosil/Stabilisil von 72/19/9
- > gefügedichte Mehrkornpackung 0,25 - 4 mm im Verhältnis Blähglas/Geosil/Stabilisil von 41/39/20.

Die Herstellung der Probekörper ist in Abschnitt 7.2.2 beschrieben. Trotz der überraschend aufgetretenen Probleme der Schädigungen der Polfäden im Bereich der Umlenkungen (Knickstelle) der Decklagen konnten mit einer geänderten Vorbehandlung des Abstandstextils (Reduktion des Stabilisilanteils gegenüber dem Geosil im

Slurry) und einem teils neu justierten Befüllprozess s. auch Abschnitt 7.7.7 zumindest einige Probekörper hergestellt werden. Die damit durchgeführten Biegezugversuche zur Evaluation des Tragverhalten bei Befüllung des Glasfaser-Abstandstextils mit haufwerksporogen Einkornmischungen zeigt Abbildung 6.321. Abbildung 6.322 zeigt unten die Versuche mit einer Befüllung mit dem o.g. Mehrkornmisch.

Ergebnis: Bei allen drei Versuchsreihen s. Abb. 6.322 und 6.323 versagen die Polfäden, sind die Prüfkörper teils schwer geschädigt und selbst bei der letzten Prüfreihe mit einer gefügedichte Mehrkornpackung zeigen die Ergebnisse der Biegezugversuche, dass mit den befüllten Abstandstextilien bei Weitem nicht die Biegezugfestigkeiten zu erreichen sind, die mit dem vorbehandelten Textil des AR-Glasrovings in Abschnitt 6.3.2.3, vgl. Abbildung 6.321 ermittelt werden. Zu erwarten ist, dass die Biegezugfestigkeit im Abstandstextil über dem dort ermittelten Wert der Biegezugfestigkeit von $9,2 \text{ N/mm}^2$ liegt.

Der neue Partner Pile Fabrics fertigt derzeit Glas-Abstandstextilien mit weniger dichten Decklagen, so daß die Versuche nach Abschluss des Projekts noch ergänzt werden können.

6.3.5 Zusammenfassung

Abbildung 6.323 zeigt die Entwicklung unterschiedlichen Bläh-/Wasserglasmatrices im Überblick. Abbildung 6.324 zeigt beispielhaft ein mit einer gefügedichten Bläh-/Wasserglasmatrix befülltes AR-GLasgewebe. Unter der Voraussetzung, daß durch eine verbesserte Ausführung der Rovings die Schädigung der Polfäden reduziert werden kann, stehen so alle Bestandteile für homogen befüllte Bauteile unterschiedlicher Dichten wie auch für graduell unterschiedlich befüllten Gewebe zur Verfügung. Zudem können je nach Gewebeausführung auch einseitig gekrümmte Bauteile hergestellt werden.

Abbildung 6.322



oben: Unterschiedliche Bläh-Wasserglasmatrices , die für ge3TEX entwickelt wurden; unten: Befülltes AR-Glas Abstandstextil

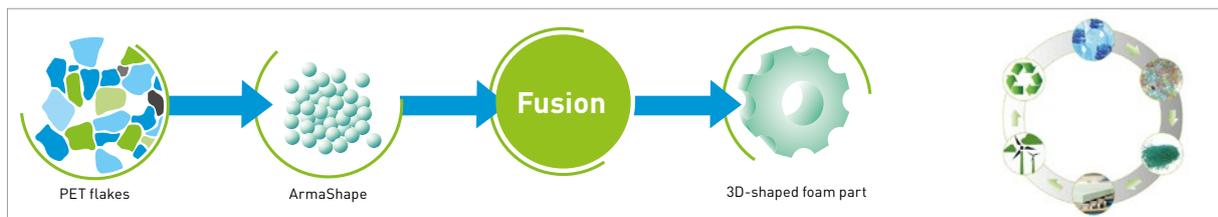
6.4 PET Fasern bzw. PET Textilien in Kombination mit PET Schäumen (s. auch Anlage 3, Autorin Beuscher, Johanna)

6.4.1 PET Schaum

6.4.1.1 /2 Allgemeines, Kategorisierung und Eigenschaften

Der PET Schaum wird vom Projektpartner Armacell Benelux S.C.S. zur Verfügung gestellt. Armacell ist führender Hersteller für rezyklierbare PET-Schäume (Block- wie auch Folien und Partikelschäume) und maßgeblicher Innovator in dem Bereich für Anwendungen im Windenergiesektor, der Bauindustrie, im Verkehrswesen und der Schiffsbauindustrie Einsatz. Sie werden unter anderem für weitgespannte Konstruktionen wie Rotorblätter von Windkräftenanlagen aber auch im Bauwesen für gebogene Kuppelkonstruktionen verwendet und durch Fräsen, Einschneiden und Thermoformen angepasst und verformt. Die bei der Plattenherstellung und beim Formen von Bauteilen anfallenden Abfälle aus Schneidprozessen können wieder aufgeschmolzen und dem Schaumextrusionsprozess zugeführt werden. PET-Partikelschäume von Armacell werden zu 100% aus PET-Flaschen hergestellt, damit handelt es sich bei dieser Materialkomponente bereits um ein Rezyklat im zweiten Lebenszyklus. Bei der Herstellung werden pro Kilogramm Beads ca. 50 PET-Flaschen mit einem Gewicht von je ca. 20g verwendet. Es gibt demnach keinen oder kaum Materialverlust bei der Erzeugung des PET-Granulats.

Abbildung 6.400



©Armacell, Verarbeitungsprozess von PET-Flakes über die Herstellung der Schaumperlen zum verschweißten Formteil, rechts aussen der geschlossener Materialkreislauf von PET-Schäumen

PET Partikelschäume (E-PET) sind eine Neuentwicklung von Armacell und wurden 2018 in den Markt eingeführt. Als Treibmittel kommen u.a. CO₂, Kohlenwasserstoffe und alternative Treibmittel aus der 4. Generation von Kältemitteln zum Einsatz, welche u.a. auch in Klimaanlage verwendet werden. Diese Treibmittel haben ein sehr geringes Erderwärmungspotential (GWP < 7, vergleichbar mit Kohlenwasserstoffen) und ein Ozonabbaupotential (ODP) nahe 0. Die Halbwertszeit in der Atmosphäre ist sehr kurz und die Zerfallsprodukte haben laut Studien keine negativen Einflüsse auf die Umwelt. Die Partikelschäume können in Formwerkzeuge gefüllt und zu fertigen Bauteil verschweißt werden. In ge3TEX wird untersucht, wie durch die textile Schalung auf kostenintensive und Bauteilgrößen limitierende Formwerkzeuge verzichtet werden kann und gleichzeitig die mechanischen Kennwerte des anvisierten neuen Verbundwerkstoffs durch die Textilanteile optimiert werden können.

Kategorisierung und Eigenschaften: ArmaShape Schaumperlen (Beads) werden in zwei Größen hergestellt.

- ArmaShape, Bead-Größe von ca. 3 mm Durchmesser, geeignet zur Herstellung komplexer Formteile mit Dichten im Bereich von 70 - 300 kg/m³
- ArmaShape Filler, Bead-Größe von ca. 6,5 mm Durchmesser und Ausgangs-Schüttdichte von 160kg/m³

Tabelle 6.400 zeigt beispielhaft Kennwerte des Schüttguts und Kennwerte endexpandierter Produkte. In industriellen Prozessen kann die gewünschte Dichte mit geringen Toleranzen (<5%) eingestellt werden, Das Material bleibt auch nach dem Schäumen thermisch formbar. Als Treibmittel für den Aufschäumprozess kön-

Tabelle 6.400

		ArmaShape	ArmaShape
		B/ 160	B/ 220
Bulk density	kg/m ³	160	220
	lb/ft ³	10.00	13.7
Bead size	mm	6.5	3.0
	inch	0.26	0.12
Expanded bulk density*	kg/m ³	130	95
	lb/ft ³	8.1	5.9

Daten Schüttgut PET-Partikelschaum im nicht vorexpandierten und expandierten Zustand nach Herstellerangaben Fa. Armacell, Produkt „Armashape Filler“ (All values are nominal. * Reference value: at 160°C / 30 minutes. Varies depending on process)

nen Kohlenwasserstoffe oder CO₂ eingesetzt werden. Die Kohlenwasserstoffe werden von PET-Beads besser gehalten als von anderen Partikelschäumen und machen sie so auch länger haltbar. Der Einsatz alternativer Treibmittel zur Optimierung der Schäumergebnisse wird durch Armacell vorangetrieben. Dem Projekt werden im Verlauf handelsübliche Beads zur Verfügung gestellt, siehe Kennwerte zu entsprechenden Beispielplatten aus ArmaShape 90-200 in Tabelle 6.401. Die Entwicklung von Schaumperlen mit Hybridcoating zur besseren An- und Verbindung in Compositbauteilen wurde parallel zur Projektlaufzeit durch Armacell in Zusammenarbeit mit Fa. Swiss cmt betrieben, siehe Kennwerte zu „ArmaShape Hybrid Coated“ in derselben Tabelle rechts aussen.

Tabelle 6.401

			ArmaShape	ArmaShape	ArmaShape	ArmaShape	ArmaShape	ArmaShape
			90	115	160	200	200 *	Hybrid Coated
Density Moulded Part	ISO 845	kg/m ³	90	115	160	200	200	200
		lb/ft ³	5.6	7.2	10.0	12.5	12.5	12.5
Compression Strength (25% deformation)	ISO 844	MPa	0.45	0.65	1.2	1.6	1.8*	1.8*
		psi	65	95	175	230	260	260
Compression Modulus	ISO 844	MPa	7	10	16	22	35	35
		psi	1,015	1,450	2,320	3,190	5,076	5,076
Shear Modulus	ISO 1922	MPa	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	18	18
		psi	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	2,610	2,610
Shear Strength	ISO 1922	MPa	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1.05	1.05
		psi	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	150	150
Shear Elongation		%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	9%	9%
Thermal Conductivity	at 23 °C	W/(m·K)	0.034	0.035	0.042	0.043	k.A.	k.A.
	at 73.4 °F	BTU.in/FT ² .hr.°F	0.236	0.243	0.291	0.298	k.A.	k.A.
Cell Diameter		µm	< 500	< 500	< 500	< 500	k.A.	k.A.

links: Kennwerte für Formteile aus PET Partikelschaum nach Herstellerangaben Fa. Armacell, Produkt „Armashape“

rechts: Kennwerte für Formteile aus PET Partikelschaum nach Herstellerangaben Fa. Armacell, Produkt „ArmaShape Hybrid Coated“

ACHTUNG: Die Kennwerte ArmaShape und ArmaShape Hybrid Coated sind nicht durchgängig mit Formteilen aus Partikelschaum zu vergleichen, da bei der Herstellung verfahrenstechnische Unterschiede bestanden.

* Armashape Hybrid Coated ist eine Neuentwicklung von Armacell in Kooperation mit swiss cmt. Es handelt sich um beispielhafte technische Kennwerte die an einem repräsentativen Plattenbauteil ermittelt wurden.

** 10% deformation

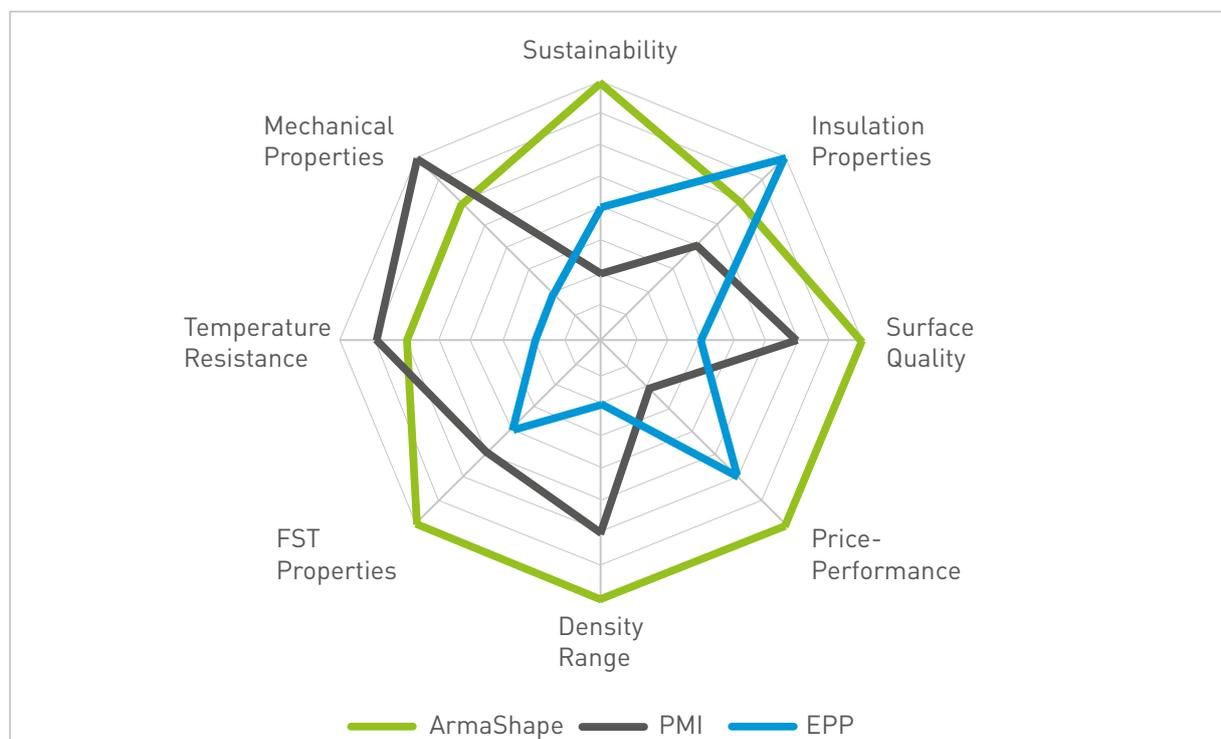
Mechanische Eigenschaften PET-Partikelschaum ist hochtemperaturstabil und weist eine große Temperatur- und Formbeständigkeit bis +150°C und kurzfristig bis +180°C auf. Im direkten Vergleich zeigen PET-Formteile eine weitaus höhere Dimensionsstabilität als EPP und EPS-Schäume. Die Verformung von Platten aus PET-Partikelschaum nimmt unter steigenden Temperaturen zu. Dabei nimmt die Druckfestigkeit eines Bauteils mit steigender Umgebungstemperatur von ca. 1,8 Mpa (20°C) auf ca. 0,3 MPa (150°C) ab.

Bauphysikalische Eigenschaften In Abhängigkeit von Rohdichten zwischen 90-200 kg/m³ lassen sich mit PET-Partikelschäumen Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,034 und 0,043 W/(m k) erzielen.

Brennbarkeit PET-Partikelschäume sind derzeit noch nicht einer feuerhemmender Variante (FR) verfügbar. PET-Partikelschäume sind jedoch hitzeresistenter als andere Schäume und ihre flammhemmende Eigenschaften könnten zukünftig durch die Zugabe von Additiven verbessert werden. Es sind mit dem Produkt ArmaForm FR bereits Blockschaumplatten der Brandschutzklasse B2 auf dem Markt erhältlich. Nach EU-Norm (DIN EN 13501) entspricht dies der Klassifizierung D-s2 d0, normal entflammbar, mit begrenzter Rauchentwicklung, ohne Abtropfen. Die hierbei verwendeten Brandverzögerer sind halogenfrei und beeinträchtigen die Rezyklierfähigkeit des Schaums nach dem Ende der Lebensdauer nicht negativ. Erste Tests des Herstellers mit ArmaShape zeigen ein gutes Potential für die zukünftige Entwicklung eines Partikelschaums mit feuerhemmenden Eigenschaften. Im Allgemeinen ist die Brennbarkeit insbesondere von der brennbaren Masse abhängig, wodurch Produkte mit geringerer Dichte bessere Klassifizierungen bezüglich des Brandverhaltens erzielen können.

Eine Evaluation ausschlaggebender Materialeigenschaften von PET-Partikelschäumen im Vergleich zu PMI und EPP findet sich in der Abbildung 6.401, Das GWP (100a) für Armashape (EPET) liegt bei 218 im Vergleich zu 361 bei EPS und 744 bei PMI, laut einer Übersicht von Armacell. Werte für den PEI sind (noch) nicht erhältlich.

Abbildung 6.401



©Armacell, Evaluation von PET-Partikelschaum gegenüber PMI und EPP-Schäumen

6.4.1.3 Herstellungsprozess

Für das Aufschäumen und Verschweißen der PET-Partikelschäume werden derzeit unterschiedliche Verfahren untersucht und teils bereits angewendet. Es wird hierbei zumeist in einem zweistufigen Prozess gearbeitet: Die PET-Partikel werden zunächst durch Vorschäumen auf die gewünschte Dichte gebracht. Daraufhin folgt eine mehrtägige Stabilisierungsphase in welcher ein Gasaustausch mit der Umgebungsluft stattfindet und der Druckunterschied zwischen dem Innendruck der Schaumperle und dem Umgebungsdruck abgebaut wird. In der Folge steht für den zweiten Schritt, das finale Schäumen und Verschweißen, wieder das Treibmittelpotential der Beads zur Verfügung.

a) Stand der Technik Aufschäumverfahren

Vorschäumen mit Dampf Wie andere Partikelschäume kann ArmaShape im Rohzustand zunächst auch mit Dampfdruck unter 150°C vorgeschäumt werden. Dampf betriebenen Anlagen kommen bei ArmaShape eher zur Herstellung höherer Dichten zur Anwendung. Hier werden mit heißem Wasserdampf und Drücken von 4 bar Schüttdichten oberhalb von 100 kg/m³ erreicht. Die benötigte Infrastruktur für Dampfdruckanlagen ist relativ

Abbildung 6.402



©NMB, IR- Vorschäumer der Neue Materialien Bayreuth GmbH

umfangreich, ausserdem erfordert sowohl die Herstellung des Wasserdampfs als Energieträger als auch die Trocknung der Schaumperlen einen hohen Ressourceneinsatz.

Vorschäumen mit IR PET-Schaumperlen können dampffrei und trocken mit Infrarot-Strahlungsanlagen, wie sie zum Beispiel von der Firma FOX Velution auf den Markt gebracht werden, vorgeschäumt werden. Vorteil hierbei sind die kurzen Durchlaufzeiten. Zudem entfällt die Trocknung der Perlen. Es ist möglich die Stärke der IR- Felder zu regeln und die Bestrahlungsdauer durch die Fließbandgeschwindigkeit genau einzustellen. Generell ist zu beachten, dass PET auf Grund der Carboxylgruppen langwellige IR Strahlung besser absorbiert als kurzwellige. Mit der IR-Technik können heute PET-Partikel präzise einstellbar, bis zu einer minimalen Dichte von 40 kg/m³ vorgeschäumt werden, s.Abb. 6.402. In diesem Fall werden die Perlen als loses Schüttgut verwendet, um sie beispielsweise als Füllstoffe in Polymerschmelzen einzuarbeiten. Perlen mit Dichten oberhalb von 70 kg/m³ werden zur Fertigung von Formteilen eingesetzt. Die Infrarottechnik ist aufgrund ihrer geringen Eindringtiefe zunächst nicht für das klassische End-Verschweißen von Partikelschäumen geeignet, kann aber neben dem Vorschäumen auch zur Veredelung wie etwa einer Beschichtung von Partikelschaumperlen genutzt werden.

Verschweißen Für den zweiten Schritt der Formteilherstellung, das Endschäumen und Verschweissen der Beads untereinander, benötigt PET mit einem Aufschmelzbereich von 220-250°C deutlich höhere Temperaturen als

Abbildung 6.403



©Armacell, Beispiel eines Formteils welches mit dem Hochdruckverfahren hergestellt wurde.

herkömmliche Partikelschaumstoffe wie EPP oder ETPU. Dies kann durch eine Bestrahlung mit Radiowellen oder durch Dampf aus speziellen Hochdruckanlagen in das Material erreicht werden. Beide Technologien ergeben sehr gute Resultate.

Formteilherstellung in Hochdrucktechnologie (Dampfkammerformen) Temperaturen oberhalb von 200°C werden mit Wasserdampf unter Drücken erreicht, die deutlich über dem Niveau herkömmlicher Formteilautomaten (bis 8 bar) liegen. Für eine gute Verschweißung wird Wasserdampf mit einem Druck von ca. 18 bar benötigt. In dieser Technologie gelang Armacell in Kooperation mit der Neue Materialien Bayreuth GmbH die Fertigung erster Formteile aus PET Partikelschaum. Die erhaltenen Formteile weisen eine glatte Oberfläche auf (Abb. 6.403) und können in Dichten von 70 kg/m³ bis 200 kg/m³ gefertigt werden. Die Prozessdauer liegt bei 30-90 Sek. und ist damit vergleichbar mit der Radiowellentechnologie.

Formteilherstellung mit Radiowellenfrequenztechnologie (RF) Auf Grund der besonderen chemischen Struktur von PET, ist die Formteilherstellung durch Bestrahlung mit elektromagnetischen Wellen im Radiofrequenzbereich ebenfalls geeignet. Das Verfahren funktioniert ähnlich wie mit einer Mikrowelle, wobei sich die Wellenlänge und Überlagerung der Strahlung etwas unterscheidet. Zitat: „Die Erwärmung von Partikelschaum (entsteht) durch Anregung mit Hochfrequenz (27,12 MHz) und Hochspannung bis 10.000 V“¹. Dies funktioniert bei EPP und EPS, die keine molekulare Polarisierung erfahren, nur sehr gering. Die Radiofrequenztechnologie ist von der Firma Kurtz Ersa entwickelt und kommerziell verfügbar gemacht worden. „Die Technik eignet sich für Materialien mit Prozesstemperaturen bis 250 °C, was einem Dampfdruck von 40 bar entspricht. Die Verschweißung erfolgt – anders als beim Dampfverfahren – von innen nach außen. Damit lassen sich auch sehr kompakte Verpressungen und auch Rezyklate verarbeiten.“² Es können Formteile mit Dichten von 70 kg/m³ bis 300 kg/m³ gefertigt werden. Problematisch bei diesem Verfahren ist der Abstand der beiden Metallplatten, zwischen denen das elektromagnetische Feld erzeugt wird. Springt „der Funke über“ ist das Schaumergebnis unbrauchbar. Ergebnisse erster Schäumversuche mit Radiowellen im Projekt ge3TEX s. Abschnitt Punkt 6.4.3.1

Formteilherstellung in variotherm-beheizten Formen Das dampffreie Schäumen und Verschweißen von PET-Partikelschaum kann auch innerhalb eines wasser- oder öltemperierten Werkzeugs stattfinden. Mit dieser Technologie sind Bauteilstärken zunächst nur bis 20 mm wirtschaftlich herstellbar. Der Maschinenbauerhersteller Fa. Teubert Maschinenbau GmbH, Blumberg, Deutschland hat diese Vorgehensweise durch die Entwicklung des sog. „ATECARMA“-Verfahrens ergänzt (Activator Temperature Efficiency Combination Automatization Resources Multi-material Adaption). Bauteile können in nur einem einzigen Arbeitsgang durch die vorherige Benetzung des Partikelschaums mit dem passenden schadstofffreien Aktivator hergestellt werden. Dabei wer-

¹ Neue Partikelschäume, neue Möglichkeiten! (2018): in: Kurtz Ersa Magazin, Nr. 46, S. 24–25, [online] <https://www.ke-mag.de/ausgabe-46/artikel/neue-partikelschaume.html>

² Neue Perspektiven für Partikelschaum-Formteile (2019): in: Kurtz Ersa Magazin, Nr. 49, S. 20–21, [online] <https://www.ke-mag.de/fileadmin/medien/kurtz-ersa-magazin/ausgabe-49/download/KEM-49-de.pdf>

den die vorbehandelten Perlen in einem formgebendes Werkzeug durch eine chemische Reaktion über indirekte Temperierung des Formwerkzeugs verbunden. Die Oberfläche der Beads wird hierbei chemisch aktiviert, was die Anbindung der Schaumperlen untereinander verbessert. Das Verfahren ist noch in der Entwicklung.

Stand der Technik, Vorschäumen und Verschweißen im Konvektionsofen Konvektionsofen werden derzeit nicht in einem standardisierten Verfahren verwendet. Für das Vorschäumen und die kommerzielle Produktion von Serienteilen im industriellen Maßstab ist der Konvektionsofen nicht geeignet, da aufgrund des langsamen Wärmeübergangs keine gleichmäßige Erwärmung der Schaumpartikel erfolgen kann und der Prozess im Vergleich zu den anderen vorgestellten Verfahren langsam ist. Für die Herstellung großer individueller Bauteile ist die Anwendung des Verfahrens allerdings denkbar.

Fazit Für ge3TEX und das Projektziel, auf Formwerkzeuge zu verzichten sowie einen möglichst robusten in situ Prozess zu entwickeln, wird zunächst u.a. mit Konvektionsofenverfahren experimentiert.

b) Weiterentwicklung von Herstellverfahren an der FRA-UAS

Abbildung 6.404



Erste Aufschäumversuche mit 24g PE-Beads in 500 ml Flasche
links: verformte PET-Flasche mit expandiertem Granulat nach Erhitzen
auf Vorschäumtemperatur von 150°C/5 min.
rechts: PET- Flasche in Originalgröße

Erste Versuche an der FRA-UAS wurden in den Wärmeschränken des Baustoffkunde- bzw. Straßenbaulabors durchgeführt. Abb. 6.404 zeigt das Aufschäumen der Beads und das gleichzeitige Schrumpfen der verwendeten PET Flasche. Die Schaumperlen expandieren um ca. 200 % und wachsen von einer mittleren Ausgangsgröße von ca. 2 mm auf ca. 4 mm. Alternativ wurden handelsübliche Mikrowellenöfen genutzt und Versuche mit einer IR-Anlage bei Fa. Fox Velution unternommen.

Zur Verfügung standen zuerst leicht vorgeschäumte PET- Beads mit einem Treibmittel auf Basis von Kohlenwasserstoff von Armacell. Diese Sorte wird fortlaufend mit der Kennung „**Beads A**“ bezeichnet.

Schüttdichte:	230-270 g/l
Perlengröße:	2-3 mm
Treibmittel:	Kohlenwasserstoff

Im Laufe des Projekts wurden Beads mit einem alternativen Treibmittel und erhöhter Expansionskraft bereits bei niedrigen Temperaturen entwickelt. Das Ziel war es, mit diesem Beads einen 1-schrittigen Prozess ohne Vorschäumen zu etablieren und somit die nötigen Fertigungsschritte für das Bauwesen zu reduzieren. Zudem hat das verwendete Treibmittel eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit was den Dämmeigenschaften der Formteile zugutekommt. Das Treibmittel gehört zur sogenannten 4. Generation der Kältemittel mit einem sehr

geringem GWP (Global Warming Potential) sowie einer geringen Halbwertszeit in der Atmosphäre (ODP=0) und wird industriell in großen Mengen in Klimaanlage (PKW) eingesetzt. Diese Beads werden fortlaufend mit der Kennung „Beads B“ beschrieben.

Schüttdichte:	ca.300-333 g/l
Perlengröße:	2-3 mm
Treibmittel:	Zusammensetzung unbekannt

Versuchsreihe 1, Vorschäumen Beads A Der Versuchsaufbau zum Schäumen von E-PET-Beads im Ofen wird nach Empfehlungen von Armacell in einem Heißluftofen mit Umluftfunktion durchgeführt. Die ersten Versuchsreihen folgen den Empfehlungen von Armacell für ein zweistufiges Verfahren, Abbildung 6.405.

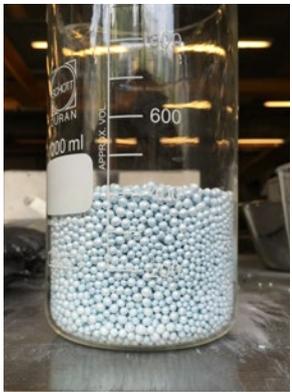
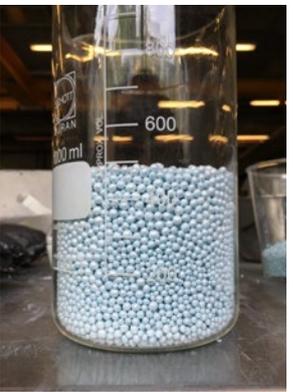
Vorschäumen:	bei 150°C-160°C	Dauer gestaffelt 5/10/15 Minuten
--------------	-----------------	----------------------------------

Für das Verschweißen wird empfohlen:

Quarantäne-Zeit:	mind. 1 Tag, besser 1 Woche
Verschweißen:	bei ca. 230-250°C
Verflüssigung:	bei ca. 285°C

Fazit 1: Als Ergebnis ist festzustellen, dass ein Aufschäumen über die Dauer von 10 Minuten hinaus keinen nennenswerten Volumengewinn mehr zeigt (Abb. 6.405). Um genügend Restexpansionspotential für den Verschweissvorgang zu behalten - ideal wären 25%, - wird sich das Vorschäumfenster zwischen 5-10 min bei 150°C bewegen.

Abbildung 6.405

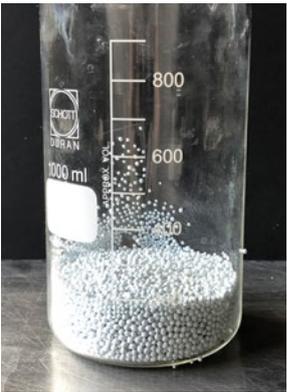
			
Beads A im Lieferzustand, 50g	5min vorgeschäumt	10min vorgeschäumt	15min vorgeschäumt
Volumen: 190 ml = 190 cm ³	420 ml = 420 cm ³	500 ml = 500 cm ³	510 ml = 510 cm ³
Volumenzuwachs: 100%	+121,05 %	+163,15%	+168,42%
Schüttdichte: 263,16 g/l	119,05 g/l	100 g/l	98,03 g/l

PET Beads-Typ A, verschiedene Aufschäumvolumina von je 50g Ausgangsmasse, im Becherglas nach 0/5/10/15-minütiger Vorschäumzeit. Untersucht wurde jeweils eine Masse von 50g, verglichen wird: Volumen in cm³, Volumengewinn in % und Schüttdichte in g/l

Versuchsreihe 2, Vorschäumen Beads B Laut Armacell ist diese Sorte Beads für einen 1-stufigen Prozess ohne vorschäumen geeignet. Entsprechend entfällt die für Typ A empfohlene Quarantänezeit Das Schäumverhalten wird im Vergleich entsprechend der vorhergehenden Versuchsreihe untersucht, die Dauer wird variiert:

Vorschäumen und Verschweißen	bei 150°C	Dauer gestaffelt 5/10/15 Minuten
------------------------------	-----------	----------------------------------

Abbildung 6.406

			
Beads im Lieferzustand, 50g	5min geschäumt	10min geschäumt	15min geschäumt
ca. 170 ml = 170 cm ³	690 ml = 690cm ³	800 ml = 800cm ³	800ml = 800cm ³
100%	+305,88 %	+370,58	+370,58
294,11 g/l	72,46 g/l	62,5 g/l	62,5 g/l

PET Beads Typ B, verschiedene Aufschäumvolumina von je 50g Ausgangsmasse, im Becherglas nach 0/5/10/15-minütiger Schäumzeit: Untersucht wurde jeweils eine Masse von 50g, verglichen wird: Volumen cm³, Volumengewinn in % und Schüttdichte in g/l

Fazit 2: Das Expansionsverhalten der neuen Beads ist viel größer als bei Typ A, so kann schon nach 5 Min. ein Volumengewinn von ca. 300 % erreicht werden. Da nach 10 Min. kein nennenswerter Volumengewinn über 370% hinaus stattfindet, ist davon auszugehen, dass die Beads hier schon ihre maximale Ausdehnung erreicht haben, Abbildung 6.406

Abbildung 6.407

			
Beads im Lieferzustand, 50g	3 min / 800 Watt	3,5 min / 800 Watt	4 min / 800 Watt
Volumen ca. 190 ml = 190 cm ³	400 ml = 400 cm ³	fehlgeschlagen	fehlgeschlagen
Volumenzuwachs 0%	110,5%	fehlgeschlagen	fehlgeschlagen
Schüttdichte 263,16 g/l	125 g/l	fehlgeschlagen	fehlgeschlagen

Aufschäumversuch in der Mikrowelle bei 800W nach 3/3,5/4 Min. Untersucht wurde jeweils eine Masse von 50g, verglichen wird: Volumen cm³ Volumengewinn in % und Schüttdichte in g/l

Versuchsreihe 3, Verfahren Mikrowelle, Vorschäumen Beads A Untersucht wurde das Schäumverhalten von 50g PET (Typ A) bei 800 W-Leistung und einer variierenden Dauer von 3, 3,5 und 4 min.

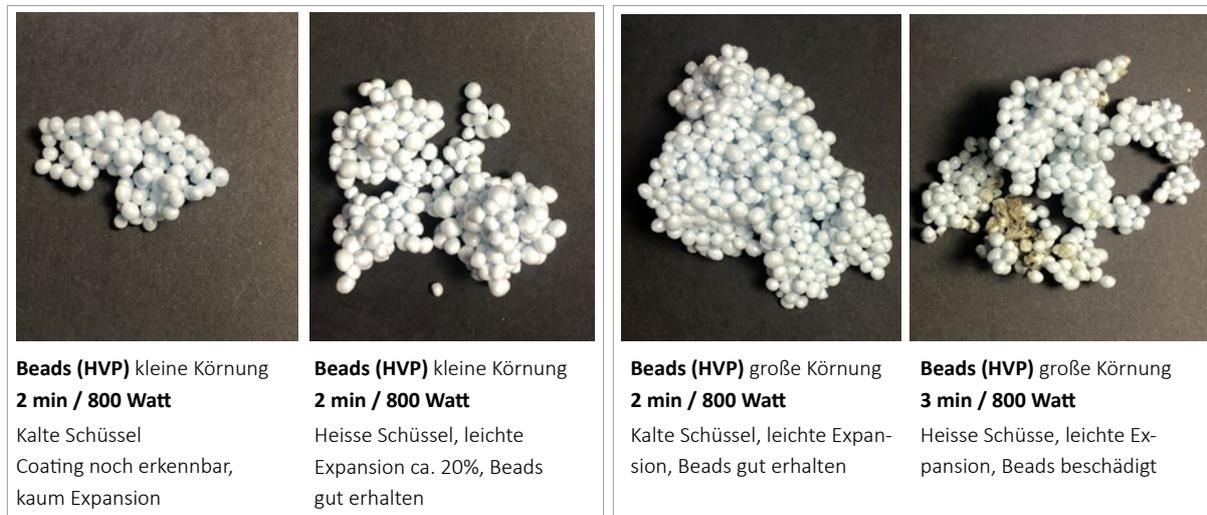
Fazit 3: Die PET-Beads schäumen bei einer Dauer von 3 Min. auf das doppelte Volumen auf. Wird diese Zeit überschritten, kommt es aufgrund der geringen Leitfähigkeit des Materials zu punktuellen Überhitzungen und Schmelzpunkten in der Mitte des Behälters. Das Material verflüssigt sich und brennt unter starker Geruchsentwicklung an. Die Methode verspricht über den Labormaßstab hinaus keine guten Ergebnisse.

Versuchsreihe 4, Verfahren Mikrowelle, Vorschäumen Beads A mit hybrid vernetzbarem Pulverharz (HVP)

Es wurden zwei Sorten Beads mit unterschiedlicher Schüttdichte untersucht, die jeweils mit einem Coating aus einem Pulverharz versehen sind. Der Projektpartner Armacell hat die Rezeptur in Zusammenarbeit mit der Firma Swiss CMT entwickelt und für eine erste Versuchsreihe zur Verbindung von PET-Textilien mit E-PET zur Verfügung gestellt. Um einschätzen zu können, wie Beads und Coating auf die Mikrowellenstrahlung reagieren, wurden folgende Tests durchgeführt:

Fazit 4 Das Expansionsverhalten unterscheidet sich je nachdem ob das zum Schäumen genutzte Gefäß kalt ist oder vorgewärmt wurde. Es wird bei gleichbleibender Leistung von 800 W das beste Schäumergebnis nach 2 Min. in der heißen Schüssel erreicht. Nach 3 Min. sind bereits geschmolzene Stellen und Beschädigungen an den PET-Beads zu erkennen. Die Ausgangsgröße scheinen keine Rolle zu spielen.

Abbildung 6.408



Aufschäumversuch von Beads mit HVP-Pulver in der Mikrowelle bei 800W für 2 und 3 Min., in heisser und kalter Schüssel.

Beads mit PET-Pulver, kristallin, und Beads mit polyesterbasierter thermoplastischer Beschichtung (PT-B) wurden in dieser Versuchsreihe nicht getestet, u.a. aufgrund des schlechten Verschweissverhaltens, s. auch Abschnitt 6.4.3. Ebenso wurden auf Grund der vorangegangenen Versuchsreihen und Erkenntnisse keine weiteren Versuche mit Infrarot-Verfahren (IR) und Radiowellen-Verfahren (RF) gemacht.

6.4.2 PET-Fasern, bzw. PET-Bändchen

6.4.2.1 /2 Allgemeines, Kategorisierung und Eigenschaften

Allgemeines Die PET-Faser ist das am häufigsten eingesetzte Polyesterfasermaterial, gefolgt von PBT (Polybutylenterephthalat). Unterschieden wird zwischen der Herstellung von PET-Fasern und PET-Bändchen. Erstere findet im Schmelzspinnverfahren statt und wird sowohl als Multifilament wie auch als Monofilament auf dem Markt angeboten. Besondere Eigenschaften von PET-Fasern sind die hohe Chemikalienbeständigkeit und die sehr geringe Feuchteaufnahme von 0,2-0,5%. Neben den Filamentgarnen, ob aus Virgin- oder rPET, können auch aus Folien geschnittenen Bändchen verwebt werden, wie sie durch den Projektpartner Propex Furnishing Solutions GmbH und Co. KG hergestellt werden. Die Folien zur Herstellung von PET-Bändchengewebe von propex werden aus recyceltem PET-Flaschenmaterial gewonnen und sind somit bereits ein Sekundärrohstoff.

Eine Übersicht allgemeiner mechanischer und bauphysikalisch relevanter Kennwerte von PET Fasern finden sich in Tabelle 6.402

Tabelle 6.402

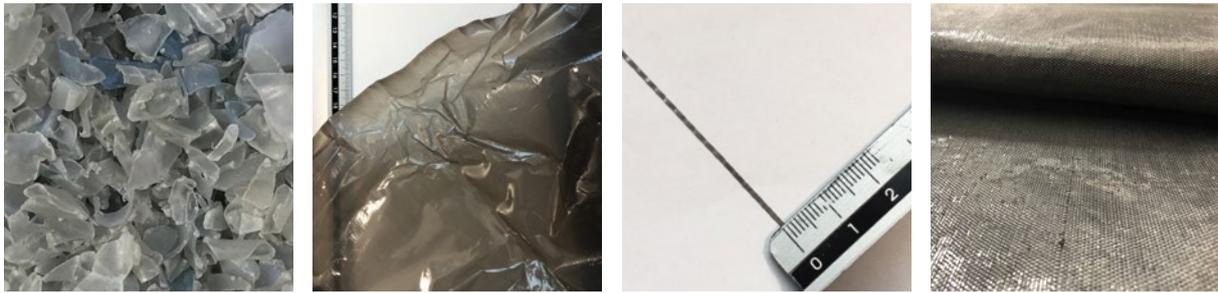
Eigenschaft	Werte
Filament-Durchmesser mm	0,2-0,6 mm
Feinheit Titer, Dtex (1 tex = 1g/1000m)	1,3-44 Dtex
Zugfestigkeit in GPa	0,34-0,89
Elastizität / E-Modul in GPa	k.A.
Rohdichte g/cm ³	1,36-1,40
Bruchdehnung in %	15,0-50,0
Feuchteaufnahme in % bei 20°C/65% rel. Luftfeuchtigkeit	0,2-0,5
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K)	0,20-0,30
Baustoffklasse / Brennbarkeit	B2
UV Beständigkeit / Stabilität	nicht beständig, durch Einbetten von Stabilisatoren kann die Lebensdauer erhöht werden
Schmelztemperatur T_m	250 - 260°C
Zersetzungstemperatur	283 - 306 °C
Erweichungstemperatur	230 - 240 °C
Fixiertemperatur	180 - 230 °C
Glasübergangs- bzw. Erweichungstemperatur T_g	80 - 110 °C
Kälteeinwirkung	K.A.
Brennverhalten	PET verbrennt in der Flamme: - abtropfend - unter Bildung dunkler Kugeln - unter Schrumpfung - verlöscht bei Entfernen der Zündflamme
Flammpunkt Fremdzündung	390°C
Selbstentzündungstemperatur	508 °C
Besondere Eigenschaften	Hohe Chemikalienbeständigkeit,, nur löslich in konzentrierter Schwefelsäure und Kalilauge

Faserkennwerte PET, allgemein, thermische Eigenschaften von PET-Fasern aus W. Oswald, D.Veit, Polyester, Virtuelles Bildungsnetzwerk der Textil- und Bekleidungsindustrie - ViBiNeT®, (2003)

Allgemeines, Herstellung von PET- Bändchengewebe Der Projektpartner Propex Furnishing Solutions GmbH und Co. KG stellt Folien aus Recycling-PET her, die dann zu „Bändchen“ oder sogenannten „Tapes“ geschnitten werden. Die Basis bieten hierbei sog. „Flakes“ aus sortierten, rezykliertem Flaschenmaterial. Die PET-Folien werden mit einem Flachfolienextruder hergestellt und nach dem Zerschneiden zu Bändchen in einem weiteren Prozess inline monoaxial verstreckt. Folien-Bändchen können mit Titern von 500-2.000 dtex hergestellt werden und können für einlagige Flächengewebe oder auch Doppelabstandsgewebe verwendet werden, letzteres s. Kapitel 7. 1.4. Abbildung 6.409 zeigt die Bestandteile und die Herstellung von PET - Bändchengeweben.

Für das Projekt wurden für die ersten Verbundversuche Gewebe aus reinen rPET Bändchen gefertigt (Textil A). Da das Schmelzverhalten von rPET Partikelschaum und rPET Gewebe sehr nah beieinanderliegt, wurden zur Verbesserung des Verbundverhaltens Bändchen aus speziell beschichteten Folien hergestellt. Diese haben oberflächlich ein anderes Schmelzverhalten und werden zu einem im weiteren Textil B benanntes Gewebe verarbeitet.

Abbildung 6.409



von links nach rechts: Rohmaterial PET-Flakes zur Folienherstellung, Polyester-Vorfilm vor Bändchenherstellung, PET-Bändchen 550dtex, Flächengewebe aus PET, einlagig

PET Bändchengewebe, Variante A Textil A besteht sowohl in Kette als auch Schuss aus reinen PET-Bändchen. In der Kettlage wird ein Bändchen des Titers 550 dtex verwendet, im Schuss ein Bändchen mit 950 dtex. Die UV-Beständigkeit der PET-Folie /-Bändchen wurde durch die Zugabe von Ruß verbessert. Entsprechend ist das Material anthrazit.

PET Bändchengewebe mit PBT-Anteil, Variante B Zur besseren Abstimmung der Schmelzpunkte wurde durch Firma Propex ein optimiertes 3-schichtiges Tape mit PET-Polyesterkern ($T_m=260^\circ\text{C}$) und Aussenschicht aus PBT (Polybutylenterephthalat, $T_m \leq 224^\circ\text{C}$) hergestellt, siehe Abb. 6.4.2.10. So ergibt sich ein Temperaturdelta von 35°C , innerhalb dessen die äusseren Schichten des Bändchens bereits angeschmolzen werden, um eine Verbundwirkung zu erzeugen, während die innere Folienschicht aufgrund des höheren Schmelzpunktes intakt und in ihren Festigkeitseigenschaften unbeeinträchtigt bleibt. Der Anteil von PBT liegt auf der Ober- und Unterseite bei jeweils 10%. Für erste Versuche wurde das Bändchen aus PET + PBT in Schussrichtung in ein einlagiges Flächengewebe (Typ B) in Leinwandbindung eingebracht und hat somit einen Flächenanteil von 50%. Der Anteil von PBT im gesamten Gewebe beträgt insgesamt 10%. Textil B verfügt über Kettfäden aus reinem PET, mit einem Titer von 950 dtex, das PET-PBT-Bändchen im Schuss hat einen Titer von 1300 dtex. Tabelle 6.403 zeigt die Gewebe im Vergleich.

Tabelle 6.403

Bezeichnung	Textil A		Textil B	
Textilart	Bändchengewebe aus PET, einlagig, Leinwandbindung		Bändchengewebe mit PBT-Anteil, einlagig, Leinwandbindung	
Bändchen in Kette/ Schuss	Kette: PET-Bändchen	Schuss: PET-Bändchen	Kette: PET-Bändchen	Schuss: PET/PBT-Bändchen
Feinheit Titer Dtex / Stärke / Breite	550 dtex / $\sim 38 \mu\text{m}$ / 1 mm	950 dtex / $\sim 35 \mu\text{m}$ / 2,1 mm	950 dtex / $35 \mu\text{m}$ / 2,1 mm	1300 dtex / $52 \mu\text{m}$ / 1,95 mm
Zugfestigkeit in GPa	3,5 cN/dtex (0,4 GPa)	3,5 cN/dtex (0,4 GPa)	3,5 cN/dtex (0,4 GPa)	4,6 cN/dtex (0,6 GPa)
Bändchen-Zugfestigkeit in N/5 cm	0,34 - 0,89	0,34 - 0,89	0,34 - 0,89	k.A.
Elastizität / E-Modul in GPa	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Rohdichte g/cm ³	$\sim 1,3$	$\sim 1,3$	$\sim 1,3$	$\sim 1,3$
Schmelztemperatur T_m	248 °C PEAK	248 °C PEAK	248 °C PEAK	248 °C PEAK / 224°C
Schrumpftemperatur	>190° C	>190° C	>190° C	>190°C/>150°C
Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften	> 250° C	> 250° C	> 250° C	> 250° C

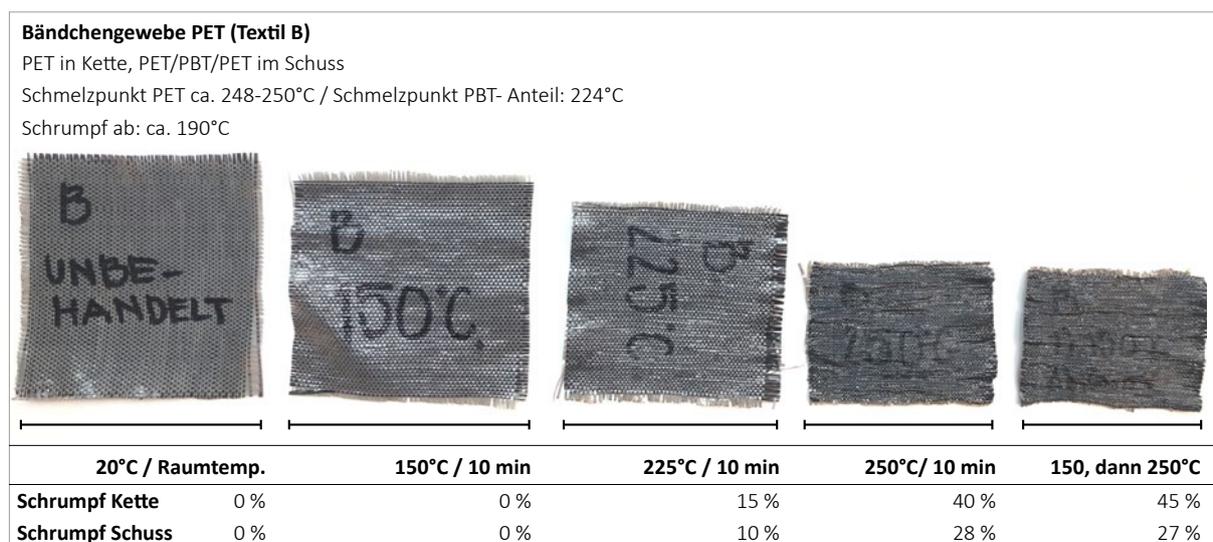
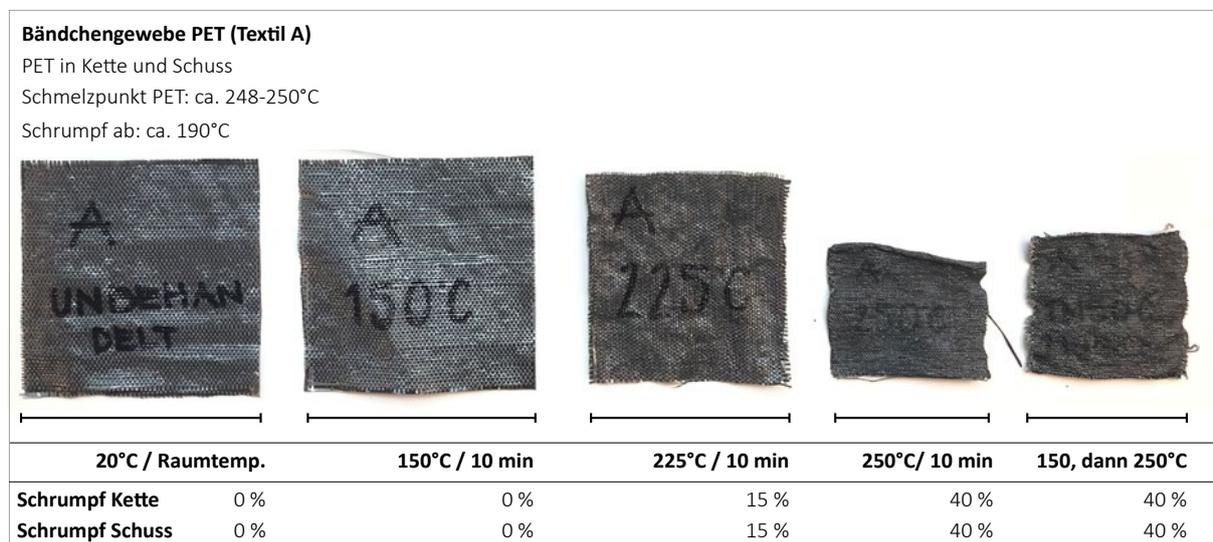
Faserkennwerte PET, allgemein, thermische Eigenschaften von PET-Fasern aus W. Oswald, D.Veit, Polyester, Virtuelles Bildungsnetzwerk der Textil- und Bekleidungsindustrie - ViBiNeT®, (2003)

Vergleichender Test zu Schrumpfverhalten von Textil A und Textil B Bereits mit dem in Abbildung 6.404 dokumentierten „Flaschenversuch“ wurde das potentielle Schrumpfungsverhalten von PET Folien demonstriert. Nachfolgend wird das Schrumpfverhalten des PET-Flächengewebes in Leinwandbindung unter der Einwirkung unterschiedlicher Temperaturen ermittelt. Ziel sind Erkenntnisse über die formgebende Wirkung der textilen Schalung durch das Schrumpfverhalten. Angenommen wird, daß bei Expansion der PET-Schaumperlen das formgebende Textil gleichzeitig schrumpft und als „textiler Formteilautomat“ auf diese Weise den Druck auf die expandierenden Beads erhöht. Im besten Fall expandieren die Beads in diesem Prozess genug und verschweißen. Nach Angaben des Herstellers und Projektpartners Propex werden die Festigkeitseigenschaften des Textils dabei ab einer Temperatur von ca. 250° C beeinträchtigt.

Fazit Abbildung 6.410 zeigt die Ergebnisse im Vergleich:

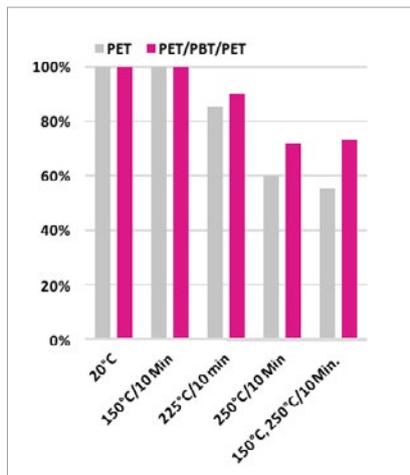
- Textil A schrumpft bei Temperaturen von 225°C um ca. 15%, bei 250°C um ca. 40%.
- Textil B schrumpft ungleichmäßig in Kett- und Schussrichtung und bei 225°C nur um ca 10% bzw. bei 250°C nur um ca. 28%.

Abbildung 6.410



Untersuchung des Schrumpfverhaltens von Textilien 10x10 cm unter thermischer Einwirkung im Konvektionsofen, oben Textil A, unten Textil B

Abbildung 6.411



Schrumpfverhalten in Prozent, Textil A und Textil B unter Hitzeeinwirkung,

Beide Textilien sind bei 150°C noch relativ formstabil. Gegenüber dem expandierenden Schaum wird das Schrumpfverhalten positiv bewertet, da es das Verschweißen der Partikel unterstützt. Ausserdem wird deutlich, dass auch bei 250°C noch keine Verflüssigung stattfindet. Das Textil wird allerdings hart und porös. Aufgrund der Ergebnisse empfiehlt es sich bei Versuchen im Ofen eine Temperatur nicht bis an die Temperaturgrenze von 250°C zu gehen, sondern niedrigere Temperaturen zwischen 225-245°C zu wählen. So kann das Textil geschont und seine mechanischen Eigenschaften erhalten werden.

Abbildung 6.412



links und mitte: Befüllen eines Abstandsgewirkes aus Polyester, Zustand nach Erhitzen, rechts: Alternative Herstellung mit Heisspresse

6.4.3 Verbundverhalten zwischen PET-Rovings/PET-Textil und PET-Partikelschaum

Bevor weitere Verbundversuche mit den PET Bändchengeweben des Projektpartners Propex und dem PET Partikelschaum des Projektpartners Armacell unternommen wurden, wurden vorab noch orientierende Versuche mit Abstandsgewirken und externen Firmenpartnern gemacht.

Dazu wurden Abstandsgewirke aus PE mit einer Stärke von 2 cm und 5 cm breiten Kanalstrukturen mit PET-Beads (Typ B) voll gefüllt und bei 190°C eine 1 Std. im Konvektionsofen wärmebehandelt. Abbildung 6.412 zeigt das erfolgreiche Aufschäumen und die leichte Verformung der Beads, die auf einen geringen Gegendruck des elastischen Abstandsgewirkes schliessen lassen. Die kleinporige Decklagenstruktur ermöglicht vermutlich ein gutes Durchströmen des Textils mit Heissluft und könnte sogar stellenweise zur mechanischen Verzahnung mit der Schaumpartikelfüllung beitragen. Zusätzlich wurden Untersuchungen mit einer Heisspresse durchge-

führt. Zwar konnte das Volumen einiger Schaumperlen vergrößert werden, so dass eine Verzahnung innerhalb der Polfadenlage stattfindet. Es ist jedoch keine Verschweißung der Beads oder Verfestigung des Textils mit dieser Technologie zu erzielen, Abb 6.412 rechts. Grundsätzlich wird die Wärme über eine Kontakttemperierung per Heisspresse zudem bei höheren Bauteilstärken nicht weit genug ins Innere des Textils dringen.

Für die nachfolgend beschriebenen Versuche werden PET Flächentextilien zu Taschen genäht, um das spätere Verhalten von Abstandstextilien zu simulieren.

6.4.3.1 Verbund- und Schäumverhalten, Beads A und Textil A

a) Verfahren Konvektionsofen / Textil A

Für Versuche im Ofen werden Geräte des Baustoffkunde- bzw. Straßenbaulabors der FRA-UAS genutzt. Zur Verfügung steht dort ein Universalwärmeschrank des Fabrikats UNB 100-500, Fa. Memmert, der auf max. 220°C bei einem Ofenraum von L/T/H= ca. 50 * 35 * 40 cm erwärmt werden kann und ein Trocken- und Wärmeschrank mit Konvektion und Umluft der Fa. Binder, der auf max >250°C geheizt werden kann und einen Ofenraum von L/T/H = ca. 95 * 55 * 114 cm bietet.

Versuchsreihe 1, Es wird ausserhalb des Textils vorgeschäumt und das Material dann in die Textiltaschen befüllt **Fazit:** Alle Versuche s. Tab. 6.404 zeigen beim Aufschneiden lose Schaumperlen im Inneren. Die PET-Tasche ist um ca. 20% auf 8 x 8 cm geschrumpft. Am Rand der PET-Tasche scheint während des Verschweißens vermehrter Druck entstehen, die Partikel sind hier bei allen Versuchen leicht druckverformt und haften aneinander, jedoch ist kein Verschweißen zu erkennen.

Tabelle 6.404

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Vor-schäumen Ort	Quarantäne Tage	Ver-schweissen °C/ min	Ergebnis
A	A	150°/5	Metallbe-hälter	7	250°/10	leichte Druckverformung der PET-Beads erkennbar
A	A	150°/10	Metallbe-hälter	7	250°/10	erkennbar sind erste Schmelzstellen
A	A	150°/15	Metallbe-hälter	7	250°/10	PET-Kugeln vom Rand verfärben sich von hellblau zu grau-gelb; die Beads haften bei längerer Vorschäum-dauer etwas besser aneinander, jedoch nicht am Textil

Zusammenfassung Versuchsreihe 1, Textil A

Versuchsreihe 2 Es wird im Textil vorgeschäumt, entsprechend kann bei der Befüllung des Textils von 50 g auf 70 g erhöht werden. Die Vorschäumdauer wird reduziert, um am Ende mehr Restvolumen Gas zum finalen Aufschäumen und Verschweißen zu haben.

Tabelle 6.405

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Vor-schäumen Ort	Quarantäne Tage	Ver-schweissen °C/ min	Ergebnis
A	A	150°/3	im Textil	7	250°/10	nur am Rand leichte Druckverformung der PET-Beads erkennbar
A	A	150°/4	im Textil	7	250°/10	Druck groß genug, um auch Verdichtung im Kern herzustellen, PET Beads im Kern kleiner als am Rand
A	A	150°/5	im Textil	7	250°/10	Beads sind im Vergleich am stärksten verformt > Favorit

Zusammenfassung Versuchsreihe 2, Textil A

Abb.6.413



Bilder zu Versuchsreihe 2, Konvektionsofen, Textil A, links Seitenansicht PET Tasche nach dem Verschweißen, mitte: Zustand nach dem Aufschneiden, kein Verschweißen zu erkennen, rechts: Versuch mit 5 min Vorschäumen mit sichtbarer Verformung (Abplattung) der PET Beads

Fazit 2 Das Expansionsverhalten der PET-Beads nimmt bei geringerer Vorschäumdauer beim Verschweißen minutenweise erkennbar zu, sie ist nach 3 Min. vorschäumen noch sichtbar einzudrücken und nach 5 Min. Vorschäumzeit prall gefüllt. Das Textil schrumpft um 16,7 %. Bei allen Taschen ist nach dem Aufschneiden eine bessere Expansion der Beads am Rand der Tasche im Vergleich Taschenkern zu erkennen. Dies lässt auf ein Abisolieren nach innen schliessen, da die Kugeln hier zumeist kleiner geblieben sind. Die Kombination aus 5 Min. Vorschäumen bei 150° C / 10 Min. Verschweißen bei Temperaturen um 250°C zeigt das beste Ergebnis. Hier ist neben der gleichmässigen Größenverteilung der Beads im Inneren der Tasche eine leichte, wenn auch instabile, Verdichtung zu erkennen. Eine Anhaftung zwischen Textil und PET-Beads wird nicht erreicht. Im Ergebnis steht ein gleichmässigeres Expansionsverhalten beim Vorschäumen in der Schüssel (s. Versuch 1) einem gesteigerten Druckpotential beim Vorschäumen in innerhalb der Textiltasche gegenüber.

Versuchsreihe 3 Die aus Flächentextilien genähten Taschen werden manuell mit Polfäden versehen, um gleichmäßigere Taschendicke zu erreichen und ungleiche Wärmeeindringtiefen zu verhindern.

Fazit 3 Das Vorschäumen der PET-Beads innerhalb des Textils erweist sich als weiterhin sinnvoll, um das volle Expansionspotential der Beads zum Druckaufbau innerhalb der Taschen nutzen zu können. Das Textil ist von 19 x 11 cm auf 18 x 10,5 cm geschrumpft. Im Kern sind weiterhin lose Beads zu finden, die sin geringfügig größer und gleichmässiger expandiert sind, jedoch keine Anhaftung am Textil statt.

Tabelle 6.406

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Vor-schäumen Ort	Quarantäne Tage	Ver-schweissen °C/ min	Ergebnis
A	A	150°/5	im Textil	7	250°/10	die Beads sind geringfügig größer und gleichmäßiger expandiert als in den Versuchen 1 und 2, alle Beads sind verformt / abgeplattet, keine Haftung mit dem Textil

Zusammenfassung Versuchsreihe 3, Textil A

Versuchsreihe 4 Untersucht wird, inwiefern die Quarantänezeit zwischen dem Vorschäumen und Verschweißen Auswirkungen auf die Expansionskraft der Beads hat. In dieser Zeit diffundiert Umgebungsluft in die Schaumperle, deren Innendruck sich so dem Umgebungsdruck angleicht.

Fazit 4 Zunächst ist bei allen Versuchen keine Anhaftung zwischen Schaum und Textil festzustellen. Die Festigkeiten unterscheiden sich nicht, alle Taschen weisen lockere Kugeln in der Taschenmitte auf und es kann keine eindeutig beste Verdichtung bei einem der Probekörper festgestellt werden. Das Aufplatzen der Tasche mit 14 Tagen Quarantänezeit ist uneindeutig und evtl. auch durch eine fälschlich erhöhte Ofentemperatur über 250°C zurückzuführen, knapp über den Schmelzpunkt des PET Textils. Dieselben Versuche bei geringeren Temperaturen zum Verschweißen von 230°C zeigen zwar keine Zerstörung der Textiltaschen mehr, aber auch sonst keine schlechteren oder verbesserten Ergebnisse. Auch mit einem Keramikofen mit Schamottsteinen, dessen Temperaturen besser regelbar sind, wurden keine Verbesserungen erzielt, s. Tabelle 6.407.

Tabelle 6.407

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Vor-schäumen Ort	Quarantäne Tage	Ver-schweissen °C/ min	Ergebnis
A	A	150°/5	im Textil	0	250°/10	Verdichtung der Beads am Rand, kein Anschmelzen
A	A	150°/5	Metallbe-hälter	5	250°/10	Beads größer als wenn in Textil vorgeschäumt, kein Anschmelzen des Textils
A	A	150°/5	im Textil	5	250°/10	Beads weniger groß expandiert als mit Vorschäumen in Metallb. kein Anschmelzen des Textils
A	A	150°/5	Metallbe-hälter	7	250°/10	leichte Verdichtung der Kugeln im Randbereich zu erkennen
A	A	150°/5	im Textil	14	250°/10	Tasche aufgeplatzt, kein Verschweißen im Inneren der Tasche
A	A	150°/5	im Textil	7	250°/5	keine Verdichtung der Beads festzustellen, ebenso wenig Anbindung zwischen Textil und Schaum
A	A	150°/5	im Textil	7	250°/10	s.o.

Zusammenfassung Versuchsreihe 4, Textil A

b) Verfahren Mikrowelle / Textil A Mikrowellenverfahren wurden erst mit dem Textil B getestet, s. 6.4.3.2

c) Verfahren Radiowelle (RF) / Textil A

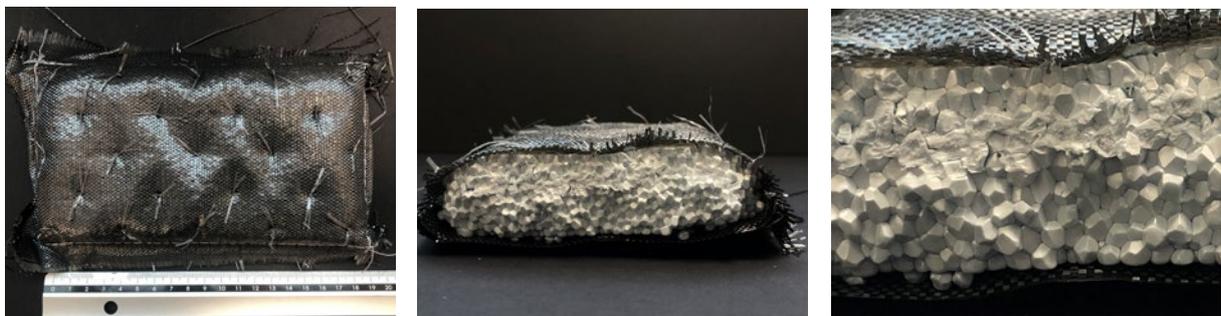
Das Radiowellen-Verfahren verfügt über längere Wellenlängen als die Mikrowelle in vorangegangenen Versuchen, dadurch können lokale Überhitzungen und Schmelzpunkte innerhalb des Schaums vermieden werden. Der Versuch wurde durch den Projektpartner Armacell in Zusammenarbeit mit Fa. Kurtz Ersa durchgeführt. Die mit vorgeschäumten PET Beads gefüllten PET Taschen der FRA-UAS werden zwischen zwei Metallplatten für die Dauer von ca. 30 Sek. - 90 Sek. einer Spannung von ca. 5000 Volt ausgesetzt. Um einen Funkenschlag zu vermeiden, muss das Textil möglichst dicht mit Beads gefüllt sein und wenig Luft einschließen aufweisen. Die Lücken zwischen Metallplatte und unebener Textiltasche werden zudem mit losen Beads ausgepolstert, s. Tab. 6.408 und Abb. 6.414.

Tabelle 6.408

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Vor-schäumen Ort	Quarantäne Tage	Ver-schweissen V / sec	Ergebnis
A	A	150°/5	im Textil	unbek. >1Woch	5.000 V 30-90 sec	schnittfester, druckstabiler Verbund, Textil ist gut angebunden, aber manuell noch lösbar

Zusammenfassung Versuchsreihe Radiowelle, Textil A

Abb.6.414



Bilder zu Versuchen mit dem Radiowellverfahren (RF): Abstandstextilstruktur aus Textil Typ A, Beads A, nach Vorschäumen im Konvektionsofen und Verschweißen durch Radiowellen bei 5.000 Volt / 30-90 sec

Fazit Es ist erstmals ein schnittfester, druckstabiler Verbund der PET-Beads zu beobachten, das Textil ist gut angebunden, jedoch manuell mit etwas Kraftaufwand vom Schaum abzulösen. Das Textil ist geringfügig auf ca. 18,5 x 10,5 cm geschrumpft (vorher 19 cm * 11 cm). Die Schaumperlen sind stark verformt und bilden sichtbare Kanten aus s. Abb. 6.414. Das Verfahren widerspricht allerdings dem Konzept, das Textil als flexible, verlorene Schalung zu verwenden.

d) Infrarot (IR): Verfahren mit der Mikrowelle wurden erst mit dem Textil B getestet, s. 6.4.3.2

6.4.3.2 Verbund- und Schäumverhalten, Beads A/B und Textil B

Im Ofen- oder Mikrowellenverfahren konnten mit Textil A keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden. Das Radiowellenverfahren zeigt zwar das beste Ergebnis, ist jedoch anlagentechnisch aufwendig. In der Folge werden die Schmelzpunkte der Folie zur Herstellung des Bändchengewebes durch den Industriepartner Propex optimiert, um durch das Anschmelzen des Textils die Anhaftung zwischen Textil und Schaum zu verbessern. Alle weiteren Versuche werden mit dem neuen Textiltyp B vorgenommen.

a) Verfahren Konvektionsofen / Textil B

Versuchsreihe 1, Es wird ausserhalb des Textils vorgeschäumt und das Material dann in die Textiltaschen befüllt / verschweißt **Fazit:** Die Schaumpartikel sind nicht genug verdichtet. Beim Aufschneiden befinden sich weiterhin lose Schaumperlen im Tascheninneren. Das Textil ist nicht durchgehend glatt und flächig mit der Füllung verbunden, es scheint ggf. zeitweise stärker gedehnt worden zu sein und ist nicht in den Ausgangszustand zurückgekehrt. s. Tab. 6.409.

Versuchsreihe 2, Es wird im Textil vorgeschäumt und das Material dann in die Textiltaschen verschweißt **Fazit:** s.o. Versuchsreihe 1, kein zufriedenstellendes Ergebnis, s. Tab. 6.409.

Tabelle 6.409

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Vor-schäumen Ort	Quarantäne Tage	Ver-schweissen °C/ min	Ergebnis
A	B	150°/5	Metallbe-hälter	5	250 / 10	lose Schaumperlen, kein Verbund mit dem Textil, Textil in Teilen ausgedehnt und lose
A	B	150°/5	im Textil	5	250 / 10	lose Schaumperlen, kein Verbund mit dem Textil

Zusammenfassung Versuchsreihe 1 und 2, Konvektionsofen, mit Textil B

Versuchsreihe 3, Es wird mit den neuen Beads B im Textil vorgeschäumt und das Material dann in die Textiltaschen im zweiten Schritt verschweißt, dies nach Herstellerangaben über längere Zeitraum und bei 230°C .
Tabelle 6.410

Abb. 6.415



Bilder zu Versuchsreihe 3, Konvektionsofen, Textil B, Beads B (im Textil vorgeschäumt und verschweißt), 45 Min.)

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Vor-schäumen Ort	Quarantäne Tage	Ver-schweissen °C/ min	Ergebnis
B	B	150°/5	im Textil	7	230 / 10	weniger lose Schaumperlen mit Abkantungen und stärker aufgedehntes Textil als mit Beads A
B	B	150°/5	im Textil	5	230 / 45	Schnittkante im Randbereich, Füllung im Kern stärker verdichtet, Haftung Textil /Beads keine Verbesserung

Zusammenfassung Versuchsreihe 3, Konvektionsöfen, mit Textil B

Fazit 3: Beide Taschen zeigen eine größere Aufdehnung und weniger lose Schaumperlen im Inneren der Tasche, als bisherige Versuche mit Beads Typ A. Nach 10 Min. ist eine deutliche Abkantung der Schaumperlen zu erkennen. Nach 45 Min. im Ofen kann beim Aufschneiden der Tasche eine Schnittkante im Randbereich erzeugt werden, die Füllung ist im Kern stärker verdichtet und etwas druckstabiler, siehe Abb. 6.415. Die Anhaftung zwischen Textil und Schaum zeigt keine deutliche Verbesserung.

Versuchsreihe 4, Es werden längere Verschweisszeiten untersucht und zudem einschrittige Verfahren ohne Quarantänezeit erprobt, entsprechend Herstellerangaben zudem auch insgesamt geringere Temperaturen sowie max 240°C zur Schonung des Textils

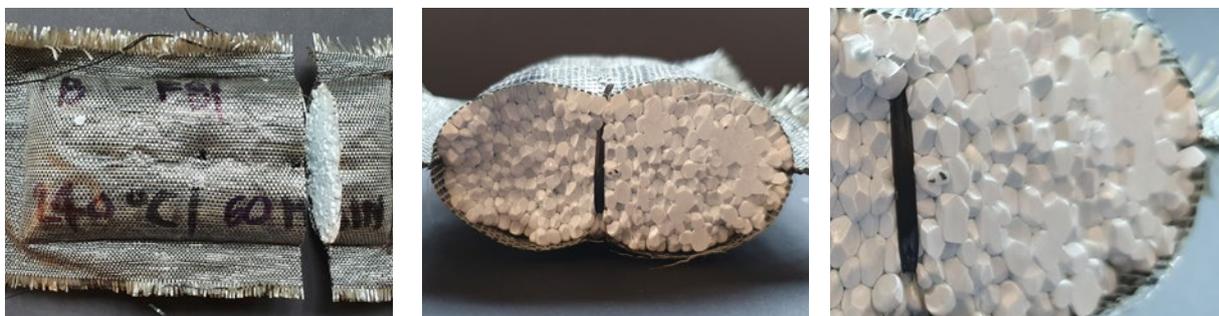
Tabelle 6.411

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Schäumen + Verschwei-ßen	Quarantäne Tage	Ver-schweissen °C/ min	Ergebnis
B	B	/	im Textil	/	190 / 45	relativ druckstabiles Ergebnis, schnittfester Probekörper
B	B	/	im Textil	/	190 / 60	s.o
B	B	/	im Textil	/	240 / 45	s.o
B	B	/	im Textil	/	240 / 60	relativ druckstabiles Ergebnis, schnittfester Probekörper, beste Textilanbindung

Zusammenfassung Versuchsreihe 4, Konvektionsofen, mit Textil B

Fazit 4: Alle Probekörper zeigen ein relativ druckstabiles Ergebnis und können zerschnitten werden. Die beste Anbindung an das Textil zeigt sich bei 240°C und einer Dauer von 60 Min, s. Abb. 6.416. Es sind zudem keine losen Partikel mehr im Kern zu finden, es gibt eine Anbindung an das Textil. Damit ist dies das bislang beste Ergebnis im Ofenverfahren und zudem einstufig. Wenn Textil B und Beads B eingesetzt werden, sollten die anvisierten Temperaturen zwischen 230-240°C beibehalten werden, um eine Haftungsoption zu haben.

Abb. 6.416



Bilder zu Versuchsreihe 4, Konvektionsofen , Textil B, Beads B (im Textil vorgeschäumt und verschweißt), 240 °C./60 Min)

b) Verfahren Mikrowelle / Textil B

Es werden unterschiedliche Zeiträume und Verfahren, mit und ohne Vorschäumen, sowie Textiltaschen der Stärken 2 cm und 1 cm getestet.

Tabelle 6.412

Beads	Textil	Vor-schäumen °C/ min	Schäumen + Verschwei-ßen	Quarantäne Tage	Mikrowelle W / Min	Ergebnis
A	B	/	im Textil	/	800 / 3,5	kein Verschweißen ohne stellenweises Verbrennen möglich / lokales Überhitzen; Keine Anhaftung an das Textil
A	B	/	im Textil	/	800 / 4,0	s.o
A	B	/	im Textil	/	800 / 4,5	s.o.
A	B	150/5	im Textil	/	800 / 4,5	s.o

Zusammenfassung Versuchsreihe 5, Mikrowelle, mit Textil B, Taschenhöhe 2 cm

Fazit: Mit dem Mikrowellenverfahren ist keine Verbindung ohne stellenweise „Verbrennungen“ möglich, es kommt zu lokalen Überhitzungen. Je länger der Prozess, desto stärker ist die Verflüssigung des PET Schaums. Es ist möglich schnittfeste Probekörper zu erstellen, jedoch sind immer auch lose Partikel im Inneren der Tasche zu finden, die nicht miteinander verbunden sind. Das Textil wird nicht angeschmolzen und es findet keinerlei Anhaftung zwischen Textil und Schaum statt (Abb. 6.417). Dabei ist im Ergebnis kein Unterschied im Schäumverhalten zwischen 1 cm / 2 cm Textilien zu erkennen.

Abb. 6.417



Bilder zu Versuchsreihe Mikrowelle (Textil B, Beads A, 800), links mit 3,5 Min, mitte 4 Min und rechts 4,5 Min / Textiltaschen 2 cm hoch)

c) Verfahren Infrarot (IR), Textil B

Erste orientierende Versuche zum Aufschäumen und evtl. Verschweißen mit einer IR-Durchlaufanlage werden bei der Firma FOX Velution durchgeführt werden. Ziel ist es, die Eindringtiefe der IR-Strahlung zum Vorschäumen im Textil zu untersuchen. Ausserdem wird geprüft, ob vorgeschäumte PET-Beads in einem zweiten Schritt durch das IR-Verfahren an der Oberfläche zum und mit dem Textil verfestigt werden können.

Fazit Tabelle 6.413 zeigt, der Abstand des IR Geräts ist sensibel, das formgebende Textil schmilzt bei zu kurzem Abstand weg. Wenn das Textil als verlorene Schalung genutzt wird, was nicht ebene Oberflächen zur Folge hat, funktioniert der Prozess nicht. Am inneren Rand des Textils sind teils leichte Expansionen mit Verdichtung der ersten Lage Schaumkugeln zu sehen, s. Abb 6.416, insgesamt ist die Tasche expandiert und aufgebläht. Ein einstufiger Schäumvorgang durch IR-Strahlung kann nur die Oberfläche des Textils erhitzen und ggf. die erste Lage der Beads erhärten, aber nicht bis in den Kern verfestigen. Eine

IR-Temperierung ist demnach eher als ergänzendes Verfahren, in einem 2-schrittigen Prozess denkbar.

Tabelle 6.413

Beads	Textil	Vor-schäumen in Vario- thermwerk- zeug °C/ min	(Schäumen) + Verschwei- ßen	Quarantäne Tage	Infrarot Sek. / mm (mm = Abstand zur Textiltasche)	Ergebnis
A	B	5/195	im Textil	keine	13 / 40	Textil verflüssigt sich, Abstand zu gering!
B	B	5/195	im Textil	keine	60 / 150	keine erkennbare Erhärtung der textilen Oberfläche, es gibt keine Haftungsverbesserung
B	B	/	im Textil	keine	40 / 150	Textiltasche partiell aufgeschmolzen, am Rand leichte Expansion mit Verdichtung der ersten Lage Schaum- kugeln

Zusammenfassung Versuchsreihe 5, Infrarotstrahlung (Textil B, Beads A und B)

Abb. 6.416



Bilder zu Versuchsreihe Infrarotverfahren, (Textil B, Beads B, einstufiger Prozess 40 sec, Abstand 150 mm)

Zusammenfassung 6.4.3.2 Die Optimierung von Textil B hat leichte Verbesserungen hinsichtlich der Haftung bewirkt und die Verwendung von Beads Typ B, mit alternativem Treibmittel, lässt durch ein stärkeres Expansionsverhalten erstmals die Herstellung relativ fester Probekörper zu. Keines der untersuchten Verfahren kann jedoch ein durchgehend geschäumtes, schnitt- und bruchfestes Schäumergebnis innerhalb der Textiltasche erzielen. Um den Prozess weiter zu optimieren, wird in der Folge die Beimischung unterschiedlicher Bindematerialien untersucht

6.4.3.3 Verbund- und Schäumverhalten, Beads A/B, Binder und Textil A/B

Im nächsten Schritt wird auf Initiative der FRA-UAS hin untersucht, ob die Verbindung der Beads untereinander sowie die Anbindung an das PET-Textil durch die Verwendung eines Pulvers als Bindemittel funktioniert. Zunächst steht ein PET-Pulver zur Verfügung, im weiteren Verlauf wird auch ein hybrid vernetzbares Pulverharz (HVP) sowie eine polyesterbasierte thermoplastische Beschichtung (PT-B) getestet. Die Tests finden hauptsächlich im Ofenverfahren statt. Es werden zudem einzelne Versuche mit Hilfe der Mikrowelle und des Infrarotverfahrens gemacht.

a) Verfahren Konvektionsofen

Versuchsreihe 1, PET-Pulver, kristallin (Textil A, Beads A) Das Vorschäumen findet für alle Proben im Textil bei 150°C und 5 Min. statt. Den PET-Schaumperlen (Typ A) wird ein Pulver aus PET untergemischt. Es werden zwei unterschiedliche Quarantänezeiten (7 / 14 Tage) und zwei unterschiedliche Verschweißtemperaturen von 230°C und 250°C getestet. **Fazit** Es kann keine Verbindung durch Zugabe des PET-Pulvers erzielt werden.

Das Pulver bleibt kristallin und verflüssigt sich erst bei der gleichen, hohen Temperatur wie die Beads selbst.

Versuchsreihe 2, Hybrides vernetzbares Pulverharz (HVP) Zusammen mit der Firma Swiss CMT aus Siebnen, CH entwickelt Armacell eine mit einem hybrid vernetzbaren Pulverharz beschichtete Type der E-PET Beads. Die Beschichtung ermöglicht eine gute Anbindung von Häuten wie z.B. das PET-Textil und kann auch zur Verbindung der Schaumbeads innerhalb einer PET-Textiltasche genutzt werden. Die Vernetzung startet ab ca. 140°C, die optimale Reaktionstemperatur der Beads liegt bei 170°C-180°C. Tabelle 6.414 zeigt die erfolgten Versuche 2a - 2g in der Übersicht. Der erste Versuch 2a erfolgte mit einer an der FRA-UAS gefertigten Textiltasche bei Armacell mit HVP-beschichteten Beads B. Die weiteren Versuche erfolgten in Frankfurt mit HVP-beschichteten Beads A, die von Armacell zur Verfügung gestellt wurden.

Tabelle 6.414

Beads ø mm	Textil	Vor- schäumen °C/ min	Schäumen + Verschwei- ßen	Quarantäne Tage	Ver- schweissen °C/ min	Ergebnis
B_HVP	A	/	im Textil	/	180/6	schnitffesten, druckstabilen Verbund der PET-Beads, feste Anbindung zwischen Textil und Schaum, die händisch nur schwer ablösbar ist
A_HVP 2	A	/	im Textil	/	170/30	leichte Druckverformung, druckstabil, gute Verbindung mit Textil, Beads verbunden, stärkste Veränderung gegenüber ungeschäumten Zustand.
A_HVP 3 - 4	A	/	im Textil	/	180/10	kaum verformt, druckstabil, gute Verbindung mit Textil, Beads gut verbunden, aber kaum Volumengewinn
A_HVP 2	A	/	im Textil	/	180/10	Schaumperlen leicht kantig verformt, druckstabil, gute Verbindung mit Textil, keine starke Verdichtung des Schaums
A_HVP 2	B	/	im Textil	/	170/30	leichte Druckverformung, gute Verbindung mit Textil, Beads verbunden, Beads am Rand schnitffest
A_HVP 3 - 4	B	/	im Textil	/	180/10	keine Verformung der Beads, gute Verbindung mit Textil, wenig Expansion
A_HVP 2	B	/	im Textil	/	180/10	leichte Kantenbildung, gute Verbindung mit Textil, keine Verdichtung der Beads

Zusammenfassung Versuchsreihe 2, Ofenverfahren (Textil A und B, Beads A und B, jeweils mit HVP)

Fazit Tabelle 6.414 zeigt zusammenfassend, daß mit den Beads B und dem HVP Coating im Ofenverfahren ein schnitffester, druckstabilen Verbund der PET-Beads erreicht werden konnte, s. auch Abb. 6.417. Das gute Ergebnis ist auf die Klebe-Wirkung der beschichteten Beads und eine längere Verfahrensdauer als zuvor zurückzuführen. Die anschließenden Versuche mit den Beads A zeigen nicht so überzeugende Resultate. Das langsame Verfahren zeigt in den Randbereichen immer das beste Ergebnis. Die Verbindung mit Hilfe der HVP Beschichtung ist im Sinne des Monomaterial-Ansatzes von ge3TEX nicht ideal, verbindet aber alle Beads miteinander. Erstmals lassen sich so relativ druckstabile, geschäumte Textiltaschen erzeugen.

Abb. 6.417



Bilder zu Versuchsreihe Ofenverfahren, (Textil A, Beads B mit HVP, einstufiger Prozess)

Versuchsreihe 3, Polyesterbasierte thermoplastische Beschichtung (PT-B)³ Um eine möglichst hohe Sortenreinheit zu erhalten, wird die Entwicklung einer thermoplastischen polyesterbasierten Beschichtung durch Armacell vorangetrieben. Die Beschichtung wird in Kombination mit beiden Bead-Sorten (Typ A/B) getestet. Für erste Versuche wird eine Temperatur von 190°C und eine längere Verfahrensdauer von 45-60 Minuten empfohlen. Aufgrund der vielversprechenden Textilentwicklung durch Propex werden zunächst Versuche mit Textil B vorangestellt. Später folgt ein Vergleichstest mit der favorisierten Kombination und Textil A. Und es werden höhere Temperaturen untersucht zur evtl. besseren Haftung zwischen Textil und Schaum.

Tabelle 6.414

Beads	Menge ml	Textil	Schäumen + Verschweißen	PT-Besch. g	Schäumen / Verschweissen °C/ min	Ergebnis
A_PT-B	150	B	im Textil	k.A.	190/45	schnitffest, gute Anbindung an Textil, Beads verbunden, nicht voll expandiert.
A_PT-B	150	B	im Textil	k.A.	190/60	schnitffest, Beads etwas besser expandiert, gute Anbindung von Textil und Polfäden
A_PT-B	150	B	im Textil	k.A.	240/45	schnitffest, Tasche verfärbt, leicht verbesserte Anbindung an Textil
A_PT-B	150	B	im Textil	k.A.	240/60	s.o, längere Heizeit zeigt leicht verdichtetes Schäumergebnis
B_PT-B	150	B	im Textil	k.A.	190/45	schnitffest, druckstabil, Beads gut verbunden, Textil schwer abzulösen
B_PT-B	150	B	im Textil	k.A.	190/60	s.o, Beads ausserdem etwas besser verbunden, nahezu glatte Schnittfläche
B_PT-B	150	B	im Textil	k.A.	240/45	s.o, Anbindung des Textils vergleichbar gut.
B_PT-B	150	B	im Textil	k.A.	240/60	s.o, Anbindung des Textils vergleichbar gut.

Zusammenfassung Versuchsreihe 2, Ofenverfahren (Textil B, Beads A und B, jeweils mit PT-B)

Fazit: Die Versuche mit Beads A_PT-B und Textil B ergeben druckstabile, schnitffeste Probekörper. Die Anhaftung an Textil B ist leicht verbessert bei 240°C was auf die Anschmelztemperatur des PBT-Anteils im Textil bei ca. 224°C zurückgeführt wird. Die Polfäden sind stabil und fest verbunden, bei 240°C zeigt sich ein deutlicher Schrumpfeffekt, es findet jedoch kein Abriss des Polfadens statt. Die Taschen werden bei 240°C leicht verfärbt, eine Schädigung der mechanischen Eigenschaften des Textils ist nicht auszuschliessen. Die Schaumperlen sind bei längerer Heizeit und höherer Temperatur etwas besser expandiert, jedoch hauptsächlich durch Verkleben verbunden.

In den Versuchen mit Beads B_PT-B und Textil B sind alle Probekörper druckstabil und schnitffest. Die Partikelschaumbeads sind sehr fest miteinander verbunden und manuell nur schwer herauszulösen. Das Schäumergebnis wie die Anbindung zwischen Schaumperlen und Textil ist bei 190°C / 60 Min. und 240°C / 45 Min. gleichermassen sehr gut. Nach Ablösen des Textils wurden Schaumdichte zwischen 197,61-214,25 kg/m³ ermittelt. Der Abstand innerhalb der Textiltaschen ist durch die Expansion von 20 mm auf ca. 35 mm aufgedehnt worden. Die Taschen sind bei 240°C erneut leicht verfärbt und stellenweise porös. Wie bei Beads B sind auf der Unterseite des Textils Klebereste zu erkennen, die Beschichtung wird durch die Expansion der Beads verdrängt und tritt im verflüssigten Zustand aus der Tasche aus. Für weitere Versuche ist die Temperatur geringfügig anzupassen und eine Reduzierung des Beschichtungsanteils vorzunehmen.

Abbildung 6.418 Zuletzt wird versucht das Austreten der verflüssigten Beschichtung durch Reduktion des Beschichtungsanteils zu reduzieren. Zudem wird durch eine geringere Verfahrenstemperatur (230°C) der PBT-Anteil des Textils nur angeschmolzen, um die Textiltascheins gesamt zu schonen. Insgesamt wird untersucht die Temperatur weiter auf 200°C abzusenken, um das Textil weiter zu schonen und den Energie zu reduzieren.

³ Auf Wunsch des Projektpartners Armacell werden keine genaueren Angaben zum Mengenanteil (g/Ltr.) der polyesterbasierten thermoplastischen Beschichtung (PT-B) gemacht.

Abb. 6.418



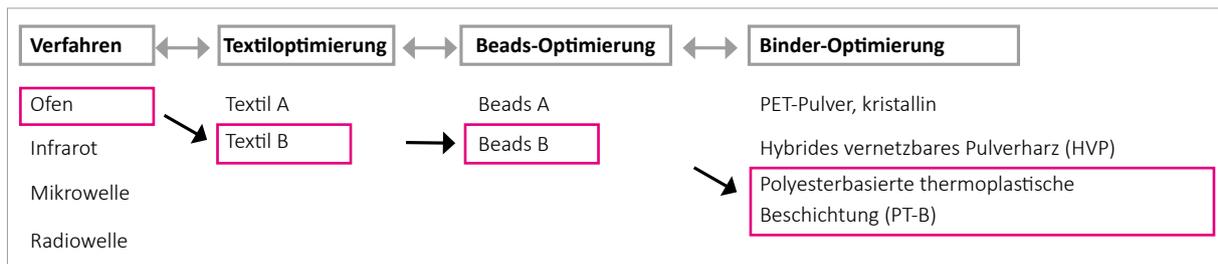
Finale Versuchsreihe 3, Beads B mit PT-Beschichtung in Kombination mit Textil A und B

Zusammenfassung Die maximale Anbindung an das Textil wird mit Textil A bei ca. 190-200°C erreicht. Textil B kann auch bei 230°C leicht angeschmolzen werden, höhere Temperaturen sind nicht nötig und so kann das Textil geschont werden. Beads Typ B verfügen, wie bereits in den Versuchen ohne Zugabe von Bindern aufgezeigt (siehe 6.4.3.1.1), über ein deutlich höheres Expansionspotential als Beads Typ A und erzeugen auch unter Zugabe der polyesterbasierten thermoplastischen Beschichtung ein besseres Schäumergebnis. Beads des Typ A mit PT-Beschichtung werden nicht für weitere Versuche verwendet, stattdessen werden Beads des Typ B mit PT-Beschichtung für größere Probekörper zur Prüfung mechanischer und bauphysikalischer Werte genutzt, vgl. 6.4.3.5. Für die Befüllung größerer Textiltaschen und die Herstellung plattenförmiger Demonstratorbauteile wird die Rezeptur der Beschichtung durch Armacell optimiert.

b) Verfahren Mikrowelle Es wurden Versuche mit Textil A und B und mit Beads A und B, jeweils unter Zugabe von HV-Pulver gemacht. **Fazit:** Das Verfahren ist schwer zu kontrollieren und auch unter Zugabe von Haftmitteln nicht für die Herstellung herkömmlicher Bauteile/Formen geeignet. Es besteht kein Vorteil gegenüber dem Ofenverfahren, die Methode wird nicht weiter verfolgt.

c) Infrarot (IR) Nicht vorexpanzierte Beads A mit HVP wurden in einem variothermen Formwerkzeug in Textiltaschen B aufgeschäumt. In einem zweiten Prozessschritt mit Infrarot wird untersucht, ob im Bereich der Decklagen eine stärkere Verdichtung /Verklebung auftritt mit dem Ziel, ein Gradientenbauteil herzustellen. **Fazit:** Das Ergebnis ist nicht ganz eindeutig. Der mit bloßem Auge sichtbare Unterschied der Schaumperlen im Randbereich im Gegensatz zur Mitte des Bauteils deutet jedoch darauf hin, dass Potential für die Entwicklung eines Gradientenwerkstoffs besteht.

Abb. 6.419

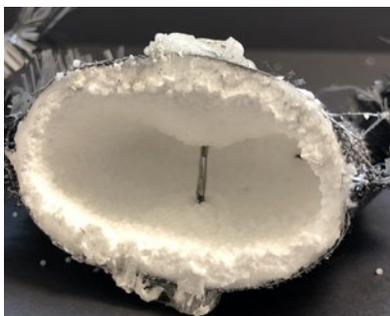


Resümee der durchgeführten Versuche: Optimierung von Materialwahl und Herstellprozessen eines sortenreinen Verbundmaterials aus PET Fasern und PET Partikelschaum

6.4.3.4 Resümee

Zur Herstellung von sortenreinen Verbundelementen aus PET Fasern und PET Schäumen hat sich das Verfahren im Ofen nach einem iterativen Auswahlverfahren s. Abb. 6.419 im Gegensatz zu Verfahren mit der Mikrowelle und Radiowellenverfahren als am sinnvollsten herausgestellt. Eine Gesamtübersicht aller Versuche findet sich in Anlage 3, ebenfalls Abschnitt 6.4.3.4. Die Eindringtiefe der Ofenwärme hat sich als ausreichend erwiesen und es ist keine hochtechnisierte Anlagentechnik wie z.B. beim Radiowellenverfahren nötig. Orientierende Versuche mit Infrarot-Strahlung bei Fox Velution haben sich für den Herstellprozess als Ganzes auch als ungeeignet erwiesen. Es gibt aber Hinweise, dass der Einsatz von IR-Strahlung evtl. für die oberflächliche Nachbehandlung eines bereits aufgeschäumten Bauteils geeignet sein könnte. D. h. zur zusätzlichen Erhärtung bzw. Verdichtung des neuen PET-Verbundmaterials an den Oberflächen. Zudem scheinen sich mit IR Optionen zur Ausbildung von Hohlkörpern beim Ausschäumen zu ergeben, da Partikelschaum im Inneren eines Bauteils nicht verschweißt wird (Abb. 6.420)

Abb. 6.420



Hohlkörper aus EPS-Partikelschaum in PET Textil nach beidseitiger IR-Bestrahlung (10 Min./3 Min.)

6.4.4 Erste Bauteiltests

6.4.4.1 Orientierende Verbundversuche mit PET Blockschaum und Textil A und B

Es wurden zunächst orientierende Versuche mit kaschiertem PET Blockschaum durchgeführt, um für erste Bauteilberechnungen s. Abschnitt 8.1 mechanische Richtwerte bekommen. Die Werte wurden im Nachgang auch als Vergleichswerte für die ausgeschäumten PET Abstandsgewebe verwendet. In Bezug auf den Haftverbund wurden im übrigen Flächentextilien der Varianten A und B verwendet und Platten in einer Doppelbandpresse bei Temperaturen von 230°C, 240°C und 250°C getestet. Daraus konnten auch Rückschlüsse für den Haftverbund und den Stabilitätserhalt der PET Textilien beim Ausschäumen gezogen werden.

Fazit: Alle Temperaturen sind grundsätzlich zur Kaschierung geeignet, in allen Fällen lässt sich das Textil ma-

nuell nur schwer vom Blockschaum lösen. Die Stärke der Anhaftung steigt mit der Temperatur, aber auch die Schädigung des Textils nimmt bei 240°C / 250°C zu. Bei 250°C ist deutlich eine harte Polymerschicht auf der Oberfläche des Textils zu erkennen. Der PBT- Anteil des Textils scheint geschmolzen und verteilt sich vor dem Erhärten durch die Presse auf der Oberfläche. Bei 250°C ist Textil B stark angeschmolzen, es ist anzunehmen dass die Materialeigenschaften stark beeinträchtigt sind. Das Textil der bei 230°C beschichteten Platten lässt sich am leichtesten ablösen.

Tabelle 6.415

PET-Block-schaum	Textil	Temp. °C	Dichte kg/m ³	Anzahl Probekörper Biegezug	Biegezugfestigkeit Mittelwert (N/mm ²)	Biegezugfestigkeit _{Max} (N/mm ²)	Standardabweichung	F max (N)
roh	-	-	95	3	2,88	3,18	0,396	428,23
roh	-	-	145	3	3,87	3,96	0,100	607,37
laminiert	Textil B	230	95	3	2,14	2,16	0,013	339,74
laminiert	Textil A	240	95	3	1,98	2,13	0,107	316,81
laminiert	Textil A	250	95	3	2,10	2,12	0,018	303,66
laminiert	Textil B	250	95	3	2,77	2,87	0,069	406,21
laminiert	Textil A	240	150	3	3,07	3,20	0,096	476,33
laminiert	Textil A	250	150	5	4,05	4,72	1,069	730,97
laminiert	Textil B	250	150	3	4,39	4,40	0,008	664,96

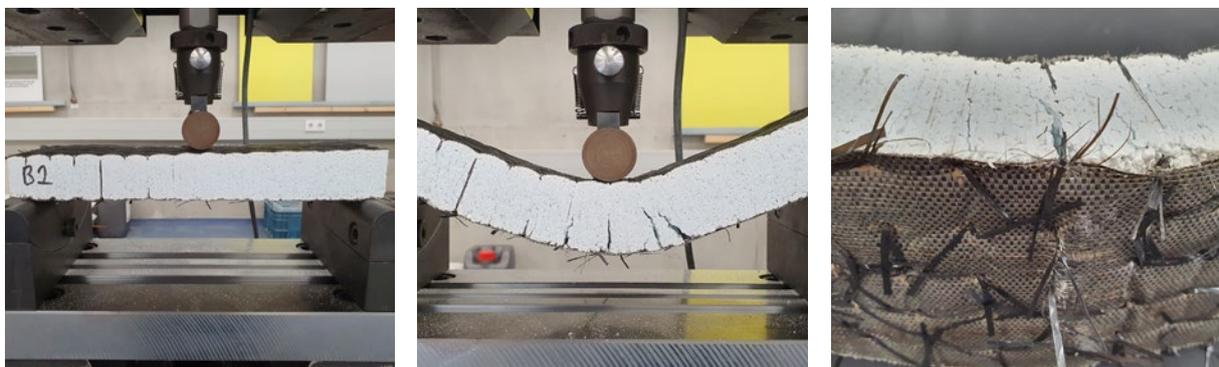
Zusammenfassung Mechanische Kennwerte laminiertes Blockschaum unterschiedlicher Dichten

Tabelle 6.415 zeigt das Fazit der Versuche: Die beste Biegezugfestigkeit o.g. Testreihe von 4,39 N/mm² konnte bei einer Dichte von 150 kg/m³ unter Verwendung von Textil B und einer Presstemperatur von 250°C im Vergleich zum unlaminierten Blockschaum der Dichte 145 kg/m³ erzielt werden. Die Schädigung des Bändchengewebes ist zwar deutlich durch ein partielles Aufschmelzen der textilen Oberfläche sichtbar, die mechanische Belastbarkeit der Probe wird hierdurch jedoch nicht negativ beeinflusst. Bei Blockschaum geringerer Dichte konnte laminiert auch bei 250°C kein besseres Ergebnis erzielt werden.

6.4.4.2 Mechanische Werte der neu entwickelten PET Schaum- und Textilstruktur

Biegezugwerte Aus den vorausgehenden Versuchsreihen mit Pulver als Binder (siehe Abschnitt 6.4.3.3) konnten für Textil A und B jeweils PET-Partikelschaumrezepturen optimiert und für die Herstellung von Probekör-

Abb. 6.421



Biegezugversuch Beads B + PT-Beschichtung und Textil B

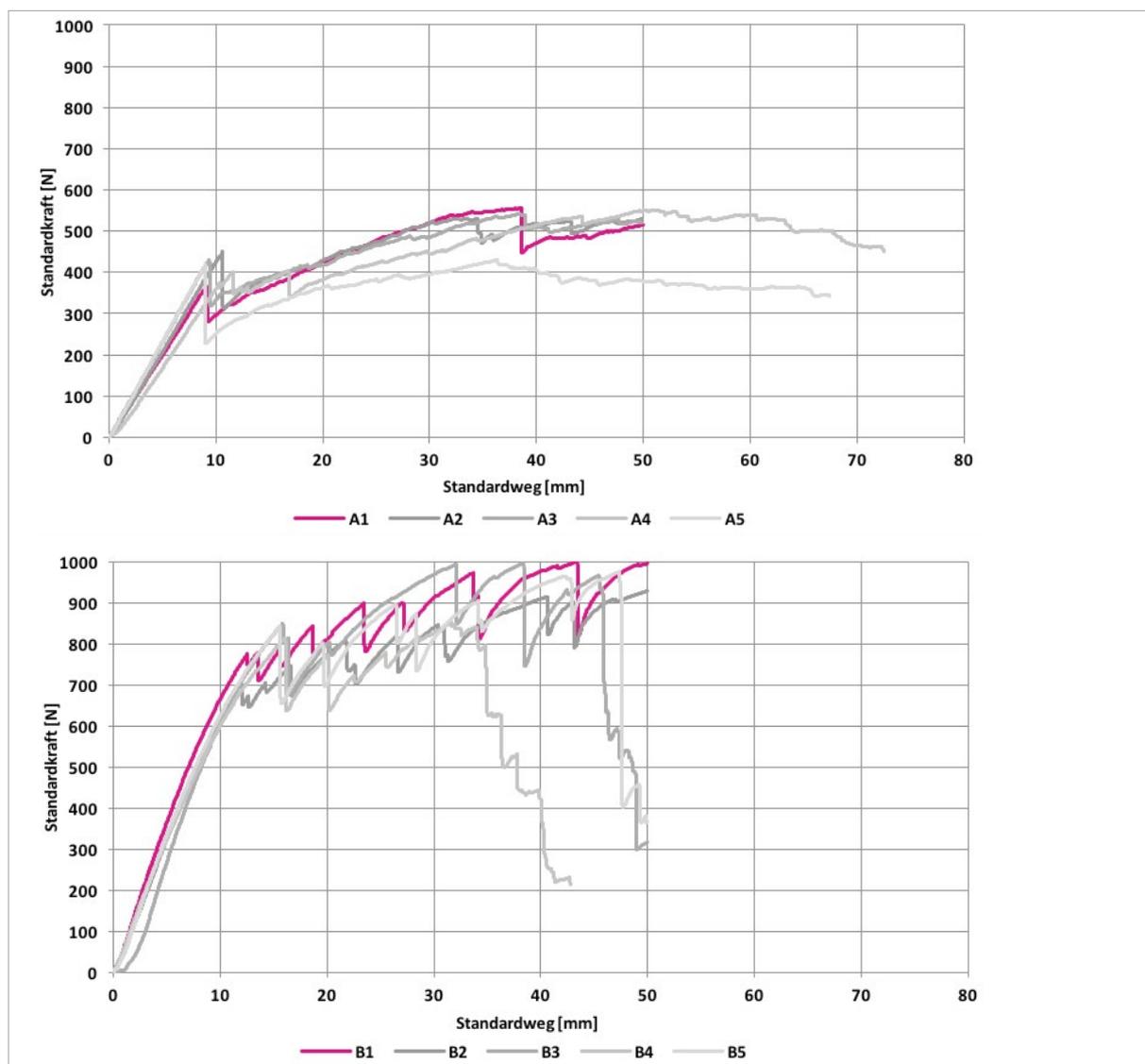
pern verwendet werden. Daraus wurden Probekörper der Dichte 197 kg/m³ im Konvektionsofen hergestellt. Im Randbereich der erstellten Platten wurden Dichten von 232,13 kg/m³ ermittelt, was auf eine ungleichmäßige Verteilung des Binders oder die beschränkte Expansionsmöglichkeit der Beads im Bereich der Seitennaht zurückgeführt wird. Diese Randbereiche wurden nicht auf ihre Biegezugfestigkeit getestet. Alle Probekörper haben eine Stärke von ca. 40 mm, bei LxB 30x10 cm.

Probekörperherstellung

- Beads: PET-Beads mit alternativem Treibmittel (Beads B)
- Binder: PT-Beschichtung als Binder (Anteil 16,66g/Ltr.)
- Temperatur: Textil A; 200°C, Textil B 230°C (T_m von PBT Beschichtung des Textils B liegt bei bei 224°C)
- Dauer: 90 Min.

Fazit Abbildung 6.421 zeigt beispielhaft den Versuch mit Textil B. Anhand der Prüfkurven.

Abb. 6.422



Prüfkurven Biegezugversuche, Probekörper aus PET Abstandstextil mit PET Partikelschaumfüllung. Oben Versuche mit Textil A, unten mit Textil B, und jeweils ausgeschäumt mit Beads B/PT-B

In Abbildung 6.422 ist erkennbar, dass die textilen Decklagen nach Versagen des Schaumkörpers (Peak) noch weitere Kraft aufnehmen. Es kommt in keinem Fall zu einer flächigen Delaminierung des Textils. Textil B hat mit einer Differenz von $1,10 \text{ N/mm}^2$ zum Bestwert von Textil A eine deutlich besseres Verbundverhalten, s. Tabelle 6.416. Im Vergleich zu einem extrudierten Blockschaum oder gar mit Textil aminierten Blockschaum s. Tabelle 6.415 sind die Biegezugwerte bei ähnlicher Dichte geringer. Da das Ziel bei ge3TEX aber mittelfristig möglichst unaufwendige in-situ Verfahren zur Reduktion von Transportvolumen sind, ist das Verfahren als erfolgreich zu bezeichnen. Erste Testwerte (Mittelwerte) eines Probekörpers ohne Textil aus dem neuen geschäumten Partikelschaum (Beads B/PT-B) sind in Tabelle 6.416 in Klammern /invers vermerkt

Tabelle 6.416

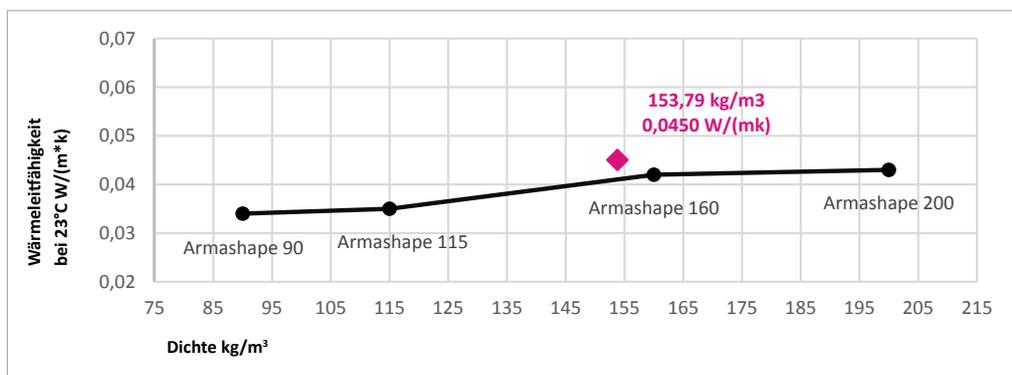
PET-Partikelschaum	Textil	Temp. °C	Dichte kg/m ³	Anzahl Probekörper Biegezug	Biegezugfestigkeit Mittelwert (N/mm ²)	Biegezugfestigkeit _{Max} (N/mm ²)	Standardabweichung	F max (N)
Beads B + PT-B (Mittl. Druckfestigkeit 2,1 MPA bei 10 % Stauchung / Druck-E-Modul Mittelwert 37,5 MPa)	Textil A	200	196,82	5	1,49	1,66	0,165	557,19
	Textil B	230	197,04	5	2,60	2,76	0,120	1000,93

Zusammenfassung: Mechanische Kennwerte von PET Abstandstextilien, ausgeschäumt mit PET Partikelschaum

E-Modul N/mm²: Anhand der Spannungs-Dehnungsdiagramme kann der E-Modul abgeleitet werden s. Anlage 5. Er liegt im Mittelwert bei 88 N/mm^2

Wärmeleitfähigkeitswert W/(m*k) Zur Messung des Wärmeleitfähigkeitswert mit Hilfe der sog. „Hot-Plate“-Methode in den Laboreinrichtungen der TU Darmstadt wurden fünf Probekörper der bisher aussichtsreichsten Zusammensetzung aus PET-Partikelschaum (Beads B) und Binder-Pulver innerhalb eines Abstandstextils geschäumt. Die Probekörper wurden polyesterbasierter thermoplastischer Beschichtung bei $230^\circ\text{C}/90 \text{ min}$ im Konvektionsofen hergestellt. Um eine ausreichende Messgenauigkeit zu erzielen, wurden die Textillagen der verlorenen Schalung abgezogen und Höhenunterschiede in der Oberfläche durch Abschleifen ausgeglichen. Die Pölfäden wurden aufgrund des guten Verbundes innerhalb des Textils belassen. Alle Probekörper haben jeweils eine Seitenabmessung LxBxH von ca. $150 \times 150 \times 35 \text{ mm}$ und weisen leichte Unterschiede in der Dichte auf ($132,48 \text{ kg/m}^3$ bis $166,45 \text{ kg/m}^3$). Die Messung der Wärmeleitfähigkeit fand nach einer Vortemperaturierung der Probekörper auf 20°C statt, getestet wurde dann der Wärmeleitwert für die Zieltemperaturen 10°C und 23°C . Erreicht wurden Mittelwerte von $0,043 \text{ W/(m*k)}$ und $0,045 \text{ W/(m*k)}$. Abb. 6.423 zeigt das Resultat im Vergleich mit anderen Partikelschäumen von Armacell. Der im Vergleich leicht erhöhte Wert ist auf den Binderanteil im Produkt zurückzuführen.

Abb. 6.423



Vergleich Wärmeleitfähigkeit / Dichte eines PET-Partikelschaums aus textiler Schalung mit konventionell geschäumten Formteilen

6.4.5 Zusammenfassung

Es konnten erstmalig stabile Bauteile ohne Formwerkzeuge aus PET Textilien hergestellt werden, die mit PET Partikelschaum in einem einstufigen Ofenprozess ausgeschäumt wurden. Das Verfahren im Konvektionsofen bietet im Quervergleich eine einfache, robuste Möglichkeit des Aufschäumens und lässt gegenüber aufwendigeren Verfahren wie der Infrarot-Technologie eine ausreichend gleichmäßige Expansion der Schaumperlen bei ca. 200 °C - 240 °C bei Stärken von derzeit bis ca. 4,35 cm zu. Nach bisheriger Einschätzung könnte durch eine in situ Produktion mind. ca. 30% des Transportvolumen eingespart werden, s. Abschnitt 7.2. Je optimaler dabei das Schrumpfverhalten des PET-Abstandsgewebes mit dem Treibverhalten der Beads zusammenwirken umso besser sind die Dichten des Schaums einstellbar. So können mechanische und bauphysikalische Eigenschaften angepasst und je nach Verwendungszweck optimiert werden. Die vorangehend getesteten Prüfkörper weisen Dichten zwischen ca. 150-200 kg/m³ auf. Es ist anzunehmen, dass diese Bandbreite sich zukünftig noch für die Erstellung last- und werkstoffoptimierter Konstruktionen im Sinne eines Gradientenbauteils erweitern lässt. Es ist ausserdem auch denkbar, dass die vollkommene Durchschäumung des Materials nicht in jedem Fall ist nötig ist. Auch ein Gradientenwerkstoff mit losen Schaumperlen im Inneren des Textils und einer erhärteten Schaumschicht an den textilen Decklagen, im Sinne eines Hohlkörpers, ist vorstellbar.

6.5 Resümee, Haftung Textil/Befüllung im Werkstoffvergleich

Für den Bereich der mineralischen Werkstoffe konnten im Bereich mineralisierter Schaum und Basalttextilien erstmals Basalt Abstandstextilien aus neu entwickelten, verwebbaren und alkalibeständigen Basaltrovingen hergestellt werden, die befüllt mit mineralisiertem Schaum ein neues Verbundmaterial ergeben. Im Bereich Bläh-/Wasserglas und Glasfasern wurden ebenfalls erstmalig Abstandsgewebe aus AR-Glas hergestellt und für die Befüllung fünf unterschiedliche Beüllrezepturen unterschiedlicher Dichte entwickelt, die verarbeitbar sind. Derzeit offen ist noch die Frage der Schädigung der Polfäden im Deckbereich, die bei der Realisierung des ersten Demonstrators auftrat. Für den Bereich der polymerbasierten Werkstoffe konnte zusammen mit den Industriepartnern ein robuster, einstufiger und völlig neuer Prozess etabliert werden. Die im Projekt ge3TEX weiterentwickelten rPET Partikelschäume können inzwischen in ebenfalls weiterentwickelten rPET Abstandstextilien ohne zusätzliche Formwerkzeuge aufgeschäumt und zu einem stabilen Verbundbauteil aus einem Material gefügt werden.

7 Fertigung erster Demonstratoren aus ausgeschäumten 3D Textilien

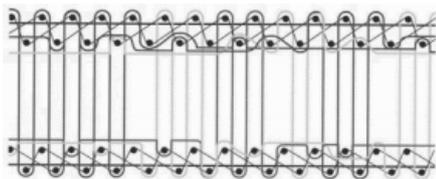
7.1 Fertigung von 3D Textilien aus Basalt- / Glasrovings sowie PET Bändchen (s. u.a. auch Anlage 4 , Autor Weimer, Timo)

7.1.1 Allgemeines

Abstandsgewebe bestehen aus zwei Gewebelagen, die mittels Polfäden miteinander verbunden sind (Abbildung 7.100). Für die Struktur der beiden Gewebelagen (Decklagen) können alle Bindungsarten verwendet werden. Der Abstand zwischen den beiden Decklagen kann eingestellt werden. Ausschlaggebend für das Einstellen des Abstandes, zwischen den beiden Decklagen, ist der verwendete Polfaden. Der Polfaden wird dabei unidirektional als Kettfaden verarbeitet. Wird ein relativ starrer, monofiler Faden verwendet, können ohne zusätzliche Hilfsmittel, Abstände mit bis zu 80 mm hergestellt werden.

Abstandsgewebe werden an Doppelgreifer-Webmaschinen hergestellt. Mit dieser Webtechnologie lassen sich auch Teppiche und Velours fertigen, jedoch werden in diesen Verfahren die Polfäden durchtrennt. Soll ein noch größerer Abstand als 80 mm zwischen den beiden Gewebelagen erreicht werden oder sollen biegeschlaffe Fäden, wie in diesem Projekt, als Polfäden verwendet werden, müssen Weblanzetten im Herstellprozess verwendet werden. Die maximale Höhe der Weblanzetten orientiert sich dabei am maximal einstellbaren Abstand zwischen den beiden Greifern. Um einen größeren Abstand als die Weblanzettenhöhe im Webprozess zu erzielen, werden auf den Weblanzetten sogenannte Blindschüsse abgelegt, über welche der Polfaden abbündet. Erst nach dem Abbinden der Polfäden über die Blindschüsse, werden diese wieder in das Gewebe eingebunden. Um die dadurch erzielte Fadenspeicherung freizusetzen, werden die Blindschüsse nach dem Webprozess wieder entfernt. Die einstellbaren Abstände, die durch das Anwenden dieses Verfahrens möglich sind ist: Weblanzettenhöhe + (X * Weblanzettenhöhe), X= natürliche gerade Zahlen.

Abbildung 7.100



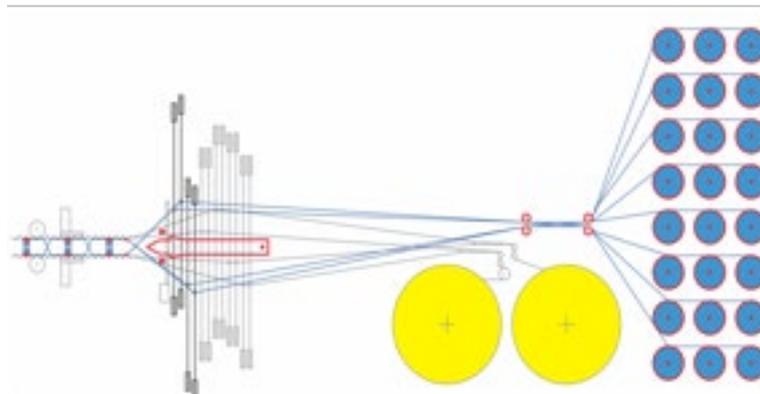
Schnitt im Schussbereich eines Abstandgewebes

7.1.2 Herstellung von Abstandsgeweben aus Basaltfasern

Für die im Projekt geplante Entwicklung und Herstellung von Abstandsgeweben aus Basaltfasern, steht dem DITF eine Abstandswwebmaschine der Firma Vandewiele zur Verfügung. Es handelt sich dabei um eine modifizierte Doppelplüschwebmaschine vom Typ Velvet Tronic VTR42 in verstärkter Ausführung mit parallelem Weblattanschlag.

Die Webmaschine ist mit einer Dreistellungsschaftmaschine ausgestattet. Von den insgesamt 20 Webschäften sind die ersten 8 Webschäfte für die Pol- bzw. Abstandsfäden reserviert. Dies ermöglicht eine variantenreiche geometrische Anordnung der Abstandsfäden und damit eine anwendungsspezifische Gestaltung der Gewebearchitektur. Allerdings führen komplexe Abstandsgewebestrukturen häufig zu unterschiedlichen Einbindungslängen der Abstands- bzw. Polfäden im Gewebe. Aufgrund des daraus resultierenden unterschiedlichen Fadenlängenbedarfs können die Abstandsfäden nicht im Kollektiv vom Kettbaum zugeführt werden, sondern müssen einzeln tangential von in einem Abrollgatter aufgesteckten Spulen abgezogen werden (Abb. 7.101).

Abbildung 7.101



Schematische Darstellung einer Abstandswebmaschine mit Lanzettentechnik (rot) und Tangentialabzug der Abstandsfäden vom Gatter (blau)

Im Gegensatz zu den Polfäden erfolgt die Zuführung der Grundkettfäden für die beiden Gewebelagen im Kollektiv von jeweils einem separaten Kettbaum.

Da es sich bei den verwendeten Basaltfasern um biegeschlaffe Faserrovings handelt, ist zur Erzeugung von Abstandsgeweben ein unbedingter Einsatz von Weblanzetten nötig. Mittels Blindschüssen ist es möglich ein Abstandsgewebe herzustellen, das einen größeren Abstand der Decklagen besitzt als die Höhe der Weblanzetten. Die Gewebebreite ist durch die Webmaschine mit 1 m Gewebereite begrenzt.

7.1.2.1 Technik und Herausforderungen

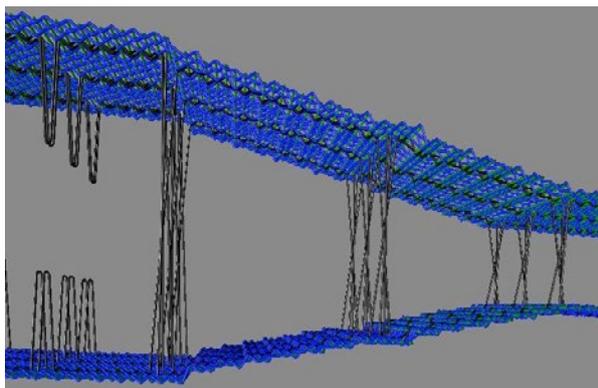
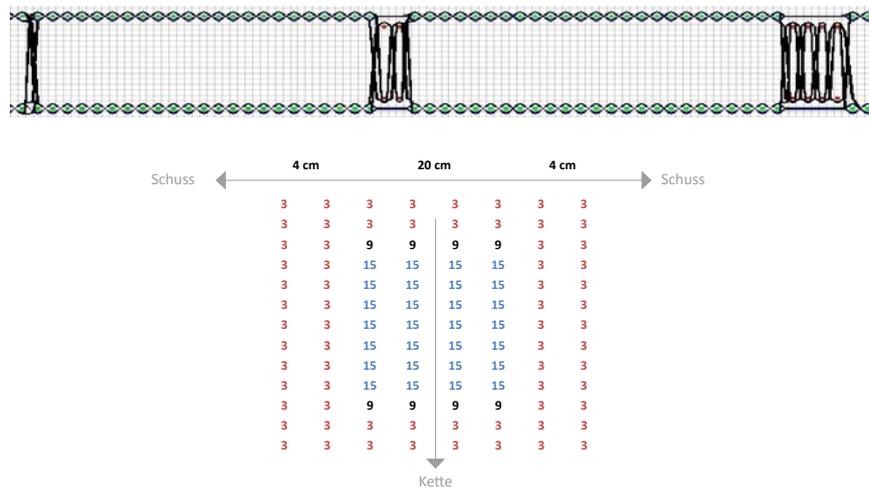
Da es nicht bekannt ist, dass Abstandsgewebe aus Basaltfasern sowohl in Kette als auch Schuss jemals hergestellt wurde, kann diesbezüglich auf keinerlei Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Da die hergestellten Abstandsgewebe aus Basalt mit Beton ausgegossen werden sollen, müssen die Polfäden im Textil so angeordnet werden, dass ein problemloses Befüllen gewährleistet werden kann. Gleichzeitig müssen die Decklagen dicht genug sein, dass kein Beton während des Befüllens ausläuft. Vorversuche ergaben, dass eine Polfadenstruktur mit einem Abstand von 4 cm x 4 cm für ein problemloses Befüllen ausreichend ist. Da die verwendeten Polfäden biegeschlaff sind und ein relativ großer Abstand der beiden Decklagen entstehen soll, muss auf das Herstellverfahren mit Blindschüssen zurückgegriffen werden. Über die eingebrachten Blindschüsse werden die Polfäden geführt, bevor diese wieder in den Decklagen einbinden. Werden die Blindschüsse entfernt ist eine erhöhte Polfadenlänge im Textil vorhanden. Da die Vorversuche gezeigt haben, dass die Haftung zwischen Beton und Textil gering ausfällt, werden in der ersten Versuchsreihe zwei Varianten hergestellt, die zusätzlich eine Noppenstruktur aufweisen. Um eine bessere Haftung des Textil-Beton-Composites mit einem weiteren Material zu verbessern, sind die Abstände der beiden Decklagen in zwei Varianten als Rippenstruktur ausgelegt. Für die erste Versuchsreihe der Abstandsgewebe aus Basalt, wurden vier unterschiedliche Abstandsgewebe hergestellt. Die Abstandsgewebe unterscheiden sich hinsichtlich ihres Aufbaus. Alle Gewebe haben webstuhlbedingt eine Breite von 1 m.

Variante 1 und Variante 2 (Abb 7.102)

- konstanter Abstand der Decklagen von 90 mm (2 Blindschüsse)
- immer 4 Polfäden liegen nebeneinander
- alle Polfäden wechseln gleichzeitig im Abstand von 4 cm
- der Abstand zu der nächsten Polfadengruppe beträgt 4 cm
- Variante 1 keine Noppen
- Variante 2 mit Noppen
(1 Blindschuss) zur verbesserten Haftung mit dem Beton

in der Abbildung dargestellt aussehen. Dabei steigt der Abstand beider Decklagen von 30 mm auf 150 mm mit einer Zwischenstufe von 90 mm an. In Schussfadenrichtung findet der Anstieg von 30 mm auf 150 mm Decklagenabstand nicht mit einer Zwischenstufe statt. Das 3D-Schema ist in Abbildung 7.106 zu sehen. Der Anstieg von 30 mm über 90 mm auf 150 mm Decklagenabstand ist im 3D Schema gut zu erkennen. Im gewebten Versuchsteil ist das im nicht ausbetonierten Zustand nicht zu erkennen.

Abbildung 7.106



Basaltgewebe Variante 7 „Kissen“, oben: Schnitt in Schussrichtung, Grün: Schüsse in den Decklagen, Rot=Blindschüsse, Schwarz= Polfäden; Links: Schemavariante, mit gedehnten Polfäden; Rechts, 3D Gewebe

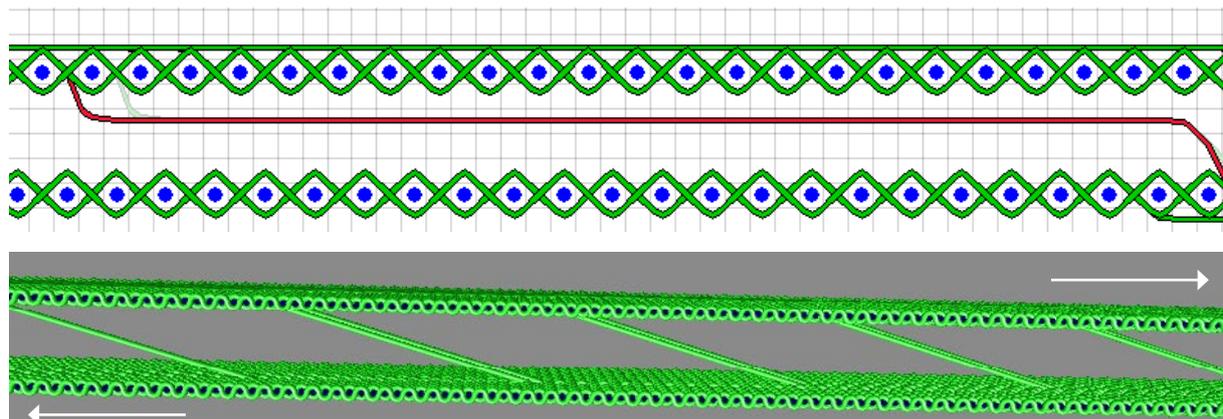
Resümee Die Herstellung eines Abstandsgewebes, das sowohl in der Kette als auch im Schuss aus Basaltfasern besteht ist als Erfolg zu werten. Die angefertigten Abstandsgewebe entsprechen den an sie gestellten Anforderungen. Die Verarbeitung von Basaltfasern im Schuss, stellt dabei eine Herausforderung dar, da der Basaltrovings sich als relativ glatt erweist und damit zu Beginn der Fertigung viele Schussfäden nicht korrekt eingetragen werden konnten. Durch Optimierungen in den Greifer Einstellungen und der Schussfadenbremse konnte dieser Fehler deutlich reduziert werden. Auch das korrekte Einbringen der Blindschüsse ist nach anfänglichen Schwierigkeiten gelungen. Die eingesetzten Weblanzetten sollten dabei so dicht wie möglich angeordnet werden, da die Blindschüsse sonst nicht in ihrer Position gehalten werden. Der darüber abbinde Kettfaden zieht den Blindschuss bei einer zu geringen Weblanzetten-Dichte aufgrund seiner Spannung zusammen und die Fadenspeicherung fällt zu geringer aus. Das Erzeugen von Noppen in den Gewebe-decklagen verbessert die Verbindung zwischen Basaltgewebe und Schaumbeton deutlich.

7.1.3 Herstellung von Abstandsgeweben aus Glasfasern

Die Herstellung des Abstandsgewebes aus alkaliresistenten Glasfasern übernahmen ebenfalls die DITF, da ein Projektpartner kurzfristig und pandemiebedingt abgesprungen ist. An der DITF stand dafür als Maschine ersatzweise eine CCI Evergreen II zur Verfügung. Es handelt sich dabei um eine Musterwebmaschine, welche insgesamt über 24 Schäfte verfügt. Da diese Webmaschine keine klassische Abstandswebmaschine ist, muss für die Herstellung der Abstandsgewebe aus AR-Glasfasern auf einige spezielle Produktionstechniken zurückgegriffen werden. Anders als bei der Webmaschine Velvet Tronic VTR42 der Fa. Vandewiele ist es bei dieser Webmaschine nicht möglich Weblanzetten anzubringen und die Schäfte können auch nur zwei anstatt drei Stellungen anfahren.

Das Fertigen eines Abstandsgewebes aus AR-Glas, das sowohl in der Kette als auch im Schuss aus AR-Glasfaser besteht, ist auch in diesem Fall eine Neuheit. Es ist nicht bekannt, dass Abstandsgewebe aus AR-Glasfasern sowohl in Kette als auch Schuss jemals hergestellt wurden. Es kann diesbezüglich auf keinerlei Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Da die hergestellten Abstandsgewebe aus AR-Glasfaser mit Blähglas befüllt werden sollen, müssen die Polfäden im Textil so angeordnet werden, dass ein problemloses Befüllen gewährleistet werden kann. Gleichzeitig müssen die Decklagen dicht genug sein, dass kein Blähglas während des Befüllens ausläuft. Vorversuche ergaben, dass eine Polfadenstruktur mit einem Abstand von 4 cm x 4 cm für ein

Abbildung 7.107



oben: Herstellung eines Polfadenschusses (Polfadenschuss = rot; Schuss = grün; Kettfäden = blau)
 unten: Aufstellen des AR-Glasfasergewebes durch Ziehen in gegensätzlicher Richtung

problemloses Befüllen ausreichend ist. Da es sich bei der Evergreen II um keine klassische Abstandswebmaschine handelt, werden beide Gewebelagen in einer Ebene hergestellt. Zur Herstellung dieser Abstandsgewebe ist der Polfaden, welcher zwischen den beiden Ebenen die Z-Verbindung realisiert, ein Schussfaden. Bei den Basaltgeweben ist der Polfaden ein Faden des Kettsystems. Auch der Polfadeneintrag wird grundlegend anders durchgeführt. Der Abstand des Basaltgewebes wird durch den Einsatz von Weblanzetten und Zwischenschüssen erreicht, welche die beiden Gewebelagen separieren. Für das Herstellen von Abstandsgeweben auf der Musterwebmaschine von CCI ist diese Methode nicht geeignet. In dieser Methode werden beide Gewebelagen übereinander hergestellt, sprich ein Abstand zwischen den beiden Gewebelagen ist während der Herstellung nicht vorhanden. Um trotzdem einen Polfaden in das Gewebe integrieren zu können, werden die Kettfäden in einzelne Gruppen eingeteilt, welche dann einem Schaft zugeteilt werden. Die Einteilung der Kettfadengruppen auf verschiedene Schäfte erlaubt es den Pol-Schussfaden zwischen den zwei Gewebelagen zu flotten, bevor er in der gegenüber liegenden Gewebelage abbindet. Der Gewebeabstand zwischen beiden Gewebelagen wird durch das Flotten des Polfadens zwischen den Gewebelagen eingestellt. In Abbildung 7.107 ist ein solcher Verlauf zu sehen. Der Polfadenschuss (rot) bindet zuerst in der oberen Gewebelage ab, bevor er zwischen den beiden Gewebelagen flottet. Durch die Strecke der Flottung wird der spätere

Abstand zwischen den beiden Gewebelagen eingestellt. Nach der Flottung bindet der Polschussfaden in die untere Gewebelage ein. Mit jedem Schuss kann maximal eine Polstelle erzeugt werden, da ein Aufstellen des flachen Doppellagen-Gewebes zu einem Abstandsgewebe sonst nicht mehr möglich ist. Aus dem gleichen Grund kann auch der Polwechsel nur in einer Richtung erfolgen, z.B. von der oberen Gewebelage in die untere Gewebelage. Ein weiterer Punkt der beachtet werden sollte, ist der, dass sich mit jedem Polwechsel die Schussfadendichte in der zuerst eingetragenen Gewebelage verringert und in der zuletzt eingetragenen Gewebelage erhöht. Um das Gewebe aufzustellen und aus den beiden flachen Gewebelagen ein Abstandsgewebe zu generieren muss nur an den beiden Gewebelagen in Schussrichtung in die entgegengesetzte Richtung gezogen werden, s. Abb. 7.107.

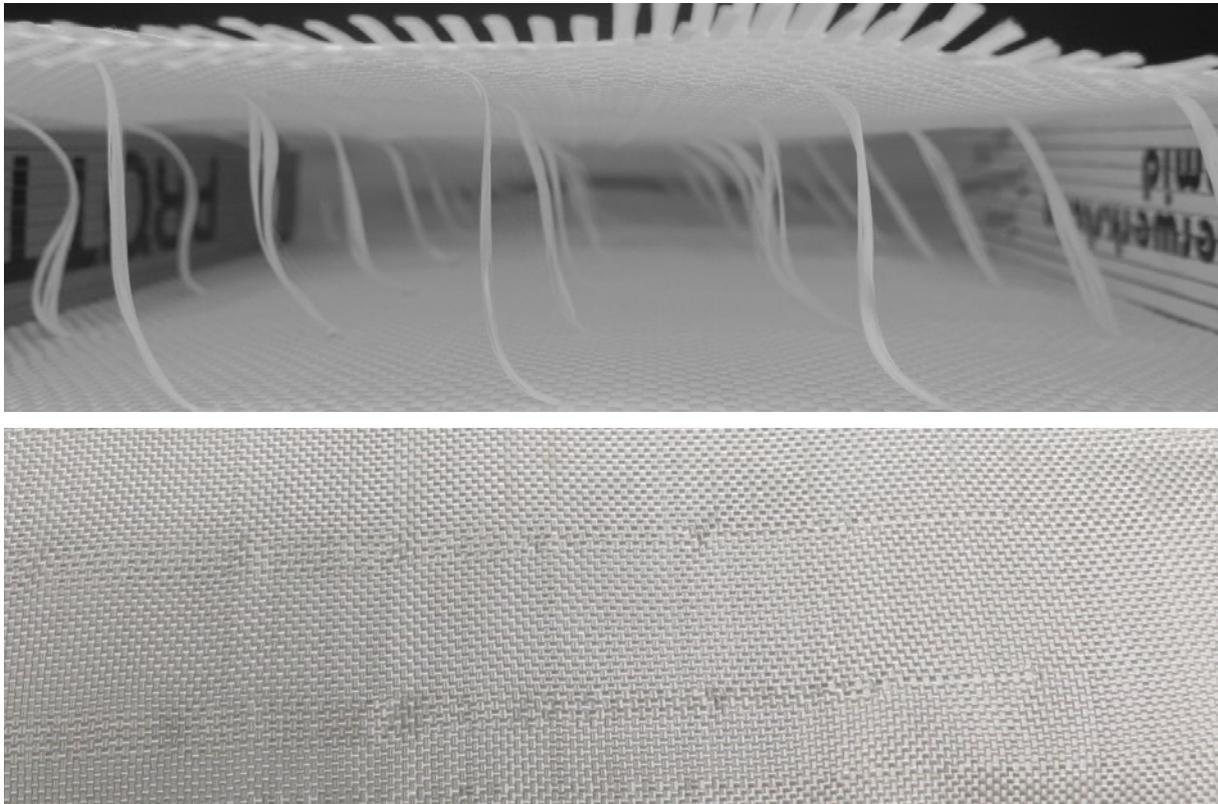
7.1.3.1 Technik und Herausforderungen

Es wurde entschieden, für die Befüllversuche zwei unterschiedliche Varianten von AR-Glasfaser Abstandsgewebe herzustellen. Als Material werden sowohl im Schuss als auch in der Kette AR640S-920 von Nippon Electric Glass verwendet. Die gewählte Textilgeometrie (Decklagenabstand, Polfadendichte) beruht auf den Ergebnissen der orientierenden Erstversuche aus PE Abstandsgeweben.

Variante 1, (Abb. 7.108)

- 2 Gewebelagen; Schussfadendichte 6 Fäden / cm, Kettfadendichte 6 Fäden / cm
- Anzahl der Polfäden in Schussrichtung 5
- Anzahl der Polstellen in Schussrichtung 5
- Polfadenabstand beträgt sowohl in Schuss- als auch in Kettrichtung 4 cm untereinander

Abbildung 7.108



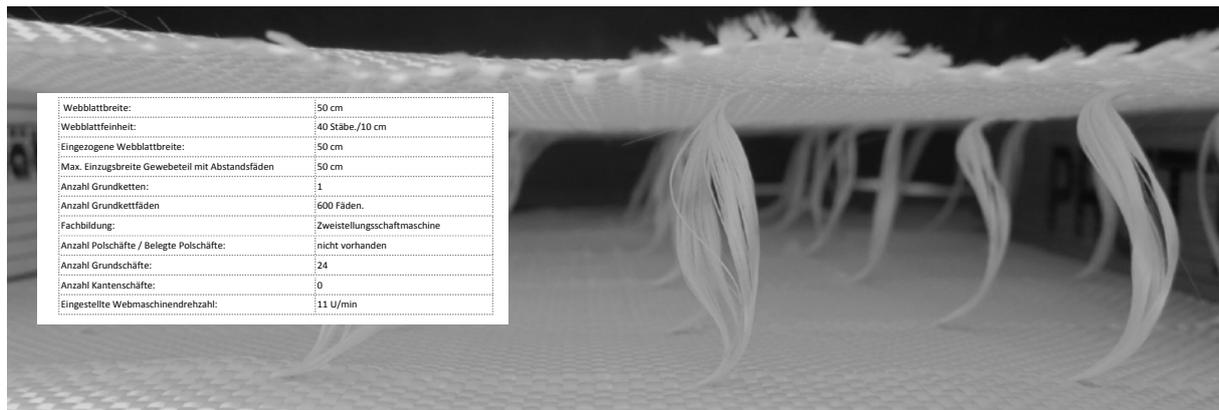
AR-Glasfaser Abstandsgewebe Variante 1: Polfadenraster 4 cm, oben: Blick in das 3D Gewebe; unten: Aufsicht auf eine Decklage, man sieht den leichten Versatz im Polfadenraster aufgrund der Herstellungsbedingungen (Polfaden = Schussfaden)

Variante 2, (Abb. 7.109)

- 2 Gewebelagen; Schussfadendichte 6 Fäden / cm, Kettfadendichte 6 Fäden / cm
- Anzahl der Polfäden in Schussrichtung 10
- Anzahl der Polstellen in Schussrichtung 5
- Polfadenabstand beträgt sowohl in Schuss- als auch in Kettrichtung 4 cm untereinander

Um alternativ die doppelte Anzahl an Polfäden pro Abbindepunkt zu erreichen wird eine Spule erzeugt, auf welcher zwei AR-Glasfaserfäden aufgespult sind. Der Greifer nimmt beim Schusseintrag beide Fäden gleichzeitig auf und trägt diese auch gemeinsam ein, bevor das Webblatt beide Fäden gemeinsam an die Webkante anschlägt.

Abbildung 7.109



AR-Glasfaser Abstandsgewebe Variante 1: Polfadenraster 4 cm, doppelte Polfäden in Schussrichtung

Resümee Die Herstellung eines Abstandsgewebes aus AR-Glas sowohl in Kette und Schuss, ist als Erfolg zu werten. Die Abstandsgewebe entsprechen den an sie gestellten Anforderungen. Die Verarbeitung von AR-Glasfasern zu einem Abstandsgewebe mittels einer Musterwebmaschine führt zu einigen Herausforderungen. Um das Gewebe herzustellen müssen alle 24 Schäfte der Maschine belegt werden um die vier Abbindepunkte zu erzeugen. Mehr Abbindepunkte in Schussrichtung sind mit dieser Maschine somit nicht herstellbar. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schäfte mit den meisten eingezojnen Kettfäden dem Webfach am nächsten sind. Um einen korrekten und schonenden Schusseintrag zu ermöglichen, ist die Eintragsgeschwindigkeit für die Gewebe-Variante 2 deutlich gesenkt worden. Das hat den Grund, wie schon im vorhergehenden Kapitel erwähnt, dass gleichzeitig zwei Schussfäden von einer Spule eingetragten werden. Da die Kettfadenlänge durch das Herstellverfahren auf 3,6 m begrenzt ist, können auf der Maschine nur Gewebe

Abbildung 7.110



AR-Glasfaser, Auffasern am Einzug der Webmaschine

hergestellt werden, welche etwas über 2 m Länge besitzen. Die restliche Kettfadenlänge wird für den Einzug, das Anweben und durch den Abstand des Kettbaumes zur Webkante verbraucht.

Da sich in den erneuten Versuchen zur Haftung zwischen Faser- und Füllmaterial diese als nicht optimal herausgestellt hat (Anlage 2), sollen in weitergehenden Versuchen die Decklagen der Abstandsgewebe offener gestaltet werden. Ziel ist es eine mechanische Verbindung zwischen Befüllmaterial und 3D Glasgewebe zu erzeugen. Für die Umsetzung eines solchen Gewebes konnte nach Ausfall des ursprünglichen Projektpartners mit der Firma Pile Fabrics glücklicherweise ein neuer Projektpartner gefunden werden. Erste Versuche dort wurden bereits gemacht. Dabei faserten die Rovings am Einzug der Maschine zunächst stark aus, s. Abb. 7.110. Derzeit werden die Rovings von einem weiteren Verarbeiter mit einer leichten Drehung versehen, um das Problem zu lösen. Im nächsten Schritt sind Gewebe entsprechend der Varianten 1 und 2 in Planung. Die Decklagen dieser AR-Glas Abstandsgewebe sollen zudem unterschiedlich dicht gewebt werden, um auch einfach gekrümmte Demonstratoren herstellen zu können (dichte Decklage aussen, weniger dichte Decklage innen)

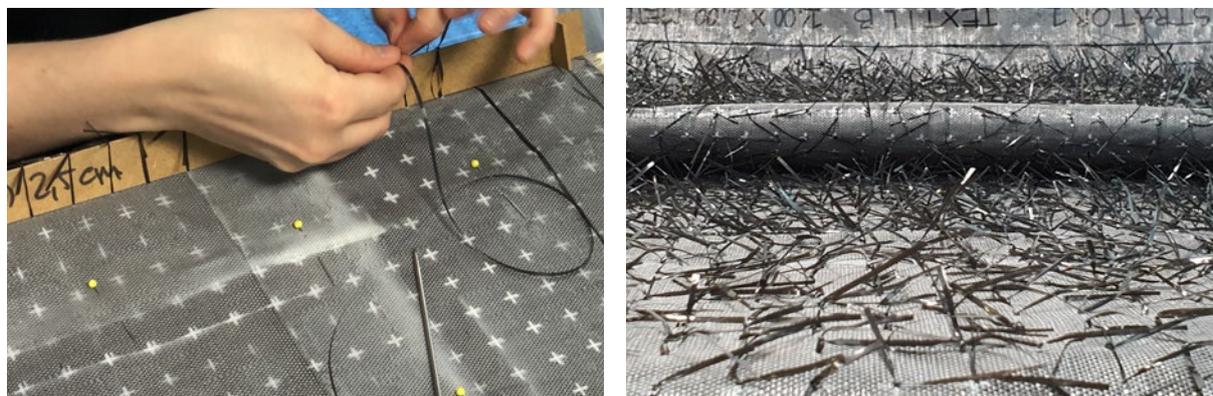
7.1.4 Herstellung von Abstandsgeweben aus PET-Bändchen (s. auch Anlage 3, Autorin Johanna Beuscher)

Der Projektpartner Propex stellt aus Rezyklat PET-Folien und daraus PET-Bändchenmaterial her (siehe Anlage 3 und Abschnitt 6.4.2.2). Zur Herstellung von Doppelabstandsgeweben kommen dabei Sulzer Projektil-Webmaschinen zum Einsatz, mit Gewebebreiten von bis zu 520 cm und Decklagenabstände von derzeit maximal 3 - 4 cm. Durch Jacquard-Webtechnik sind zukünftig neben orthogonalen auch z.B. diagonale Kanalstrukturen als dreidimensionale Textilgeometrie denkbar. Das PET Material kann ausserdem überfärbt werden, so daß dunkle Farbtöne erzeugt werden können, changierend zwischen Blau, Grün, Braun und Grau.

7.1.4.1 Technik und Herausforderungen

Die Herstellung eines Abstandstextils aus PET war im Projektverlauf aufgrund der Corona-Pandemie nicht mehr darstellbar. Es konnten aber für ge3TEX noch einlagige Flächengewebe des Typ A und B zur Vefügung gestellt werden. Zur Herstellung größerer Demonstratoren wurden daraus an der Frankfurt University Abstandstextilien durch händisches Einbringen von Polfäden angefertigt (Abb. 7.111). Als Polfadenmaterial wurden die neu entwickelten Bändchen aus PET/PBT Material des Textils B mit optimiertem Schmelzpunkt genutzt, für das Polfadenraster wurde für 4 cm und alternativ 2 cm entschieden. Entsprechend wurden Rastermarkierungen mit Hilfe einer Schablone auf die Textilien aufgesprüht und mit einer Behelfslanzette aus MDF (s. Abb. 7.111 links) definierte Polfadenlänge abgemessen, durch beide Textillagen geführt und verknotet. Die beiden Textillagen wurde zuletzt auseinandergezogen und so für das Befüllen vorbereitet.

Abbildung 7.111

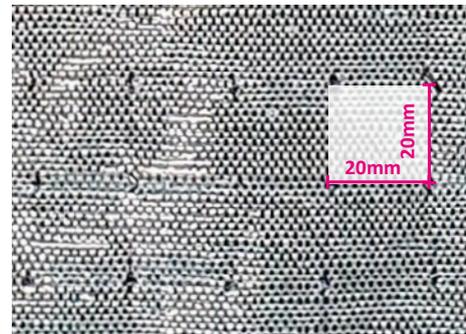
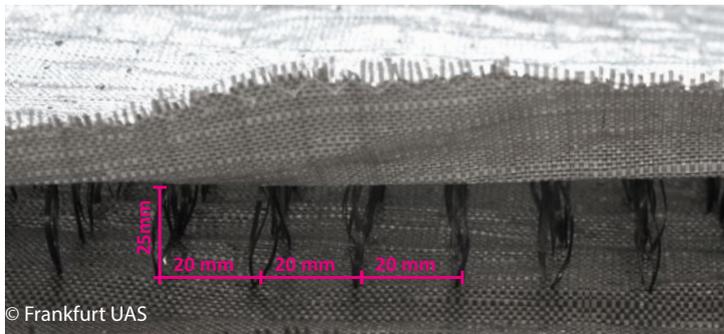


PET Abstandsgewebe, Fertigung an der FRA-UAS: Pandemiebedingt werden einlagige PET Textilien der Sorte A und B (s. Anlage 3, 6.4) händisch zu Abstandsgeweben gefügt

Variante 1, planares Element, (Abb. 7.112)

- Variante 1a aus Textil A, Variante 1 b aus Textil B
- Abstand der Decklagen durchgängig 2,5 cm
- Polfadenraster 2 cm * 2 cm
- Befüllbereich innen 38 cm * 58 cm

Abbildung 7.112

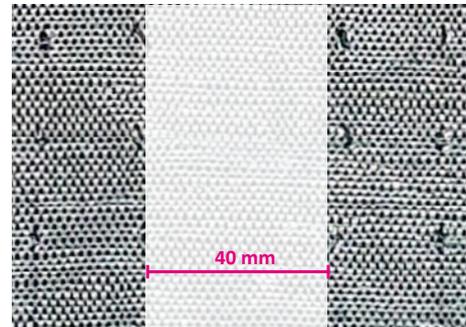
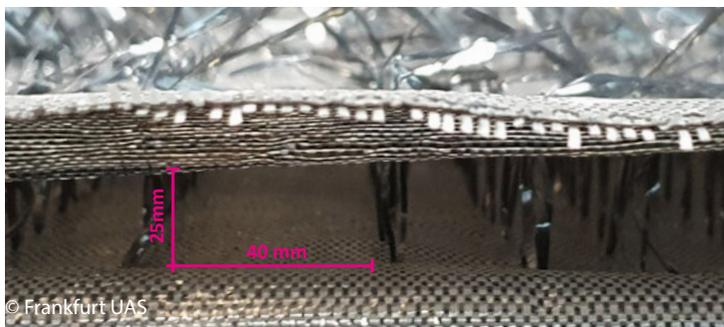


PET Abstandsgewebe, planares Element

Variante 2, Rippenelement (Abb. 7.113)

- Textil B
- Abstand der Decklagen durchgängig 2,5 cm
- Polfadenraster 2 cm * 2 cm, Ausnahme Kanalstruktur mit Polfadenabstand 4 cm
- Befüllbereich innen 34 cm * 42 cm

Abbildung 7.113



PET Abstandsgewebe, Rippenelement

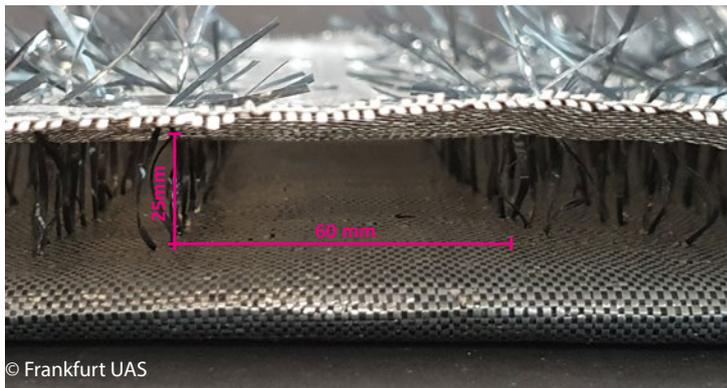
Variante 3, Kreuzelement (Abb. 7.114)

- Textil B
- Abstand der Decklagen durchgängig 2,5 cm
- Polfadenraster 2 cm * 2 cm, Ausnahme gekreuzte Kanalstruktur mit Polfadenabstand 6 cm
- Befüllbereich innen 34 cm * 42 cm

Variante 3, Vierpunktelement (Abb. 7.115)

- Textil B
- Abstand der Decklagen durchgängig 2,5 cm
- Polfadenraster 2 cm * 2 cm, Ausnahme vier bereich mit Polfadenraster 6 cm * 6 cm
- Befüllbereich innen 34 cm * 42 cm

Abbildung 7.114



PET Abstandsgewebe, Kreuzelement

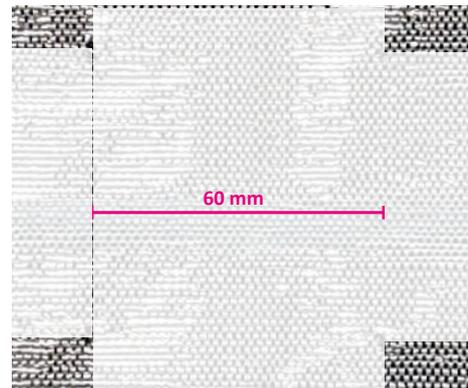
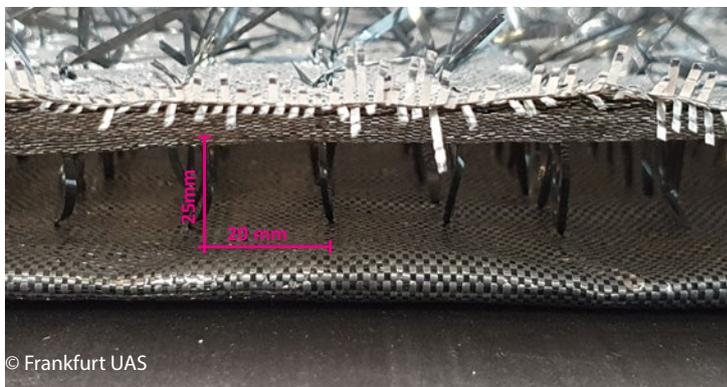
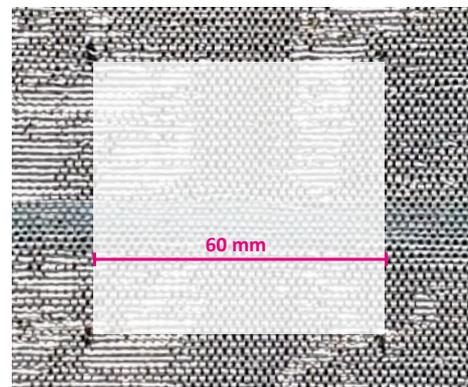


Abbildung 7.115



PET Abstandsgewebe, Punktelement



Resümee Die händische Herstellung war nicht geplant aber alternativlos. Generell und in normalen Zeiten können die Gewebe problemlos maschinell auf der Sulzer Projektile-Webmaschinen hergestellt werden. Hier sind laut Industriepartner auch größere Decklagenabstände möglich bzw. kann die Maschine entsprechend eingestellt werden. Die Jacquardtechnik ermöglicht zudem alternativ auch noch weitere Muster bzw. Textilgeometrien, über die hier gewählten „Rippe, Kreuzung und Punkte“ hinaus.

7.2 Ausschäumen / Befüllen der 3D Textilien

7.2.1 Abstandstextil aus Basaltfasern, befüllt mit Schaumbeton (s. auch Anlage 1, Autor Maier, Andreas)

Voruntersuchungen 3D Gewebe aus Polyester: Für erste Befülltests wurden von den DITF zunächst Polyestergerewebe unterschiedlicher Geometrien gefertigt. Untersucht werden sollte:

- das Einbringen des Schaums unter Beachtung der Fertigung bei der Firma Wilhelm Röser Söhne GmbH & Co. KG im Betonwerk Dorfmerkingen; der eingesetzte Schaumgenerator hat einen Leitungs- und Einfüllschlauch mit einem Durchmesser von 5,5 cm
- die Verteilung des Schaums im Gewebe sowie die Morphologie des Schaums bei größeren Befüllhöhen
- das Verformungsverhalten des Textils unter dem Druck des Zementschaums

Entsprechend wurde Befüllstrategien untersucht s. Kapitel 5.2 und Polfadenabstände variiert (Abb. 7.200) Zum Hängen der Textilien wurden Laschen angenäht, befüllt wurde sowohl über die kurze wie lange Seite und zuletzt auch hängend von zwei Seiten, zur Herstellung gekrümmter, formaktiver Bauteile. Abbildung 7.201 zeigt die ersten Versuche mit Polyestergereweben.

Ergebnis: Bauteildicken von min. 4,5 cm mit Polfadenabstand 4 cm lassen sich mit dem Mischer und dem Transportschlauch gut füllen. Geringere Bauteilhöhen 4,0 cm lassen sich wenig bis gar nicht befüllen, auch Einfüllgassen funktionieren nicht. Bei den 180 cm langen Bauteilen unterstützt die Schwerkraft den Füllprozess in ausreichendem Maße. Und auch das formaktive Bauteil ließ sich gut befüllen. Für ein Gewebe war der

Abbildung 7.200



PE Gewebe, befüllt mit Zementschaum,
links unbefüllt: L * B * H = 40 cm * 40 cm * 4,5 cm, Polfadenraster von unten nach oben, 1 cm * 1 cm, 2 cm * 2 cm und 4 cm * 4 cm
mitte L * B * H = 180 cm * 40 cm * 4,5 cm, Polfadenraster 4 cm * 4 cm, Befüllung über die lange Seite, rechts befüllt

Abbildung 7.201



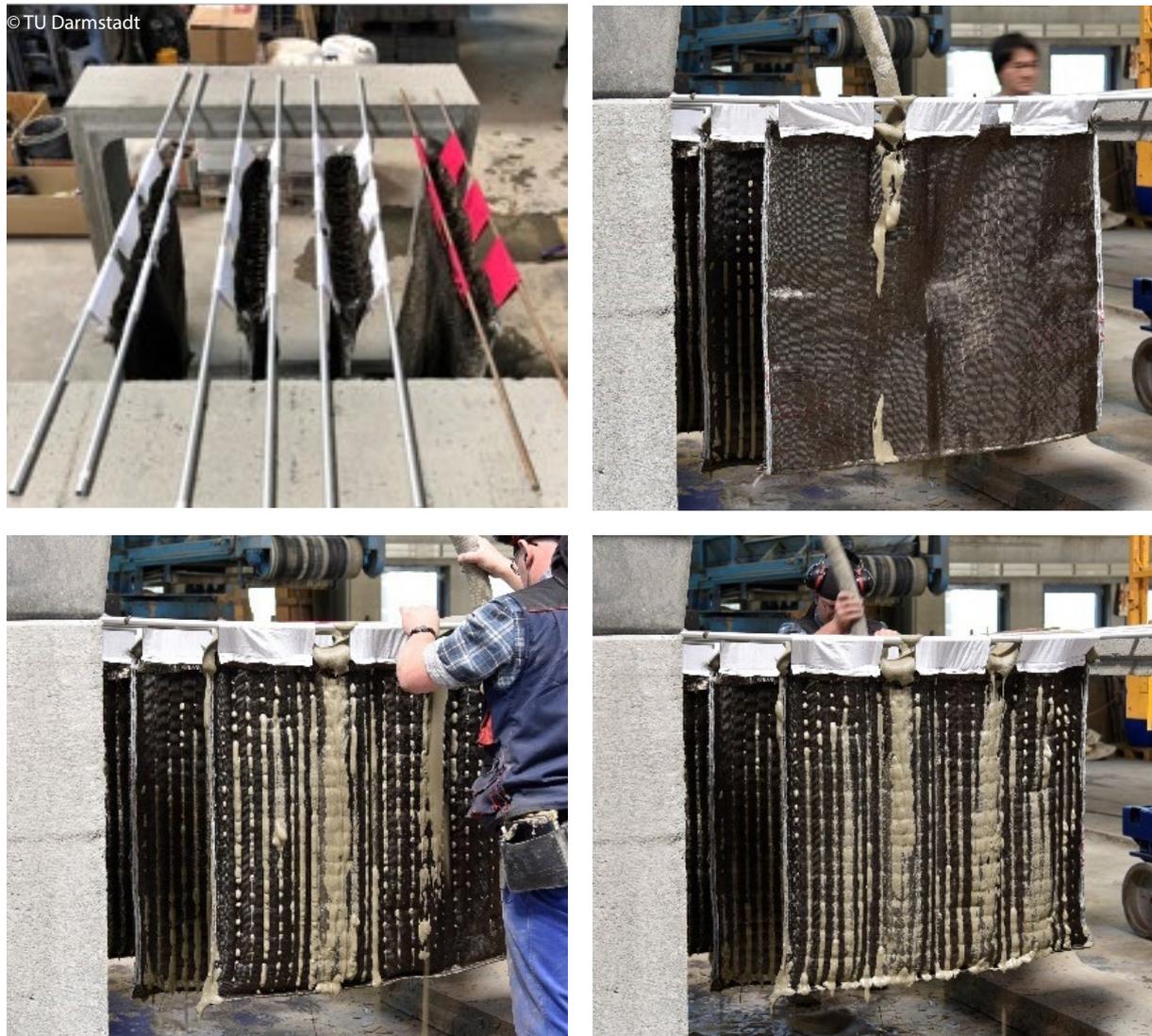
PE Gewebe, befüllt mit Zementschaum
links L * B * H = 180 cm * 40 cm * 4,5 cm, Polfadenraster 4 cm * 4 cm Befüllung über die kurze Seite daneben befüllt
rechts: L * B * H = 180 cm * 40 cm * 4,5 cm, Polfadenraster 4 cm * 4 cm Befüllung zweiseitig über die kurzen Seiten

Bogenstich zu groß, die Decklagen wurden zusammengedrückt und der Befüllvorgang unterbrochen. Prinzipiell funktioniert eine solche Befüllung aber bei weniger großen Stichmaßen.

Demonstratoren aus Basaltgewebe und Zementschaum $L * B * H = 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm} * 9 \text{ cm}$ Die Ersten Demonstratoren aus Basaltgeweben wurden aus dem Roving BF17 (Kapitel 6.2) hergestellt, die Textilgeometrie entspricht den Varianten 1 bis 4 (Kapitel 7.1.2.1), ohne und mit Noppen, flach und in Rippenstruktur. Die Polfädenabstände betragen $4 \text{ cm} * 4 \text{ cm}$, entsprechend den vorangegangenen Versuchen mit PE Material und wie in Abbildung 7.202 dokumentiert.

Im Ergebnis ließ sich feststellen, dass sich sämtliche Taschen gut befüllen ließen. Die innenliegenden Noppen bzw. Schlaufen haben keine negativen Auswirkungen auf das Hineinfließen des Schaumes. Die Schaumverteilung erwies sich als sehr homogen für beide Textilgeometrien. Es zeigten sich auch optisch keine Unterschiede zu den Elementen ohne Schlaufenausbildung entsprechend Abbildung 7.203. Allerdings tritt im Bereich der Schlaufenausbildung vermehrt Schaum durch die Nahtöffnungen an den Oberflächen heraus. Die in der textilen Geometrie angelegten Rippen ließen sich durch den Schaumdruck ausbilden

Abbildung 7.202



Basaltgewebe befüllt mit Zementschaum, $L * B * H = 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm} * 9 \text{ cm}$, Polfadenraster $4 \text{ cm} * 4 \text{ cm}$, Variante 1 ohne innenliegende Noppen, Variante 2 mit innenliegenden Noppen (s. Kapitel 7.1.2.1)

Abbildung 7.203



3D Basaltgewebe befüllt mit Zementschaum, oben mit und unten ohne innenliegende Schlaufen (Noppen)

Demonstratoren aus Basaltgewebe und Zementschaum $L * B * H = 100 \text{ cm} * 470 \text{ cm} * \text{ca } 15 \text{ cm}$ Im nächsten Schritt wurden längere Basalttextilien hergestellt gem. Kapitel 7.1.2.1 Varianten 5 - 7 und diese zudem zusätzlich zur Planar- und Rippenvariante in einer Kissen geometrie gefertigt. D.h., die Bauteilhöhen variieren bei der flachen Struktur mit $H = 15 \text{ cm}$ über die Rippenstruktur mit $H = 3 \text{ cm} / 15 \text{ cm}$ bis hin zur Kissenstruktur mit $H = 3 \text{ cm} / 9 \text{ cm} / 15 \text{ cm}$ und Kissenrößen von $\text{ca } 30 \text{ cm} * 40 \text{ cm}$. Aufgrund der großen Länge musste eine Konstruktion gebaut werden, um eine Befüllung von oben zu ermöglichen. Weiterhin wurde dafür Sorge getragen, dass die einzelnen Elemente auch nach dem Befüllen -sie wiegen dann $\text{ca. } 130 \text{ kg}$ - noch bewegt werden können. Für die Bewegungsmöglichkeit wurden die durch die Traglaschen geführten Gewindestangen auf Schwerlastrollen gelegt und konnten somit auch in $\text{ca. } 5,0 \text{ m}$ Höhe bewegt werden, s. Abb. 7.204)

Abbildung 7.204



links: Aufhängung der 470 cm langen Basalttextilien, Varianten „Planar“, Rippen“ und „Kissen“
rechts: Einfüllung von oben, Schaumaustritt im Bereich der Polfäden / Decklagen

Ergebnis Es lassen sich sowohl ebene als auch gerippte Elemente und auch Elemente mit einer kissenartigen Struktur herstellen. Die Füllung, die sich im Querschnitt einstellt, s. Abb. 7.205, ist in allen Bereich vollflächig vorhanden. Die Kissenstruktur prägt sich im Vergleich zu den Rippen allerdings nicht so deutlich aus wie erwartet. Das Gewebe ist zu steif, die Kissen zu kleinteilig angelegt. Generell ist festzustellen, daß bei der gewählten Höhe aufgrund des erhöhten Betonierdrucks vermehrt Schaum nicht nur im Bereich der Polfäden, sondern auch am unteren Ende des Textils austritt. Das Gewebe müsste dazu dichter gewebt sein. Abbildung 7.206 zeigt, dass der ausgetretene Schaum entfernt werden kann.

Abbildung 7.205



Querschnitte der drei unterschiedlichen Querschnittsformen: links –Planarelement; mitte –Rippenelement; rechts – Kissenelement

Abbildung 7.206



Basalttextil- Zementschaumelemente, oben: Vor und nach Oberflächenreinigung, unten Element ca. 200 cm * 100 cm, erfolgreich getestet wurden Längen bis 380 cm

7.2.2 Abstandstextil aus Glasfasern, befüllt mit Bläh-/Wasserglas (s. auch Anlage 2, Autoren Nagel, Dominik und Rucker-Gramm, Petra)

Voruntersuchungen mit 3D Geweben und 3D Gewirken aus Polyester: Für erste Befülltests wurden sowohl Gewirke aus dem vorangegangenen Projekt 3dTEX als auch speziell von den DITF gefertigte PE Abstandsgewebe mit unterschiedlichen Textilgeometrien betrachtet. Untersucht wurde:

- das Einbringen des Befüllmaterials aus Bläh-/Wasserglas in die 3D Textilien unter Berücksichtigung der eher mörtelähnlichen Materialkonsistenz, im Gegensatz zum Zementschaum
- die Verteilung der Bläh-/Wasserglasmatrix insbesondere im Gewebe und bei größeren Befüllhöhen
- das Verformungsverhalten des Textils beim Befüllen

In der Konsequenz wurde zwei Befüllstrategien untersucht s. Kapitel 5.2. Das Einrakeln des Materials über die Deckflächen, getestet zunächst an kleinen Mustern und dann großflächig s. Abb. 7.207 links. Und das Befüllen über die Kanten s. Abb. 7.207, mitte und rechts, analog zu den Versuchen mit Zementschaum. Das Einrakeln stellte sich als einfach handhabbare, robuste Technologie heraus. Die derzeit erhältlichen Glasgewirke sind allerdings noch im FuE Stadium. Dort werden als Polfäden relativ steife Monofilamente verwendet, damit das Gewirke ein ausreichendes Rückstell- bzw. Aufstellvermögen hat. Dies ist auch hilfreich zum Einrakeln, widerspricht aber dem Projektziel, sortenreine Verbundbauteile herzustellen. Entsprechend wurde das seitliche Befüllen von Abstandsgeweben weiterverfolgt. Es wurden PE Abstandsgewebe mit unterschiedlichen Deckflächenabständen und Polfadenrastern gefertigt. In Abb. 27.206 zu sehen ein Befüllversuch mit einem Gewebe der Maße $L + b + H = 100 \text{ cm} * 40 \text{ cm} * 2 \text{ cm}$ und einem Polfadenraster von 2 cm. Die Konsistenz wird so eingestellt, dass a) sich ein homogenes, fehlstellenfreies Gefüge im Abstandstextil ergibt, b) kein Bindemittel (Wasserglas) abtropft aber c) gerade so viel Bindemittel enthalten ist, dass das Blähglasgranulat vollständig benetzt wird und sich optimal verbindet.

Abbildung 7. 207

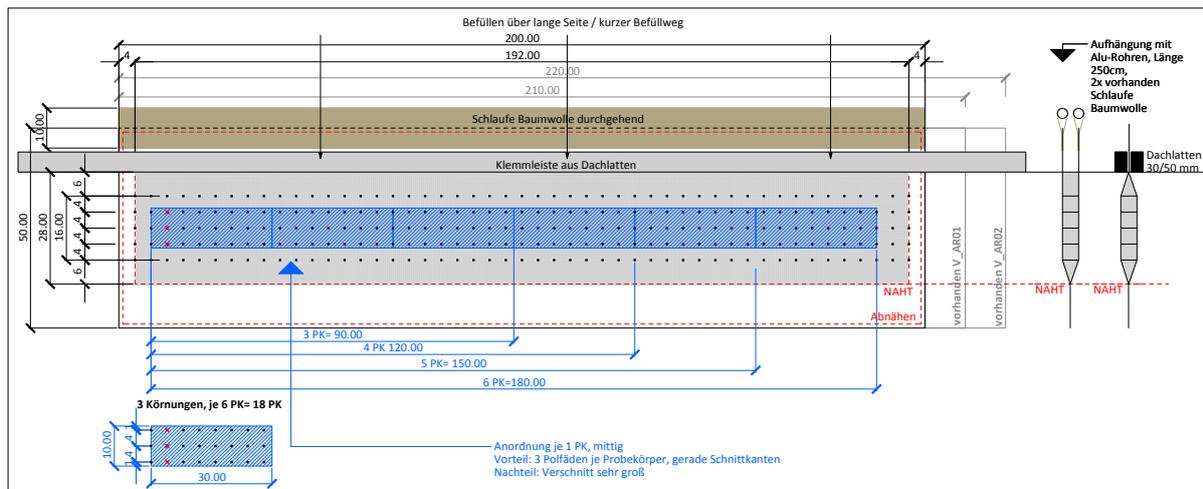


links PE Gewirke: Einrakeln der mörtelähnlichen Konsistenz der Bläh-/Wasserglasmatrix über die Deckflächen
mitte und rechts PE Gewebe: Einfüllen /Rütteln der mörtelähnlichen Konsistenz der Bläh-/Wasserglasmatrix über die Seiten

Ergebnis 3d Gewirke: Es wurde entschieden, die Technik „Einrakeln“ mit einem PE Gewirke trotz der angesprochenen Problematik betr. Sortenreinheit dennoch soweit voranzutreiben, daß diese in einem größeren Demonstrator einmal Anwendung findet, s. Kapitel 10.

Ergebnis 3d Gewebe: Das Befüllen über die Seiten in ein Abstandsgewebe ergab, dass ein minimaler Decklagenabstand und Polfadenraster von 2 cm einzuhalten ist. Für das weitere Vorgehen mit Glasgeweben wurde für Decklagen mit 4 cm Abstand und ein Polfadenraster von ebenfalls 4 cm entschieden. Das Befüllen benötigt ansonsten aufgrund der mörtelähnlichen Substanz bei größeren Höhen definitiv einen Rüttler o.ä., um eine gute Verteilung der Bläh-/Wasserglasmatrix im Textil zu erreichen und Fehlstellen zu vermeiden.

Abbildung 7.208



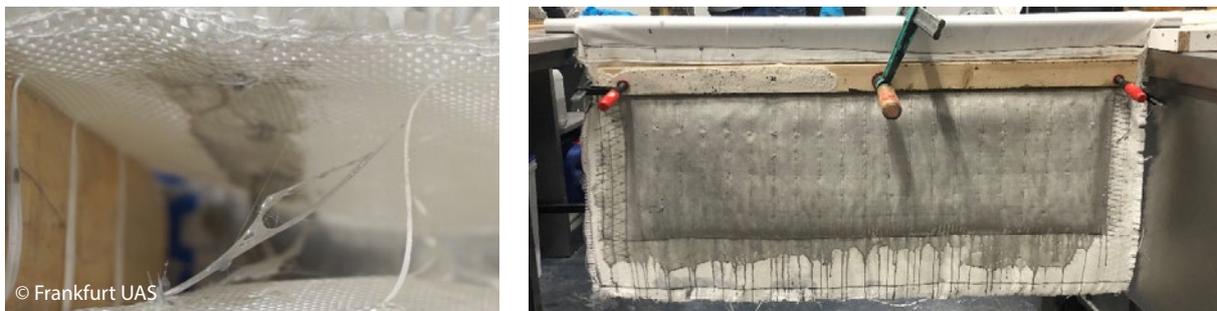
AR Glas Abstandsgewebe, Vorbereitung der Befüllung

Demonstratoren aus Glas-Abstandsgewebe und einer Bläh-/Wasserglasmatrix $L * B * H = 200 \text{ cm} * 100 \text{ cm} * 4 \text{ cm}$ Die von den DITF ersatzweise gefertigten Abstandsgewebe aus AR-Glas der Firma Nippon Electric Glass mit der Feinheit 640 tex (Roving GF9 aus Abschnitt 6.3.2) wurden gem Abb 7.208 für eine seitliche Befüllung über die lange Seite vorbereitet. Sie wurden dreiseitig zugenäht und mit Hängeschlaufen versehen. Letztendlich konnten so neben der Befüllprüfung sechs Prüfkörper für die noch ausstehenden Biegezugversuche hergestellt werden, s. Kap. 6.3.3.4.

Anders als bei den PE Abstandsgeweben müssen die AR Abstandsgewebe zusätzlich und zur besseren Haftung vor dem Befüllen mit einem Slurry aus Wasserglas vorbehandelt werden, wie bei den Haftzugprüfungen in Kapitel 6.3.2 mit Flächentextilien aus AR-Glas ermittelt. Überraschend zeigt sich, daß die Polfäden der Abstandsgewebe aber anders als erwartet durch die Vorbehandlung im Bereich der Knickstelle kurz unter den Decklagen durch den Slurry zerstört werden (Abb 7.209 links) - obwohl die Rovings aus AR Glas sind. Bei genauer Betrachtung zeigt sich, wie durch das Weben / Umlenken um 90 Grad eine Vorschädigung der Rovings entsteht. Erste Versuche mit einer Vorbehandlung des AR Gewebes alternativ von aussen, die auch verfahrenstechnisch auch besser zu bewerkstelligen ist, brachten keine Verbesserung. (Abb 7.209 rechts). Der Slurry dringt nicht durch das dichte Gewebe.

Erst mit einem geänderten Slurry mit weniger Härteranteil - vorher Geosil / Stabasil 2 / 1, dann Geosil / Stabasil 9 / 1 - konnten zunächst Verbesserungen erreicht werden. Vorversuche zeigen, dass bei einem reduzierten Stabasil-Anteil die Sprödigkeit und somit die Bruchgefahr der Polfäden reduziert werden kann. Das gesamte Gewebe entsprechend vorab mit dem geänderten Slurry getränkt (Abb. 7.210 links) . Aber auch hier zeigten

Abbildung 7.209



Befüllversuche mit AR Glas Abstandsgewebe, links zerstörten Polfäden nach Vorbehandlung, (grau: Slurry aus Geosil/Stabasil) rechts alternative Versuche mit einer Vorbehandlung des Gewebes von außen

sich nach fünf Minuten Schädigungen an den Polfäden. Zudem zeigen aufgeschnittene Probekörper Trocknungsrisse, Ihre Stabilität entspricht nicht den Erwartungen. Entsprechend wurde auch der Trocknungsprozess angepasst, (Trocknung liegend 72 h 20 °C, 48 h 80 °C) und zudem Schalplatten rechts und links montiert, s. Abb. 7.210., mitte. Dies, um zumindest die Haftung zwischen AG Glas Deckflächen und Befüllmatrix Bläh-/Wasserglas prüfen zu können bzw. den Verlust der Polfäden zu kompensieren.

Nach einer gesamten Lagerzeit von 7 Tagen werden Probekörper für Biegezugversuche herausgeschnitten. Abbildung 7.210 rechts zeigt beispielhaft einen aufgeschnittenen Probekörper aus AR Abstandsgewebe befüllt mit einer Bläh-/Wasserglasmischung aus 0,25 - 4 mm Mehrkorngemisch. Das Ergebnis ist in Bezug auf die erwarteten Festigkeiten und den Verbund nicht zufriedenstellend, s. Kap. 6.3.3

Abbildung 7.210



Befüllversuche mit AR Glas Abstandsgewebe, links Tränken des AR Abstandsgewebes mit einem Slurry aus Geosil/Stabilis im Verhältnis 9 / 1, Mitte Befüllvorrichtung, rechts aufgeschnittener Probekörper mit sichtbarer Delaminierung

Ergebnis Abbildung 7.211 zeigt die beiden AR-Glasgewebe, die aus den gleichen Rovings der Feinheit 640 tex hergestellt wurden. Links das Flächentextil für die Vorversuche mit AR Glasrovings im Schussbereich, rechts das finale AR Glas Abstandsgewebe mit AR Glasrovings in Kett- und Schussbereich. Sichtbar ist die unterschiedliche Dichte. Während sich mit dem Flächentextil vorab eine Penetration und Durchtränkung mit dem Bindemittel gut realisieren liess und ein sehr guter Verbund zur Befüllmatrix erreicht werden kann, ist die Herstellung eines ausreichenden Verbundes bei Verwendung des im Bild rechts dargestellten Ar Glas Abstandsgewebes nicht möglich. Unabhängig von der Polfadenproblematik verhindert die dichte Decklage den Verbund zwischen Decklage und Füllmaterial ausreichend herzustellen. Das dichte Gefüge lässt keine Aufnahme des Geosil/Stabilis-Slurry zu. Im Folgenden wird versucht, mit dem neuen Industriepartner AR Glas Abstandstextilien herzustellen, deren Decklage eine Penetration mit dem Slurry aus Geosil/Stabilis ermöglicht um den Verbund zwischen Decklage und Füllmatrix sicherzustellen. Für die Polfäden soll ein AR-Glasroving mit einer Feinheit von ≥ 1200 tex (s. Empfehlung Abschnitt 6.3.2.5) zur Anwendung kommen, so dass die Schädigung im Übergang des Polfadens zur Decklage möglichst geringe Auswirkungen auf die Verbundwirkung hat. Oder die Schädigung kann durch eine leichte Drehung des Rovings aus 640 tex minimiert werden.

Abbildung 7.211



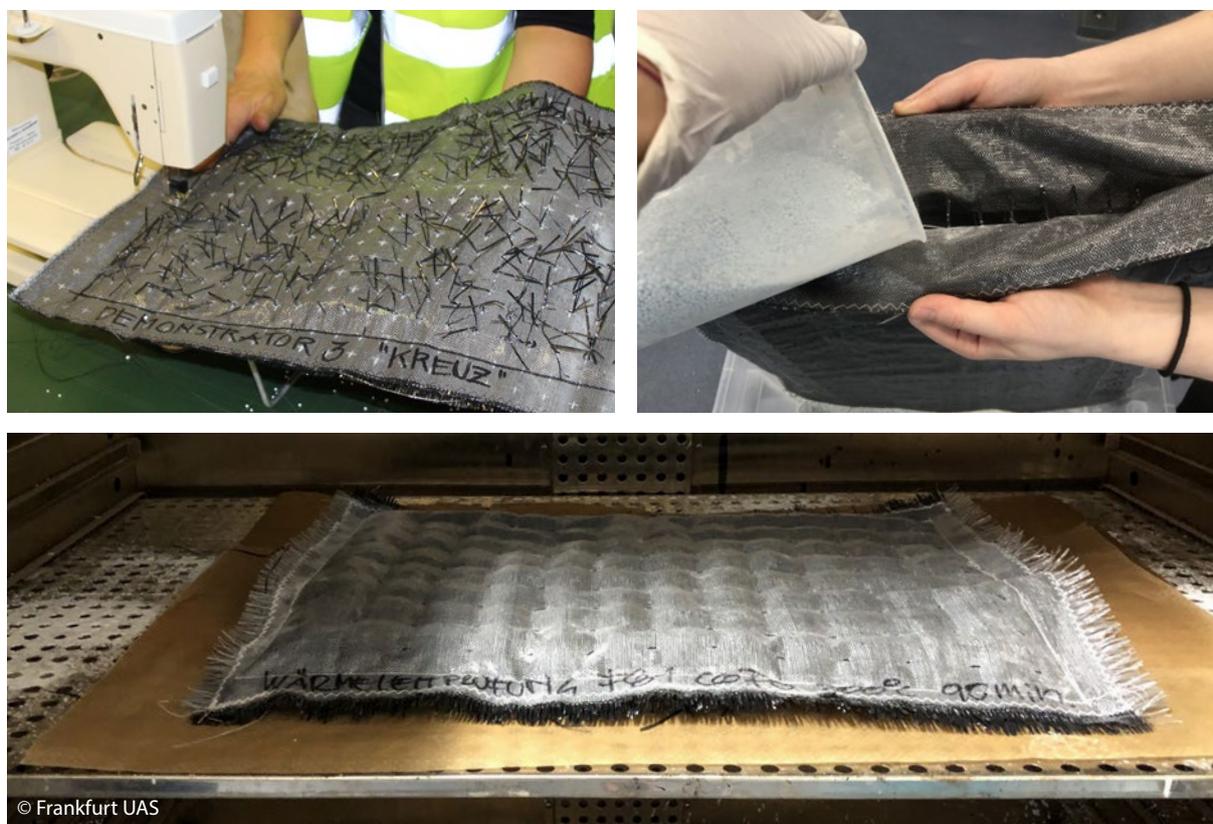
links, Flächengewebe aus AR Glas 640 tex, rechts Abstandsgewebe aus AR Glas 640 tex

7.2.3 Abstandsgewebe aus PET-Fasern ausgeschäumt mit PET-Schaum (s. auch Anlage 3, Autorin Beuscher, Johanna)

Für erste Befülltests konnten im Bereich der Werkstoffgruppe PET von Anfang an PET Flächentextilien verwendet werden, die Teil des Produktsortiments des Firmenpartners Propex sind. Sie wurden zu kleineren Taschen vernäht, um das Zusammenspiel von aufschäumendem Partikelschaum mit schrumpfendem PET Gewebe zu untersuchen und letztendlich das gemeinsame Verbundverhalten der beiden verschiedenen Materialstrukturen zu untersuchen, s. Kapitel 6.4. Experimentiert wurde dabei mit dem klassischen PET Textil der Firma (Textil A) sowie einem alternativen Textil B, aus einem für ge3TEX speziell gefertigten mehrschichtigen Bändchenmaterial mit differenziertem Schmelzverhalten.

Grundsätzlich erfolgt die Herstellung ausgeschäumter PET-Abstandstextilien in mehreren Schritten und wie in Abbildung 7.212 dargestellt

Abbildung 7.212



links oben: Textil konfektionieren

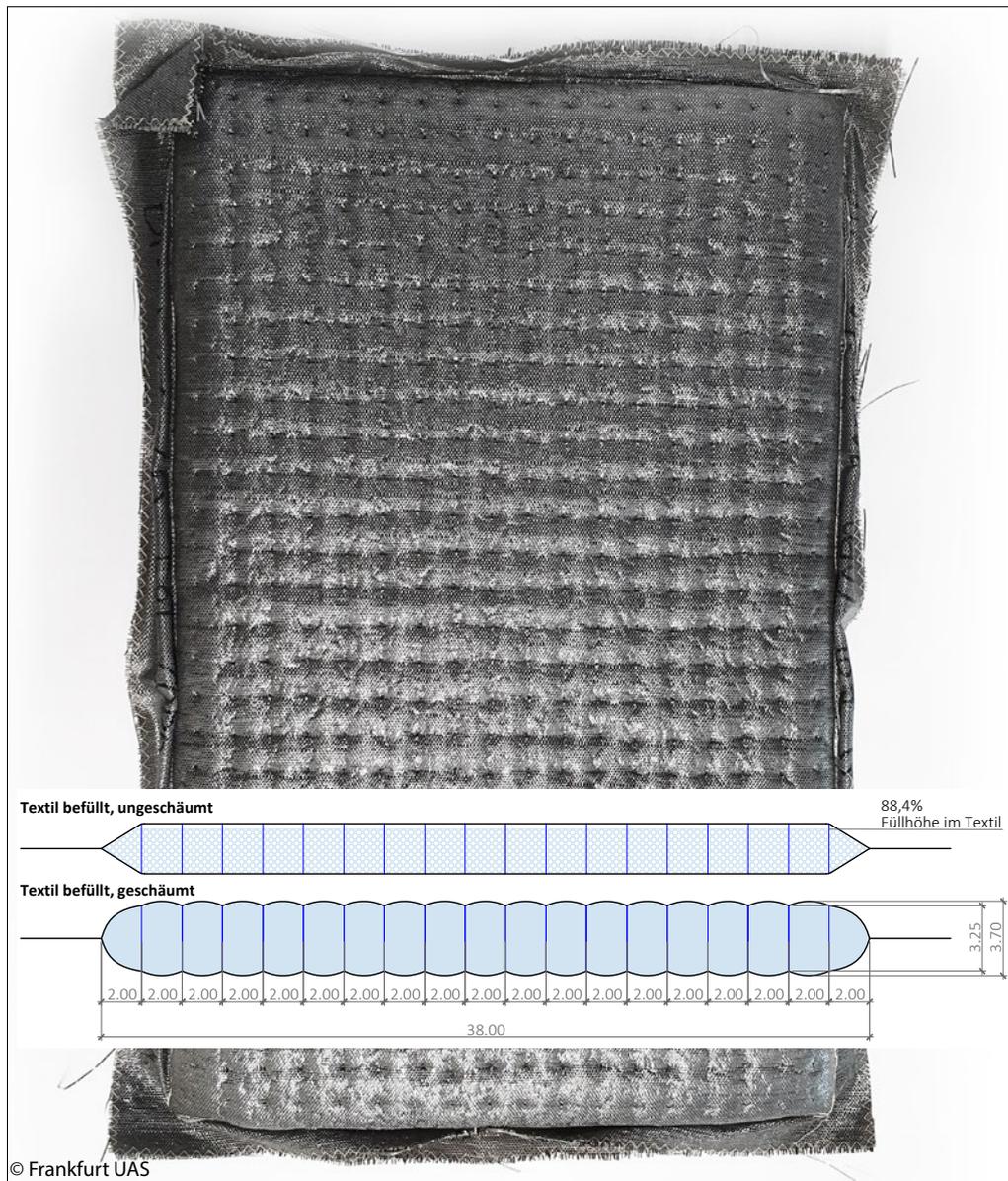
rechts oben: Vertikales Einfüllung der Mischrezeptur, Einfüllöffnung danach zunähen

unten: Im Ofen bei 190 -240°C aufschäumen

Demonstrator „Planares Element“ aus PET-Abstandsgewebe A und B und PET-Schaum $L * B * H = 58 \text{ cm} * 38 \text{ cm} * 2,5 \text{ cm}$ (Abb.7.213) Das Element wurde mit einem Polfadenraster von 2 cm und 4 cm gefertigt, Abbildung x zeigt das engere Polfadenraster von 2 cm

Demonstrator „Rippenelement“ aus PET-Abstandsgewebe B und PET-Schaum $L * B * H = 42 \text{ cm} * 34 \text{ cm} * 2,5 \text{ cm}$ (Abb.7.214) Die Rippen entstehen durch Varianten im Polfadenraster. Indem linear eine Reihe Polfäden entfällt, verdoppelt sich in dem Bereich der Polfadenabstand auf 4 cm, der entstehende Kanal transformiert beim Aufschäumen zu einem kreisförmigen Rippenquerschnitt.

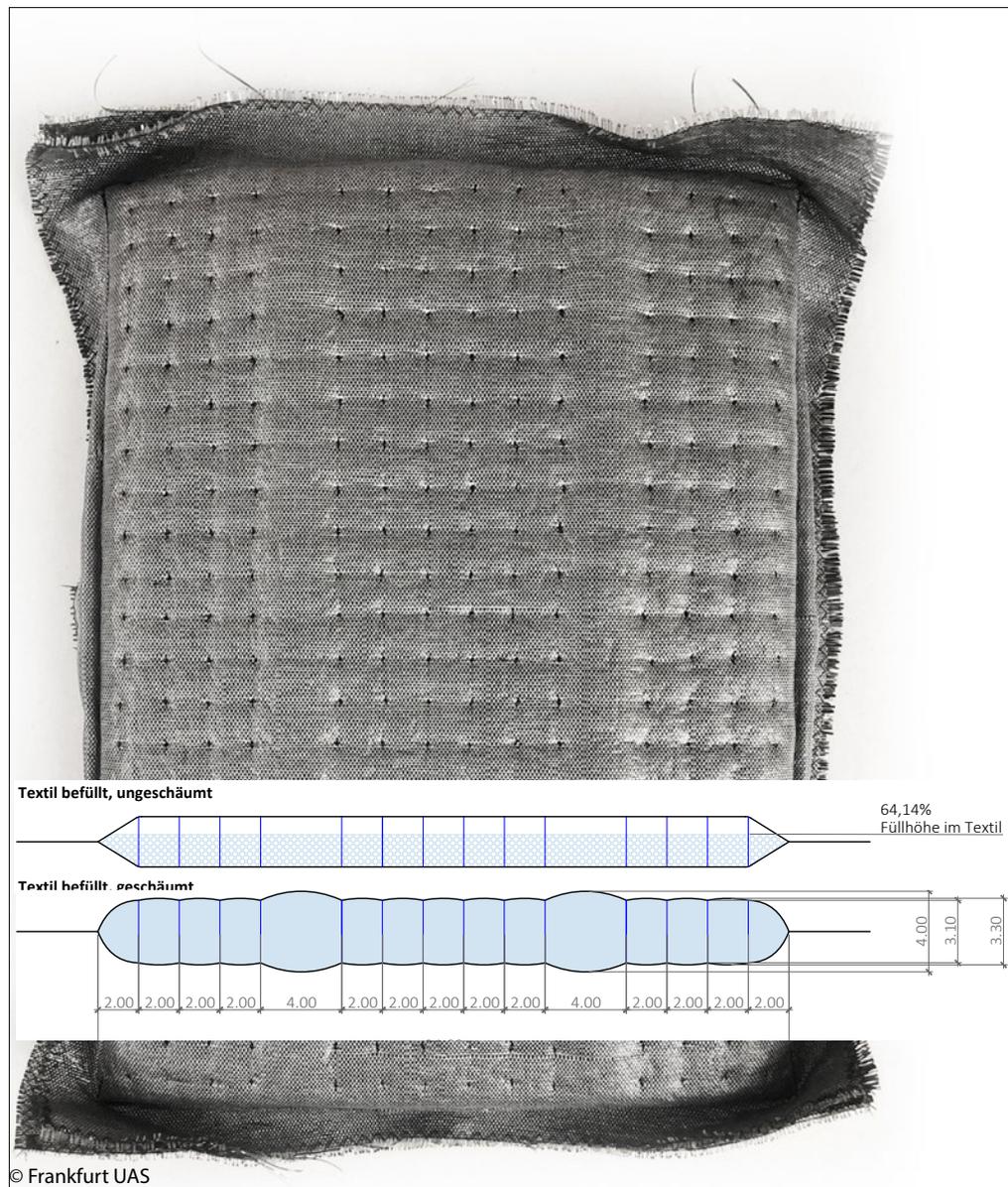
Abbildung 7.213



Textilkomponente	Textil: Raster Polfadenlage: Abstand Decklagen vor Expansion: Maße Textil Innentasche: Innenvolumen Textiltasche:	Typ A 2,00 x 2,00 cm 2,50 cm / 100% 38,00 x 58,00 cm 0,0055 m ³
Schaumkomponente	Partikelschaum (Beads): Füllvolumen Beads: Füllhöhe Beads im Textil:	Typ Beads B + PT-Besch. (k.A. g/Ltr.) 4,42 Ltr. / 0,00442 m ³ 2,21 cm / 88,4%
Verfahren im Ofen	Temperatur/ Zeit:	200°C / 90 min
Ergebnis	Abstand Decklagen nach Expansion, max. Fläche: Abstand Decklagen nach Expansion, Mittelw. Fläche: Expansion Beads: Dichte:	4,00 cm / 160% 3,70 cm / 148%, kein Unterschied zu Textil B 3,70 cm / 167,12% 197,04 kg/m ³

Planares Element, mit PET ausgeschäumtes PET Abstandstextil

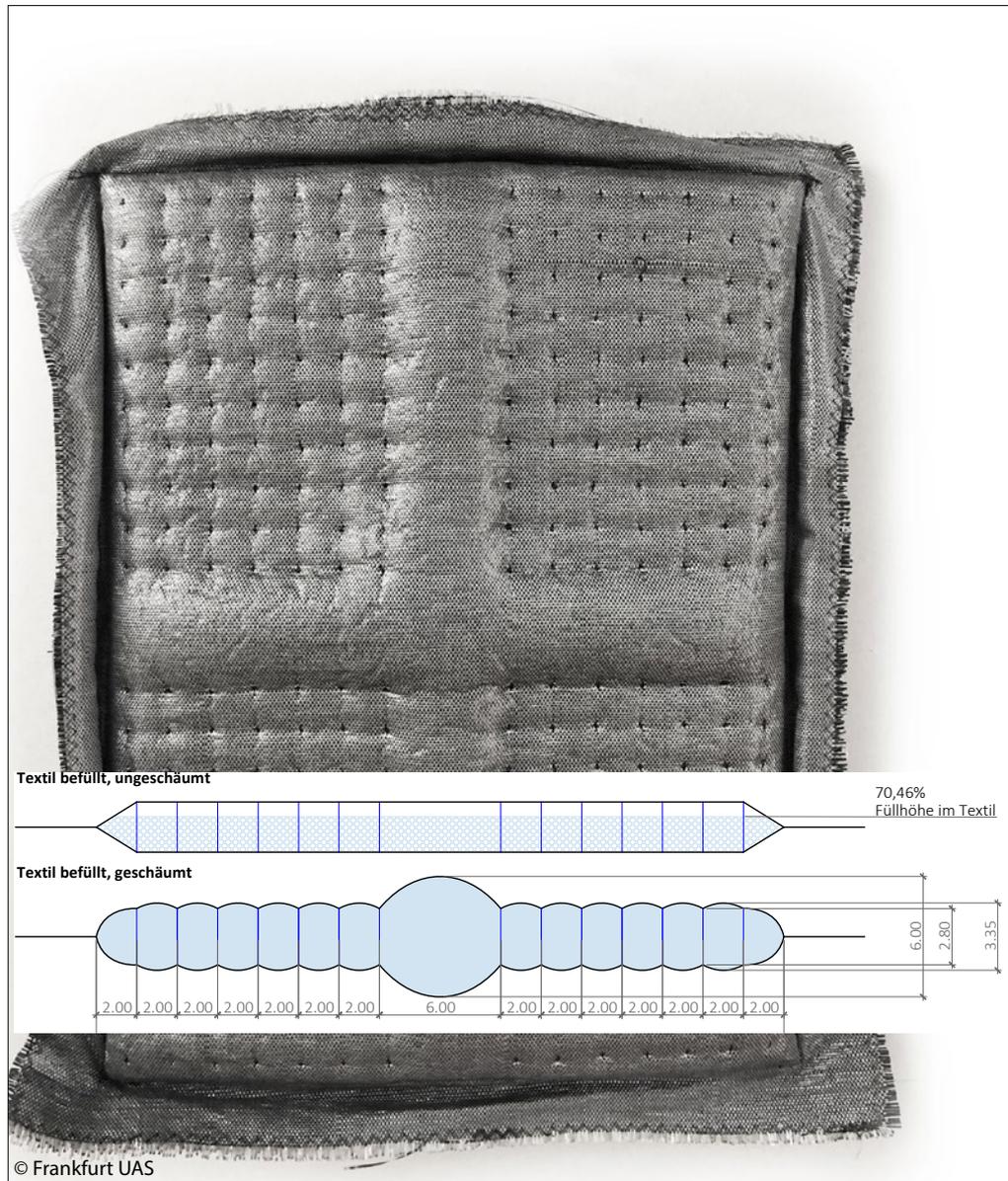
Abbildung 7.214



Textilkomponente	Textil:	Typ B
	Raster Polfadenlage:	2,00 x 2,00 cm, Teilbereiche linear freigel.
	Abstand Decklagen vor Expansion:	2,50 cm / 100%
	Maße Textil Innentasche:	36,00 x 46,00 cm
	Innenvolumen Textiltasche:	0,0041 m ³
Schaumkomponente	Partikelschaum (Beads):	Typ Beads B + PT-Besch. (k.A. g/Ltr.)
	Füllvolumen Beads:	2,63 Ltr. / 0,0026 m ³
	Füllhöhe Beads im Textil:	1,60 cm / 64,14 %
Verfahren im Ofen	Temperatur/ Zeit:	190°C / 90 min
Ergebnis	Abstand Decklagen nach Expansion, max. Fläche:	3,40 cm / 136 %
	Abstand Decklagen nach Expansion, Mittelw. Fläche:	3,30 cm / 132 %
	Abstand Decklagen nach Expansion, max. Bereich Rippe	4,00 cm / 160 %
	Expansion Beads:	3,30 cm / 206,25%
	Expansion Beads im Bereich Rippe:	4,5 cm / 281,25 %
	Dichte:	k.A.

Rippenelement, mit PET ausgeschäumtes PET Abstandstextil mit rippenförmiger Tragstruktur

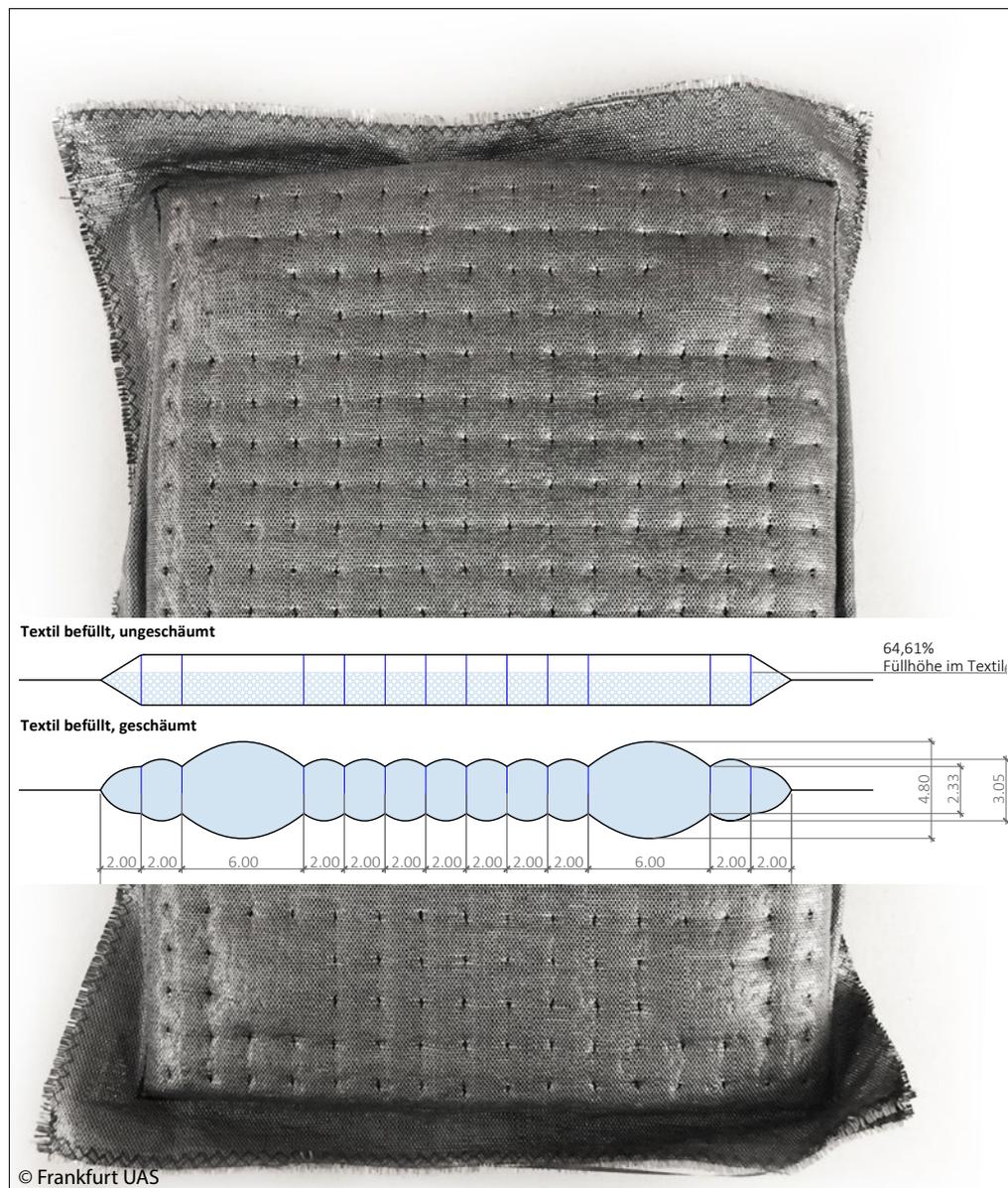
Abbildung 7.215



Textilkomponente	Textil: Raster Polfadenlage: Abstand Decklagen vor Expansion: Maße Textil Innentasche: Innenvolumen Textiltasche:	Typ B 2,00 x 2,00 cm, Teilbereiche linear freigel. 2,50 cm / 100% 36,00 x 46,00 cm 0,0043 m ³
Schaumkomponente	Partikelschaum (Beads): Füllvolumen Beads: Füllhöhe Beads im Textil:	Typ Beads B + PT-Besch. (k.A. g/Ltr.) 3,03 Ltr. / 0,003 m ³ 1,76 cm / 70,46 %
Verfahren im Ofen	Temperatur/ Zeit:	190°C / 90 min
Ergebnis	Abstand Decklagen nach Expansion, max. Fläche: Abstand Decklagen nach Expansion, Mittelw. Fläche: Abstand Decklagen nach Expansion, max. Bereich Kreuz Expansion Beads in der Fläche: Expansion Beads im Bereich Kreuz: Dichte:	3,35 cm / 134 % 3,30 cm / 132 % 6,00 cm / 240 % 3,30 cm / 187,34% 6,00 cm / 340% k.A.

Kreuzelement, mit PET ausgeschäumtes PET Abstandstextil mit gekreuzter Tragstruktur

Abbildung 7.216



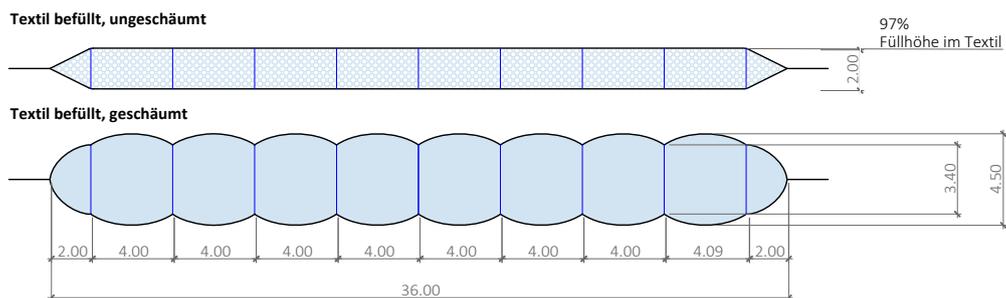
Textilkomponente	Textil:	Typ B
	Raster Polfadenlage:	2,00 x 2,00 cm, Teilbereiche punktuell frei
	Abstand Decklagen vor Expansion:	2,50 cm / 100%
	Maße Textil Innentasche:	36,00 x 46,00 cm
	Innenvolumen Textiltasche:	0,0039 m ³
Schaumkomponente	Partikelschaum (Beads):	Typ Beads B + PT-Besch. (k.A. g/Ltr.)
	Füllvolumen Beads:	2,52 Ltr. / 0,0025 m ³
	Füllhöhe Beads im Textil:	1,61 cm / 64,62 %
Verfahren im Ofen	Temperatur/ Zeit:	190°C / 90 min
Ergebnis	Abstand Decklagen nach Expansion, max. Fläche:	3,20 cm / 128 %
	Abstand Decklagen nach Expansion, Mittelw. Fläche:	3,05 cm / 122 %
	Abstand Decklagen nach Expansion, max. Bereich Punkt	4,80 cm / 192 %
	Expansion Beads:	3,05 cm / 201,32%
	Expansion im Bereich des freigelassenen Punkt:	4,8 cm / 316,83%
	Dichte:	k.A.

Punktelement, mit PET ausgeschäumtes PET Abstandstextil mit 4 Auflagerpunkten

Demonstrator „Kreuzelement“ aus PET-Abstandsgewebe B und PET-Schaum $L * B * H = 42 \text{ cm} * 34 \text{ cm} * 2,5 \text{ cm}$ (Abb.7.215) Die kreuzförmige Tragstruktur entsteht wie beim Rippelement durch Varianten im Polfadenraster. Indem linear kreuzweise jeweils eine Reihe Polfäden entfällt, verdoppelt sich in dem Bereich die Polfadenabstand auf 4 cm. Die entstehenden Kanäle transformieren sich beim Aufschäumen zu einem kreisförmigen Querschnitten, die im Kreuzungspunkt miteinander verschmelzen.

Demonstrator „Vierpunktelement“ aus PET-Abstandsgewebe B und PET-Schaum $L * B * H = 42 \text{ cm} * 34 \text{ cm} * 2,5 \text{ cm}$ (Abb.7.216) Die vier punktuellen Auflager- oder Befestigungspunkte innerhalb des ausgeschäumten PET Textiles entstehen durch vier Bereiche, in den das Polfadenraster auf 6 cm, * 6 cm erhöht wurde.

Abbildung 7.217



Verformungsverhalten eines planaren Elements aus geschäumtem PET Textil mit 4 cm Polfadenraster

Ergebnis Das Ausschäumen des PET Textils funktioniert sehr gut. Es lassen sich je nach Konfektionierung des Textils zudem bauphysikalisch wie kraftflussoptimierte Geometrien generieren. Abb. 7.217 zeigt, wie dabei bis zu 200% Ausdehnungen des Füllmaterials erreicht werden können.

7.3 Resümee, denkbare Makro- und Mesogeometrien von Wand-/Dachbauteilen

Im Vergleich der drei Werkstoffgruppen zeigt sich, was schon vorab in Kapitel 5 systematisch grafisch aufgezeigt wurde. Insbesondere die Konsistenz und die jeweilige Verfahrenstechnik zur Herstellung des geschäumten Befüllmaterials bestimmen im Weiteren die Geometrie und spätere Funktionalität der potentiellen Bauteile.

Der flüssige Zementschaum benötigt dabei ebenso wie der PET Schaum sehr dichte bis dichte Gewebe, damit das Befüllmaterial nicht austritt. Für den Zementschaum bieten sich auch aufgrund der Gewebesteifigkeit eher planare Elemente an. Anders als der Zementschaum entwickeln die eingefüllten und gecoateten PET Partikel dabei erst im Textil und bei Aufschäumen Druck. Der im Vergleich zum Zementschaum um einiges höhere Innendruck im PET Textil führt dabei zu deutlich plastischeren Elementen. Hinzu kommt die Elastizität des PET Bändchenmaterials, das dies durch sein verformungsfreundliches Verhalten besser unterstützt als das relativ schwere und steife Basaltgewebe. Hier sind räumliche Bauteile herstellbar mit integrierten Tragrippen oder auch gefaltete Elemente.

Die mörtelähnliche Konsistenz der Bläh-/Wassergalsbefüllung hingegen erlaubt auch die Verwendung deutliche offenerporiger Textilien. Damit ergeben sich auch andere Befülltechniken wie das Einraken in Abstandsgewirke anstelle des Befüllens vorkonfektionierter Abstandsgewebe. Funktional resultiert dies in anderen Bauteilgeometrien aufgrund der unterschiedlichen Lastabtragungen. Während die Gewebe Zugkräfte mit aufnehmen können, ermöglicht die Drapierbarkeit der Gewirke die Konzeption stärker formaktiv ausgerichteter Bauteile. Mittelfristig zu prüfen ist hier, ob entweder die Tragfähigkeit von Gewirken über eingelegte Schussfäden erhöht werden kann, oder ob über hängendes Befüllen robuste Bauteile hergestellt werden können, die hauptsächlich für Normalkraftbeanspruchungen geplant sind.

8 Zwischenauswertung (s. auch Anlage 5, Autorin Weilandt, Agnes)

8.1 Konzeption und Tragwerksabschätzung für Demonstratoren im Wand- oder Dachbereich

Ausgehend von den ermittelten Daten (Kap. 6) und den ersten Befüllversuchen (Kap. 7) wird nachfolgend zunächst in einer ersten Abschätzung untersucht, welche Bauteilgeometrien sich jeweils für Fassaden- und/oder Dachelemente für die zuvor untersuchten drei Verbundwerkstoffe ergeben. Ihr Aufbau ergibt sich aus den jeweils unterschiedlichen Materialeigenschaften und Herstellungsverfahren der drei Verbundwerkstoffe.

8.1.1 Basaltfaser und Schaumbeton

Eine Rezepturänderung des für ge3TEX verwendeten Zementschaums war lt. Angabe der TU Darmstadt nicht möglich. Die nachfolgenden Überlegungen berücksichtigen entsprechend die Eigenschaften des zur Verfügung stehenden, dämmfähigen und vergleichbar zu anderen Dämmstoffen druckbelastbaren Materials.

8.1.1.1 Mögliche Geometrien für Wand- und/oder Dachelemente aus Basaltfasern und Zementschaum

Drei Konzepte wurden evaluiert:

a) Variante 1: Ein befülltes Basaltfaser-Zementschaumelement dient als einseitige, verlorene Schalung für eine senkrecht betonierte Ortbetonwand, Resümee: Das Verbundelement wird zwischen den Ankern infolge des Betonierdruckes als Platte beansprucht und in den Ankerbereichen lokal auf Druck beansprucht. Diese Beanspruchungen sind bei üblichen Bauhöhen für Wände nicht durch den Schaumbeton aufnehmbar, der im Verbund mit dem Basaltgewebe die Biegedruckspannungen aufnehmen müsste.

Alternativ realisierbar sind folgende Herstellkonzepte

- Ein vor Ort gefertigtes Basaltfaser-/Schaumbetonelement wird horizontal mit einer Aufbetonschicht versehen, ausgeschalt und dann senkrecht gestellt
- Im Kellerbereich dient ein befülltes Basaltfaser-Zementschaumelement als einseitige, verlorene Schalung für eine senkrecht betonierte Ortbetonwand. Es entsteht keine Plattenbeanspruchung, wenn vor dem Betonieren das Erdreich verfüllt wird
- Es wird von einem Fertigteilelement statt von Ortbeton ausgegangen. Das Basalttextil wird am Fertigteilelement befestigt und erst vor Ort befüllt

Zwischenresümee: Die hohe Tragfähigkeit des Basaltgewebes wird in keiner der Varianten aktiviert, da ihr gegenüber die Druckfestigkeit des Schaumbetons zu stark abfällt. Selbst bei einer horizontalen Herstellweise, bei der die geringe Druckfestigkeit des Schaumbetons ausreichend berücksichtigt werden kann, wird das Textil nicht zur Lastableitung von Zugkräften aktiviert.

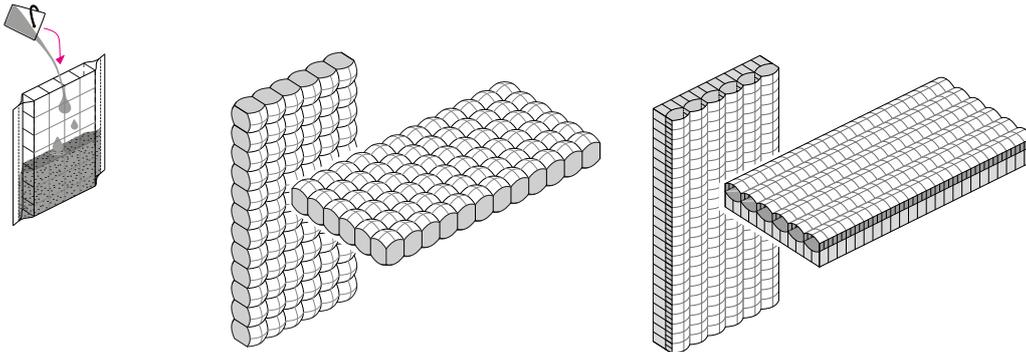
b) Variante 2: Es wird von der Kombination einer dickeren und damit für die Dämmung maximal genutzten Schaumbetonschicht mit einer wesentlich dünneren, dafür tragenden Schicht aus hochfestem Beton ausgegangen. Auch hier müssen die bereits unter a) benannten Herstellbedingungen bedacht werden (Betonierdruck / Stabilität Zementschaum). Als Textil wäre dafür mittelfristig ein dreilagiges 2-Kammertextil anzustreben vorausgesetzt, in ge3TEX konnte zunächst einmal die Realisierung eines zweilagigen Textils nachgewiesen werden. Generell muss, um das hochfeste Basaltgewebe auch sinnvoll im Hinblick auf die Tragfähigkeit einzusetzen bzw. die Bauteilhöhe auszunutzen, auf eine kraftschlüssige Verbindung zwischen der äußeren Gewebeschicht und der Deckschicht aus hochfestem Beton geachtet werden.

c) Variante 3: Als Resultat für ge3TEX ergibt sich zuletzt als sinnvolle Kombination eine hochfeste dünne Be-

tonplatte in Kombination mit dem dämmenden Zementschaum, wie am Beispiel der ETA Fabrik in Darmstadt bereits für ein anderes Konzept mit Bauteilaktivierung realisiert¹. Für den Herstellprozess in ge3TEX werden die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich Schichtdicken (dünne Tragschicht, dicke Dämmschicht) genutzt. Der Herstellprozess variiert: Das 3D Textil wird vertikal ausgeschäumt und als verlorene, gedämmte Schalung zum Aufbringen eines Aufbetons genutzt (Abb. 8.100). Hier sind unterschiedliche Geometrien herstellbar (Rippen/Kissen) und ebenso mittelfristig eine Herstellung „naß in naß“, vertikal und mit einem dreilagigen 2-Kammer-System.

Abbildung 8.100

≠



Lings 3D Basaltgewebe befüllt mit Zementschaum: Mitte zweilagiges 1-Kammer Abstandsgewebe als verlorene Schalung für spätere Aufbetonschicht; Rechts, Zukunftsoption: Dreilagiges 2-Kammer Abstandsgewebe mit dünner Tragschicht aus UHPC und dicke Dämmschicht aus Zementschaum

Zudem soll für die Tragwirkung eines Dachelements das hochfunktionale Textil als Unterspannung aktiviert werden um zusätzlich Gewicht zu sparen. Dazu muss die Geometrie des 3D Basalttextils so konzipiert werden, dass beim Aufbetonieren kraftschlüssige Verbindungen zwischen der druckstabilen Decklage aus UHPC und dem zugfesten Textil an der Unterseite des Bauteils entstehen. Es können Tragsysteme entstehen, wie zuvor in Kapitel 5.1 gezeigt. D.h. Rippensysteme oder unter- bzw. überspannte Tragsysteme für den Wand- wie Deckenbereich bzw. Dachelemente. Ähnlich wie bei dem Projekt KnitKandela und in Kapitel 2.1.2 beschrieben wirkt auch in ge3TEX das Textil dabei als Schalungsgeometrie für eine lastfalloptimierte Aufbetonschicht. Anders als bei KnitKandela aber ohne aufblasbare Einzelkissen im 3D Textil und stattdessen mit dämmendem Zementschaum gefüllt.

8.1.1.2 Lastfallsimulation zur Ermittlung des Kräfteverlaufs in einem neuartigen Verbundbauteil aus Basalttextil, Zementschaum und hochfestem Beton (gedämmtes Dachdeckenelement)

a) Berechnungsgrundlagen: Die erste theoretisch untersuchte Variante zur Umsetzung eines Deckenelementes baut auf der Überlegung auf, das Gewebe so zu konfektionieren, dass sich beim Befüllen mit Schaumbeton eine Kissenform herausbildet. Die zur Verfügung stehenden Maschinen ermöglichen die Herstellung der in Abb. 8.100 dargestellten Geometrie. Die Ausbildung der Kammern wird durch die unterschiedlichen Längen der jeweiligen Polfäden gesteuert (s. Kapitel 7, Anlage 4). Zur Berechnung der Tragfähigkeit des Elementes werden zunächst die einzelnen Schichten geometrisch erfasst und analysiert:

- Deckschicht aus hochfestem Beton: Der tragende Querschnitt in Längsrichtung ergibt sich als Negativ der Oberfläche des ausgehärteten und mit Schaumbeton gefüllten Basaltgewebes (Abb 8.101) Die für die Berechnung maßgebenden Querschnittswerte ergeben sich gem. Anlage 5 in der Annäherung mit:

$$\begin{aligned} \text{Querschnittsfläche } A &= 452 \text{ cm}^2, \\ \text{Schwerpunkt: } z, s &= 2,78 \text{ cm (von Oberkante)} \\ \text{Flächenträgheitsmoment } I_y &= 1674 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

¹ Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt ETA-FABRIK, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

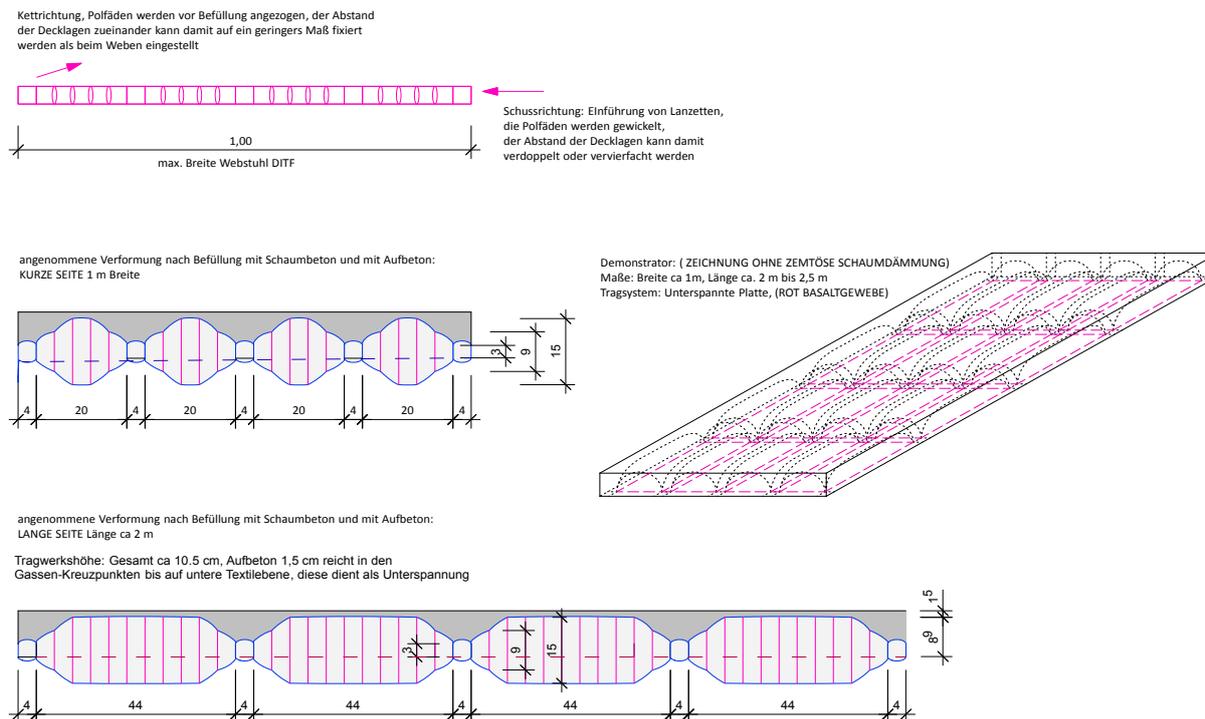
- **Basaltgewebe:** Das Textil wird aus einem Basaltgarn gefertigt. In einem ersten Schritt werden in der Decklage, die der Längsrichtung des Bauteils entspricht, 45 Kettfäden pro 10 cm mit 600 tex verarbeitet. Die Zugfestigkeit des Garns wird mit 4.400 N/mm^2 angesetzt. Es erfolgt eine Umrechnung der Querschnittsdaten einer Gewebelage von (tex) in (cm^2) und in einer Ersatzquerschnittsdicke pro m Breite des Bauteils, (Anlage5)

- Gewicht der Konstruktion pro m Länge bei 1 m Bauteilbreite, dabei wird das Gewicht des Basaltgewebes vernachlässigt

Aus den Querschnittswerten und mit dem Gewicht der Konstruktion kann die Tragfähigkeit des Verbundquerschnitts ermittelt werden. Hierzu wird ein 1 m breiter Querschnitt analysiert, der an beiden Enden gelenkig aufgelagert wird

b) Berechnung Ansatz 1: Alleinige Tragwirkung der UHPC-Schicht mit Mikrobewehrung (Berechnung s. Anlage 5,) Resümee: Die Geometrie, die sich beim Befüllen des Basaltgewebes mit dem Schaumbeton einstellt und damit die Form der verlorenen Schalung gem. Abb. 8.101 resultiert in einer oberen Deckschicht mit breiten und entsprechend schweren Rippen mit ungünstigem Gewichts-Tragfähigkeitsverhältnis. Die Deckschicht allein ist in der Lage unter Eigengewicht und zusätzlichen Auflasten die Konstruktion zu tragen. Das Basaltgewebe wird nicht aktiviert. Dies bereits bei einer geringen Biegezugfestigkeit des verwendeten Betons. Die Verwendung eines unbewehrten Betons muss aufgrund des Risikos von Schwindrissen ausgeschlossen werden. Hinsichtlich der statischen Tragfähigkeit des Querschnitts wäre eine Geometrie von schmalen hohen Rippen für die Deckschicht anzustreben.

Abbildung 8.101



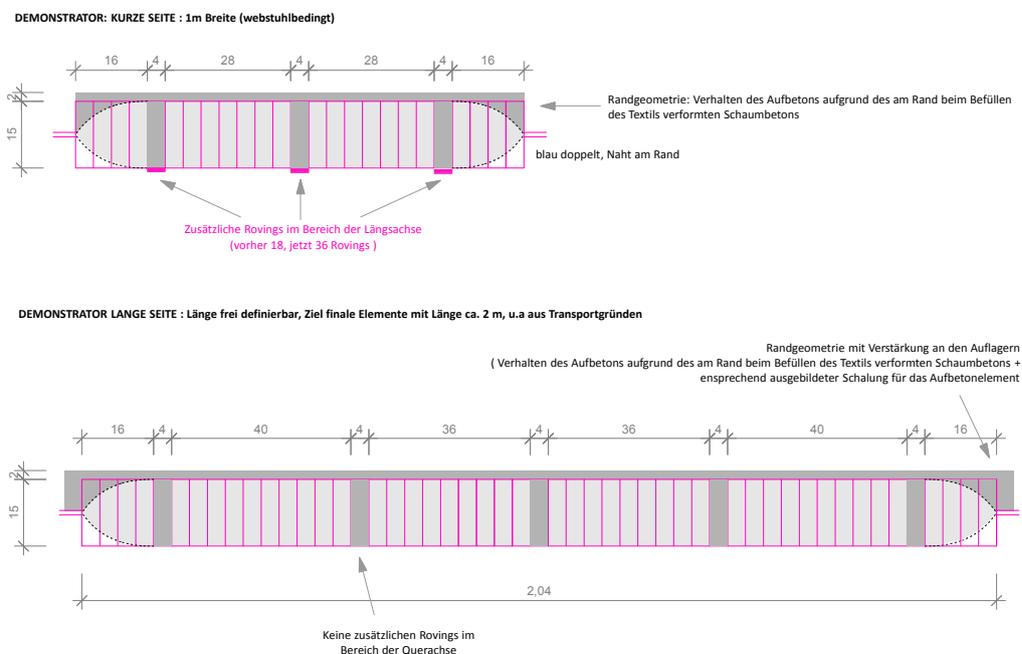
Geometrischer Aufbau einer möglichen Kissenstruktur mit Deckschicht aus hochfestem Beton

c) **Berechnung Ansatz 2, Varianten A:** UHPC-Schicht mit Mikrobewehrung und Basaltgewebe tragen im Verbund (Berechnung s. Anlage 5,): Um die Verbundwirkung des Gesamtquerschnittes (Deckschicht + Basaltgewebe) zu aktivieren ist es erforderlich einen Schubverbund zwischen der Deckschicht und der unteren Lage des Basaltgewebes sicherzustellen. Der Konstruktion entsprechend sollten sich hierzu im Füllmaterial des Gewebes Druckstreben und über die Polfäden des Gewebes Zugstreben ausbilden, so dass sich ein Verbund

zwischen Deckschicht und unterer Gewebelage einstellen kann. Da der Schaumbeton jedoch keine ausreichende Druckfestigkeit aufweist, um die Beanspruchungen zu übertragen, ist eine weitere lokale Verstärkung erforderlich, um die Verbundwirkung zu aktivieren.

Hierzu können die Rippen der Deckschicht herangezogen werden. Die in Ansatz 1 zunächst gewählte kissenförmige Geometrie des Verbundmaterials (Gewebe + Schaumbeton) ist in diesem Fall jedoch kontraproduktiv, da die Höhe der sich einstellenden „Unterspannung“ bei jeder Querrippe künstlich reduziert wird. Zudem müssten die sich ergebenden Umlenkungskräfte durch den Schaumbeton aufgenommen werden. Entsprechend wird eine andere schlauchförmige Geometrie ohne Quereinkerbungen des Verbundmaterials angestrebt, so dass sich für die UHPC-Deckschicht eine Struktur mit durchlaufenden Rippen einstellt, s. Abb. 8.102. Dabei zeigen die Berechnungen s. Anlage 5, daß erst bei einer deutlichen Erhöhung des Gewebequerschnitts (Annahme der Mitwirkung des Gewebes über die volle Querschnittsbreite bzw. Ausbildung von Gurten in den Rippenachsen) die Unterspannung aktiviert werden kann. In der Weiterentwicklung des Elementes wird es also das Ziel sein, den Abstand zwischen Schwerpunkt der Deckschicht und unterer Gewebelage zu maximieren und die Biegesteifigkeit der oberen Deckschicht zu reduzieren um wie beabsichtigt die textile Unterspannung zu aktivieren.

Abbildung 8.102



Basalttextilien, ausgeschäut mit Zementschaum: Gedämmte, verlorene Schalung für lastflussoptimierte Aufbetonschichten mit längslaufenden Verstärkungsgurten in Tragrichtung unter Einzeldruckstäben aus UHPC, die zur Aktivierung der Unterspannung mit der unteren Textillage verbunden sind.

d) Berechnung Ansatz 2, Variante B, Ausblick Demonstrator: UHPC-Schicht mit Mikrobewehrung und Basaltgewebe tragen im Verbund: Hierzu wird zunächst rechnerisch angenommen, dass die obere Deckschicht ohne Rippen ausgebildet werden kann. Der Abstand zwischen unterer Gewebelage und Deckschicht soll lokal über Pins sichergestellt werden. Sinnvollerweise ist dieser Pinabstand zu maximieren und in der Achse der Pins das Gewebe maximal zu verstärken, so dass es möglichst unmittelbar aktiviert werden kann.

Die Ergebnisse der Berechnung (Tabelle 8.100) zeigen, dass ohne eine deutliche Verstärkung des Gewebes das System bei der gegebenen Belastung und Spannweite zu weich wird und die aufnehmbaren Verformungen weit überschritten werden (Variante F). Bei diesen Verformungen ist nicht mehr von einem linear-elastischen Tragverhalten auszugehen, so dass die dazugehörigen Ergebnisse der Berechnung nur eine Richtung aufzeigen können. Bei einer deutlichen Verstärkung des Textils in den Achsen der Pins, bzw. bei einer Aktivierung

Tabelle 8.100

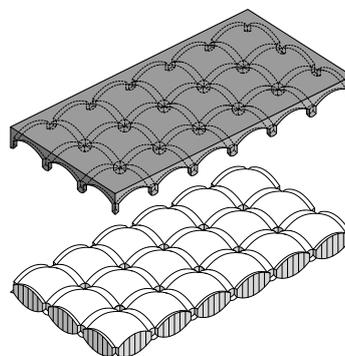
Bezeichnung	System	Biegemoment Gurt [kNm]	Verformung linear elastisch	Normalkraft Gewebe
			(mm)	(KN)
E1	600 tex, n=4500/m	0,3 (9%)	38,6 (207 %)	20,6
	AGewebe=0,36 cm ² - UHPC			(Spannung=575 N/ mm ²)
	Höhe + 5 cm			
	Dünne Platte mit Pins			
E2	600 tex, n=4500/m	0,20 (10 %)	40,2 (217 %)	21,2
	AGewebe=0,36 cm ² - C30/C37			(Spannung=590 N/ mm ²)
	Höhe + 5 cm			
	Dünne Platte mit Pins			
E3	600 tex, n=900/m	1,29 (38,1%)	265 mm (1500%)	14,04
	A=0,072 cm ² - C30/C37			(Spannung = 2000 N/ mm ²)
	Höhe + 5 cm			
	Dünne Platte mit Pins			

Zusammenfassung der maßgebenden Ergebnisse der Variantenuntersuchung zum Verbundquerschnitt mit dünner Deckplatte anstelle der Rippenstruktur und unter Beibehalt der Pins im Bereich der Tragachsen

des gesamten Gewebes über die Bauteilbreite kann mit dieser weiterentwickelten Geometrie eine Aktivierung des Gewebes als Unterspannung erreicht werden (Variante E1, E2, Tab. 8.100). Aus diesen Berechnungen soll die Geometrie für einen Prototypen für ein Dachelement entwickelt werden. Die zur Verfügung stehenden Webstühle erlauben eine maximale Breite der Gewebe von 1 m. In diesen Maßen müssen sinnvolle Abstände für die Tragachsen, in denen das Gewebe verstärkt wird, gefunden werden.

Abb. 8.103 zeigt die neue Geometrie. Anstelle der Rippen werden in regelmäßigem Abstand Pins aus tragfähigem Beton realisiert, die eine tragfähige Verbindung zwischen der unteren Gewebeschicht und der Deckschicht ermöglichen. Die aktuell zur Verfügung stehenden Webstühle für die Gewebe erlauben es nicht, das Gewebe mit derartig schmalen oder lokalen Einkerbungen auszubilden. Deswegen wird entschieden, die Aussparungen für die Pins vor der Betonlage der Deckschicht händisch in das Schaumbetonelement einzubohren. Die verstärkten Gurtbereiche werden unterhalb der Pins angeordnet und gleichmäßig über die Querschnittsbreite verteilt. Weitere Verstärkungen des unteren Gewebes sind aufgrund der Anzahl maximalen Anzahl der zum Einsatz kommenden Spulen im Projekt derzeit nicht möglich.

Abbildung 8.103



3D Basalttextil, ausgeschäumt mit Zementschaum: Gedämmte, verlorene Schalung für lastflussoptimierte Aufbetonschicht mit Einzelpins, diese sind in Tragrichtung mit der unteren Textilage verbunden, die zur Unterspannung herangezogen wird.

Die Variante mit dünner Platte mit Pins ist deutlich leichter. Die Platte soll mindestens eine Belastung aus ihrem Eigengewicht und einer Auflast von 100 kg/m^2 aufnehmen können. Auf der sicheren Seite wird keine Querverteilung der Zugkräfte auf das neben den Gurten befindliche Gewebe angesetzt. Die Gurte werden wie folgt angesetzt: Gurt $b = 4 \text{ cm}$ (36 Rovings auf 4 cm Breite: $n = 36/0,04 \text{ m} = 900 / \text{m}$). Tabelle 8.101 zeigt die Zusammenfassung der maßgeblichen Ergebnisse der Varianten für einen Demonstrator Breite * Länge = $1 \text{ m} * 2 \text{ m}$.

Tabelle 8.101

Bezeichnung	System	Biegemoment Deckschicht [kNm]	Verformung linear elastisch [mm]	Normalkraft Gewebe [kN]
Prototyp- Deckschicht ungerissen	UHPC 2 cm + Pins + Gewebe 600 tex, $n=900/\text{m}$ – gurtartig verstärkt – $h=16 \text{ cm}$ (Abstand Gewebe – Schwerachse Deckschicht)	0,11	5	1,3 (Spannung = 185 N/mm^2)
Prototyp Deckschicht gerissen (30% Biegesteifigkeit)	UHPC 2 cm + Pins + Gewebe 600 tex, $n=900/\text{m}$ – gurtartig verstärkt – $h=16 \text{ cm}$ (Abstand Gewebe – Schwerachse Deckschicht)	0,05	6,8	1,7 (Spannung = 243 N/mm^2)

Zusammenfassung der maßgebenden Ergebnisse der Variantenuntersuchung für den Demonstrator (Spannweite $l=2\text{m}$)

• Nachweis der Gebrauchstauglichkeit:

Die Verformung entspricht bei Berücksichtigung der Rissbildung in der Deckschicht $6,8 \text{ mm} = l/300$. Da es sich primär um ständige Lasten handelt, könnte eine Überhöhung angedacht werden. Es ist eine ausreichende Lagertiefe sicherzustellen, um ein Abrutschen des Elementes zu verhindern.

• Nachweis der Tragfähigkeit:

- Nachweis des Gewebes, Zugspannungen: Die Zugspannungen sind deutlich unter den aufnehmbaren Spannungen von Basaltfasern

- Nachweis Betonquerschnitt: Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung unter Annahme eines ungerissenen Querschnitts, es wird ein leicht erhöhter Sicherheitsbeiwert von $\gamma = 1,4$ angenommen.

$$\text{Druckkraft } N_d = -1,4 * 1,3 \text{ kN} / 0,32 \text{ cm Breite} = -5,7 \text{ kN/m (1m Breite)}$$

$$\text{Biegemoment } M_d = 0,26 \text{ kN/m} * 1,4 / 32 \text{ cm} = 0,48 \text{ kNm/m (1 m Breite)}$$

- Spannung im Querschnitt, Zug/ Druck:

$$\sigma, d = -5,7 / 1000 \text{ MN/m} / 1 \text{ m} / 0,02 \text{ m} \pm 0,48 / 1000 \text{ MNm/m} / (1 \text{ m} * 0,02^2 \text{ m}^2 / 6) = -0,29 \text{ N/mm}^2 \pm 7,2 \text{ N/mm}^2$$

$$= -0,29 \text{ N/mm}^2 + 7,2 \text{ N/mm}^2$$

Die Zugfestigkeit kann mit einem mikrobewehrten UHPC erreicht werden. Die maximalen Druckspannungen liegen deutlich unter den Druckfestigkeiten von UHPC. Im Falle des Auftretens von Biegerissen wird die Biegesteifigkeit der Deckschicht deutlich reduziert, so dass der Lastabtrag noch weiter auf das unterspannte System übertragen wird, und die Beanspruchungen der Deckschicht deutlich reduziert werden.

-Biegesteifigkeit der Platte für lokale Beanspruchungen bei einem angenommenen Abstand der Pins von 40 cm. Vereinfacht wird der Abstand der Pins als Spannweite angesehen

$$M, d = 1,8 \text{ kN/m} * 1,4 * 0,4^2 / \text{m}^2 / 8 = 0,05 \text{ kNm}$$

$$W = 2^3 * 100 / 6 = 133 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 0,05 * 100 / 133 = 0,05 \text{ kN/cm}^2 = 0,4 \text{ N/mm}^2$$

Die Spannung ist im Vergleich zu globalen Beanspruchungen vernachlässigbar, so dass ein lokales Versagen der Deckschicht bei gleichmäßig verteilten Belastungen ausgeschlossen werden kann.

Resümee: Die Berechnungen zeigen, dass mit einer Reduktion der Biegesteifigkeit der Deckschicht durch Reduzierung der Rippen oder deren Entfall die untere Gewebelage als Unterspannung aktiviert werden kann. Für eine effiziente Aktivierung des Gewebes ist es erforderlich, dieses in den „Unterspannungsachsen“ lokal zu verstärken, da eine Querverteilung der Beanspruchungen im Gewebe aufgrund der Webart nicht sichergestellt werden kann. Die Simulationen/Berechnungen zeigen weiterhin, dass die für den Demonstrator gewählten Querschnittsabmessungen eine Aufnahme der Belastung aus Eigengewicht und 100 kg/m^2 Auflast sicherstellen. Die Biegetragfähigkeit der Deckschicht unterstützt das Tragverhalten des Querschnitts und reduziert die Verformungen. Die Deckschicht könnte prinzipiell für den Lastabtrag auch ohne Mikrobewehrung hergestellt werden. Aufgrund der geringen Bauteilstärke wäre jedoch im Aushärtungsprozess bei der Herstellung mit großen Schwindrissen zu rechnen, die den Zusammenhalt der Deckschicht, auch im Hinblick auf die Druckbeanspruchung und damit einhergehende Stabilität der Deckschicht im Belastungszustand in Frage stellen würde. Eine Grundbewehrung der Deckschicht ist für das Gesamtbauteil demnach unerlässlich.

8.1.2 Glasfaser und Bläh-/Wasserglas

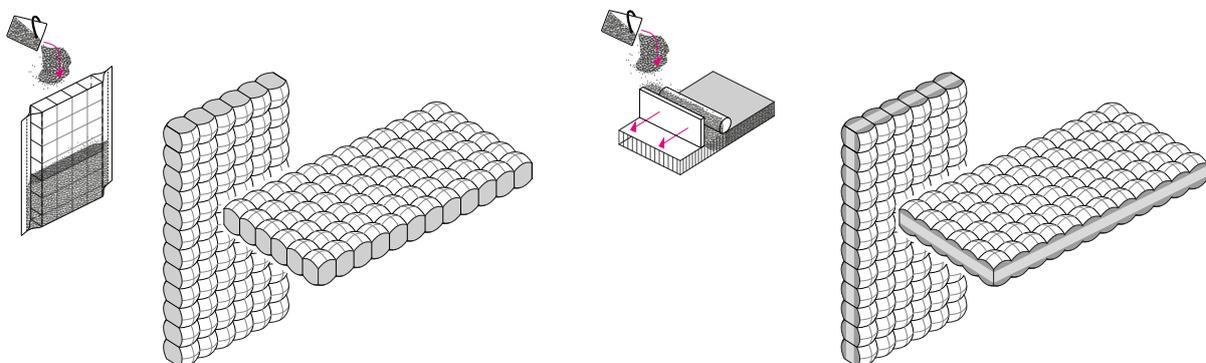
Die Zielsetzung für ein Verbundbauteil aus dem Werkstoff Glas ist dieselbe wie beim Basaltfaser-/Zementschaumtextil: Ein integriertes, sortenreines Bauteil, bei dem das Glasfasertextil zugleich als verlorene Schalung wie zur Lastabtragung auftretender Zugkräfte aktiviert wird. In diesem Fall wurden an der FRA-UAS gem. Kapitel 6.3 Rezepturvarianten einer Bläh-/Wasserglasmatrix entwickelt und getestet. Entscheidende Parameter sind hier unterschiedlich dicht wählbaren Blähglasanteile (s. Produktsortiment des Firmenpartners Poraver) und der Anteil bzw. die Zusammensetzung der wasserglasbasierten Matrix (s. Produktsortiment des Firmenpartners Wöllner). Es ergeben sich entsprechende Befüllszenarien des 3D Textils mit unterschiedlich dichtem Material und entsprechend unterschiedlich mechanischen und bauphysikalischen Werten.

8.1.2.1 Mögliche Geometrie für Wand - und/oder Dachelemente aus Glasfaser und Bläh-/Wasserglas

a) Es wurden zunächst folgende Konzepte angedacht: Plattenartige Baukörper mit homogener Befüllung einer einzigen Bläh-Wasserglasrezeptur definierter Dichte -oOder als Variante die Befüllung mit zwei unterschiedlich dichten Materialien, zur Ausbildung von Tragrippen und dazwischenliegenden, dämmfähigeren Bereichen (s. auch Abb. 8.104). Letzteres bietet die Option, die innere Struktur des Wandelements gezielt entsprechend der gegebenen Lasteintragungen und Dämmanforderungen zu optimieren. Die erste Variante macht bauphysikalisch nur Sinn, wenn weniger dichte Rezepturen verwendet werden, was zu Laster der Tragfähigkeit geht. Bei der zweiten Variante, die einem Skelettbau ähnelt, muss die textile Geometrie das Befüllen mit zwei unterschiedlich dichten Rezepturen befördern. Im Abstandsgewebe wie -gewirke werden kanalartige Strukturen durch die sie begrenzenden Polfäden ausgebildet. Es ist zu prüfen, ob sich die von der Konsistenz her eher mörtelähnlichen Blähglasrezepturen hier sauber getrennt befüllen lässt.

Abbildung 8.104

≠



links, 3D Glasgewebe befüllt mit Bläh-/Wasserglas; rechts 3D Glasgewirke mit zwei unterschiedlichen Rezepturen befüllt

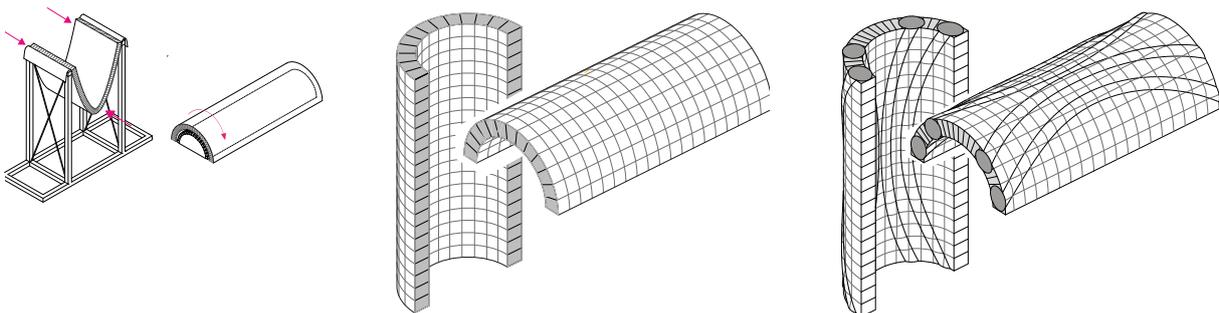
Resümee: Durch die Möglichkeit das 3D Glastextil mit unterschiedlich dichten Bläh-/ Wasserglasgemischen zu befüllen, besteht im Gegensatz zu aktuellen monolithischen Wandkonstruktionen (Bsp. Dämmbeton) die Option, die innere Struktur des Wandelement entsprechend der gegebenen Lasteintragungen und Dämmforderungen zu optimieren.

b.) Ausgehend von einem derzeit technisch noch hypothetischen 2-Kammer-Textil aus Glas wäre ein alternativer Konzeptansatz die Trennung zweier unterschiedlich dichten Befüllungen über ein dreilagiges 2-Kammertextils s.o. bei Basaltgewebe/Zementschaum, Abb. 8.103. Ebenso denkbar und anders als beim Zementschaum/UHPC ist zudem das Einrakeln/Einrollen unterschiedlich dichter Blähglas/WasserglasBefüllungen von zwei Seiten in ein Abstandsgewirke denkbar, s. Abb. 8.105 rechts aussen.

Resümee: Durch die Möglichkeit das 3D Glastextil mit unterschiedlich dichten Bläh-/ Wasserglasgemischen zu befüllen, besteht wie bei den Zementschaum-/Betonvarianten und im Gegensatz zu aktuellen monolithischen Wandkonstruktionen (Bsp. Dämmbeton) die Option, die innere Struktur des Wandelement entsprechend der gegebenen Lasteintragungen und Dämmforderungen zu optimieren und z.B. in Dämm- und Tragebenen zu trennen - bis hin zu graduellen Abstufungen. Insbesondere bei befüllten, in Zukunft erhältlichen, drapierbaren 3D Gewirken, aber auch bei 3D Geweben, besteht zudem die Möglichkeit, über den Trocknungsprozess formaktive Bauteile mit zusätzlich minimiertem Materialeinsatz bei gleicher Tragwirkung herzustellen (Abb. 8.105.)

Abbildung 8.105

≠



Glasgewirke, befüllt mit Bläh-/Wasserglas und beim oder nach dem Befüllen in Form gebracht

8.1.2.2 Lastfallsimulation zur Ermittlung des Kräfteverlaufs in einem neuartigen Verbundbauteil aus Glasfasern und Bläh-/Wasserglas

Die erste theoretisch untersuchte Variante zur Umsetzung eines gekrümmten Decken-/Dachelementes baut auf der Überlegung auf, die Herstellung so zu gestalten, daß sich nach dem Befüllen zur Trocknung ein gewölbtes Element einstellt, das eine räumlichen Lastabtrag ermöglicht.

a) Berechnungsgrundlagen: Die Untersuchungen basieren auf einer Elementlänge von 3 m und einer Bauteildicke von 5 cm. Die angenommene Auflast beträgt 1 kN/m^2 . Das Eigengewicht der Konstruktion wird über die Wichte der Füllung in den Berechnungen automatisch berücksichtigt. Das Gewicht des Gewebes ist vernachlässigbar. Das Gewebe trägt im Verbund mit der Füllung, so dass sich aus den Materialkennwerten der Einzelmaterialien nur in einer Annäherung die Verbundkennwerte ableiten lassen. Unter Annahme des vollen Verbundes kann anhand des Spannungs-Dehnungsdiagramms die Biege- und Zugsteifigkeit des Verbundquerschnittes abgeleitet werden. Hier wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die Füllung aus Wasser-/Blähglas infolge Biegung nur Druckbeanspruchungen aufnimmt, und das Gewebe die Zugkräfte, siehe Tabelle 8.102. Dieser Ansatz wurde in den Vergleichsuntersuchungen zu den Tragwerksgeometrien zunächst zugrunde gelegt. Die Berechnung erfolgt mit der finiten Elementmethode. In Folgenden sind die Ergebnisse für die verschiedenen untersuchte Geometrien zusammengefasst.

Tabelle 8.102 Zusammenfassung der Ergebnisse - Kennwerte Verbundquerschnitt

№	Schaum/Gewebe	Bläh-/ Wasserglas		Gewebe						Sand- wich	Biege- trag- fähigk.	Ersatzsteifigkeiten bezogen auf Sandwich mit Höhe h			
		E- Modul	Druck- festig- keit	E- Modul	Zug- festig- keit	Wichte	Gewe- be	Ab- stand Roving	Fläche			Höhe	Mr,k	EA Ersatz	EI Ersat
		[N/ mm ²]	[N/ mm ²]	[N/ mm ²]	[N/ mm ²]	[g/cm ³]	[tex]	[mm]	[cm ² /m]			[mm]	[kNm]	[kN]	[kNm ²]
V0	Betonschaum-1/Basalt	3000	5	70000	1800	2,7	1500	3	1,85	50	1,88	175925,93	19,03		
V1	Betonschaum-1/Basalt	3000	5	70000	1800	2,7	1200	5	0,89	50	1,43	162444,44	10,70		
V2	Betonschaum-1/Basalt	3000	5	70000	1800	2,7	1500	3	1,85	80	4,02	252962,96	54,25		
V3	Betonschaum-1/Basalt	500	5	70000	1800	2,7	1500	3	1,85	50	3,08	37962,96	9,64		
V4	Betonschaum-1/Basalt	3000	2	70000	1800	2,7	1500	3	1,85	50	0,75	162962,96	19,03		
V0	Poraver /Glasfaser	780	1,2	70000	1800	2,7	1500	3	1,85	50	0,68	50963	11,83		
V1	Poraver /Glasfaser - Kennwerte 09/19 grobe Körnung	1200	1,2	70000	1800	2,7	1500	3	1,85	50	0,60	72963	14,29		
V2	Poraver /Glasfaser - Kennwerte 09/19 feine Körnung	1200	4	70000	1800	2,7	1500	3	1,85	50	2,00	72963	14,29		
V3	Wasserglas /Glasfaser, Kennwerte 01/21 (gefüged. Mischung 0,25-4 mm) r = 620 kg/m ³	1400	5,2	70000	1800	2,7	1500	3	1,85	50	2,48	82963	15,12		
V4	Wasserglas /Glasfaser Kennwerte 01/21 (2-4 mm) r = 250 kg/m ³	445	0,6	70000	1800	2,7	1500	4	1,85	50	0,38	35213	9,06		

a) Berechnung Ansatz 1, gerade Platte ohne Formgebung: Abmessungen: Breite b= 1m; Länge l = 3m; Als Faltwerk mit 15 cm Stich, Belastung Eigengewicht + 1kN/m², Materialkennwerte V3 (Tabelle 8.102) Ergebnis:

Verformung $w = 9 \text{ mm} = l/333$

Spannung $\sigma_{\max} = 3,6 \text{ N/mm}^2$; Biegemoment $M_{y,k} = 1,47 \text{ kNm}$

Unter Berücksichtigung von erforderlichen Sicherheitsbeiwerten kann nicht mit ausreichender Sicherheit angenommen werden, dass die Platte die Lasten aufnehmen kann (Ausnutzung ohne Sicherheitsbeiwerte = $1,47/2,48=60\%$)

b) Berechnung Ansatz 2, Faltwerk: Abmessungen: Breite b= 1m; Länge l = 3m mit 15 cm Stichhöhe, Belastung Eigengewicht + 1kN/m², Materialkennwerte V3, siehe Tabelle X, Ergebnis:

Verformung $w = 1 \text{ mm} = l/3000$

Spannung $\sigma_{\max} = 1,4 \text{ N/mm}^2$ $M_{y,rk} = 0,12 \text{ kNm/m}$

Das Tragverhalten ändert sich von einem biegeaktiven Tragwerk zu einem formaktiven Tragwerk, so dass ein maßgeblicher Teil der Beanspruchungen über Normalkräfte statt Biegung abgetragen wird. Der Verlauf der Spannungstrajektorien zeigt auf, dass sich die Zugspannungen (blau) am Rand des Systems in Längsrichtung konzentrieren und sich Druckbögen (rot) in der Konstruktion ausbilden. Die Beanspruchungen liegen auch unter Berücksichtigung der Sicherheitsbeiwerte ($\sigma_{\max} / \sigma_r = 1,4/5,2=27\%$) deutlich unter den aufnehmbaren Spannungen für V3. Eine weniger dichte Mischung, die einen besseren U-Wert aufweist, könnte also in diesem Fall eingesetzt werden oder die Bauelemente dünner ausgeführt werden.

c) Berechnung Ansatz 3, Bogenform: Abmessungen: Breite b= 1m; Länge l = 3m mit 15 cm Stichhöhe, Belastung Eigengewicht + 1kN/m², Materialkennwerte V3, siehe Tabelle X, Ergebnis:

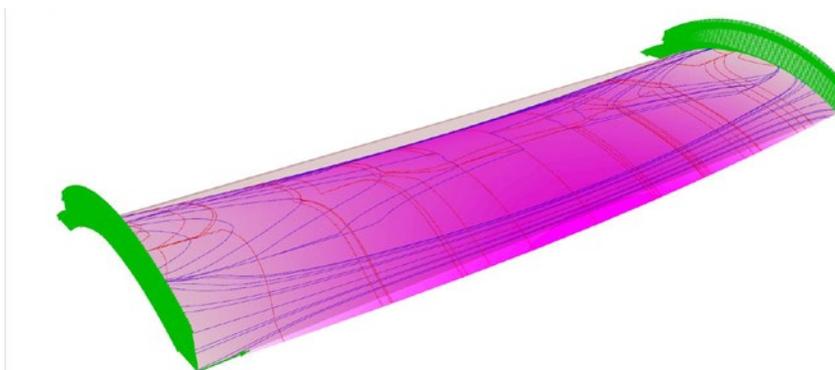
Verformung $w = 1 \text{ mm} = l/3000$

Spannung $\sigma_{\max} = 1,4 \text{ N/mm}^2$ $M_{y,rk} = 0,12 \text{ kNm/m}$

An Stelle der Faltung kann die Formaktivierung auch durch eine Bogenform sichergestellt werden, die dem Prinzip der Kappendecken entspricht (Abb. 106) Bei einer bogenförmigen Ausbildung wird dieser Effekt noch deutlicher und die Tragfähigkeit der Elemente erhöht sich weiter gegenüber der gefalteten Struktur.

Abbildung 8.106

≠



Verformungsbild mit Hauptspannungstrajektorien für System als bogenförmiges Element mit 15 cm Stich, bei 1 m Elementbreite

d) Berechnung Ansatz 3, Bogenform, Ausblick Demonstrator: Abmessungen: Breite $b= 1\text{ m}$; Länge $l = 2\text{ m}$ mit 15 cm Stichhöhe, Belastung Eigengewicht + 1 kN/m^2 , Materialkennwerte siehe Tabelle 8.103, Ergebnis:

Bei der betrachteten Geometrie kann die Dichte des Materials deutlich reduziert und somit der Materialeinsatz und auch U-Wert der Konstruktion bei ausreichender Tragfähigkeit reduziert werden, siehe Vergleichsuntersuchungen Tab. 8.105. Neben der Optimierung der Form können auch Systeme mit Graduierung angedacht werden. Zum einen kann das Textil in hochbeanspruchten Bereichen entlang der sich ausbildenden Zugbänder lokal verstärkt bzw. in gering beanspruchten Bereichen weniger dicht gewoben werden. Zum anderen kann durch eine gezielte Konfektionierung der Gewebe angedacht werden, Kammern im Gewebe so auszubilden, dass entlang der Druckbögen dichteres Material eingesetzt oder eine größere Bauhöhe erzielt werden kann, vergleichbar s. Abb. 8.105.

Tabelle 8.103

	Beschreibung	Verformung	max. Zugspannung	max. Druckspannung	zul. Druckspannung	Ausnutzung
		mm	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	unter Annahme eines globalen Sicherheitsbeiwerts von 3
A	Mischung V3; d= 5 cm	0,3	0,6	-0,6	5,2	35%
B	Mischung V3; d= 2 cm	1,4	2	-0,9	5,2	52%
C	Mischung V4; d= 5 cm	0,9	0,47	-0,25	0,6	125%

Varianten Formaktive Tragwerk - bogenförmiges Element

8.1.3 PET-Faser / PET-Schaum

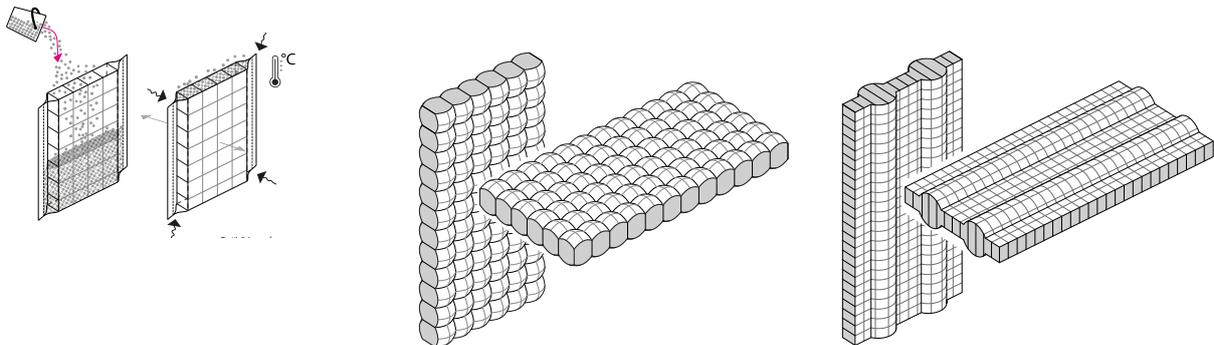
Anders als bei den Basaltfaser-/Schaumbetonverbundbauteilen und den Verbundbauteilen aus Glasfaser mit Bläh-/Wasserglas entsteht der PET Verbund durch Ausdehnung des Partikelschaum unter Hitze im PET-Textil – bei gleichzeitiger Schrumpfung des PET-Textils unter Hitze. Eine Befüllung mit graduell unterschiedlich dichten Partikelschäumen vergleichbar zu den erstgenannten Werkstoffvarianten ist denkbar. Entwickelt und untersucht im Rahmen von ge3TEX wurde aber zunächst aber nur eine Dichte, entsprechend liegen nur dazu erste mechanische und bauphysikalische Daten vor.

8.1.3.1 Mögliche Geometrien für Wand - und/oder Dachelemente aus PET

a) Wie bei den mineralischen Verbundwerkstoffen zuvor wurden auch hier zunächst **plattenartige Baukörper** mit homogener Befüllung angedacht. Bei PET ist die Herstellung jedoch anders, die finale Bauteilgröße ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Ofengröße. Abb. 8.107 zeigt die schalungsfreie Herstellung von mit PET Beads befüllten PET Abstandsgeweben. Je nach Textilgeometrie sind hier Plattenquerschnitte möglich (mittig). Aber auch die Ausbildung von Tragrippen (rechts) ist durch die Ausbildung unterschiedlicher Abstände zwischen den Polfäden des 3d Textils ausführbar. Je größer deren Abstand untereinander ist, umso größer können die durch die gleichmäßige Ausdehnung des PET Materials entstehenden kreisförmigen Tragrippen definiert werden.

b) **Formaktive Tragsysteme** wie bei dem Glasverbundwerkstoff in Form einer Faltung oder eines bogenförmigen Systems liessen sich auch in PET realisieren. Vorteil der Faltung ist ein durch das Textil ausgebildetes Linienscharnier. Nachteil ist die fehlende Kraftübertragung in dem Bereich. Zur Herstellung eines bogenförmigen Tragwerks müsste das PET nachträglich über einer Schalung unter Hitze verformt werden, was energetisch und unter Nachhaltigkeitsaspekten ebenfalls suboptimal erscheint.

Abbildung 8.107



PET Abstandsgewebe, befüllt mit PET Partikelschaum und unter Hitze zu einem Verbundelement aufgeschäumt

Resümee: Da für die PET Variante bislang keine stark differenzierten Materialdichten in der Ausführung zu erwarten sind, muss das Augenmerk hier eher auf die Erhöhung der Tragfähigkeit gelegt werden. Und eine Abwägung zwischen sinnvollen Plattenquerschnitten und Platten mit integrierten Trägern s. Abb 8.107 rechts erfolgen.

8.1.2.2 Lastfallsimulation zur Ermittlung des Kräfteverlaufs in einem neuartigen Verbundbauteil aus Glasfasern und Bläh-/Wasserglas

a) **Berechnungsgrundlagen:** Gem. Kapitel 6.4 wurden für den neuen Verbundwerkstoff In 3-Punkt-Biegeversuchen Materialkennwerte ermittelt. Es ergeben sich als mittlere Zugfestigkeit, abhängig von der Wahl des Textils, Werte zwischen $1,5 \text{ N/mm}^2$ und $2,6 \text{ N/mm}^2$. Anhand der Spannungs-Dehnungsdiagramme kann der E-Modul abgeleitet werden s. Anlage 5. Er liegt im Mittelwert bei $E\text{-Modul} = 88 \text{ N/mm}^2$

b) **Berechnung Variante 1, Platte mit konstanter Bauteildicke:** Abmessungen: Breite $b = 1 \text{ m}$; Länge $l = 3 \text{ m}$, Belastung Eigengewicht + 1 kN/m^2 , Materialkennwerte s.o., Ergebnis:

Zur Aufnahme der Beanspruchungen unter Annahme eines ausreichenden Sicherheitsfaktors auf Material- und Lastseite ist eine Bauteilhöhe von 13 cm erforderlich. Hier wird angenommen, dass die Kennwerte des Verbundquerschnittes sich durch die Anpassung der Bauteilhöhe nicht wesentlich ändern. Es sind die Verformungsrandbedingungen maßgebend ($l=300 \cdot \text{stel}$)

c) Berechnung Variante 2, Platte integrierten Tragrippen, $b=1\text{ m}$; Länge $l=3\text{ m}$, Belastung Eigengewicht + 1 kN/m^2 , Materialkennwerte s.o., Ergebnis:

Die obenstehende Untersuchung zu Variante 1 – Platte mit konstanter Höhe zeigt, dass die Verformungsrandbedingungen für die Tragfähigkeit des PET-Verbund-Werkstoffes maßgebend sind. Eine maßgebliche Verbesserung kann in diesem Fall durch eine Erhöhung der statischen Nutzhöhe erfolgen. Um das Gewicht und das eingesetzte Material nicht unnötig zu erhöhen, bietet sich bei der möglichen Fertigung dieser Materialvariante an, die statische Nutzhöhe durch lokal angeordnete Rippen zu erhöhen. Die Fertigung der Gewebe bedingt, dass die Rippen sich zu beiden Seiten der Bauteilachse auswölben.

Unter Annahme eines Rippenabstands von 25 cm ergeben sich bei einer Plattenbreite von 1m Bauteile mit 4 Rippen. Um eine ausreichende Tragfähigkeit zu erreichen sind Rippen mit 20 cm Höhe und 6 cm Breite bei einer Grundplattenstärke von 3 cm erforderlich. Es ist auch in diesem Fall aufgrund des niedrigen E-Moduls die Gebrauchstauglichkeit für die Querschnittswahl maßgebend

d) Berechnung Variante 2, Platte integrierten Tragrippen, Ausblick Demonstrator: Der Demonstrator wird als Platte mit konstanter Dicke, 2 m Bauteillänge und mit 3,9 cm Bauteilhöhe gefertigt. Die Maße sind in diesem Fall durch die Fertigungs des Textils ebenso bestimmt wie durch die Größe des zur Verfügung stehenden Ofens. Für diese Bauteilhöhe liegen die Kennwerte der Materialeigenschaften auf Grundlage von Versuchen vor. Die Berechnungen gem. Anlage 5 zeigen, dass die Steifigkeit und damit die Gebrauchstauglichkeit maßgebend die Dimensionierung und die mögliche Auflast des Demonstrators ist. Unter Eigengewicht treten hohe, aber noch akzeptable Verformungen (im Bereich von $l/200$) auf. Bei weiteren Auflasten werden die Verformungen sehr hoch; unter Einhaltung eines Sicherheitsfaktors $F=3$ und ohne Berücksichtigung der Verformungen könnten bis zu 30 kg/m^2 Auflast aufgenommen werden

8.2 Resümee

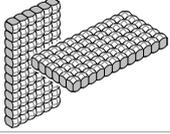
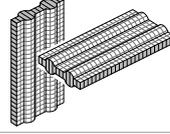
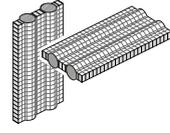
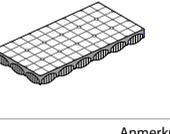
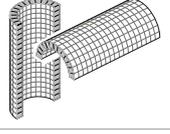
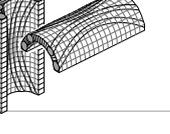
Die rechts abgebildete Tabelle 8.105 zeigt die Ergebnisse im Überblick. Es wird differenziert nach Tragsystemen, angelehnt an Kategorien nach Heino Engel¹. Verglichen werden notwendige Querschnittshöhen für Bauteile mit 2 m Spannweite, bei angenommen gleicher Verformung von 7 mm ($l=300\text{'stel}$). Diese Werte sind rot gekennzeichnet. Die Basiswerte dazu liefert Tab. 8.104 bzw. Anlage 5.

In rot und gestrichelt umrahmt sind Plattenbauteile mit konstanter Bauteilhöhe. Aus reinem Zementschaum läßt sich hier kein Bauteil herstellen, verglichen werden also die Glas- und PET Bauteile. Letzteres ist im Vergleich nur ca. halb so schwer, bei absehbar besseren Dämmwerten. Vergleicht man im nächsten Schritt Lösungen, bei denen das innere strukturelle Gefüge der Leichtbauteile wie die äußere Form entscheidend aus ihrer räumlichen Wirkung resultieren sieht man, daß unter Einzug der Zementschaum- /Betonlösung das PET Bauteil immer noch vorteilhafter in Bezug auf das Gewicht ist wie Dämmung ist. Der Wärmeleitwert liegt bei 0,045 für das neue PET Verbundmaterial im Gegensatz zu 0,06 beim Zementschaum und 0,14 beim Blähglasbauteil. Das Glasbauteil kann sehr gut auch als einfach gekrümmtes Bauteil hergestellt werden, die Bauteilhöhe liegt dann nur noch bei 5 cm und im Verleich zum PET Bauteil ist es dann nicht mehr doppelt so schwer sondern nur noch halb so schwer.

Tabelle 8.104 Vergleich Materialgruppen, System: Länge 2 m, Durchbiegung 7 mm ($=l/300\text{stel}$), Auflast 100 kg/m^2 + Eigengewicht

	Schaubeton/ Basalt	Wasserglas	Wasserglas v2	Wasserglas	PET	PET mit Rippen
		Versuche 1/21 Gefüge 2-4 mm	Versuche 1/21 Gefüge 2-4 mm	Versuche gefü- ged. Mischung 0,25-4 mm		Rippe $b=6\text{ cm}$ Abstand a $=25\text{ cm}$
Bauhöhe	17 cm	7 cm	12 cm	7 cm	11 cm	17 cm Rippe + 3 cm Platte
maßgebend	Verformung	Tragfähigkeit	Tragfähigkeit	Verformung	Verformung	Verformung
Sicherheit GZT	ca.5-7	1	2	2	8	5,5

Tabelle 8.105

Tragsysteme	Basaltfaser und Schaumbeton	Glasfaser und Bläh-/Wasserglas	PET-Faser / PET-Schaum
Schaumdichten in kg/cm ^x	180 kg/cbm Schaumbeton (2.500 kg/cbm mrUHPC)	620 kg/cbm Bläh-/Wasserglas Verbund (Dichteoptionen 250-620 kg/cbm)	197 kg/cbm Verbund aus PET Textil und -Schaum
Eigengewicht in kg, bezogen auf max. Verformung 7mm und herstellbares Element gem. nachf. Auswertung	154 kg	86,8 kg (gebogenes Element 62 kg)	43,34 kg
SCHNITTAKTIV (MASSEAKTIV)			
	der Zementschaum ist allein nicht ausreichend druckstabil	s. Anlage 5, 8.1.2.2: Erste Berechnungen für ein Bauteil der Abmessungen L*B*H = 300*100*5 cm, Eigengewicht und Auflast 1 kN/m ² ergeben keine ausreichende Sicherheit für eine Lastaufnahme (Ausnutzung zul. Spannungen ohne Sicherheitsbeiwerte = 60%)	s. Anlage 5, 8.1.3.2: Erste Berechnungen für ein Bauteil der Abmessungen L*B = 300*100 ergeben unter Eigengewicht und Auflast 1 kN/m ² sowie der Annahme eines ausreichenden Sicherheitsfaktors auf Material- und Lastseite eine Bauteilhöhe von 13 cm
Anmerkungen	nicht tragfähig	herstellbar, Tragwirkung nachgewiesen	herstellbar, Tragwirkung nachgewiesen
Bauteilhöhe bei Auflast 1 kN/m ² , Abmessungen L*B = 200*100 cm, angenommene Verformung l/300= 7 mm	/	7 cm, GZT = 2	11 cm, GZT = 8
	der Zementschaum ist allein nicht ausreichend druckstabil	statt den Querschnitt anzupassen können im Glasbereich einfacher lastwerkadäquate Materialdichten verwendet+ entsprechend Höhen von Plattenelementen angepasst werden	s. Anlage 5, 8.1.3.2, sinnvoll ist eine maßgebliche Erhöhung der statischen Nutzhöhe -, maßgeblich für die Tragfähigkeit des PET Verbundwerkstoffs sind die Verformungsrandbedingungen u. ergeben erste Berechnungen bei L*B0 = 300*100 cm sinnvolle Querschnitt mit 4 Rippen, h 20 cm, a= 25cm, Grundplatte h= 3 cm
Anmerkungen	nicht tragfähig	theoretisch herstellbar, Sinnhaftigkeit kritisch	herstellbar, Tragwirkung nachgewiesen
Bauteilhöhe bei Auflast 1 kN/m ² , Abmessungen L*B = 200*100 cm, angenommene Verformung/l/300= 7 mm	/	/	4 Rippen, h 17 cm, a= 25cm, Grundplatte h= 3 cm, GZT = 5,5
Vektoraktiv			
	es lassen sich im Bereich der Polfäden keine ausreichend dichten Kanäle ausbilden, um flüssigen Zementschaum und Betone höherer Dichteklassen im Element selbst zu trennen	es stehen unterschiedlich dichten Bläh-/Wasserglasgemischen zur Verfügung	es stehen bislang keine Partikelschäume mit ausreichend unterschiedlichen Dichten zur Verfügung; die durch Polfäden ausbildbaren Kanalstrukturen wären aber ausreichend, um Schaumbereiche unterschiedlicher Dichten voneinander zu trennen
Anmerkungen	nicht herstellbar	theoretisch herstellbar, Sinnhaftigkeit kritisch.	noch nicht sinnvoll herstellbar
Bauteilhöhe bei Auflast 1 kN/m ² , Abmessungen L*B = 200*100 cm, angenommene Verformung/l/300= 7 mm	/	/	/
	Erhöhung der Druckfestigkeit durch räumlich wirksame Aufbetonschicht aus UHPC auf verlorener Schalung aus Basaltfaser - Zementschaumelementen mit eigearbeiten Unterspanngurten	die eher mörtelartige, nicht fließfähige Struktur der Bläh-/Wasserglasmatrix macht solch komplexe Geometrien mit einer Blähglasauflage eher unmöglich	da im Textil aufgeschäumt wird, müsste die obere Lage über ein dreilagiges 2-Kammertextil hergestellt werde - dies in unterschiedliche Materialdichten
Anmerkungen	herstellbar, Tragwirkung nachgewiesen	nicht sinnvoll herstellbar	noch nicht sinnvoll herstellbar
Bauteilhöhe bei Auflast 1 kN/m ² , Abmessungen L*B = 200*100 cm, angenommene Verformung/l/300= 7 mm	17 cm (2 cm UHPC + 15 cm Zementschaum) GZT = 5-7	/	/
FORMAKTIV			
	der Zementschaum ist allein nicht ausreichend druckstabil, eine zusätzliche druckstabile Schicht würde ein 2-Kammertextil erfordern	vertikales Befüllen und Trocknen in Hängeposition, alternativ Trocknen auf Form, (Berechnung s. s. Anlage 5, 8.1.2.2)	PET wird im Textil aufgeschäumt, es entsteht eine Platte, die erst nachträglich unter erneuter Wärmezufuhr und auf einer Schalung verformt werden kann
Anmerkungen	(noch) nicht herstellbar	herstellbar, Tragwirkung nachgewiesen	nicht sinnvoll herstellbar
Bauteilhöhe bei Auflast 1 kN/m ² , Abmessungen L*B = 200*100 cm, angenommene Verformung/l/300= 7 mm	/	Elementstärke 5 cm, Stichhöhe 15 cm, GTZ= 3, Ausnutzung Annahme globaler Sicherheitsbeiwert von 3: 35%	/
	Es lassen sich im Bereich der Polfäden keine ausreichend dichten Kanäle ausbilden, um flüssigen Zementschaum und Betone höherer Dichteklassen zu trennen	Bereits mit einer homogenen Befüllung lassen sich Tragfähigkeit und Dämmung sehr gut optimieren, die Differenzierung in unterschiedliche Befüllrichtungen wird im Vergleich zu aufwendig sein	Es stehen bislang keine Partikelschäume mit ausreichend unterschiedlichen Dichten zur Verfügung
Anmerkungen	nicht herstellbar	Herstellung aufwendig	nicht sinnvoll herstellbar
Bauteilhöhe bei Auflast 1 kN/m ² , Abmessungen L*B = 200*100 cm, angenommene Verformung/l/300= 7 mm	/	/	/

sinnvolle Demonstratorbauteile

Übersicht über mögliche Bauteilgeometrien, Bauteilhöhen und Bauteilgewichte - ausgehend von der Tragfähigkeit

9 Zusätzliche Bauteilfunktionalisierungen

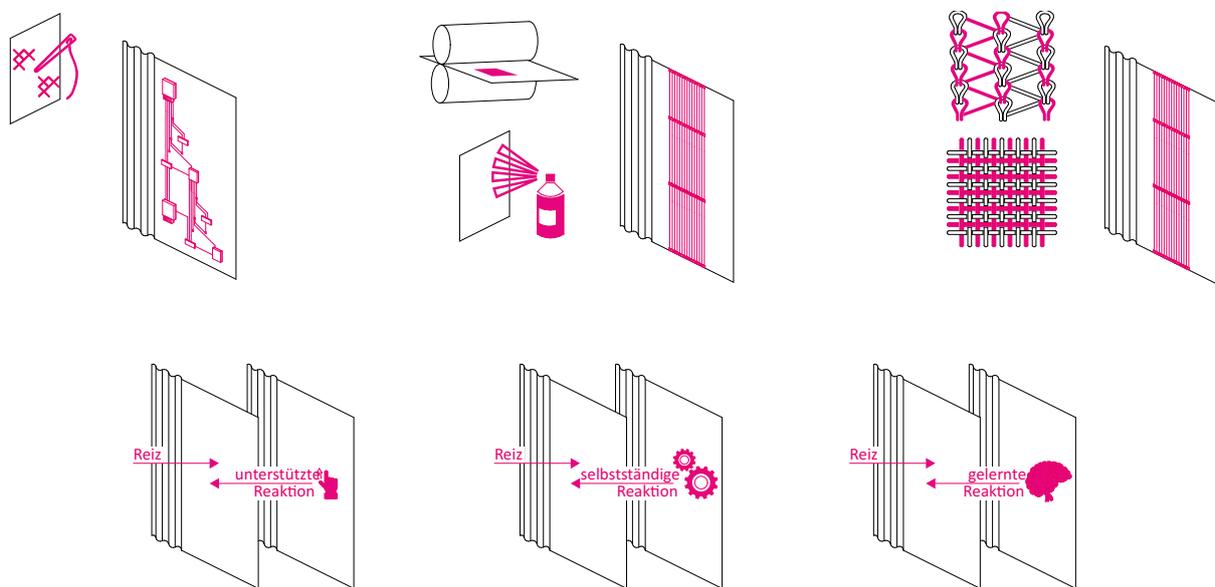
Die in Kapitel 6 dokumentierte Entwicklung von drei strukturdifferenzierten Monomaterialien aus Fasern und geschäumten Werkstoffen bietet erste Optionen zur Herstellung von Bauteilen mit relevanten Funktionen wie Tragfähigkeit, Wärmeschutz und je nach Material auch Wetterschutz. Damit Zusatzfunktionen nicht erneut in überflüssigen Materialeinsatz und fehleranfälligen Herstellungsverfahren vor Ort resultieren, werden nachfolgend Optionen aufgezeigt, wie insbesondere über die textilen Anteile eine erhöhte Multifunktionalität erreicht werden kann

9.1 Textilbasierte Funktionserweiterungen

In der Bekleidungs- aber auch in der Automobilbranche und in der Medizin erobern impulsleitende Jacken, leuchtende Sicherheitsbekleidung, heizende und leuchtende Innenausstattungs-elemente, medizinische Stents u.a. den Markt. Und auch in der Bauindustrie gibt es inzwischen neben Textilbetonen erste, wenige Beispiele und ein Potential für sogenannte technische Textilien, s. auch Kapitel 2.

Technische Textilien können Fasern, Stoffe oder Trägermaterialien sein. Sie bilden den Grundbaustein für smarte Textilien. Die Faserbeschaffenheit, Herstellungstechnik und Endbearbeitung sind für das jeweilige Produkt so zugeschnitten, dass es einen bestimmten Nutzen¹ erfüllt. Meist handelt es sich um eine Hybridstruktur aus konventionellem Garn und Spezialgarnen mit besondere Fähigkeiten. Dazu gehört das Leiten oder „Fühlen“ von elektrischen, thermischen, chemischen oder magnetischen Reizen, aber auch die Fähigkeit, diese Reize durch einen Aktor zu verarbeiten und mit einer Wandlung des Textils zu reagieren. Per Definition sind somit smarte Textilien Textilien, die Umweltreize wie Temperatur, Licht oder Druck wahrnehmen und durch ihre besondere Textilstruktur darauf reagieren oder sich anpassen können². Abb 9.100 zeigt Herstellung und Kategorien Technischer Textilien bzw. Smart Textiles mit entsprechenden Funktionalisierungsoptionen.

Abbildung 9.100

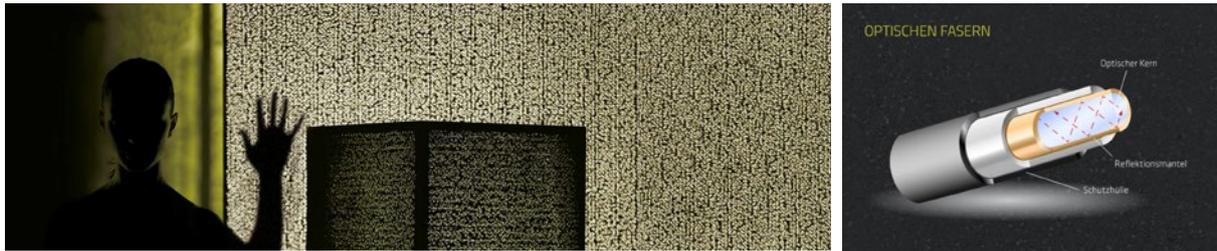


oben links: Applikation von Funktionselementen auf Textilien durch Sticken; oben mitte: Reduktion von starren Funktionselementen durch Aufdrucken, Beschichten; oben rechts: Integration textile Funktionsfasern
 unten links: Passives, smartes Textil; unten mitte: Aktives, smartes Textil; unten rechts: Adaptiv-reaktives smartes Textil

1 Butaud-Stubbs& Niestroy, 2013

2 Schneegass / Amft, Smart Textiles, 2017

Abbildung 9.101



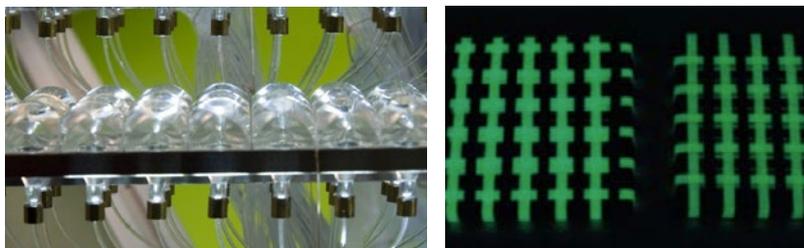
Luccon (CRE PANEL) Lichtdurchlässiger Beton mit Lichtwellenleitern

9.1.1 Licht und 3D Textilien

9.1.1.1 Lichtleitende Fasern, Nachleuchtende Garne

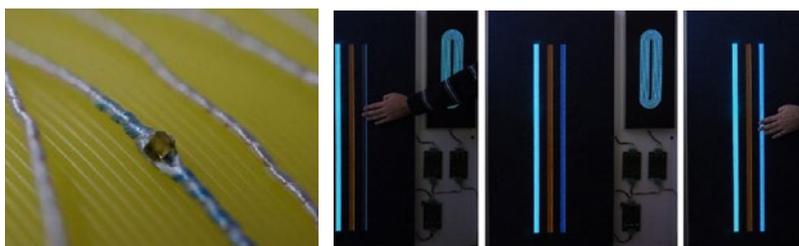
Natürliches Licht in Innenräumen reduziert Kunstlicht, spart Energie und ist gut für das Allgemeinbefinden. **Lichtdurchlässige Betonelemente** (Luccon), s. Abb. 9.101, machten schon vor längeren auf die mögliche Integration von lichtleitenden Glasfasern in opake Bauteile aufmerksam. Auch der **Sollektor**, der an der Hochschule Nürnberg entwickelt wurde, s. Abb 9.102 links, arbeitet mit lichtleitenden Acrylglasfasern. Das Sonnenlicht wird auf das 700-fache durch mehr als 800 Kunststofflinsen verstärkt und in 1mm starke Lichtleitfasern eingespeist. Die Fasern können einzeln oder gebündelt bis zu 20 Meter geführt werden. Eine zweite Art passiver Beleuchtungsstrategien sind **nachleuchtende Garne** (CoreCoat, Recytex/NighTec) s. Abb. 9.102 rechts. Hier wird nachleuchtendes Granulat in die Ummantelung von Garnen eingefügt, die zum Weben, Stricken, Nähen oder Flechten verwendet werden können. Dieser Effekt kann auch über Beschichtungen erreicht werden. **IluTex** (H.-L. Johannesen, M. Guglielmi, V.T enner, J. Senode) ist die Entwicklung einer passiv leuchtenden textilen Gebäudehaut. Sie schützt bei Dämmerung vor Einsicht von außen über eine eine phosphorhaltige, nachleuchtende Beschichtung.

Abbildung 9.102



links Sollektor (Technische Hochschule Nürnberg/ Bavarian Optics) Sammelstation und Lichtverteiler, rechts: Nachleuchtendes Garn CoreCoat (Recytex/NighTec)

Abbildung 9.103



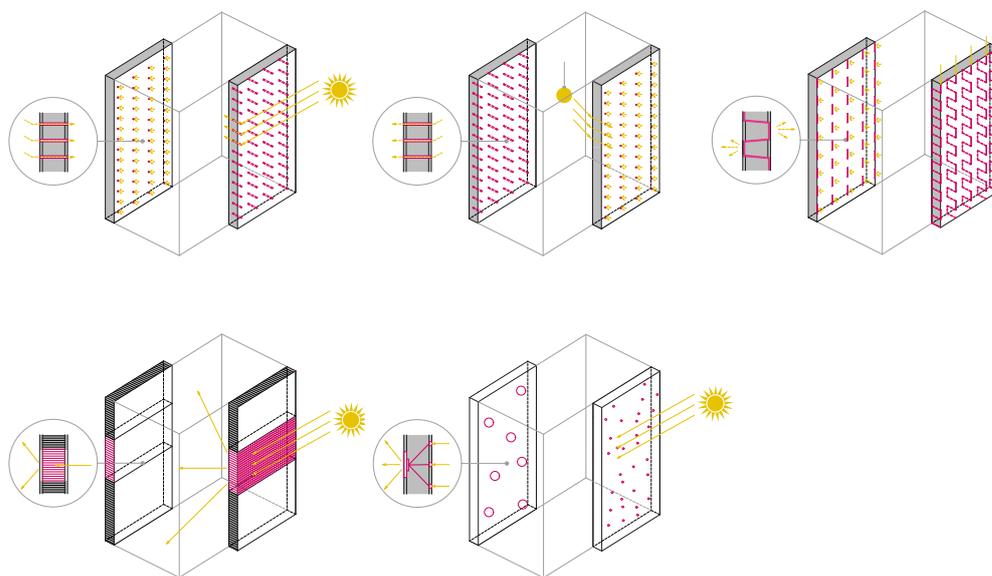
links, E-Thread mit LED (PASTA/Primo1D)

rechts Garne mit farblich dynamischem Leuchtverhalten und näherungs-sensorischen Eigenschaften (iTV Denkendorf/ IGF)

Neben diesen passiven gibt es auch aktive Lichtsteuerungsmöglichkeiten, s. Abb. 9.103. **E-Thread** (PASTA/Primo1D) ist ein mit Halbleitern bestücktes Metallgarn, das großflächig in Textilien eingearbeitet werden kann und beispielsweise mit aktiv ansteuerbaren LEDs verknüpft wird. Die DITF haben mit der Entwicklung von **Leuchtgarnen** noch einen weiteren Entwicklungsschritt vollzogen, bei dem Garne selber zum Leuchten gebracht werden. Das Garn kann auf einer industriellen Stickmaschine verarbeitet werden. Es ist mit einer Platine verknüpft, die drei Farbkanäle hat und das Leuchtgarn versorgt

Insbesondere die lichtleitenden Garne stellen für ge3TEX eine interessante Option dar (Abb. 9.104). Über die Dreidimensionalität der Abstandstextilien und das zielgenaue Einweben oder Einwirken ergeben sich einfacherer Möglichkeiten der Tageslichtintegration, als über das Herstellverfahren, z.B. von Luccon.

Abbildung 9.104



Abstandstextilien, Licht- bzw. Leuchtkonzeptemit 3d Textilene und integrierten, lichtleitenden Fasern bzw. Garnen

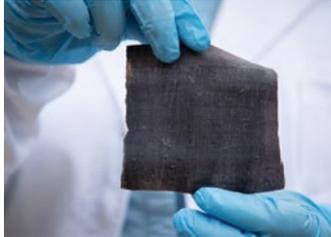
Die Energiegewinnung über **Solarfasern** oder solaraktive Beschichtungen steckt hingegen noch immer im Forschungsstadium. In der Entwicklung sind sogenannte Perowskite - Solarzellen (L. Qiu, J. Deng, X. Lu, Z. Yang, H. Peng). Dies sind faserförmige Solarzellen, die auf einem Perowskit-Material und Kohlenstoff-Nanoröhrchen basieren. Sie sind sehr flexibel und lassen sich daher auch zu einem textilen Gewebe verarbeiten. Durch die spezielle Beschichtung des Stahldrahtes mit n-halbleitenden Titandioxid, porösen nanokristallinem Titandioxid und dem Perowskit-Material, einem organischen Material und dem transparenten Kohlenstoff-Nanoröhrchen entstehen unter der Einwirkung von Licht photoelektronische Strömungen die einen Wirkungsgrad von 3,3%. Auch solaraktive Beschichtungen mit Farbstoffzellen oder organischen Zellen sind bislang schwierig aufgrund der Elastizität und Unebenheit der textilen Flächen. Was bleibt ist die Applikation separat gefertigter Module, die dann im besten Fall auch zum Wetterschutz beitragen.

9.1.2 Energiespeicherung und 3D Textilien

Eine neue Methode zur Herstellung von leistungsstarken und langlebigen Energiespeichern wurde von Wissenschaftlern der RMIT University entwickelt und bietet ein kostengünstiges und leichtanwendbares Verfahren: **Smart textile patch** (RMIT University) Die Graphen-Superkondensatoren werden durch einen Laserdruck auf Textilien aufgebracht. Der Energiespeicher ist waschbar und lässt sich leicht mit Energiequellen, wie beispielsweise Solarenergie, verknüpfen. Dazu ist er temperaturbeständig (Abb. 9.105). In Bezug auf 3D Textilien

ist das Verfahren erst noch mit dem Druckprozess zu synchronisieren, aufgrund der Elastizität des Rückstellvermögens der 3D Textilien.

Abbildung 9.105



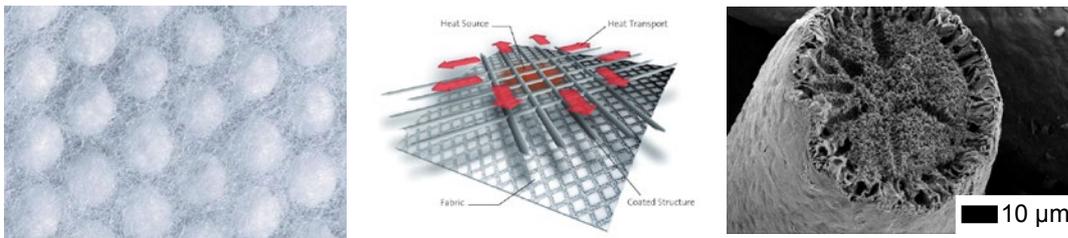
Textiler Energiespeicher (RMIT University)

9.1.3 Temperaturmanagement und 3D Textilien

Zur Energiespeicherung und zum Temperaturamplitudenmanagement nutzt auch die Textilindustrie zunehmend PCM Materialien. Zwei Techniken stehen hier zur Verfügung, das Beschichten oder Schäumen auf Textilflächen oder das Ausrüsten von Garnen mit PCM. **Schoeller-PCM** z. B. bietet beschichtete, kühlende Textilien an s. Abb. 9.106. Bei **Outlast** wird das PCM in Mikrokapseln aus Kunststoff gefasst, die in Fasern eingesponnen werden können.

Eine andere Option bieten Aerogele, die unter anderem als Hitzeschutz in der Raumfahrt verwendet werden, wo sie in Form von spröden Blöcken zum Einsatz kommen. Um das Material in einem weiten Feld von Anwendungen nutzen zu können, wird am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University³ faserbasiertes Aerogel-Material entwickelt (Abb 9.106, rechts). Die neuen **Cellulose Aerogelfasern** sind, analog zu Glas- oder Keramik, flexibel und verformbar. Dadurch ist ihr Einsatz in unterschiedliche Bereiche der Isolation denkbar. Für ge3TEX und das Thema verlorene Textilschalungen bietet diese Faserentwicklung zusätzliches Dämmpotential.

Abbildung 9.106



links: Schoeller-PCM (Schoeller) PCM in Mikrokapseln eingefasst und auf das Textil aufgetragen
 mitte: Outlast Excelerate (Outlast) PCM in Kombination mit Hitzeverteilern
 rechts: Cellulose-Aerogel-Fasern

9.2 Schaumbasierte Funktionserweiterungen

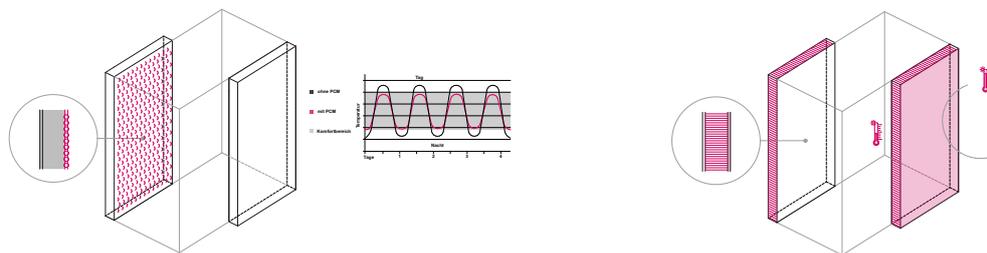
Auch im Bereich der Schäume wird mit PCM Materialien experimentiert. Der in ge3TEX zusammen mit Basalttextilien genutzte Zementschaum wird beim Projektpartner TU Darmstadt im Projekt **NRG-Storage** zu einem neuen **Kompositmaterial aus mineralischem Schaum mit integrierten PCM's** geformt. PCM dient als Energiespeicher, während der zementgebundene Dämmstoff brandsicher, wirtschaftlich und nachhaltig ist. Die Kombination der beiden Materialien formt einen neuartigen und leichten Dämmstoff mit besonderen Eigenschaften. So kann das Verbundmaterial Wärme speichern oder abgeben. Im Sommer bedeutet das den Schutz

³ Gries, T., Pico, D., (2016-19) Silica Aero - Validierung des Innovationspotentials von porösen Silica-Aerogelfasern im Bereich der Wärmeisolation, Fördermittelträger BMBF

vor Überhitzung des Innenraums und im Winter die Speicherung der Wärme innen. Darüber hinaus ermöglicht die Dämmung eine Reduktion der erforderlichen Dicke, so dass Kosten und Ressourcen gespart werden. Erste Ergebnisse zeigen eine um 25% verbesserte Dämmfähigkeit gegenüber herkömmlichen synthetischen Materialien wie beispielsweise Steinwolle. Dazu erlaubt es eine passive oder aktive Energiespeicherung. Ebenso wie bei den Textilien wird im Betonbereich schon länger mit Aerogelzuschlägen experimentiert (**Aerogelbeton**)⁴ Im Verbund haben die Betone dann faszinierende Eigenschaften: Geringe Dichte, hohe Schalldämmung und exzellente Wärmedämmung.

Optionen der zusätzlichen Funktionalisierung von Faser- wie Schaumanteilen der neuen Verbundmaterialien in Bezug auf das Dämmverhalten und Temperaturmanagement zeigt Abb. 9.107.

Abbildung 9.107



links: 3D Textilien und Temperaturamplitudenmanagement durch PCM-Fasern
rechts: Zementschäume mit PCM Beimischungen

9.3 Bauteilfügen

Aufgrund der textilen Anteile in ge3TEX werden insbesondere textile Fügungsmechanismen betrachtet. Bereits im Vorprojekt 3dTEX wurde mit Klettverschlüssen zur Fügung ausgeschäumter Abstandstextilien experimentiert. Vorreiter ist im übrigen der Forschungspavillon des ICD/ITKE von 2015-16, in dem textile Techniken wie Nähen und Schnüren zur Verbindung der dünnen Sperrholzplatten zum Einsatz gebracht wurden (Abb. 9.108) Weitere textile Fügungsmechanismen sind neben Nähen und Schnüren Knöpfen, Nieten, Kletten und Klemmen.

Abbildung 9.108



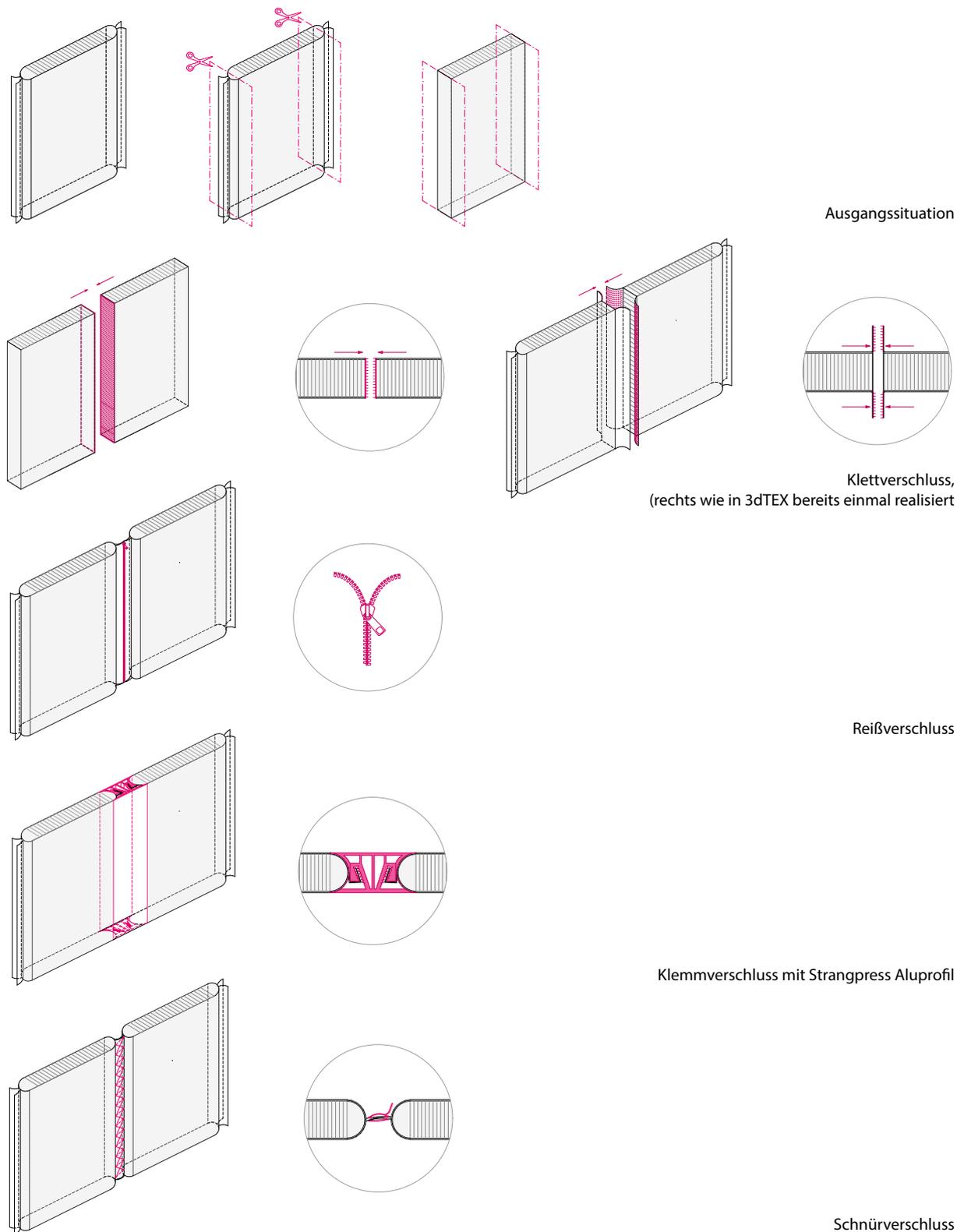
Forschungspavillon Stuttgart ICD / ITKE 2015/16

9.3.1 Transfer in Bezug auf 3D Textilien

Die Herausforderung bei der Verarbeitung von 3D Textilien ist, daß klassisches Nähen wenn dann nur durch beide Decklagen funktioniert. Entsprechend schwierig ist derzeit die Befestigung durch Nieten, Reißverschlüsse oder Klettverschlussverbindungen, ausser es werden die freie Decklagen an der Enden der ausgeschäumten Textilien verwendet. Klebetechniken wurden aufgrund der nachträglich schwierigen Trennung /Lösbarkeit der Verbindung verworfen. Eine Übersicht der Möglichkeiten zeigt Abb. 9.109.

⁴ Ratke, L. (2008) Herstellung und Eigenschaften eines neuen Leichtbetons: Aerogelbeton, 2008 Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin - Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 4, S. 236

Abbildung 9.109



9.3 Resümee

Ein Resümee sinnvoller Möglichkeiten weiterer Funktionalisierungen ausgeschäumter 3D Textilien wird in Abschnitt 11 und in Bezug auf die einzelnen Werkstoffgruppen abgebildet.

10 Fertigung finaler Demonstratoren, Zusammenführung der Zwischenergebnisse

10.1 Fertigung finaler Demonstratoren

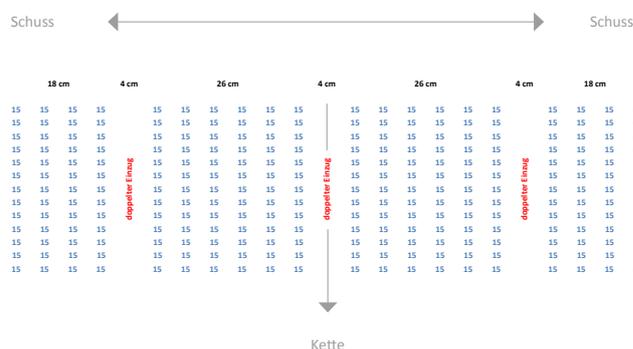
10.1.1 Demonstrator aus 3D-Basaltgewebe und Schaumbeton, in Kombination mit einer Aufbetonschicht (s. auch Anlage 1, Autor Maier, Andreas)

Wie in Kapitel 7.1.1 ausgeführt, wurden insgesamt sieben Varianten an Basaltgeweben konzipiert und in einer ersten Testreihe befüllt. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Befüllversuche und der Herstellung erster Demonstratoren von ca. 100 cm * 100 cm und 100 cm * 470 cm Größe wurde ein finales Basaltgewebe konzipiert (Abb. 10.100). Ausschlaggebend und eingeflossen in die Konzeption der finalen Textilgeometrie sind Befüllversuche s. Kap. 7. 2 .1 und die Berechnungen aus Kapitel 8.1.1.

Textilgeometrie: Nach den ersten Versuchen zur Textilherstellung und Befüllversuchen war das Ziel, eine im befüllten Zustand kissenartige Struktur herzustellen. Sie sollte zum einen als verlorene Dämmschalung für eine tragende Aufbetonschicht dienen. Zum anderen sollte sie im Bereich der Kreuzungspunkt der Vertiefungen zwischen den Kissen wie bei einem Eierkarton punktuelle Verbindungen zwischen oberer und untere Deckschicht erlauben. Dies, um die in den Berechnungen sinnvoll nachgewiesene Unterspannung der Aufbetonschicht durch die untere Textilebene zu gewährleisten. Nach dem Ausschäumen und Testen der verschiedenen Varianten gem. Kapitel 7.1.2 musste die Idee einer kissenförmigen Struktur mit punktuellen Vertiefungen wie bei einem Eierkarton im Rahmen von ge3TEX zurückgestellt werden. Machbar aber war die Verstärkung der unteren Textilebene gem. Abb. 10.100. in drei Bereichen und dementsprechend die weitere Verfeinerung von Variante 6 gem. Kapitel 7.2.1. Der Abstand von 150 mm zwischen den beiden Gewebelagen wurde als ausreichend betrachtet. Auch die Anzahl und der Abstand der Polfäden im Gewebe werden von Variante 6 übernommen, sowie das Einbringen der Noppen über die komplette Gewebebreite. Zur Verstärkung ist in einer Gewebelage zwischen zwei Polfadenstellen doppelt eingezogen worden. Diese Bereiche sind 4 cm groß und besitzen nach dem doppelten Einzug die doppelte Fadenanzahl im Grundgewebe, bei gleichbleibendem Gewebeabstand. Das finale Gewebe stellt sich wie folgt dar ,bei 1m Breite:

- Konstanter Abstand der Decklagen von 150 mm (4 Blindschüsse)
- 4 cm Polfadenraster:
- Schussdichte: 6 Schuss / cm und Gewebelage, Kettichte: 4,5 Kettfäden / cm und Gewebelage
- Mit Noppen zur verbesserten Haftung mit dem Beton
- Zur Steigerung der Unterspannung wird eine Gewebelage an drei Stellen mit der doppelten Fadendichte eingezogen

Abbildung 10.100

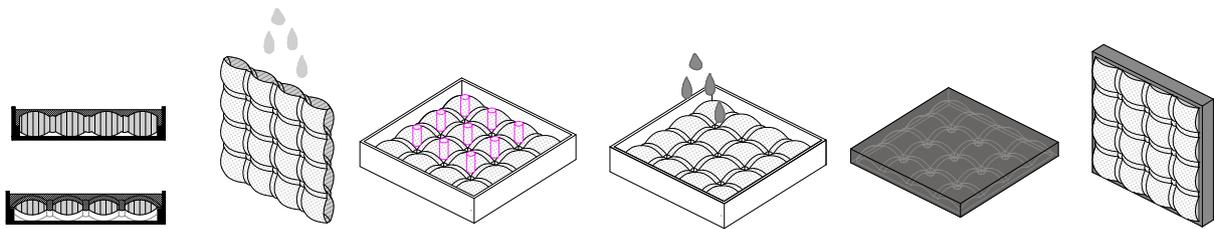


Min. / max. Webblattbreite:	95 cm / 175 cm
Webblattfeinheit:	44,9 St./10 cm
Eingezogene Webblattbreite:	ohne Kante: 104,5 cm mit Kante: 112,6 cm
Max. Einzugsbreite Gewebeteil mit Abstandsfäden	100 cm
Anzahl Grundketten:	2 (Ø 1.000 mm)
Anzahl Grundkettfäden	2 x 450 Fd.
Anzahl Spulensteckplätze eines optionalen Kettpulengatters / verwendete Anzahl:	364 / 104
Fachbildung:	Dreistellungsschiffmaschine
Anzahl Polschäfte / Belegte Polschäfte:	8 (Schaft 1 – 8) / 6 (Schaft 1-6)
Anzahl Grundschäfte:	Untergewebe (UW): 4 (Schaft 9 – 12) Obergewebe (OW): 4 (Schaft 13 – 16)
Anzahl Kantenschäfte:	Untergewebe (UW): 2 (Schaft 17 – 18) Obergewebe (OW): 2 (Schaft 19 – 20)
Webmaschinendrehzahl (min. / max.):	65 / 220 U/min
Eingestellte Webmaschinendrehzahl:	90 U/min

Basaltgewebe, finaler Demonstrator (aufbauend auf Variante 6, s. Kap. 7.2) mit Noppen, links: Schema Textilgeometrie, rechts: Daten Webmaschine

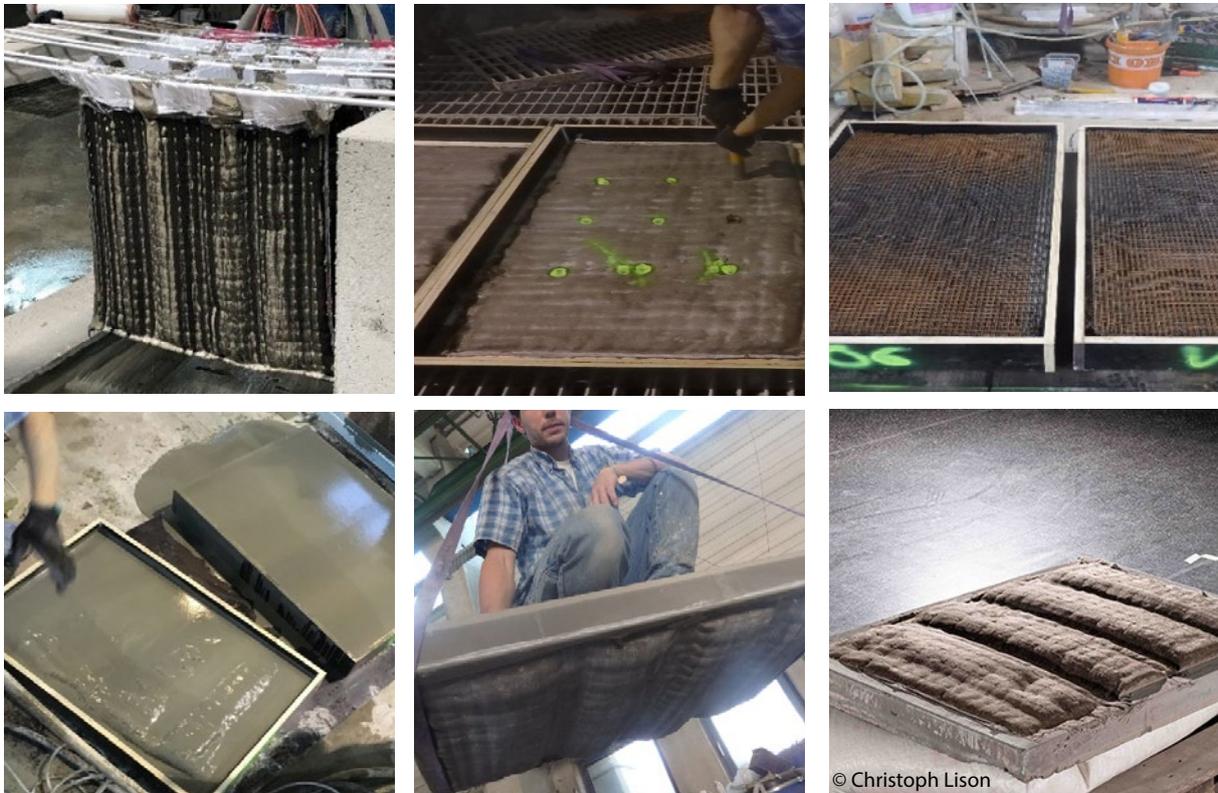
Zur Aufbringung einer Aufbetonschicht auf das mit Zementschaum gefüllte Gewebe wird eine umlaufende Schalung benötigt. Abb. 10.101. zeigt das ursprüngliche Konzept mit einer kissenartigen Struktur. Für den Demonstrator wurde das Konzept abgewandelt. Es wurde ein quasi planares Zementschaumtextil hergestellt (Abb. 10.103) mit drei verstärkten, eingewebten Gurtbereichen an der Unterseite. Zur Verbindung der Aufbetonschicht aus hochfestem Beton und der Unterspannebene wurden gem. Berechnungsgrundlagen einzeln manuell Bohrlöcher in die verlorene Dämmschalung eingebracht. Sie füllen sich beim Aufbringen der Aufbetonschicht und stellen als Pendelstützen somit wie angedacht punktuell und in Tragrichtung die Lastübertragung der Druckkräfte zum Unterspanngurt her. Bei horizontalem Einbau gibt es ein Zusammenwirken der zugbeanspruchten Textillage unten mit der druckbeanspruchten UHPC Lage oben

Abbildung 10.101



Prozessschritte zur Herstellung des finalen Demonstrators wie ursprünglich konzipiert, mit einer kissenartigen, verlorenen Dämmschalung

Abbildung 10.102



Erste Versuche zur Herstellung eines horizontal belasteten Bauteils aus einer verlorenen Dämmschalung aus Basalttextilien und Zementschaum für eine druckbelastbare Aufbetonschicht

Abbildung 10.103

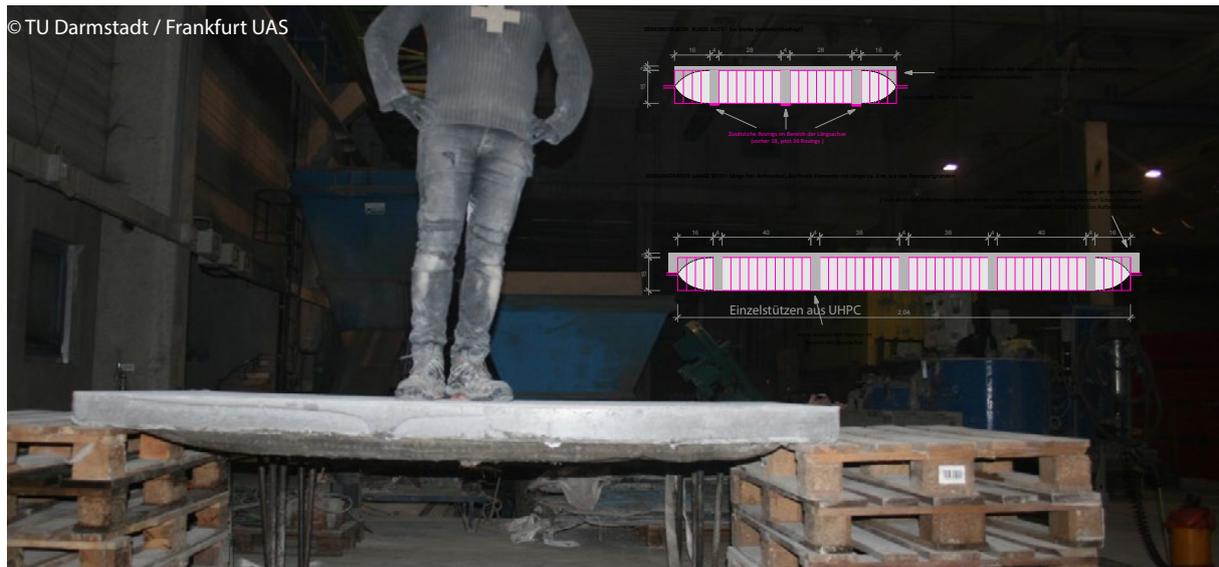


Prozessschritte zur Herstellung des finalen Demonstrators von links oben nach rechts unten: Hängen / Befüllen, Abkleben, Trocknen (Bild im gereinigten Zustand), Schalungsbau mit flächigen Randauflagern für die Nahtbereiche, Simulation der geplanten Eierkartonstruktur (manuelles Bohren für die Betonstempel) zum Verbund von druckbelasteter Aufbetonschicht und zugbelasteter Textilschicht mit eingearbeiteten Unterspanngurten, Einlegen einer Mikrobewehrung (Glasvlies), um evtl. Rissbildung im Aufbeton zu vermeiden

Herstellung des finalen Demonstrators, s. Abb. 10.103 Grundmaterial des Basalttextils ist der Roving BF17, aus denen die zweilagige Basaltelemente gem. Kap.7 hergestellt wurden. Als dämmendes Füllmaterial wird der im Kapitel 6.2.1. vorgestellte mineralisierte Zementschaum verwendet. Als druckübertragender Aufbeton kommt ein mrUHPC der Firm DUCON zum Einsatz. Dieser Hochleistungsbeton weist Biegezugfestigkeiten von über 35 MPa sowie Druckfestigkeiten von über 115 MPa auf. Daraus ergeben sich die sehr geringen Bauteildicken. Zur Rissminderung wurden alternativ eine Mikrobewehrung aus Schwarzstahl in zwei Demonstratoren und ein Glasfaservlies in einen der Demonstratoren eingebracht. Der Befüllprozess des Basalttextils erfolgte hängend wie in den Vorversuchen, das Aufbringen des Aufbetons erfolgte analog zu Abb. 10.101 und den ersten Vorversuchen mit den 100 cm * 100 cm Zementschaumelementen, s. Abb. 10.102.

Ergebnis Das Kompositbauteil konnte wie geplant aus einer verlorenen Dämmschalung aus Zementschaum und einem speziell gefertigten 3D Basalttextil mit eingearbeiteten Unterspanngurten hergestellt werden. Aufgrund der geringen Druckfestigkeit des Schaumwerkstoffes wurde eine druckfeste Schicht aus einem mikro-

Abbildung 10.104



Ausgeschaltetes Kompositbauteil mit 3 cm starker Aufbetonschicht (rechnerisch ausreichend sind 2 cm) sowie umlaufend seitlichen Rahmenausbildungen und einem 15 cm starken, mit zementösem Schaum gefüllten 3D Basaltgewebe mit eingewebten Unterspanngurten

bewehrten ultrahochfesten Beton aufgebracht. Das Konstruktionsprinzip einer hybriden Tragwirkung mit zugbelastetem Textil und druckbelastetem Beton funktioniert, s. Abb. 10.104. Den Anteil der Lastabtragung über das Textil müsste in einer späteren Versuchsreihe experimentell nachgewiesen werden durch einen Vergleich dieser Konstruktion mit einer solchen ohne textiler Unterspannung. Auch der Nachweis einer Tauwasserfreiheit der Konstruktion über das Jahr hinweg gesehen unter Standardbedingungen fehlt noch.

Anzustreben sind in jedem Fall deutlich größere Elemente, da nur dann der Ansatz von Leichtbau umgesetzt werden kann. Sowohl der Schaum zu Dämmzwecken als auch vor allem der Aufbeton bringen gerade auch im Hinblick auf eine EnEV/GEG-konforme Anwendung großes Gewicht in die Konstruktion, was sich erst bei Spannweiten deutlich über 5,0 m als leichte und weitgespannte Elemente weniger bemerkbar macht und die Konstruktion als Ganzes filigran erscheinen lässt. Die hohen mechanischen Eigenschaften des mrUHPCs und der Basaltflächentextilien ermöglichen problemlos Spannweiten von 10,0 m in den hier verwendeten Abmessungen. Bei größeren Spannweiten müsste die Bauteildicke des Aufbetons ebenfalls geringfügig anwachsen.

Abbildung 10.105



Demonstratorelement 200 cm * 100 cm, aufgeschnitten, Zementschaumdämmung und Basalttextil mit UHPC Aufbetonschicht (Hier noch mit einer Egalisierungsschicht) und UHPC Druckstäben, zur Lastübertragung auf die eingewebten Unterspanngurte im Basalttextil

10.1.2 Demonstrator aus Abstandsgewirken und Bläh-/Wasserglas (s. auch Anlage 2, Autoren Nagel Dominik und Rucker-Gramm, Petra)

Textilgeometrie Gewebe: Wie in Kapitel 7.1.2 ausgeführt, wurden zwei Varianten Abstandsgewebe aus AR Glas konzipiert und in der Größe 200 cm * 50 cm * 4 cm, Polfadenraster 4 cm, mit alternativ einfachem oder doppelten Polfäden hergestellt. Größere Gewebemuster konnten bislang nicht hergestellt werden bzw. sind geplant mit einem zu Projektende neu hinzugestoßenen Projektpartner (Pile Fabrics GmbH). Für die finalen Demonstratoren ist entsprechend den ersten Befüllversuchen gem. Kapitel 7.2.2 geplant die Deckflächen weniger dicht zu weben, so daß sich eine mechanische Haftung zwischen Bläh-/Wasserglasmatrix und Textil einstellt. Zudem sollen die Deckflächen zwecks Biegsbarkeit unterschiedlich dicht hergestellt werden.

Textilgeometrie Gewirke: Hier wurde für einen finalen Demonstrator zunächst auf bestehendes PE Abstandsgewirke aus dem Projekt 3dTEX zurückgegriffen. Es liegen zwar erste Muster zu Glasgewirken mit verstärkenden Monofil Polfäden vor, s. Abb. 10.106. Die Technik ist aber bislang nicht etabliert, größere Muster sind nicht zu bekommen.

Abbildung 10.106

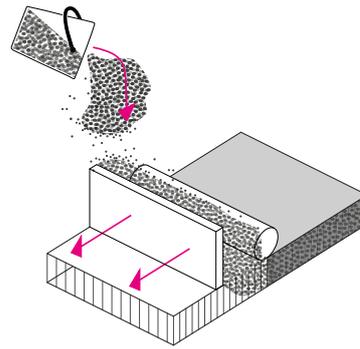


Im Vordergrund links: Aufsicht Abstandsgewirk aus Glasfasern, Polfäden Mischung aus Glasfasern und Monofilamenten, daneben das Glasfasergewirke im Schnitt; Im Hintergrund Demonstrator 1, PE Abstandsgewirk, befüllt mit Blähglas

Herstellung Demonstrator 1, 160 cm * 50 cm * 4 cm, Stichhöhe 35 cm Realisiert wurde ein finaler Demonstrator aus bestehendem PE Abstandsgewirke. Eingerakelt wurde eine Einkornmischung aus einer Blähglaskörnung mit Durchmesser 1-2 mm, gebunden in einer Wasserglasmatrix aus Betol. Das Gewirke wurde nacheinander über beide Deckflächen befüllt, s. Abb. 10.107, und anschließend über einer einfach gekrümmten Holzlattenschalung luftgetrocknet, s. Abb. 10.108

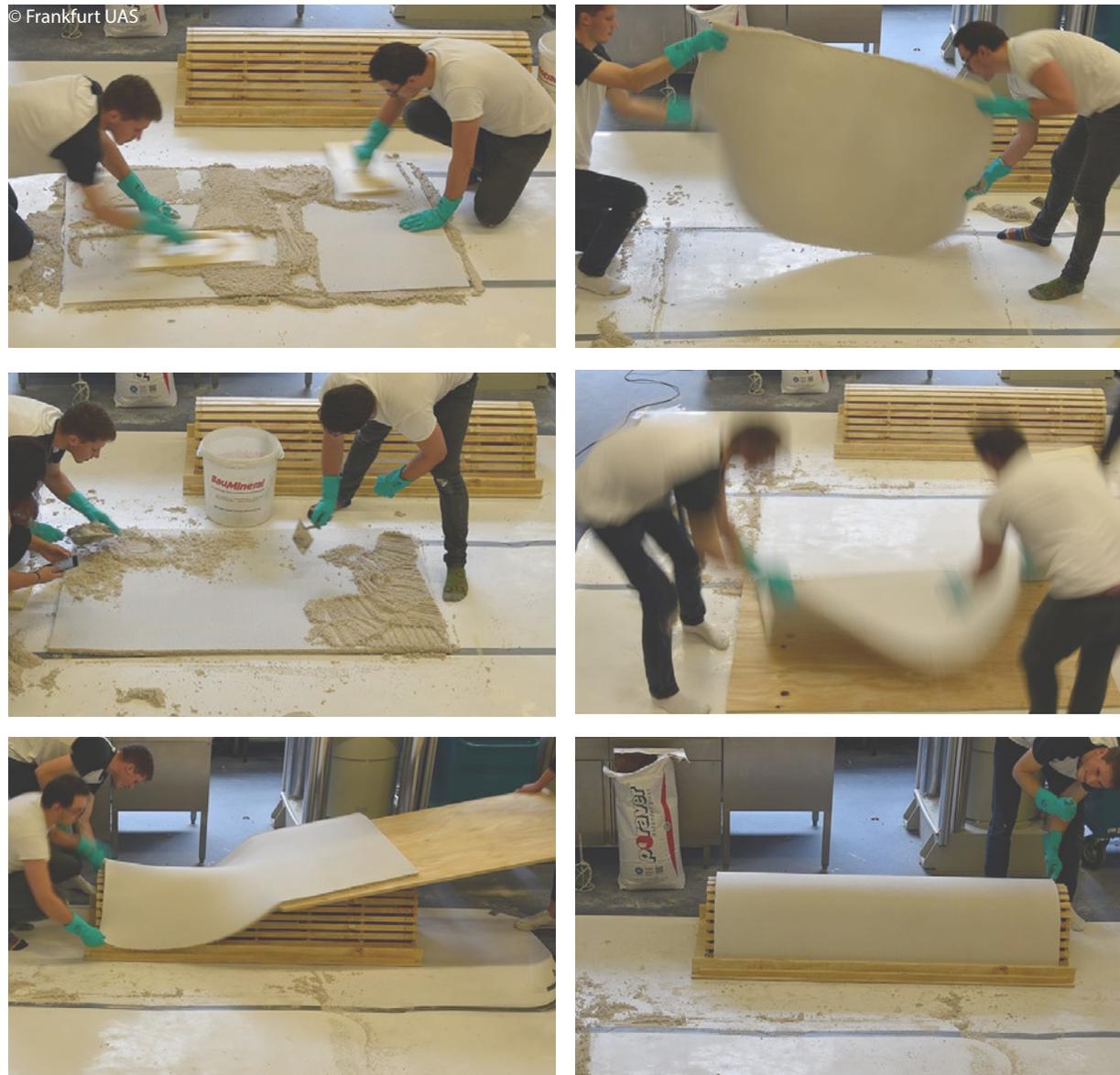
Ergebnis: Nach dem Trocknungsprozess können die einfach gekrümmten Schalelemente leicht abgehoben, transportiert und sowohl senkrecht als auch waagrecht platziert werden (Abb. 10.109). Die Oberfläche behält bei dieser Herstelltechnik ihre textile Haptik und Struktur. Sie muss dazu aber final erneut mit Wasserglas innenseitig hydrophobiert werden, um die Oberfläche zu bewahren und gleichzeitig Staubfestigkeit zu gewährleisten. Mittelfristig und bei Abstandsgewirken mit größerer Höhe ist auch ein rein einseitiges Einrakeln denkbar, so daß der Rest des unbefüllten Textils zur Dämmung beiträgt.

Abbildung 10.107



Schematische Herstellung eines potentiell automatisierbaren (Rakel)Prozesses:
Die Bläh-/Wasserglasmatrix wird nicht eingerakelt, sondern über ein kontinuierliches Rollensystem eingerüttelt bzw. eingerollt.

Abbildung 10.108



Herstellung eines finalen Demonstrators aus Abstandsgewirke und einer Bläh-/Wasserglasmatrix, die beidseitig eingerakelt wird; zum „Form“ Trocknen wird das Element auf eine Schalung gelegt oder kann alternativ aufgehängt werden

Abbildung 10.109



© Christoph Lison

Demonstratorelement 200 cm *100 cm, Bläh-/Wasserglasmatrix, eingerakelt in ein PE Gewirke, einseitig gekrümmt, luftgetrocknet

Abbildung 10.110

Demonstratorelement ca. 100 cm * 150 cm * 4 cm, gefügedichte Bläh-/Wasserglasmatrix in AR Glas Abstandsgewebe, flach, im Ofen getrocknet

Herstellung Demonstrator 2, ca. 100 * 50 cm * 4 cm, Ein zweiter Demonstrator wurde gem. dem Vorversuchen in Abschnitt 6.4 aus den AR Glas Ersatzgeweben des DITV gefertigt, s. Abb. 10.110. Eingefüllt wurde eine gefügedichte Bläh-/Wasserglasmischung in hängender Position über die Seitenkanten. Das Element wurde im Ofen getrocknet.

Ergebnis: Trotz der mit Sicherheit geschädigten Polfäden ist das Element soweit stabil. Neue Glasgewebe des neuen Industriepartners lagen zu Projektende noch nicht vor, so konnten bislang keine weiteren Versuche gemacht werden.

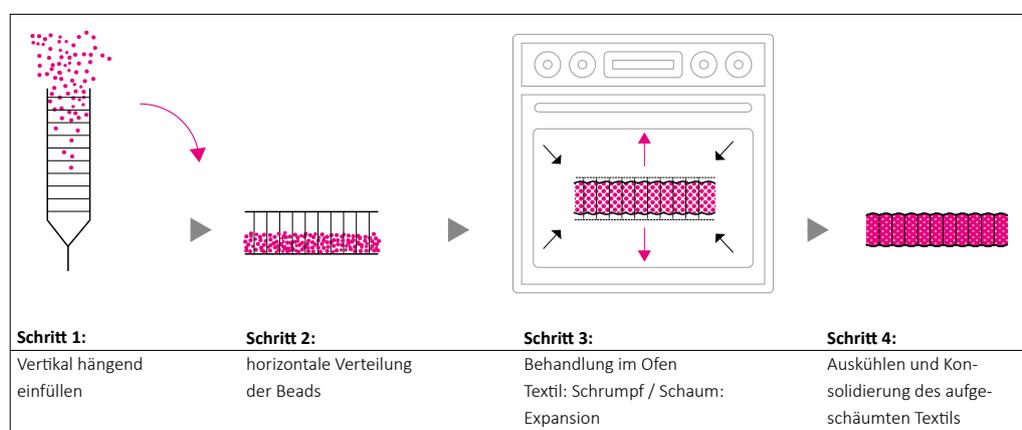
10.1.3 Demonstrator aus PET Gewebe/ PET Partikelschaum, s. auch Anlage 3, Autorin Beuscher, Johanna

Textilgeometrie Gewebe: Zur Herstellung eines finalen Demonstrators wurde eine einfache, planare Geometrie gewählt. Das gesamte Herstellungsverfahren mit einem großen Ofen wird hier das erste Mal angewendet. Es stand nur ein großes Abstandstextil zur Verfügung, das händisch und von Tutoren hergestellt keinen Raum für weitere Experimente bot.

Herstellung Demonstrator 200 cm * 100 cm * 2,5 cm Die Herstellung der finalen Demonstratoren konnte in den Produktionsstätten des Projektpartners Armacell in Thimister, BE erfolgen. Hier steht ein großer Ofen zur Verfügung, sodass erstmals Demonstratoren mit Bauteilabmessungen von 1 m x 2 m, bzw. 1 m x 1 m hergestellt werden konnten. Die als verlorene Schalung und Formgeber vorgesehenen Abstandstextilien wurden, wie auch die vorangegangenen Versuche, aus jeweils zwei einlagigen PET Flächentextilien zusammengefügt und durch PET-Bändchen einer definierten Länge von 2,5 cm auf Abstand gehalten. Die Abstandsfäden wurden in einem gleichmässigen Raster von 2 cm x 2 cm (Demonstrator 1) und 4 cm x 4 cm (Demonstrator 2) eingebracht. Ziel war es zu beobachten, wie sich die Dichte und Anordnung der Polfäden auf die Verteilung der Beads und das Schäumverhalten insgesamt im Ofen auswirkt.

Die in dem Fall händisch gefertigten PET Abstandstextilien werden für die Befüllung vorkonfektioniert, indem sie dreiseitig durch Doppelnähte verschlossen und zur Aufhängung mit Laschen versehen werden, um ein besseres Befüllen von oben zu ermöglichen. Um das Innenvolumen des Textils voll nutzen zu können, müssen vor der Aufhängung die Decklagen voneinander getrennt werden. Hierfür wird ein Abstandhalter der richtigen Größe, in diesem Fall ein Alu-Rohr, zwischen die Polfäden geschoben. Die 3D Textilien werden dann vertikal aufgehängt und das Befüllen erfolgt über ein Einrieseln der noch nicht final expandierten Schaumpartikel. Das Abstandsgewebe wird nach dem Befüllen am oberen Rand mit Nadeln abgesteckt, zusammengeheftet und mit der Nähmaschine durch eine letzte Naht verschlossen. Danach muss die Füllung innerhalb des Textils in horizontaler Lage gleichmässig im Textil verteilt werden. Diese Egalisierung ist notwendig, um ein gleichmässiges Expandieren der Schaumperlen zu erleichtern und keine Unregelmässigkeiten in der Dichte des Schaumergebnisses und an der Oberfläche der Platte zu erzeugen. Denkbar wäre es hierfür eine horizontale Rüttelplatte zu nutzen. Das befüllte Textil wird bei 190°C, der Maximaltemperatur des Ofens, in einem Schritt für die Dauer von 90 Min. geschäumt. Als Abstandhalter zum Boden des Ofens werden Baustahlmatten in Kombination mit Armierungsgittern genutzt. So soll eine allseitige Luftumstömung gewährleistet und gleichzeitig vermieden werden, dass Überhitzungen an der Unterseite des Demonstrators zu einer Beschädigung des Textils führen. Das Abkühlen der Probekörper erfolgt ausserhalb des Ofens auf Paletten oder einem Gitterrost. Die thermoplastische Verformbarkeit bleibt bis ca. 140°C bestehen, danach ist die Platte relativ ausgehärtet und kann horizontal liegend und mit Kantenschutz versehen, transportiert werden. Abbildung 10.111 zeigt grafisch den Herstellungsprozess, der in Abb. 10112 fotografisch dokumentiert wurde.

Abbildung 10.111



Herstellung eines mit PET-Partikelschaum aus Rezyklat ausgeschäumten PET-Textils, ebenfalls aus Rezyklat

Abbildung 10.112



Aufziehen des Textilvermögens mit Alustange als Hilfsmittel



Aufhängung der 3D Textilien zur vertikalen Einfüllung der PET-Beads



Rohmaterial PET- Beads mit polyesterbasierter thermoplastischer Beschichtung



Befüllen der Textiltasche mit ArmaShape PET-Beads



Abstecken und Zunähen der Einfüllöffnung vor Ort



Vorgeheizter Ofen bei Armacell mit Bewehrungsmatten als Abstandshalter



Demonstrator nach 30 Min. im Ofen



Auskühlen und Konsolidierung des Demonstrators (1 x 2m) nach 90 Min. im Ofen

Herstellung der Finalen Demonstratoren aus PET Textil und PET Schaum

Ergebnis Der Herstellprozess funktioniert einwandfrei. Es konnten unterschiedliche Elemente mit individuellen Geometrien gefertigt werden. Einzig beim Polfadenraster 4 cm * 4 cm haben sich einzelne Polfäden aufgrund des erhöhten Drucks gelöst. Dies ist der manuellen Fertigung mit einzeln verknöteten Polfäden zuzuschreiben. Alle Elemente sind gleichmäßig befüllt, auch die große Platte s. Abb. 10.113 ist steif und stabil, der Verbund zwischen Textil und final geschäumtem Partikelschaum ist ebenfalls überall und durchgängig sehr gut.

Abbildung 10.113



Finaler Demonstrator aus PET Textil und PET Schaum, Untersicht

Tabelle 10.200 Sortenreine Bauteile aus drei Werkstoffgruppen im Vergleich: Mechanische und bauphysikalische Werte, Nachhaltigkeitsaspekte

Vergleich Kennwerte ge3TEX	Dichte	Druckfestigk.	Zugfestigkeit	Biegezugfestigkeit	E-Modul	Wärmeleitfähigkeit	Recyclierfähigkeit	
Alle Werte aus eigenen Messungen sind Mittelwerte	kg/m ³ (bei Textil Doppelgewebe kg/qm)	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	λ	Wieviel % Rezyklat wird im Herstellprozess verwendet	Wie wird das Material recycelt? (Downcycling, Recycling, Upcycling)
Quellangaben in hellgrau								
Basaltroving (Flächengewicht Doppelgewebe in kg/m²)	1,47	/	4.840	/	91.000 - 110.000	/	k.A.	Ein Einschmelzen der Fasern ist zwar möglich wird aber aufgrund der geringen Mengen und des Aufwands, die Basaltfasern von anderen Stoffen zu trennen, nicht gemacht.
	Info DITF kg / qm							Info DITF
Zementöser Schaum	180	0,21		0,031		0,057	0%	downcycling und shreddern für Strassenbau. Recycling in Form vollständiger Trennung von anderen Betonschichten und neuerliche Verwendung als geringfügig dünnere Dämmplatte
Schichtstärke ca 15 cm								
mrUHPC	2500	120	14,1	25-35	25.500-30.500	2,5	0%	downcycling, shreddern und Recycling für neuerliche Betonherstellung
Schichtstärke ca 2 cm								
Verbundbauteil Beton/Textil	/	/	/	/	/	/	0%	Trennung von Textilkissen und mrUHPC gut möglich; eine Trennung von Schaum und Textil durch Shreddern und Filtern möglich, wobei beides mineralischer Natur ist und nicht sortenein getrennt werden muss. Die Trennung kann nicht zerstörungsfrei erfolgen
Bauteil 200*100*0,17 cm (Schichten 15+2cm)								
Glasroving (Flächengewicht Doppelgewebe in kg/qm)	1,47	/	1.800 - 5.000	/	70.000-90.000	/	k.a	k.A.
	Info DITF kg / qm							3.3.21 Weimer angefragt
Wasserglas	/	/	/	/	/	/	0%	wieder einschmelzbar
Blähglas	/	/	/	/	/	/	100%	wieder einschmelzbar
Bläh-/Wasserglas Verbund (Herstellung im Verhältnis 4/6)	600	3,2-5		1,31 - 2	1.245	0,146	50 % (Entspricht Masseanteil Blähglas)	Sofern das Material ausreichend fein gemahlen wurde, kann es portionsweise (max 20%) der Poraver-Produktion zugeführt werden
	240					0,045		
								210209 Auskunft Poraver
Verbundbauteil Blähgastextil	s. Anlage 2	s.v.	s.v.	s.v.	s.v.	s.v.	50 % (Entspricht Masseanteil Blähglas)	Sofern das Material ausreichend fein gemahlen wurde, kann es portionsweise (max 20%) der Poraver-Produktion zugeführt werden. Die Fasern stellen bei ausreichender Feinheit keine Gefahr für das Produkt dar.
Bauteil 200*100*0,07 cm								210209 Auskunft Poraver
PET Bändchen (einlagiges Gewebe 0,125 kg/m²)	0,25	/	Längs= 89,19 Quers= 84,55	/	Längs= 258 Quers= 196	/	95%	wieder einschmelzbar + recycierbar (downcycling)
			s. mail Propex 5.3.2021, Labordaten. Ausserdem Dehnung Längs = 26,79%, Quer = 16,84 %					
Partikelschaum HybridC.	200	1,8 (10% Verformung)			DruckE modul 35	0,03-0,05	100%	kann z.B. im Spritzgießprozess oder Fließprägeprozesse einen positiven Einfluss auf Impact des Rezyklats
					Shear modulus 18			Einschätzung Armacell
(Extr. Blockschaum E/GR195	195	1,8	1,15	k.A.	DruckE modul 66			
Quelle Armacell					Shear Modulus unterschiedlich in xz/yz			
Verbundbauteil PETschaumtextil	197	2,1 bei 10% Stauchung	k.A.	2,6	88	0,045	Knapp 100 %, entsprechend der Ausgangs-bestandteile	Wir gehen davon aus, dass sich auch das Verbundteil wie oben beschrieben recyclet werden kann
Bauteil 200*100*0,11 cm			Quelle FRAUAS			Quelle TUD		Einschätzung Armacell
Bauteil 200*100*0,15 cm						0,045		

10.2 Bewertung, Zielerreichung, Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

	Gewicht	U-Wert Bauteil	CO2 Äquivalent			Primärenergiegehalt							
	kg	W/(m2 K)	Co2e/kg	CO2e/cbm	Ergebnis	Pne MJ/kg	MJ/cbm	SUMME	Pe MJ/kg	MJ/cb	SUMME	Pages- MJ/kg	SUMME
Kann das verwendete Material erneut im selben / in anderen Herstellprozessen verwendet werden?													
k.A.	2,94	/	pro kg Rovings 1,99 (Originalwert 4,77 bezieht sich auf 1.000 m Roving = 2,4 kg)	/	5,85	69,9 (Originalwert 29,13 bezieht sich auf 1.000 m Roving, = 2,4 kg Basaltroving)	/	85,64	k.A.	/	/	/	85,64
210215 Die Werte beziehen sich auf Rovings der DBF, die nach deutschen Standards gefertigt also weniger Pei beinhalten, als in anderen Teilen der Welt gefertigte (Quelle über Weimer "Bewertung der Nachhaltigkeit: Ökologische Aspekte von Basaltfasern" Projekt des SKZ Nr.: C3-B1 Teilvorhaben K, Stand: 20. April 2016"/ Hier wird der verbrauch fossiler Ressourcen (ADPF) statt Pei in MJ abgebildet													
Nein, jedoch neuerliche Verwendung als Dämmplatte möglich	54	0,38	/	124,91	37,47	/	361,6	108,48	/	60,76	18,23	/	126,71
Ja, in der Betonherstellung für Betone bis C50/60 ohne Resthydratisierung zu 100% in Bezug auf den gemahlene Zementstein	100	12,5	/	618,64	24,75	/	2978,02	119,12	/	292	11,68	/	130,80
Einzelbestandteile können wieder verwendet werden, siehe oben, ggf. ist auch eine Aufteilung in kleinere Elemente durch Sägen möglich	156,94	0,35	/	/	68,07	/	/	313,24	/	/	29,91	/	343,15
Quelle Herr-Gleich John Mansville, "Life cycle assessment of CFGF – Continuous Filament Glass Fibre Products" October 2016 Report prepared for GlassFibreEurope by PwC – Sustainable Performance and Strategy, Neuilly-sur-Seine cedex, Seite 25 CO2e und Seite 20 (PEI)													
k.A.	2,94	/			2,03	5,97	/	/	/	/	/	33,9	99,67
k.A.	29,4	/			1,384	40,69	/	k.a.	/	k.a.	k.a.	/	/
max 10% im selben Prozess wieder verwendbar	54,6	/	0,68	218	37,13	8,22	2.631	s.unten	0,38	121,4	s.unten	8,6	/
Sofern das Material ausreichend fein gemahlen wurde, kann es portionsweise (max 20%) der Poraver-Produktion zugeführt werden	84	2,09	/	/	77,82	/	/	690,48	/	/	31,92	/	722,4
	57,6	0,38			59,33								
210209 Auskunft Poraver													
Sofern das Material ausreichend fein gemahlen wurde, kann es portionsweise (max 20%) der Poraver-Produktion zugeführt werden. Die Fasern stellen bei ausreichender Feinheit keine Gefahr für das Produkt dar.	86,94	2,09	/	/	83,79	/	/	/	/	/	/	/	822,07
210209 Auskunft Poraver		(Wert ohne Dämmung)			Wert Bogenelement mit Dämmung: 87,53								Wasserglasanteil im Bläh-/Wasserglasverbund vernachlässigt bei PEI Berechnung bzw. als Blähglas
im selben Prozess kann man die Bädchen wieder verwerten, allerdings nur in einem gewissen Prozentsatz	0,5	/	0,742 (bezogen auf m2 Folie einlagig)	/	2,968	15,51 (bezogen auf m2 Folie einlagig)	/	62,04	1,924 (bezogen auf m2 Folie einlagig)	/	7,696	/	69,736
Propex: Keine Werte vorhanden (Alternativwert Dampfbrème PET gitterverstärkt (Dicke 0,0001 m) aus ÖkobauDat)													
ressen eingesetzt werden. Hybrid coating hat	44	/	218		95,92		k.A.	/	/	k.A.	/	k.A.	/
Einschätzung Armacell			Quelle Armacell, mail v.24.11 "Environmental Impact ArmaShape (EPET)", mail 8.3.21 "Die Angabe (wert 218) beziehen sich auf 100 kg Schaum, +			Von Armacell nur Angaben zu "Abiotic depletion, fossil fuels", Wert in 5540 MJ (Im Vergleich EPS 8032 MJ)							
teil mit Schaum und Gewebe einschmelzen und	43,34	0,41	/	/	97,45								k.A. wegen fehlender Schaumwerte
Einschätzung Armacell	59,1	0,30			131,81								

10.2.1. Materialdesign

Tabelle 10.200 zeigt in einer qualifizierenden Zusammenschau, wie sich die drei Verbundbauteile unterscheiden, bei gleichem Verformungsverhalten von 7 mm ($l = 300\text{stel}$), bei 200 cm Spannweite und bezogen auf die in Kapitel 8 ermittelten Bauteilhöhen. Die Tabelle listet alle relevanten Werte für die Einzelwerkstoffe auf. Gesamtwerte für die neuen Verbundmaterialien werden dabei entweder über die Addition der Einzelwerte ermittelt. Oder es werden die Kennzahlen aufgelistet, die im Rahmen des Projekts ge3TEX direkt für das jeweils neue Verbundmaterial ermittelt werden konnten.

Erfasst sind mechanische und bauphysikalische Kennwerte, beschrieben werden Recyclingoptionen und ermittelt wurden Nachhaltigkeitswerte. Da für den neuen PET-Schaum keine PEI Werte vorliegen, wurde für den Gesamtvergleich das CO₂-Äquivalent herangezogen. Eine genaue Nachhaltigkeitsmodellierung, z.B. mit der eLCA-Software der Ökobaudat, ist aufgrund der erstmalig erhobenen Datenlage der neuen Verbundmaterialien noch nicht umfänglich möglich. Entsprechend sind sämtliche Daten nur als qualifizierend einzuordnen.

Ergebnisse: Vergleicht man man die Bauteile untereinander in Bezug auf Gewicht, U-Werte und GWP und unter Berücksichtigung eines gleichen Verformungsverhaltens bei entsprechend unterschiedlichen Bauteilhöhen (s. Kapitel 8.2), sowie annähernd ähnlichem Dämmverhalten, ergibt sich folgende Tabelle 10.200:

- Das mit Zementschaum gefüllte Basalttextil wird zu einer verlorenen Dämmschalung mit integrierten Untertensiongurten; zusammen mit einer druckstabile Aufbetonschicht (mrUHPC) ergibt sich ein Bauteil mit im Vergleich geringem GWP von ca. 68 aber hohem Gewicht von ca. 157 kg (Werte s. Zeile 1 Tabelle 10.201):

Tabelle 10.201

Bauteile 100 cm breit, Spannweite 200 cm, Auflast 1 kN/m ² , bei identischer Verformung von 7 mm und entsprechend unterschiedlichen Bauteilhöhen <small>Werte bei vergleichbaren U-Werten von 0,35 - 0,3 und Verformung von bis zu ca. 7mm</small>	Gewicht kg	U-Wert W/(m ² K)	GWP (CO ₂ -Äquivalent)
Basalttextil + Zementschaum / UHPC Aufbeton, bei 7 mm Verformung h=15 cm (ZS) + 2 cm (UHPC)	ca. 157	ca. 0,35	ca. 68
Glastextil + Bläh-/Wasserglasbefüllung bei 7 mm Verformung h= 7 cm	ca. 87	ca. 2,1	ca. 84
formaktives Glasbauteil, Grundgröße 100*200cm, Bogenform: 2 cm Bauteilhöhe, 15 cm Stichhöhe, Verformung 1,4 mm	ca. 24 kg (zzgl. 12 cm Blähglas mit Dichte 240kg/cm = 58 kg) gesamt dann 82 kg	7,3 ohne Dämmung (zzgl. 12 cm Blähglas 240kg/ cm / λ 0,45 s. Anlage 1 Abb 43; U Wert) gesamt 0,35)	19,7 (zzgl. 12 cm Blähglas mit Dichte 240 kg/cm ergibt GWP von 65) gesamt dann ca. 87
PET Textil + PET Schaum h=11 cm, bei 7 mm Verformung	ca. 44	ca. 0,41	ca. 98
PET Textil + PET Schaum h=15 cm,	ca. 59	ca. 0,3	ca. 132

Zusammenstellung wesentlicher Kennwerte basierend auf Tabelle 10.200

- Das Glastextil- /Blähglasbauteil benötigt im Gegenteil zum Basalttextil- /Zementschaumelement zusätzliche

Dämmung. Nennenswerte Vorteile in Bezug auf das Gewicht ergeben sich, wenn das Potential zur Herstellung formaktiver, gekrümmter Bauteile aus dem Glas-Verbundmaterial genutzt wird. Bei einem gebogenen Bauteil mit einer tragenden Schicht von 2 cm (Dichte 600 kg/cbm) und einer 12 cm Dämmschicht ebenfalls aus Blähglas (Dichte 240 kg/cbm), ergibt sich ebenfalls ein U-Wert von 0,35 wie beim Zementschaum-Bauteil und ein GWP von 87, dafür liegt das Gewicht bei diesem Bauteil nur bei 87 kg.

- Das Verbundbauteil aus PET Textil und PET Schaum trägt und dämmt zugleich und ist leichter als die mineralischen Varianten. Bei etwas besserem U-Wert als das Glastextil-/Blähglaselement von ca. 0,3 und einer Bauteilhöhe von dann 15 cm bleibt, das Element bei einem Gewicht von 59 kg immer noch im Vergleich das leichteste, der GWP steigt aber auf 132 im Vergleich zu im Durchschnitt 85 bei den mineralischen Varianten.

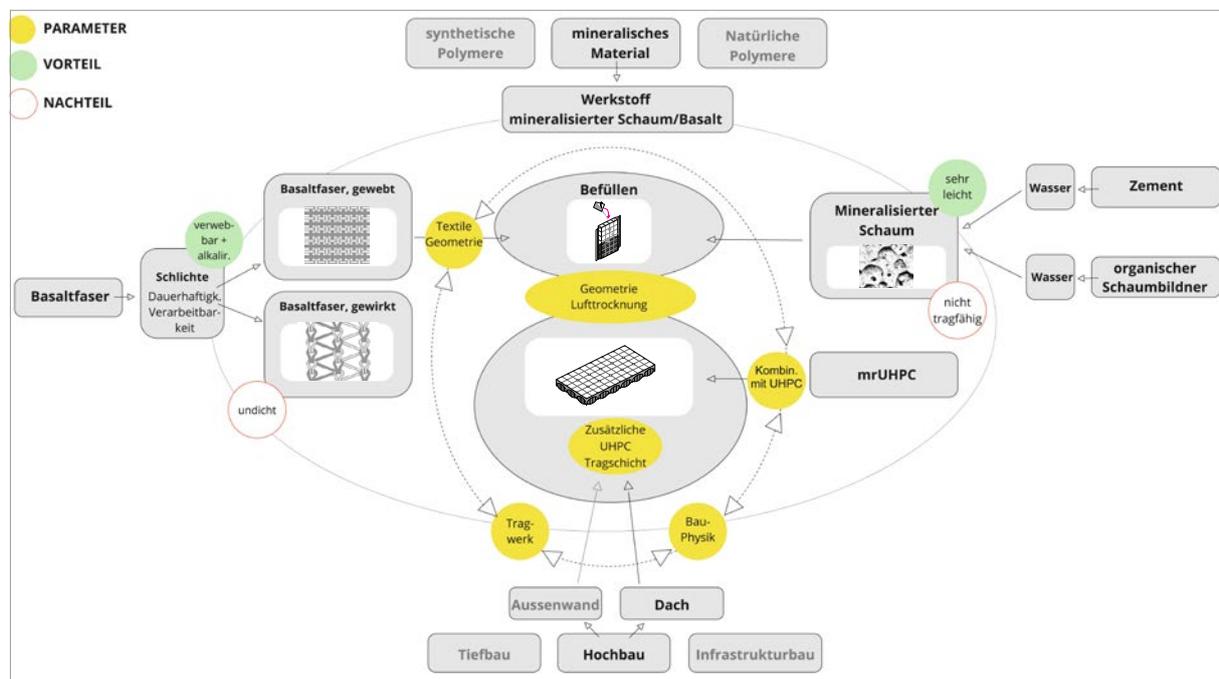
Im Vergleich: Bei der Entwicklung von Gradientenwänden am ILEK wird über Mikrogradierung eine Masseinsparung von 60 - 75 % und ein Wärmeleitwert von 0,21 angestrebt¹. Bezogen auf die durchschnittlichen Bauteilmaße von ca. L*B*H = 200*100*15 cm (0,3 cbm), die sich bei ge3TEX bei ähnlicher Verformung und ähnlichen U-Wert von ca. 0,3 ergeben haben, wäre das ein Gewicht von ca. 244 kg für die Gradientenwand (reine Betonwand Gewicht ca. 750 kg). Der U-Wert läge bei dem für die Gradientenwand angestrebten Wärmeleitwert s.o. bei 1,4. Eine Berechnung des GWP- basierend² auf 1cbm Beton C25/30 mit GWP 211 ergibt bei 0,3 cbm ein Ergebnis von ca. 63. Bis auf den GWP wären die Werte im Vergleich zu Tabelle 10.201 ungünstiger.

10.2.2. Bauteilherstellung

Die Diagramme der Abbildungen 10.200 -202 zeigen zusätzlich zu den qualifizierenden Materialkennwerten aus Tab. 10.200 - 201, welches die Rahmenbedingungen zur Herstellung des jeweiligen Verbundmaterials sowie des finalen Verbundbauteils sind.

- Basalttextil und Zementschaum/ mrUHPC (Abb. 10.200) : Für den flüssigen Zementschaum braucht es

Abbildung 10.200



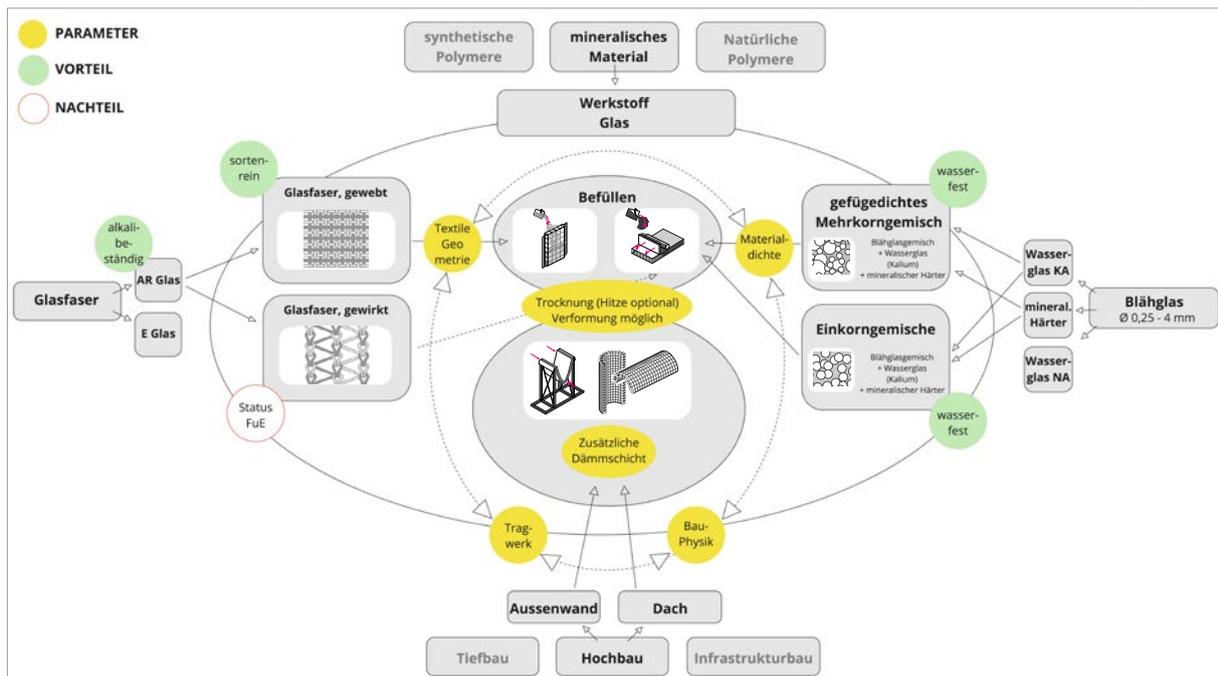
Herstellung nachhaltiger Leichtbauteile aus Basaltfasern und Zementschaum /UHPC

1 BBSR Forschungsworkshop, 15.6.2020
 2 <https://www.betontechnische-daten.de/de/14-oekobilanzielle-kennwerte-fuer-zement-und-beton>

ausreichend dichte 3D Gewebe. Damit deren Traglastreserven als Unterspannung ausgenutzt werden können, sind weitgepannte Dach- bzw. Deckenelemente sinnvoller als Wandelemente. Bei Herstellung vor Ort werden keine Schalungen sondern nur wiederverwendbare Hängevorrichtungen benötigt und bei in-situ Produktion kann 90% Transportvolumen eingespart werden. Gem. Kapitel 6.2.1.4, Mischungszusammensetzung des Zementschams, beinhaltet 1 m³ Zementschaum anteilig 0,042 m³ Zement und 0,907 m³ Schaum und andere Restanteile.

- **Glastextil und Bläh-/Wasserglas (Abb. 10.202)** : Die mörtelähnliche Bläh-/Wasserglasbefüllung lässt alternativ das Befüllen von Geweben oder das Einrakeln über die Deckflächen in Gewirke zu. Diese müssen anders als beim Zementschaum keine dichte Struktur haben. Im Gegenteil, der Haftverbund verbessert sich bei offeneren Strukturen. Bei 3D Gewirken muss auf ein ausreichendes Rückstellvermögens des Abstandstextils beim Einrakeln geachtet werden. Dann aber können auch unterschiedlich dichte Befüllungen schichtenweise oder nebeneinander befüllt werden. Zugkräfte können über zusätzlich platzierte Rovingeinträge abgetragen werden. Reine 3D Glasgewirke gibt es bislang nicht. Erste Mischgewirke mit rückstellfreundlichen Monofilamenten als Polfäden sind bei Projektpartnern in Entwicklung, standen für das Projekt aber nicht zur Verfügung. Die Glasbauteile nutzen die Möglichkeit, mit unterschiedlich dichten Befüllungen bei gleichzeitiger Formoptimierung mit minimalem Materialeinsatz ein Maximum an Funktionalität zu erreichen. Eine Einsparung von Transportgewicht sind bei einer in-situ Produktion nicht zu erwarten, alle Materialien müssten dann einzeln auf die Baustelle geliefert werden. Bei plastischen Bauteilen kann bei in-situ Produktion hingegen Transportvolumen eingespart werden.

Abbildung 10.202



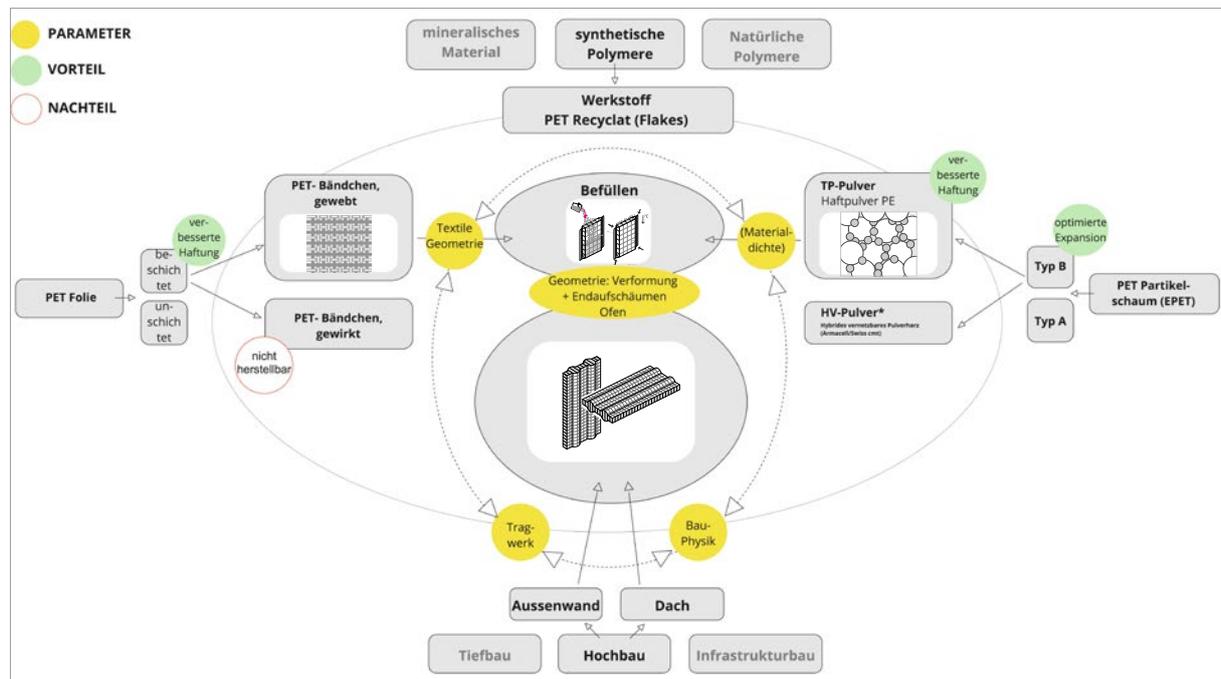
Herstellung nachhaltiger Leichtbauteile aus Glasfasern und Bläh-/Wasserglas

- **PET Textil und PET Schaum (Abb. 10.203):** Das PET Textil muss ausreichend dicht sein, damit der Partikelschaum vor dem finalen Schäumen nicht austritt. Für das finale Aufschäumen werden Temperaturen zwischen 190° C bis 240° C benötigt. Der entstehende Innendruck im Textil erlaubt die Ausbildung individueller Querschnittsgeometrien wie z.B. integrierter Trägerprofile oder formaktiver Faltgeometrien - je nach Vorkonfektionierung des Textils. Ca. 30 % Transportvolumen lässt sich bei Aufschäumen vor Ort einsparen. Als Hitzekammern könnten z.B. umgebaute Transportcontainer dienen.

Resümee: Durch das gezielte Zusammenspiel der Dichte der Befüllmaterialien, Faserarten, Textilgeometrien

sowie den Befüll- und Aushärtungsprozessen entstehen sehr unterschiedliche räumliche Optionen. Sie ermöglichen bei PET Schaum- und Zementschaumbauteilen die Reduktion von Transportvolumen bei in-situ Herstellung. Im Glasbauteil kann hingegen durch den Einsatz gezielt unterschiedlichen Befülldichten im Gegensatz zum Zementschaumbauteil Gewicht gespart werden. Darüberhinaus kann Transportgewicht generell über formaktive Bauteile reduziert werden, wie dies z.B. bei den PET Elementen durch integrierte Tragstrukturen oder Faltungen bzw. bei Glas über gebogene Bauteile demonstriert wurde.

Abbildung 10.203



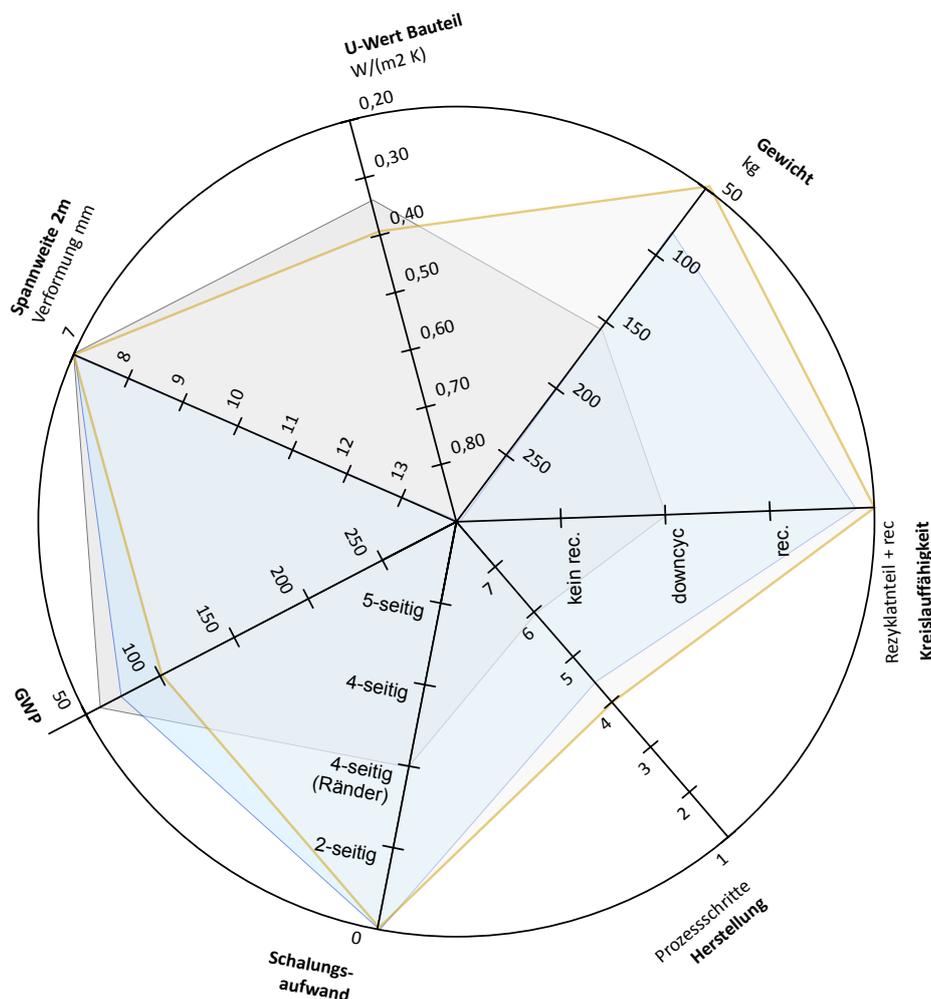
Herstellung nachhaltiger Leichtbauteile aus PET Fasern und PET Schaum

10.2.3 Gestaltung optimieren

Die beiden Spinnenetzdiagramme Abb. 10.204 und 10.205 zeigen zuletzt, welche Gestaltungsparameter insgesamt welche Auswirkungen auf das Erscheinungsbild des jeweiligen Verbundbauteils haben. Die Kennwerte der Diagramme sind der Tabelle 10.200 entnommen, zum Verformungsverhalten s. Abschnitt 8, **Resümee:** Die Grafiken visualisieren einen Vergleich basierend auf dem Tragverhalten (Abb. 10.204) und auf dem Trag- und Dämmverhalten (Abb. 10.205) und setzen dies in Bezug zu Nachhaltigkeitskriterien. Dazu gehören neben Transportgewicht und Schalungsbedarf das GWP und das Kreislaufpotential. Ausserdem wurde jeweils der Herstellungsaufwand in Form einzelner Prozessschritte betrachtet. Die ersten drei Prozessschritte sind immer ähnlich, ab Prozessschritt 4 gibt es Varianten:

- 1 > 3D Textil herstellen
- 2 > Konfektionierung: dreiseitig zunähen (teils vierseitig), Montageschlaufen anbringen
- 3 > Aufhängen, Befüllen, Abklemmen
 - > Beton:
 - 4 > Vierseitige Randschalung herstellen
 - 5 > Aufbeton aufbringen
 - 6 > Ausschalen
 - > Glas:
 - 4 > Vorbehandeln des Gewebes mit Slurry zur Haftungsverbesserung (5 > gegebenenfalls Formherstellung oder /und Ofentrocknung)
 - > PET:
 - 4 > Aufschäumen im Ofen

Abbildung 10.204



Kenngrößen, ausgehend von identischer Verformung der Bauteile von max 7mm (entspricht I 300'stel), bei 2m Spannweite und 100kg/m² Auflast plus Eigengewicht. Es ergeben sich entsprechend unterschiedliche Bauteilhöhen, s. Tabelle 10.201

Grau: Leichtbauteile aus Basaltfasern und Zementschaum /UHPC > Bauteilhöhe 15cm Zementschaum + 2 cm UHPC Aufbeton
 Blau: Leichtbauteile aus Glasfasern und Bläh-/Waserglas („Gefügedichte Mischung“) > Bauteilhöhe 7 cm
 Gelb: Leichtbauteile aus PET Fasern und PET Schaum > Bauteilhöhe 11 cm

10.2.4 Resümee

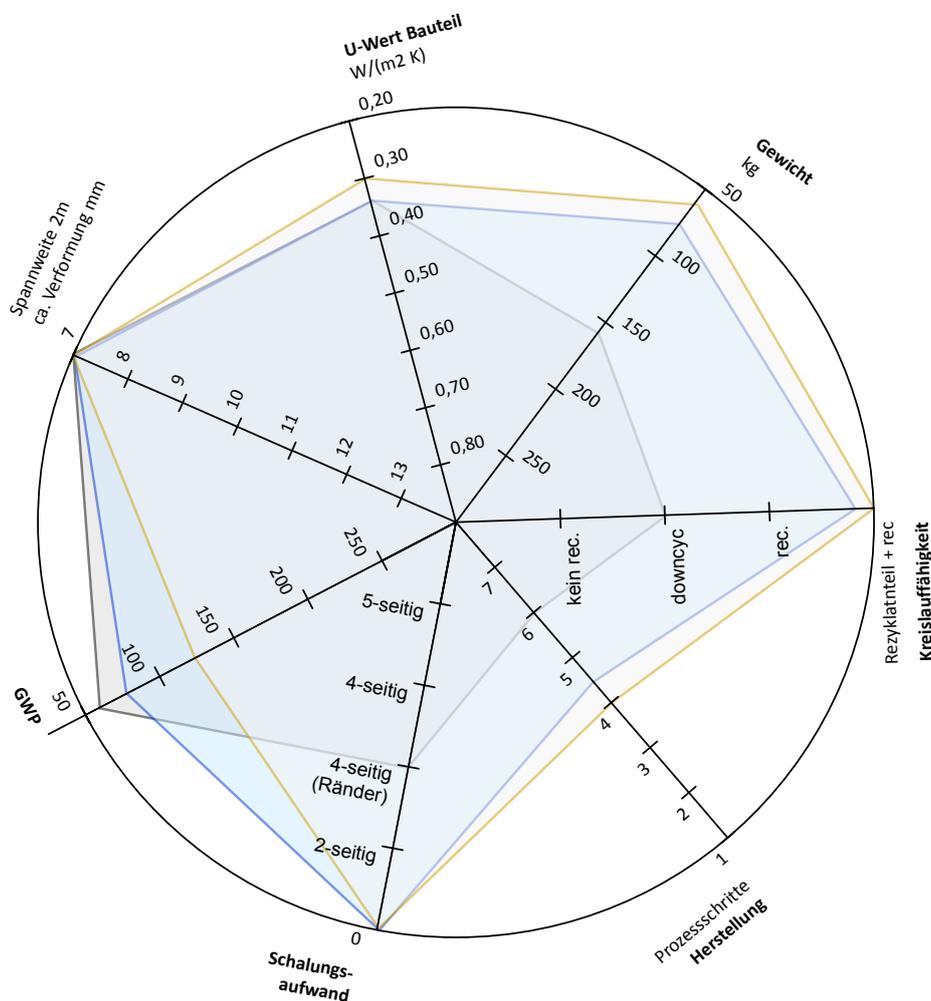
Im Vergleich der beiden Spinnennetzdiagramme zeigt sich, wie textilbasierte, sortenreine und kreislauffähige Leichtbauteile je nach Werkstoffgruppe und Herstellprozess durch individuelle Bauteilgeometrien und Materialmorphologien funktional und nachhaltig optimiert werden können.

Das Zementschaumbauteil demonstriert, wie die verlorene Dämmschalung aus ausgeschäumtem Basalttextil über eingewebte Gurte in der unteren Basaltgewebelage zusätzlich zur Unterspannung des Bauteils beiträgt. Im Zusammenspiel von Textil und mrUHPC werden so gute Tragfestigkeiten erreicht, der dämmende Zementschaum ist oberflächengeschützt und das Element hat das geringste GWP. Gleichzeitig ist das Element im Vergleich zu den anderen Verbundbauteilen aus Glas und PET schwerer und erreicht wie das Glasbauteil etwas schlechtere U-Werte als das PET Bauteil, bei gleicher Verformung. Zudem ist die Recyclierfähigkeit eher ein Downcycling, der Zementschaum kann z.B. nicht als Zuschlag für Recyclingbeton genutzt werden. Das Glasverbundmaterial entwickelt als gekrümmtes Bauteil sein volles Potential. Mit ca. 82 kg punktet es

gegenüber dem ca. 157 kg schweren Zementschaumbauteil in Bezug auf Gewicht, hat zudem einen etwas besseren U-Wert bei der angedachten Bauweise aus zwei unterschiedlich dichten Blähglasfüllungen s. Abb. 10.205 und ein Verformungsverhalten, das bei einer Bogenform unter 7 mm liegen dürfte (Verformung der Tragschale ohne Dämmschicht liegt bei 1,4 mm, s. Kap 8.1.2.2, Punkt d)). Das GWP liegt mit 73 fast vergleichbar zum Zementschaumbauteil mit 68, zudem ist das Glasbauteil voll kreislauffähig.

Das PET-Bauteil hat mit 132 die schlechtesten Werte in Bezug auf das GWP. Es ist aber wie das Glasbauteil nicht nur voll kreislauffähig, sondern wird bereits aus Rezyklat hergestellt, zudem würde eine in situ Herstellung ca. 30% Transportvolumen sparen, abgesehen vom dem im Vergleich mit den mineralischen Werkstoffgruppen generell geringen Gewicht. Es hat bereits als flaches Bauteil hohe Trag- und Dämmfähigkeiten, ist sehr leicht und in einem einstufigen, einfachen Verfahren herzustellen. Zudem lassen sich beim Aufschäumprozess selbstverformende Faltungen ohne Schalung herstellen, die auch bei größeren Spannweiten Materialreduktion ermöglichen. Einzig die notwendige Hitze (Ofenprozess 190°C - 240°C) sowie die absehbar maximale Brandschutzkassifizierung im Bereich B1 schmälern das Potential.

Abbildung 10.205



Kenngrößen, ausgehend jeweils von Bauteilen 200 cm * 100 cm bei ähnlichen U-Werten von 0,35-0,3 und vergleichbarer Verformung von max. ca. 7 mm (Glasbauteil ca. 2mm) bei 2 m Spannweite, s. Tabelle 10.201

Grau: Leichtbauteile aus Basaltfasern und Zementschaum /UHPC, Bauteilhöhe 15 cm Zementschaum + 2 cm mrUHPC
 Blau: Leichtbauteile aus Glasfasern und Bläh-/Wasserglas, gebogenes Element,
 2 cm Tragschicht aus 600 kg/cbm Bläh-/Wasserglas und 12 cm Dämmschicht aus Blähglas 240 kg/cbm
 Gelb: Leichtbauteile aus PET Fasern und PET Schaum, Bauteilhöhe 15 cm

11 Fazit

In Summe konnten vergleichend drei verschiedene Verbundmaterialien entwickelt werden und dazu Herstellungsverfahren optimiert sowie jeweils ein nachhaltiges Leichtbauteil hergestellt werden. Die Herangehensweise folgt einem holistischen Entwurfsansatz, der sich in den entwickelten Bauteilen widerspiegelt: Material wird reduziert, mit einem Minimum an Material wird ein Maximum an Funktionalität erreicht, das Material entstammt zum größten Teil Recyclingkreisläufen, die Bauteile sind sortenrein und können wieder recycelt werden. Ausserdem werden bei der Herstellung nachgeordnete Materialverbräuche, die z.B. durch Schalungen entstehen, reduziert und wurde insgesamt versucht, den Transportaufwand zu minimieren. Die Materialisierung der Bauteile, in diesem Fall ihr inneres strukturelles Gefüge ebenso wie ihre äußere Form, resultiert dabei entscheidend aus ihrer räumlichen Wirkung.

Das Ziel konnte nur in einem interdisziplinären Team erreicht werden, in dem Wissen aus den Bereichen Architektur, Tragwerkslehre, Bauphysik und Textiltechnik zusammen angewendet wird. Und es konnte nur erreicht werden, weil erst in der Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Forschungsinstitutionen und Industriepartnern aus Ideen baurelevante Ergebnisse werden. Hier haben alle über die Maßen Energie, Zeit und Know-How eingebracht und deshalb an diese Stelle und vor einem inhaltlichen Fazit ein großer Dank an alle Beteiligten:

Herrn Dipl.-Ing. Batz, Wöllner GmbH

Herr Dr.-Ing. Bauder, DITF

Frau M.A. Beuscher, Frankfurt UAS

Herr Elfering, Poraver Service GmbH & Co. KG

Herr Gleich, Johns Manville Slovakia a.s

Herr Dipl.-Ing. Maier M.Eng., TU Darmstadt

Herr M. Eng. Nagel, Frankfurt UAS

Herr Haussmann, Poraver Service GmbH & Co. KG

Herr Hendriks, Ultima Deutschland GmbH (Armacell Group)

Herr Hörlin, Poraver Service GmbH & Co. KG

Herr Holten, Pile Fabrics GmbH

Herrn Röser, Wilhelm Röser Söhne GmbH & Co. KG Betonwerk

Frau Prof. Dr.-Ing. Rucker-Gramm, Frankfurt UAS

Herr Schaller, C-Con GmbH & Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Schneider, TU Darmstadt

Frau Prof. Dr.-Ing. Weilandt, Frankfurt UAS

Herr M.Sc. Weimer, DITF

sowie alle beteiligten Labormitarbeiter, Studierenden und Tutoren, die unter „Mitwirkende“ aufgelistet sind.

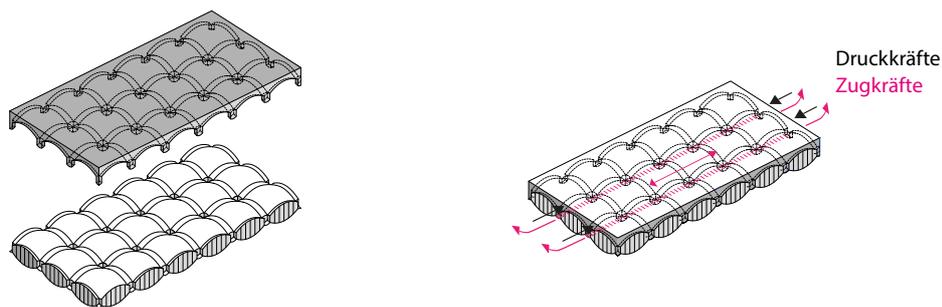
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die realisierten Demonstratoren nochmals im Vergleich. Abbildung 11.100 zeigt die aus befüllten Basaltfaserabstandsgeweben hergestellte gedämmte, verlorene Schalung zusammen mit dem Aufbeton, der über UHPC „Pin's“ mit den in der textilen Schalung eingewebten Unterspanngurten verbunden ist. Abbildung 11.101 zeigt einfach gekrümmten Abstandsgewirke, befüllt mit einer Bläh-/Wasserglasmatrix, deren Trag- und oder Dämmfähigkeit über die unterschiedliche dichten Befüllrezepturen variiert werden kann, die im Projekt entwickelt wurden. Das gesamte Element besteht zu über 50% aus recyceltem Glas und kann komplett wieder eingeschmolzen und wiederverwendet werden. Die PET Bauteile s. Abbildung 11.102 bestehen zu 100 % aus Rezyklat und können komplett in den Kreislauf rückgeführt werden. Sie werden dafür im Gegensatz zu den mineralischen Verbundbauteilen nur Baustoffklasse B1 erreichen können. Für das Gesamtfazit ist Abb. 10.205 entscheidend. Sie zeigt in Abhängigkeit gleicher Funktionalitäten - in diesem Fall vergleichbares Dämm- und Verformungsverhalten der Bauteile - die jeweils unterschiedlichen Kennwerte der drei neuen Verbundbauteile in Bezug auf Gewicht, GWP, Herstellung (Prozessschritte) und Schalungsaufwand (Reduktion von Sekundärmaterialkreisläufen)

11.1 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Abb. 11.100 zeigt nochmals das final gebaute Demonstroelement zum Thema Basaltfasern und mineralisierter Schaum. Es besteht aus einer Decklage aus mrUHPC (rechnerisch reichen 2 cm statt der realisierten 4 cm) und einer verlorenen Dämmschalung aus 3D Basaltgewebe, ausgeschäumt mit mineralisiertem Schaum und mrUHPC Druckstäben. Letztere verbinden die mrUHPC Decklage mit den Basaltfasergurten, die in das 3D Basaltgewebe zur Unterspannung zusätzlich eingewoben wurden.

Auf der Basis der gewonnenen Projektergebnisse entstanden Fragen, zu denen entsprechend weitere Fördermittel im Bereich Leichtbau und nachhaltiges Bauen aquiriert werden sollen. Dies betrifft zum einen die Realisierung dreilagiger, zweischichtiger Basaltgewebe, um komplett auf Schalungen verzichten zu können. Bei Geometrien, die zunächst ein Befüllen mit mineralisiertem Schaum und nachfolgend mit UHPC erfordern, müsste dazu die Druckfestigkeit des mineralisierten Schaums weiterentwickelt werden, um dem Betonierdruck des UHPC bei vertikaem Befüllen standzuhalten. Zudem fehlen Untersuchungen zur Alkalibeständigkeit der Basaltfasern im Zusammenspiel mit dem UHPC, bauphysikalische Nachweise zur Bauteiltauglichkeit des neuen Verbundmaterials bei Verwendung des mineralischen Schaums als Innendämmung und es sollte untersucht werden, wie das an der TU Darmstadt entwickelte Kompositmaterial aus mineralischem Schaum mit integrierten PCMs (Abschnitt 9.2) den dynamischen U-Wert des Bauteils verbessern kann.

Abbildung 11.100



© Christoph Lison

oben: Herstellprozess eines sortenreinen Bauteils aus Basaltfasern, mrUHPC und mineralisiertem Schaum. Die roten Pfeile zeigen die Lage der Unterspanngurte an, blau gekennzeichnet die Druckzone im Bereich der UHPC Schicht.

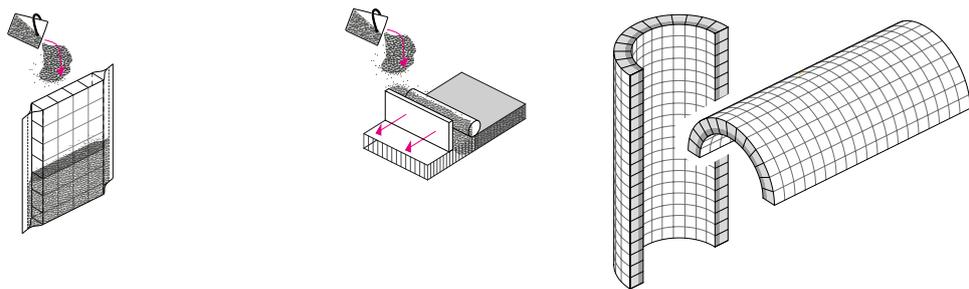
unten, realisierter Demonstrator: Verlorene Dämmschalung aus 3D Basaltgewebe, ausgeschäumt mit mineralisiertem Schaum und mit mrUHPC Aufbeton; letzterer ist über mrUHPC Druckstäbe mit Basaltfasergurten verbunden, die zur Unterspannung zusätzlich in das 3D Basaltgewebewebe mit eingewebt wurden, s. rote Pfeile in der Grafik oben.

Abb. 11.101 zeigt die beiden realisierten Glasdemonstratoren, links aus 3D Glasgewebe, rechts aus 3D PE-Gewirke, jeweils befüllt mit unterschiedlich dichten Bläh-/Wasserglasmatrices. Zum Projektende noch offen waren Versuche mit leicht gedrehten AR Glas-Rovings. Hier wird derzeit untersucht, ob dadurch die Schädigung der Polfäden im Bereich der Decklagen wie in Abschnitt 7.2.2 beschrieben verhindert werden kann.

Festzuhalten ist, daß die mörtelähnliche Substanz der entwickelten Befüllung sehr gute Ergebnisse für formstabile, gebogene Elemente in Kombination mit 3D Gewirken ergeben hat, s. Abb. 11.101 rechts. Hier sollen weitere FuE Mittel zur Entwicklung von Glasgewirken mit alkalibeständigen, evtl. biologisch abbaubaren Polfäden aquiriert werden, um die optimalen Formgebungsverfahren dieser Herstelltechnik in Kombination mit unterschiedlich dichten Blähglasvarianten und damit das Thema Gradientenbauteile weiter vorantreiben zu können. Über Studienarbeiten sollen hier vorab Einschätzungen zur Recyclierfähigkeit erfolgen, z.B. unter Berücksichtigung von biobasierten PLA Monofilamenten für Polfäden anstelle der bruchgefährdeten AR Glas-Polfäden. Ausserdem sollen im Rahmen von Abschlussarbeiten erste Versuche zu Demonstratoren mit unterschiedlich dichten Befüllungen gemacht werden, wie oben rechts in Abb. 11.201 dargestellt.

Abbildung 11.102-3 zeigt zuletzt die realisierten PET Demonstratoren in unterschiedlichen Formgebungen. Das mit der Industrie zusammen entwickelte, einstufige Herstellverfahren und das neue Verbundmaterial aus weiterentwickelten rPET 3D Geweben und Partikelschäumen ermöglicht die gezielte Herstellung unterschied-

Abbildung 11.101



oben links: Herstellprozess eines sortenreinen Leichtbauteils aus 3D Glasgeweben, oben rechts: Herstellung eines sortenreinen Leichtbauteils aus 3d Glasfasergewirken und einer Bläh-/Wasserglasmatrix.

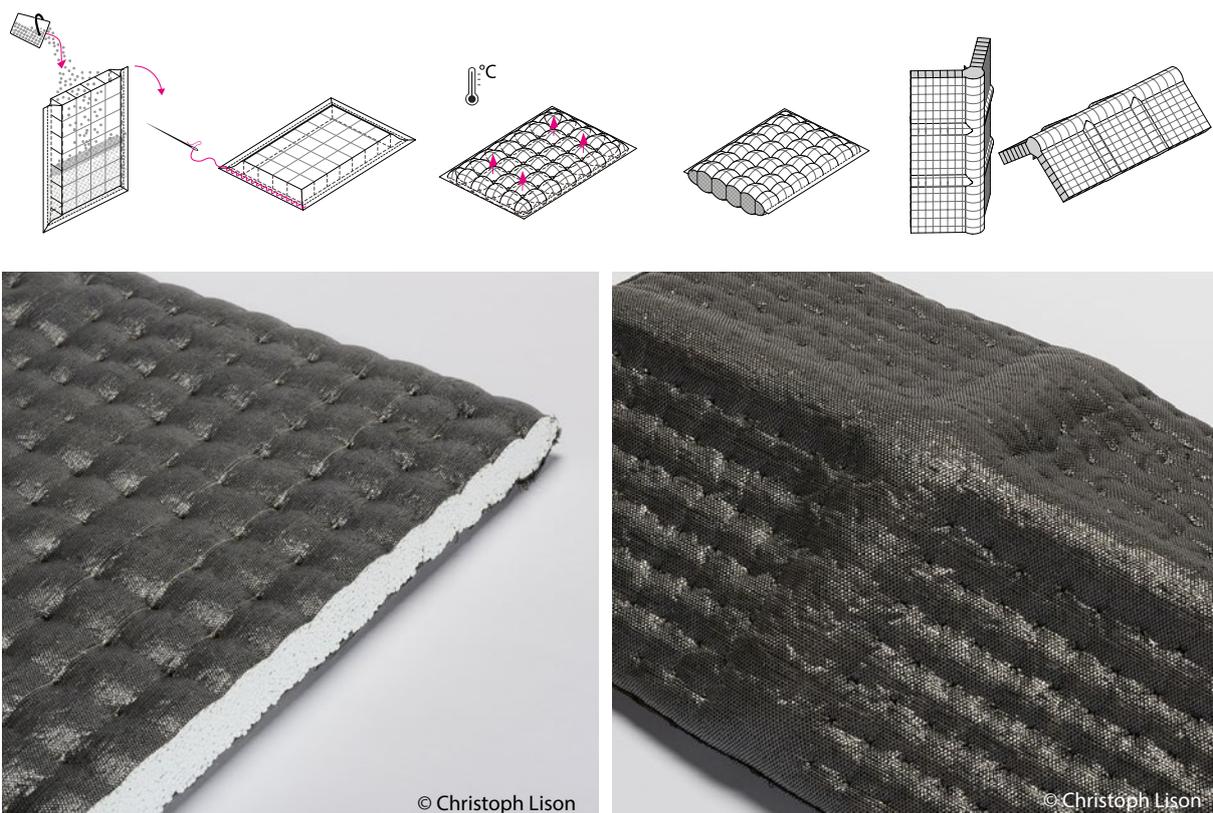
unten, realisierter Demonstratoren: links, befülltes, einfaches Glasgewebe mit 4 cm Decklagenabstand und 4 cm Polfadenraster aus AR-Glasfasern; rechts: zwei Leichtbaudemonstratoren aus PE Gewirke, beidseitig befüllt einer Bläh-/Wasserglasmatrix über die Decklagen und anschließend luftgetrocknet über einer Form, s. auch Abb 7.207

lich geformter, lastflussgerechter Bauteile ohne weiteren Schalungsaufwand oder Formwerkzeuge. Im Projekt wurden bislang Bauteile bis ca. 4 cm Bauteilhöhe realisiert. In weiteren Projekten soll untersucht werden, bis zu welchen Bauteilstärken reproduzierbare Ergebnisse erreicht werden können. Ausserdem sind Fragen offen in Bezug auf die Herstellung unterschiedlicher Schaumdichten in dem entwickelten Verfahren. Bislang liegen die Dichten bei ca. 200 kg/m^3 . Erst dann lassen sich auch Aussagen zu Gradientenbauteilen machen, vergleichbar zu den Glasbauteilen.

Für alle drei Verbundmaterialien bzw. Verbundbauteile, die im Projekt hergestellt wurden, sind Funktionserweiterungen, wie in Kapitel 9 beschrieben, denkbar. Insbesondere Temperaturamplitudenmanagement und Lichtlenkung sind Themen, die nachhaltig und sinnvoll sind. Zu überprüfen in Anschlussprojekten ist dann auch, inwieweit der Gedanke von strukturdifferenzierten Monomaterialien durch die Integration neuer Werkstoffanteile konterkariert wird, oder ob dies durch einen anderen Mehrwert ausgeglichen werden kann.

Ebenfalls noch unzureichend untersucht ist der Oberflächenschutz der Bauteile an der Aussenseite des Bauwerks. Auch hier sollen neue FuE Mittel akquiriert werden bzw. gibt es bereits bereits ein Anschlussprojekt in Aussicht. In dem Projekt wird statt einer klassischen Wetterschutzschicht die Integration einer Grünfassade in die textile Struktur der Bauteile untersucht werden. Ebenso soll die textile Aussenoberfläche akustisch, haptisch und farbig aktiviert werden. Auch dazu müssen weitere Untersuchungen gemacht werden.

Abbildung 11.102



oben links: Herstellprozess eines sortenreinen Leichtbauteils aus rPET Geweben, befüllt mit rPET Partikelschaum; der rPET Partikelschaum endexpandiert unter Temperatureinwirkung, während das rPET als textiles Formteil und verlorene Schalung mit Schrumpfverhalten die Ausformung unterschiedlicher Geometrien ermöglicht

unten, realisierte Demonstratoren: links flaches Bauteil mit 4 cm Polfadenabstand, rechts gefaltetes Bauteil, die Faltung entsteht durch Vorkonfektionierung des rPET Gewebes vor dem Befüllen und in einem einstufigen Ofenprozess ohne Formwerkzeug, die Form stellt sich durch einfache seitliche Behinderung der Bewegung im Ofen ein.

11.2 (Bau-) praktische Anschlussfähigkeit, über den Abschlussbericht hinausgehender Output

Aus der Frankfurt UAS hat sich parallel zum Projekt ge3TEX das Start-UP „zeltHAUS“ ausgegründet, mit Anwendungszensarien insbesondere für die PET Verbundmaterialien.

Das Team „zeltHAUS“ nutzt die Technik geschäumter Textilien für temporäre Bauten, wie schon am Ende des Vorgängerprojekts 3dTEX angedacht und formuliert. Zitat: „Das zeltHAUS ist eine nachhaltige und temporäre Unterkunft, die als Notunterkunft in humanitären Krisen, aber auch bei Veranstaltungen oder diversen Outdooraktivitäten zum Einsatz kommen kann. Im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Zelt ist es gedämmt, so dass es wie ein Haus vor jedem Klima und zu jeder Jahreszeit Schutz bietet. Durch seine modulare Bauweise kann es in seiner Größe individuell angepasst werden. Neben dem kompakten Transport kann es aufgrund seines innovativen und durch ein Gebrauchsschutzmuster geschütztes Faltsystems einfach und ohne jegliche Vorkenntnisse in kürzester Zeit aufgebaut werden. Dabei besteht das zeltHAUS aus einem neuartigen Mono-Material aus recycelten PET, welches nach seiner Verwendung erneut recycelt oder wiederverwendet werden kann. Der Name ist Programm: das zeltHAUS vereint die besten Eigenschaften von Zelt und Haus“¹ Das Projekt hat neben vielen anderen Preisen zuletzt den Green Concept Award gewonnen.

Abbildung 11.103



oben links: verschiedene Demonstratoren aus 3D rPET Gewebe und rPET Partikelschaum

unten, realisierter Demonstrator, Falstruktur im Schnitt

¹ www.zelthaus.com

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Bauder, Hans-Jürgen (DITF Denkendorf)
Beuscher, Johanna (Frankfurt University of Applied Sciences)
Lüling, Claudia (Frankfurt University of Applied Sciences)
Maier, Andreas (Technische Universität Darmstadt)
Nagel, Dominik (Frankfurt University of Applied Sciences)
Rucker-Gramm, Petra (Frankfurt University of Applied Sciences)
Weilandt, Agnes (Frankfurt University of Applied Sciences)
Weimer, Timo (DITF Denkendorf)

Weitere Mitwirkende

Alahmad Ibrahim (TU Darmstadt)
Bramann, Florian (Frankfurt UAS)
Gentzel, Anastassija (Frankfurt UAS)
Höbert, Marcel, (TU Darmstadt)
Langelüddecke, Timo (TU Darmstadt)
Luther, Jonas (Frankfurt UAS)
Mittelmann, Annette (Frankfurt UAS)
Mocke, Michelle (Frankfurt UAS)
Söger, Rebecca (Frankfurt UAS)

sowie Mitwirkung durch Studienarbeiten der Frankfurt UAS von Frau Bartl, Frau Skubella sowie von Frau Landgraf, Herr Völker und Frau Weber und Untersuchungsergebnisse aus der Bachelorarbeit von Herrn Jochmann

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

C-Con GmbH & Co.KG
DITF Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
Johns Manville Slovakia a.s
Poraver Service GmbH & Co. KG
Pile Fabrics GmbH
Poraver Service GmbH & Co. KG
Technische Universität Darmstadt
Ultima Deutschland GmbH (Armacell Group)
Wilhelm Röser Söhne GmbH & Co. KG Betonwerk
Wöllner GmbH

Fachliche Betreuung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung,
Referat WB 3
Daniel Wöffen

Kurzbiographien der Autorinnen und Autoren



Dr.-Ing. Hans- Jürgen Bauder

Hans-Jürgen Bauder studierte allgemeinen Maschinenbau an der Universität Stuttgart mit Vertiefung Textiltechnik. Seit 1994 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an den DITF tätig und promovierte auf dem Gebiet der Jacquardwebtechnik. Seit 2005 leitet er den Forschungsbereich Webtechnologien und ist spezialisiert auf 3D-Gewebeentwicklungen für technische Anwendungen.



M.A. Johanna Beuscher

Johanna Beuscher studierte bis 2017 Architektur an der Frankfurt UAS sowie als DAAD- Vollstipendiatin am SCI-ARC, Los Angeles und war tätig in Architekturbüros in Frankfurt am Main und Santa Monica, CA. Derzeit forscht sie als wiss. Mitarbeiterin zu baulichen Anwendungsfelder von Abstandstextilien.



Prof. Claudia Lüling

Claudia Lüling studierte an der TU Darmstadt und der SCI-ARC Los Angeles Architektur, war für zwei Jahre Vertretungsprofessorin an der Universität der Künste Berlin und lehrt als Professorin seit 2003 an der Frankfurt UAS. Sie ist Gründungsmitglied des Frankfurter Forschungsinstituts FFin und leitet dort das Labor für Textilien Leichtbau im Forschungsschwerpunkt Nachhaltiger Leichtbau.



Dipl.-Ing. Andreas Maier M.Eng.

Andreas Maier schloss sein Studium mit einem Diplom (2009) und einem Master (2011) in Bauingenieurwesen ab und arbeitet seit 2011 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Konstruktion (ISM + D) der Technischen Universität Darmstadt mit dem Forschungsschwerpunkt thermisch aktivierter und tragender Bauteile aus mineralisiertem Schaum und mikrobewehrtem UHPC.



M.Eng. Dominik Nagel

Dominik Nagel schloss sein Studium mit einem Bachelor in Bauingenieurwesen (2016) und einem Master im Studiengang „Zukunftssicher Bauen“ (2018) an der Frankfurt UAS ab. Seit 2015 arbeitet er als Laboringenieur im Labor für Baustoffe, Bauphysik und Bauwerkserhaltung an der FRA-UAS. Dort betreut er laufende Forschungsprojekte, studentische Laborübungen sowie Bachelor- und Master Arbeiten.

**Prof. Dr.-Ing. Petra Rucker-Gramm**

Petra Rucker-Gramm studierte an der Universität Stuttgart Bauingenieurwesen mit Promotion an der TU München und war bis 2017 Gesellschafterin des Ingenieurbüros concrete concepts. Seit 2012 ist sie Professorin für Baustoffe, Bauphysik, Bauwerkserhaltung & ressourcenoptimiertes Bauen, leitet das Labor für Baustoffe, Bauphysik und Bauwerkserhaltung und ist geschäftsführende Direktorin des Frankfurter Forschungsinstitut für Architektur • Bauingenieurwesen • Geomatik (FFin).

**Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider**

Jens Schneider studierte und promovierte an der TU Darmstadt im Fachbereich Bauingenieurwesen. Nach mehrjähriger Tätigkeit in einem international tätigen Ingenieurbüro wurde er für zwei Jahre Professor für Baustatik an der FRA-UAS und hat seit 2009 den Lehrstuhl für Statik am Institut für Statik und Konstruktion (ISM + D) der TU Darmstadt inne. Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich Glas, Polymere sowie Energieeffizienz im Bauwesen. Derzeit ist er Vizepräsident der TU Darmstadt.

**Prof. Dr.-Ing. Agnes Weilandt**

Agnes Weilandt studierte an der RWTH Aachen und der Ecole des Ponts et Chaussée in Paris. Sie arbeitete sie zunächst als Tragwerksplanerin bei Werner Sobek Ingenieure, dann am Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren (ILEK) und bei Bollinger + Grohmann Ingenieure in Frankfurt. Seit 2010 ist sie Professorin für „Baumechanik, Baustatik und konstruktiver Ingenieurbau“ und leitet seit 2013 den Masterstudiengang „Zukunftssicher Bauen“.

**M.Sc. Timo Weimer**

Timo Weimer schloss seinen Master (M.Sc.) in Technologiemanagement an der Universität Stuttgart nach Abschluss des Bachelors (Maschinenbau, B.Eng.) in 2018 ab. Seitdem arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzzentrum Stapelfaser, Weberei und Simulation an den DITF Denkendorf. Ein Fokus seiner Arbeit liegt auf der Erforschung von 3-dimensionalen Geweben.

Literaturverzeichnis

- Kwan, W. H., Cheah, C., Ramli, M., Chang, K.** (2018) Alkali-resistant glass fiber reinforced high strength concrete in simulated aggressive environment, *Materiales de Construcción*
- Schmeer, D., Schönemann, B., Arkhipkina, O., Haase, W. Garrecht, H. Sawodny, O., Sobek, W.** (2020) Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton, Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3194
- Austin, H., Allen, M., Donohoe, B., Rorrer, N., Kearns, F., Silveira, R., Pollard, B., Dominick, G.; Duman, R., El Omari, K., Mykhaylyk, V., Wagner, A., Michener, W.E., Amore, A., Skaf, M.S., Crowley, M., Thorne, A., Johnson, C.W., Woodcock, H., McGeehan, J. & Beckham, G.,** (2018): Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Bd. 115, Nr. 19, S. E4350–E4357, [online] doi:10.1073/pnas.1718804115.
- Bartl, B. & Skubella, T.** (2019) Abschlussbericht zum Projekt Leichtbau Frankfurt University of Applied Sciences,
- Bruckermann, O.** (2007) Zugverhalten von textilbewehrtem Beton, Dissertation RWTH Aachen
- Butaud-Stubbs, E., & Niestroy, I.** (2013), Technische Textilien als Wachstumsmotor, Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses, Brüssel
- Cherenack, K., & Pieterston, L.** (2012). Smart textiles: Challenges and opportunities, *Journal of Applied Physics*, 112(9).
- DIN EN 1015-3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch); Deutsche Fassung EN 1015-3:1999+A1:2004+A2:2006.**
- Fischer, H.-M.; Freymuth, H. & Häupl, P. et al.** (2008) Lehrbuch der Bauphysik – Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima, Bauwesen, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden
- Gries, T., Veit D. & Wulfhorst, B.** (2019), *Textile Fertigungsverfahren: Eine Einführung*, Hrsg. Carl Hanser Verlag, 3. Aufl., München
- Gries, T., Veit, D. & Wulfhorst, B.** (2015): *Textile Fertigungsverfahren: Eine Einführung*, 2., München, Deutschland: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Hillebrandt, A.** (2018) Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource, Edition DETAIL
- Hoffmann, F., Motzko, C., Corsten, B.** (2012) Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren, Zeittechnik-Verlag
- Holleman, A.F.; Wiberg, E.; Wiberg, N.** (2007) Lehrbuch der anorganischen Chemie. de Gruyter, Berlin
- Jochmann, Y.** (2019) Die Entwicklung eines gefügedichten Werkstoffs aus Wasserglas und einem Leichtzuschlag aus Recyclingglas, Bachelorarbeit, Frankfurt University of Applied Sciences,
- Koch, A., Lüking A.** (2017) Abschlussbericht des Projektpartners RWTH Aachen – ITA im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM), Projekt „BasFlair“: Basaltfasern als ökologische Bewehrung für Textilbeton
- Kokubo, T.; Takagi, H.,** (2004) „Alkali-Resistant BaO TiO₂-SiO₂ Glasses,“ Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University, 1981.
- Kolb, B.** (2004) Nachhaltiges Bauen in der Praxis. blok-Verl., München
- Kresser, Thomas** (2019): Recycling des Plastikmülls durch Bakterien kommt voran, ingenieur.de, [online] <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/recycling-des-plastikmuells-durch-bakterien-kommt-voran/> [abgerufen am 19.01.2021].

- Krus, M.** (1995) Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken., Dissertation, Universität Stuttgart
- Kulas, C.H.** (2013), Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile (Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen), RWTH Aachen
- Künzel, H.** (2003) Wärme- und Feuchteschutz, Porenbetonbericht 11, Bundesverband Porenbeton
- Landgraf, K.; Völker, S. & Weber, Th.,** (2019) Rezeptoptimierung eines Verbundwerkstoffes aus Bläh- und Wasserglas, Abschlussbericht zum Projekt Leichtbau, Frankfurt University of Applied Sciences
- Nourredine, A.** (2010) Influence of curing conditions on durability of alkali-resistant glass fibres in cement matrix, Université de Annaba, Algérie
- online:** <https://www.alscherer.com/concrete-formingwork/> [abgerufen 2020]
- online:** Atecarma Transforming Future (o. D.): www.teubert.de, [online] <https://www.teubert.de/atecarma-de.html> [abgerufen am 01.03.2020]
- online:** Chemie.de Lexikon: Polyethylenterephthalat (o. D.): [Chemie.de](https://www.chemie.de), <https://www.chemie.de/lexikon/Polyethylenterephthalat.html> [abgerufen am 20-02-20].
- online:** Chemie.de Lexikon: Polymer (o. D.): [Chemie.de](https://www.chemie.de), [online] <https://www.chemie.de/lexikon/Polymer.html> [abgerufen am 20.02.2020].
- online:** FOX VELUTION GmbH, Lichtenfels (o. D.): FOX VELUTION, [online] <https://www.fox-velution.de/> [abgerufen am 20.02.2020].
- online:** IGEN, TU Darmstadt (2012): Nutzung von PET und Stoffstromanalyse, igem.tu-darmstadt.de, [online] https://www.igem.tu-darmstadt.de/sponsoren_1/2012/projekt_1/umweltwissenschaften/environmental_science/abfalltechnik.de.jsp [abgerufen am 18.01.2021].
- online:** Ik Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., Bad Homburg (o. D.): Forum PET Faktencheck 2017, Forum PET, [online] <https://forum-pet.de/infomaterial/> [abgerufen am 27.03.2020].
- online:** Neue Partikelschäume, neue Möglichkeiten! (2018): in: Kurtz Ersä Magazin, Nr. 46, S. 24–25, [online] <https://www.ke-mag.de/ausgabe-46/artikel/neue-partikelschaume.html>.
- online:** Neue Perspektiven für Partikelschaum-Formteile (2019): in: Kurtz Ersä Magazin, Nr. 49, S. 20–21, [online] <https://www.ke-mag.de/fileadmin/medien/kurtz-ersa-magazin/ausgabe-49/download/KEM-49-de.pdf>.
- online:** Partikelschäume – Rohmaterialentwicklung, Prozesstechnik und Oberflächenoptimierung (2018): Neue Materialien Bayreuth GmbH, [online] <https://www.nmbgmbh.de/werkstoffe/partikelschaumstoffe/> [abgerufen am 20-02-20].
- Rembold, Mario** (2019): Kunststoffknacker – Mit Mikroorganismen gegen Plastikmüll?, www.laborjournal.de, [online] https://www.laborjournal.de/rubric/hintergrund/hg/hg_19_12_02.php [abgerufen am 14.01.2021].
- Reyer, E.; Schild, K.; Völkner, S.** (2002) Kompendium der Dämmstoffe. Fraunhofer IRB-Verl., Stuttgart
- Rybin, V., Utkin, A., Baklanova, N.** (2012) „Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers,“ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Novosibirsk
- SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG:** Produktdatenblatt Styrodur® 5000 CS Hartschaumplatte
- Scheydt, J.** (2014) Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Beton unter Druckbelastung – Vergleich von DIN EN 12390-13 und DIN 1048-5, Newsletter Technik, Heidelbergcement, Dezember
- Schneegass, S., & Amft, O.** (2017). Introduction to Smart Textiles. In S. Schneegass, & O. Amft, Smart Textiles - Fundamentals, Design, and Interaction (S. 1-15). Springer International Publishing
- Schneider, S., Poh, P., Grimm, F.** (2015) Leitfaden 01 Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile Projektplattform Energie, www.ppe.tum.de [abgerufen am 2020].

West, M. (2017) The fabric formwork book : Methods for building new architectural and structural forms in concrete / Routledge,

woellner: Geosil 14517 - Produktdatenblatt,
https://www.woellner.de/files/downloads/TDS/TDS-Geosil_14517-D.pdf.

woellner: Stabisil 40 - Produktdatenblatt,
https://www.woellner.de/files/downloads/TDS/TDS-Stabisil_40-D.pdf.

woellner: Betol 50 T1 - <https://www.woellner.de/files/downloads/TDS/TDS-Betol-50T1-D.pdf>

Abkürzungsverzeichnis

rPET	Polyethylenterephthalat aus Rezyklat
AR Glas	Alkali-reststeine Glasfasern
PCM	Phase Changing Materials
mrUHPC	micro reinforced Ultra High Performance Concrete
PEI	Primärenergieinhalt
Schlichte	Flüssigkeit, welche auf textile Fäden vor der Weiterverarbeitung wie z.B. Weben aufgebracht wird
SIC-Test	Standard In Concrete Test
E-Glas	Standardfaser, Aluminiumborsilikat-Glas mit weniger als 2 % Alkalioxiden
Roving	Bündel, Strang oder Multifilamentgarn aus parallel angeordneten, nicht miteinander verdrehten Filamenten (Endlosfasern)
tex	1 tex = 1 Gramm pro 1.000 Meter

Tabellenverzeichnis

Sämtliche Tabellen wurden von den jeweiligen Autoren erstellt

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 1

Abb. 1. 100 © FRA-UAS

Kapitel 2

Abb. 2. 100 ILEK, ISYS, IWB, Universität Stuttgart, Foto Stefan Görlich

Abb. 2. 101 ICD/ITKE, Universität Stuttgart

Abb. 2. 102 van Hinte et al., 2007 https://www.researchgate.net/figure/Superuse-Studios-harvest-map-for-a-site-in-Rotterdam-source-van-Hinte-et-al-2007_fig16_296705471

Abb. 2. 103 Block Research Group / ETH Zürich / Nadia Iljazovic

Abb. 2. 104 Andreoli, C., Freti, F.: Man-made fibres. Reference books of textile technologies. Fondazione Acimit, Milan, 2004.

Abb. 2. 105 Jane Burry, Jenny E. Sabin, Bob Sheil, and Marilena Skavara(2020, Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture, ISBN: 9781787358119, Seite 194 ff

Abb. 2. 106 Quelle: <http://www.spacekitchen.de/projekte/paul.html>

Kapitel 3

keine Abbildungen

Kapitel 4

Abb. 4. 100 © FRA-UAS

Kapitel 5

alle Abbildungen © FRA-UAS

Kapitel 6

Abb. 6. 100 © FRA-UAS

Abb. 6. 201 © TU Darmstadt

Abb. 6. 202 © TU Darmstadt

Abb. 6. 203 © TU Darmstadt

Abb. 6. 204 Rybin, A. Utkin und N. Baklanova, „Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basaltfibers,“ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistr, Novosibirsk, 2012.

Abb. 6. 205 Rybin, A. Utkin und N. Baklanova, „Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basaltfibers,“ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistr, Novosibirsk, 2012.

Abb. 6. 206 Rybin, A. Utkin und N. Baklanova, „Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basaltfibers,“ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistr, Novosibirsk, 2012.

Abb. 6. 207 © TU Darmstadt

Abb. 6. 208 bis 6.217 © TU Darmstadt

Abb. 6. 300 © FRA-UAS

Abb. 6. 301 bis 6.313 © FRA-UAS

Abb. 6. 314 A. NOURREDINE, „Influence of curing conditions on durability of alkali-resistant glass fibres in cement matrix,“ Université de Annaba, Algérie, 2010.

Abb. 6. 315 bis 6.322 © FRA-UAS

Abb. 6. 322 © Christoph Lison

Kapitel 7

Abb. 7. 100 Textile Werkstoffe für den Leichtbau S.216

Abb. 7. 101 bis 7.110 © DITF

Abb. 7. 112 bis 7.115 © FRA-UAS

Abb. 7. 200 © TU Darmstadt

Abb. 7. 201 bis 7.206 © TU Darmstadt

Abb. 7. 206 Bild unten rechts © Christoph Lison

Abb. 7. 207 bis 7.217 © FRA-UAS

Kapitel 8

Abb. 8. 100 bis 8.107 © FRA-UAS

Kapitel 9

Abb. 9. 1 © FRA-UAS

Abb. 9. 2 online gefunden 01/2021, <http://www.luccon.com>

Abb. 9. 3 online gefunden 01/2021: Bavarian Optics

online gefunden 01/2021: DITF Denkendorf

Abb. 9. 4 online gefunden 01/2021: Sächsisches Textil Forschungsinstitut e.V.

online gefunden 01/2021: DITF Denkendorf

Abb. 9. 5 © FRA-UAS

Abb. 9. 6 online gefunden 01/2021: RMIT University

Abb. 9. 7 online gefunden Schoeller Switzerland

online gefunden 11/2020 Outlast Technologies LLC

online gefunden 03/2021: Cellulose-Aerogelfasern, Dissertation Dipl.-Chem. Björn Schulz 2016

Abb. 9. 8 © FRA-UAS

Abb. 9. 9 online gefunden 03/2021: <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2015-16/>

Abb. 9. 10 © FRA-UAS

Kapitel 10

Abb. 10. 100 © FRA-UAS

Abb. 10. 101 © FRA-UAS

Abb. 10. 102 bis 10.104 © TU Darmstadt

Abb. 10. 105 © Christoph Lison

Abb. 10. 106 bis 10.108 © FRA-UAS

Abb. 10. 109 © Christoph Lison

Abb. 10. 110 © Christoph Lison

Abb. 10. 111 bis 10.112 © FRA-UAS

Abb. 10. 113 © Christoph Lison

Abb. 10. 200 bis 10.205 © FRA-UAS

Kapitel 11

Abb. 11. 100 bis 11.103 Grafiken © FRA-UAS, Bilder © Christoph Lison

Publikationsliste

Lüling, C. (4/2019). Gewebt, Gewirkt, Geschäumt. Deutsche Bauzeitung, S. 66 – 70

Lüling, C. & Beuscher, J. (2019). 4dTEX – Exploration of Movement Mechanisms for 3D Textiles Used as Solar Shading Devices. Powerskin Journal of Façade Design and Engineering (JFDE), Vol 7 /No.1 2019, S. 159 - 172

Lüling, C. & Richter, I. (2017) Architecture Fully Fashioned - Exploration of foamed spacer fabrics for textile based building skins. Journal of Facade Design and Engineering, [S.I.], v. 5, n. 1, p. 77 - 92, jan. 2017. ISSN 2213- 3038. doi: <https://doi.org/10.7480/jfde.2017.1.1526>.

Lüling, C.; Rucker-Gramm, P.; Weilandt, A.; Schneider, J.; Bauder, H-J.; (2021) G3TEX – Multifunctional monomaterials made from foamed glas-, basalt- or PET- based 3d textiles, 04/21 Proceedings Powerskin, S.37 - S.50

Veranstaltungsliste

Ausstellung Bau19, Messestand des BMI, München 2019

Ausstellung Exempla, Messe, Sonderausstellung Textil, München 2019

Vortrag 2. European Exchange Meeting and Semnar for Research and Industry, IVGT, Frankfurt 2019

Vortrag HSRM Wiesbaden, 2019

Ausstellung CLB Galerie Berlin /BMI, Berlin 2019

Ausstellung Zukunft Bau Kongress 2019: JETZT! Bauen im Wandel

Ausstellung Bautec, Messestand des BMI, Berlin 2020

Beitrag Luminale, Frankfurt 2020

Vortrag Workshop Fraunhofer ISI, digital 2020

Ausstellung Virtuelle Messe der Allainz Faserbasierte Werkstoffe, 2020

Vortrag Symposium Aedes, Berlin 2020

Vortrag 9th World Conference on 3D Fabrics and Their Applications, online 2021

Vortrag Powerskin, online 2021

Preise

Finalist DGNB Sustainability Challenge 2021

