

BBSR-
Online-Publikation
35/2023

6dTEX

Leichtbauteile aus 3D-Textilien und 3D-Druck

von

Claudia Lüling
Sascha Biehl
Roxana Tennert
Gözdem Dittel
Marina Kremer
Thomas Gries

6dTEX

Leichtbauteile aus 3D-Textilien und 3D-Druck

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.11

Projektlaufzeit: 04.2021 bis 07.2023

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 und Innovation im Bauwesen“
Daniel Wöffen
daniel.woeffen@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Frankfurt University of Applied Sciences, Frankfurt
Fachbereich 1, ReSULT (Research Lab for Sustainable Lightweight Building Technologies)
Prof. Claudia Lüling (Projektleitung)
clue@fb1.fra-uas.de

Sascha Biehl, M. A.
biehl@fb1.fra-uas.de

Roxana Tennert, B. Eng.
roxana.tennert@fb1.fra-uas.de

Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University
Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing., Universitätsprofessor, Thomas Gries
Direktor
thomas.gries@ita.rwth-aachen.de

Gözdem Dittel, M. Sc.
gozdem.dittel@ita.rwth-aachen.de

Marina Kremer, M. Sc.
marina.kremer@ita.rwth-aachen.de

Stand

Juli 2023

Bildnachweis

Titelbild: Frankfurt UAS
Alle Fotografien wie gekennzeichnet, nicht gekennzeichnete Fotografien: Frankfurt UAS

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; Biehl, Sascha; Tennert, Roxana; Dittel, Gözdem; Kremer, Marina; Gries, Thomas, 2023: 6dTEX: Leichtbauteile aus 3D-Textilien und 3D-Druck. BBSR-Online-Publikation 35/2023, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	8
1 Einführung	10
1.1 <i>3D-Druck und 3D-Textilien im Produktbereich</i>	10
1.1.1 3D-Druckverfahren im Produktbereich	10
1.1.2 3D-Textilherstellung im Produktbereich	11
1.1.3 3D-Druck in Kombination mit 2D-Textilien im Produktbereich	13
1.2 <i>Fazit 3D-Druck und 3D-Textilien im Produktbereich, Ausblick Bauwesen</i>	14
2 Problemstellung	14
2.1 <i>3D-Druck und 3D-Textilien im Baubereich</i>	14
2.1.1 Stand der Technik 3D-Druck sowie 3D-Textilien im Baubereich	14
2.1.2 Stand der Forschung 3D-Druck sowie 3D-Textilien im Baubereich.....	18
2.1.3 Stand der Forschung 3D-Druck auf Textilien.....	20
2.2 <i>Forschungslücke/Entwicklungsbedarf</i>	22
3 Zielstellung	23
3.1 <i>Konkrete Projektziele</i>	23
3.2 <i>Übergeordnete Ziele, Beitrag des Projekts</i>	23
4 Forschungsdesign	24
4.1 <i>Arbeitshypothesen</i>	25
4.2 <i>Methodischer Ansatz</i>	25
4.3 <i>Projektteam und Organisation, Kooperationspartner</i>	25
4.4 <i>Arbeitspakete und Meilensteine</i>	26
5 Projektverlauf	27
5.1 <i>6dTEX: Verfahrens- und Prozessparameter sowie Prüfreihe</i>	27
5.1.1 Ziele	27
5.1.2 Synthetische Materialien: 3D-Druckmaterialien/–verfahren und Fasermaterialien	27
5.1.3 Natürliche Materialien: 3D-Druckmaterialien/–verfahren und Fasermaterialien	28
5.1.4 Mineralische Materialien: 3D-Druckmaterialien/–verfahren und Fasermaterialien	29
5.1.6 Prozessparameter 3D-Druck auf 3D-Textilien	31
5.1.7 Orientierende Vorversuche Kunststoffe: 3D-Druck auf marktgängige 2D-Textilien	47
5.1.8 Vorversuche Kunststoff, 3D-Druck auf kettengewirkte Biaxialgelege	54
5.1.9 Orientierende Vorversuche mineralische Werkstoffe: 3D-Druck auf Resttextilien und kettengewirkte Biaxialgelege	61
5.1.10 Vorversuche mineralische Werkstoffe: 3D-Druck auf 2D-kettengewirkte Gelege	65
5.1.11 Orientierende Versuche PES/PET, 3D-Druck auf 3D-Textilien	82
5.1.12 Versuche PES/PET: 3D-Druck auf 3D-Textilien	86
5.1.13 Orientierende Versuche, Glas/Beton: 3D-Druck auf 3D-Textilien.....	95
5.1.14 Versuche Glas/Beton: 3D-Druck auf 3D-Textilien	99

5.2 <i>Material- und Gestaltungsvarianten</i>	105
5.2.1 Überblick Gestaltungsmatrix 3D-Druck auf bzw. in 3D-Textil	105
5.2.2 Skalierung, Bewegliche Elemente, 3D rPETG-Druck auf 3D PES-Textil	108
5.2.3 Skalierung: Statische Elemente, 3D-Betondruck auf 3D-Glasgewebe	110
5.3 <i>Demonstratoren</i>	114
5.3.1 Herstellung Sonnenschutz Demonstrator SHIFT aus rPETG-Druckmaterial auf 3D-kettengewirkten Abstandsgelege aus PES	114
5.3.2 Herstellung Wand Demonstrator YURTE und Demonstrator (KAPPEN)DECKE aus Betondruck auf kettengewirkte Abstandsgelege aus AR Glas im Steh- und Schussfadenbereich	121
5.3.3 Brandschutz- und lichttechnische Prüfungen	124
5.4 <i>Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag</i>	127
6 Ergebnisse	128
6.1 <i>Bewertung/Diskussion/Zielerreichung</i>	128
6.1.1 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext	128
6.1.2 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	129
6.2 <i>Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit</i>	135
6.3 <i>(Bau-)praktische Anschlussfähigkeit</i>	135
7 Danksagung	136
8 Mitwirkende	136
<i>Autorinnen und Autoren</i>	136
<i>Weitere Mitwirkende</i>	136
<i>Projektpartner und weitere Fördermittelgeber</i>	136
<i>Kurzbiographien</i>	137
9 Verzeichnisse	138
<i>Literaturverzeichnis</i>	138
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	142
<i>Tabellenverzeichnis</i>	149
<i>Publikations- und Veranstaltungsliste</i>	149
Anlagen	152

Kurzfassung

6dTEX beschäftigt sich mit der Verbindung zweier bislang separat betrachteter Verfahrenstechniken. Untersucht wird die Kombination der Herstellung von 3D-Textilien mit 3D-Druckverfahren. Ziel ist es, durch die zusätzliche Funktionalisierung technischer 3D-Textilien im Verbund mit additiven 3D-Druckverfahren neue, nachhaltige Leichtbauanwendungen in der Architektur und für die Gebäudehülle zu entwickeln. Betrachtet werden insbesondere Abstandstextilien. Die Hypothese ist, dass die dreidimensionale, textile Sandwichstruktur von 3D-Gewirken und kettengewirkten Abstandsgewirken durch ihre optional unterschiedlich porösen Decklagen und Zwischenräumen geeignet ist, im Zusammenspiel mit additiven Druckverfahren resiliente Verbundelemente aus werkstoffgleichen und kreislauffähigen Materialien zu generieren.

Die additive Fertigung und insbesondere der 3D-Druck auf nicht elastische und elastische Flächentextilien bzw. 2D-Textilien ist Stand der Technik. International renommierte Maschinenbauer wie KARL MAYER bieten seit diesem Jahr Textilmaschinen mit gekoppelter 3D-Druck Einheit an. Als Produktanwendungen werden insbesondere Funktionsbekleidung und der Bereich Automotive genannt. In der Forschung wird für diese Bereiche schwerpunktmäßig die verbesserte Haftung zwischen Druck- und Textilmaterial untersucht. Dabei stehen Fused Deposition Modeling (FDM) Druckverfahren und die Verwendung unterschiedlichster Kunststoffe als Druckmaterialien im Mittelpunkt - gedruckt wird dabei bislang auf herkömmliche Flächentextilien wie Naturstoffe aus Baumwolle oder auf kunststoffbasierte Textilien wie Polyester. Die angestrebte Multifunktionalität wird mit Multimaterialität erreicht.

Zum 3D-Druck auf 3D-Textilien gibt es keinen Stand der Technik und auch keinen Stand der Forschung, das Projekt 6dTEX ist eine Grundlagenforschung. In einem iterativen, explorativen Prozess konnte methodisch Schritt für Schritt nachgewiesen werden, dass neuartige Leichtbauanwendungen im Bauwesen durch die Kombination von 3D-Druck und 3D-Textil möglich und zudem in gleichen Werkstoffgruppen darstellbar sind. Unterschieden wurde dazu zwischen mineralischen sowie nicht mineralischen bzw. nicht metallischen Materialien. In einer Vorauswahl wurden gängige, additiv Druckprozesse und verfügbare Druckmaterialien mit kompatibel verarbeitbaren Faserwerkstoffen abgeglichen, die bei der Herstellung von Abstandsgewirken bzw. kettengewirkten Abstandsgewirken auch auf den jeweiligen Textilmaschinen verwendet werden können. Entschieden wurde zuletzt zum einen für einen Verbund aus Polyester, d.h. Polyestertextil und PET Druckmaterial aus Rezyklat, das ebenfalls aus der Gruppe der Polyester ist. Zum anderen wurde ein mineralischer Verbund aus Betondruck und einem Textil aus AR-Glas Fasern in den Decklagen untersucht. Die abstandsgebenden und abstandshaltenden, sogenannten Polfasern verbleiben auch bei der mineralischen Kombination als Monofilamente aus Polyester, dies ist aus technischen Gründen bislang alternativlos. Im nächsten Schritt wurden wesentliche Prozessparameter beim 3D-Druck identifiziert, die zur Haftung beitragen. Dazu gehören insbesondere z.B. die Distanz des Druckkopfs zur textilen Oberfläche und die Druckgeschwindigkeit bei der/den ersten Drucklage(n). Dies ist für beide Werkstoffgruppen relevant. Parameter, bei denen sich die Werkstoffgruppen unterscheiden sind bei synthetischen Druckmaterialien u.a. die Drucktemperatur, während es beim Druck mit mineralischen, erhärtenden Werkstoffen wie Lehm oder Beton im Wesentlichen die Rezepturen der Druckwerkstoffe und ihre reproduzierbare Konsistenz während der Herstellung sind.

Für Versuchsreihen in beiden Werkstoffgruppen wurden zuerst 2D- bzw. Flächentextilien hergestellt. Dies unter Verwendung einer Textilmaschine, die vergleichbare Oberflächen wie die später anvisierten kettengewirkten Abstandsgewebe produziert. Die Ergebnisse wurden dann auf die 3D-Textilmaschine übertragen und für beide Werkstoffgruppen in beiden Versuchsreihen jeweils Haft- und Biegezugversuche gemacht. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Haftung des rPETG-Druckmaterials umso besser wird, je eher eine dichte und topographisch fein ausdifferenzierten Oberfläche ist. Die besten Werte wurden bei ca. 40-60 % des Durchmessers des Druckmaterials im Verhältnis zur lichten Weite der Schussfäden erreicht und einem Öffnungsverhältnis zwischen Lichte Schussfäden zu Breite Schussfäden von ca. 20-30 % erreicht. Eine Verbesserung des Biegezugverhaltens konnte im Polyesterverbund im Vergleich zum reinen Druckmaterial

kaum festgestellt werden. Offensichtlich führt die mechanische Verzahnung von Druck- und Textilmaterial im Bereich der Kontaktfläche beim Druckmaterial zu minimalen Sollbruchstellen, die das Biegezugverhalten im Vergleich zum reinen Druckmaterial verschlechtern. Die besten Ergebnisse konnten hier bei ca. 60 % des Durchmessers des Druckmaterials im Verhältnis zur lichten Weite der Schussfäden erreicht und einem Öffnungsverhältnis zwischen Lichte Schussfäden zu Breite Schussfäden von ca. 30-40 % erreicht werden. Beim Betondruck stellt sich das Ergebnis anders dar. Die zur Verbesserung des Biegezugverhaltens notwendige Beschichtung muss beim Haftzug mit bedacht werden. Versuche zeigen bei gleichem Textil deutlich bessere Haftzugwerte beim unbeschichteten im Vergleich zum beschichteten Textil. Die Poren des Textils setzen sich zu, die Haftung wird eingeschränkt. Die Porigkeit der noch unbeschichteten textilen Oberfläche liegt hier beim besten Ergebnis bei ca. max. 50 %. Gleichzeitig verbessern sich die Biegezugwerte des Betons im Verbund mit dem Textil durch die Beschichtung. Die höchsten Spannungen werden bei einem lichten Schussfadenabstand zwischen 3 und 3,5 mm erreicht, das entspricht ca. 40 % des Düsendurchmessers (8 mm) des Betondruckers. Das Öffnungsverhältnis zwischen Lichte Schussfäden zu Breite Schussfäden liegt bei den besten Serien zwischen 110 -180 %. Bei größeren Öffnungsweiten reduziert sich die Biegezugfestigkeit wieder. Generell sind alle genannten Werte erste Annäherungen. Die Prüfverfahren sind zu optimieren, da Auflagerflächen und Angriffsflächen der auf das Textil gedruckten Prüfkörper gerade beim Beton bislang suboptimal für die genormten Prüfverfahren sind.

Zuletzt konnten Bauanwendungen für beide Materialgruppen nachgewiesen werden, die sich auch in ihrer potentiellen Brandschutzklassifizierung unterscheiden. Aus Polyester wurden Sekundärbauteile wie Sonnenschutzelemente entwickelt: Das neue Verbundmaterial aus 3D-Druck und 3D-Textil kann aus Rezyklat und schwerentflammbar hergestellt werden. Der Demonstrator SHIFT, der final im Maßstab 1:1 aus kettengewirkten Gelegen gebaut wurde, ermöglicht durch leichte Verschiebung der Decklagen zueinander die scharnierlose Einstellung unterschiedlicher Transparenzen im Fensterbereich und reduziert so gezielt die Überhitzung von Innenräumen. Der Demonstrator BOW aus Abstandsgewirken zeigt einen Träger, der in zwei Schritten aufgedruckt auf ein Textil dann durch das Textil zu einem Bogen aufgespannt wird. Es entsteht ein hybrides Tragwerk, das sich modular zu einem horizontalen Sonnenschutz im Stadtraum zusammensetzen lässt. Er bietet durch seine Plastizität Blendschutz und zugleich Schutz vor Überhitzung: Erwärmte Luft wird durch die prozessbedingt entstandenen Öffnungen gezielt abgeleitet. Im Bereich Betondruck konnte gezeigt werden, wie aus dem Verbund aus Betondruck und glasbasierten, kettengewirkten Abstandsgewirken selbsttragende Wand- und Deckenbauteile realisiert werden können, die nicht dem Massivbau, sondern dem Skelettbau zuzuordnen sind. Das Wandelement YURTE zeigt eine durch das Textil ausgesteifte und thermisch getrennte, außenliegende und diagonale Tragstruktur. Beim Deckenelement (KAPPEN)decke, mit linear aufgedruckten Betonträgern, die durch das Textil unterspannt werden, können die textilen Zwischenbereiche hängend als verlorene Schalung bis hin zu stehenden, gewölbten und formaktiven Bauteilen werden, ähnlich einer Kappendecke.

Insgesamt ist die Abstimmung zwischen textiler Herstellung und Oberfläche insbesondere im Bereich Betondruck sensibel. Betonrezepturen und Porositäten der textilen Decklagen müssen in weiteren Forschungen systematisch feinjustiert werden. Die Schiebefestigkeit der fragilen Textilstruktur muss zudem entweder textiltechnisch oder über bessere und zugleich elastisch verformbare Beschichtungen erhöht werden. Die nachweislich mögliche und aus CO₂ Gründen notwendige Reduktion von Betonmaterial durch skelettartige baukonstruktive Gestaltung weg vom Massivbau zeigt gleichzeitig das große Potential von 6dTEX gerade im Bereich nicht brennbarer Verbundwerkstoffe.

Abstract

6dTEX deals with the combination of two process technologies that have so far been considered separately. The combination of the production of 3D textiles with 3D printing processes is investigated. The aim is to develop new, sustainable lightweight construction applications in architecture and for the building envelope. The hypothesis is that the three-dimensional, textile sandwich structure of 3D knitted fabrics and warp-knitted spacer fabrics, with their optionally different porous cover layers and interstices, has a potential for additional functionalization of technical 3D textiles in interaction with additive printing processes. The hypothesis is also, that the new composite from fibres and print material is suitable for generating resilient and recyclable composite elements, made of materials that are identical for both structural elements, textile and print.

Additive manufacturing and, in particular, 3D printing on non-elastic and elastic 2D textiles is state of the art. Internationally renowned machine builders such as KARL MAYER have been offering textile machines with a coupled 3D printing unit since this year. Functional clothing and the automotive sector in particular are cited as product applications. In research in these areas, the focus is on improved adhesion between print and textile material. The focus is also on fused deposition modeling (FDM) printing processes and the use of a wide variety of plastics as printing materials - printing has so far been carried out on conventional textiles such as natural cotton fabrics or on plastic-based textiles such as polyester. The desired multifunctionality is achieved with multi-materiality.

There is no state of the art or research on 3D printing on 3D textiles; the 6dTEX project is applied basic research. In an iterative, explorative process, it was possible to prove methodically, step by step, that novel lightweight construction applications in the building industry are possible through the combination of 3D printing and 3D textiles and, moreover, can be represented in the same material groups. For this purpose, a distinction was made between mineral and non-mineral or non-metallic materials. In a pre-selection, common additive printing processes and available printing materials were compared with compatible processable fiber materials that can also be used on the respective textile machines in the production of spacer fabrics or warp-knitted spacer fabrics. It was finally decided to use a composite of polyester, i.e. polyester textile and PET printing material made from recycled material, which is also a polyester. On the other hand, a mineral composite of concrete printing and a textile of AR glass fibers in the cover layers was investigated. The spacing and spacing-retaining, so-called pile fibers remain as monofilaments made of polyester even with the mineral combination; for technical reasons, this has so far been without alternative. The next step was to identify key process parameters in 3D printing that contribute to adhesion. These include in particular, for example, the distance of the print head to the textile surface and the printing speed for the first print layer(s). This is relevant for both material groups. Parameters where the material groups differ include the printing temperature for synthetic printing materials, while for printing with mineral, hardening materials such as clay or concrete, it is essentially the formulations of the printing materials and their reproducible consistency during production.

For test series in both material groups, 2D textiles were first produced. This was done using a textile machine that produces comparable surfaces to the warp-knitted spacer fabrics targeted later. The results were then transferred to the 3D textile machine and adhesion and bending tensile tests were made for both groups of materials in each of the two test series. As a result, it can be concluded that the denser and topographically finely differentiated the surface is, the better the adhesion of the rPETG printing material becomes. The best values were obtained at about 40-60 % of the diameter of the printing material in relation to the clear width of the weft threads, and an opening ratio between clear weft threads to width weft threads of about 20-30 %. An improvement of the bending tensile behavior could hardly be observed in the polyester composite compared to the pure printing material. Obviously, the mechanical interlocking of print and textile material in the area of the contact surface leads to minimal predetermined breaking points in the print material, which worsen the bending tensile behavior compared to the pure print material. The best results were achieved here at approx. 60 % of the diameter of the printing material in relation to the clear width of the weft threads and an opening ratio between the clear weft threads to the width of the weft threads of approx. 30-40 %. For concrete printing, the result is different. The coating necessary to improve the bending tensile behavior must

also be taken into account in the adhesive tension. Tests with the same textile show significantly better adhesive tensile values with the uncoated textile compared to the coated textile. The pores of the textile become clogged and adhesion is limited. The porosity of the still uncoated textile surface is at a maximum of approx. 50 % with the best results. At the same time, the coating improves the flexural properties of the concrete in combination with the textile. The highest stresses are achieved at a clear weft spacing between 3 and 3.5 mm, which corresponds to approx. 40 % of the nozzle diameter (8 mm) of the concrete printer. The opening ratio of clear weft to wide weft is between 110 -180 % for the best series. With larger opening widths, the bending tensile strength is reduced again. In general, all values mentioned are first approximations. The test methods must be optimized, since the bearing surfaces and contact surfaces of the test specimens printed on the textile have so far been suboptimal for the standardized test methods, especially for concrete.

Recently, construction applications for both material groups could be demonstrated, which also differ in their potential fire protection classification. Polyester has been used to develop secondary components such as solar shading elements: The new composite material of 3D printing and 3D textile can be produced from recycle and flame retardant. The demonstrator SHIFT, which was finally built on a scale of 1:1 from warp-knitted spacer fabrics, enables the hinge-free adjustment of different transparencies in the window area by slightly shifting the cover layers in relation to each other, thus specifically reducing the overheating of interior spaces. The demonstrator BOW made of knitted spacer fabrics shows a beam that is printed onto a textile and then stretched through the textile to form an arch. The result is a hybrid support structure that can be assembled modularly to form a horizontal sunshade in urban spaces. Thanks to its plasticity, it provides glare protection and at the same time protection against overheating: Heated air is specifically dissipated through the openings created by the process. In the area of concrete pressure, it was possible to show how self-supporting wall and ceiling components can be realized from the composite of concrete pressure and glass-based, warp-knitted spacer fabrics, which are not to be assigned to solid construction but to skeleton construction. The wall element YURTE shows an external and diagonal load-bearing structure stiffened and thermally separated by the textile. In the case of the ceiling element (KAPPEN)decke, with linearly imprinted concrete girders, which are sub-spanned by the textile, the textile intermediate areas can be suspended as lost formwork up to standing, curved and form-active components, similar to a cap ceiling.

Overall, the match between textile fabrication and surface is sensitive, especially in the area of concrete pressure. Concrete formulations and porosities of the textile cover layers need to be systematically fine-tuned in further research. The shear strength of the fragile textile structure must also be increased either by textile technology or by better and at the same time elastically deformable coatings. The demonstrably possible and, for CO₂ reasons, necessary reduction of concrete material through skeleton-like structural design away from solid construction also shows the great potential of 6dTEX, especially in the area of non-combustible composites.

1 Einführung

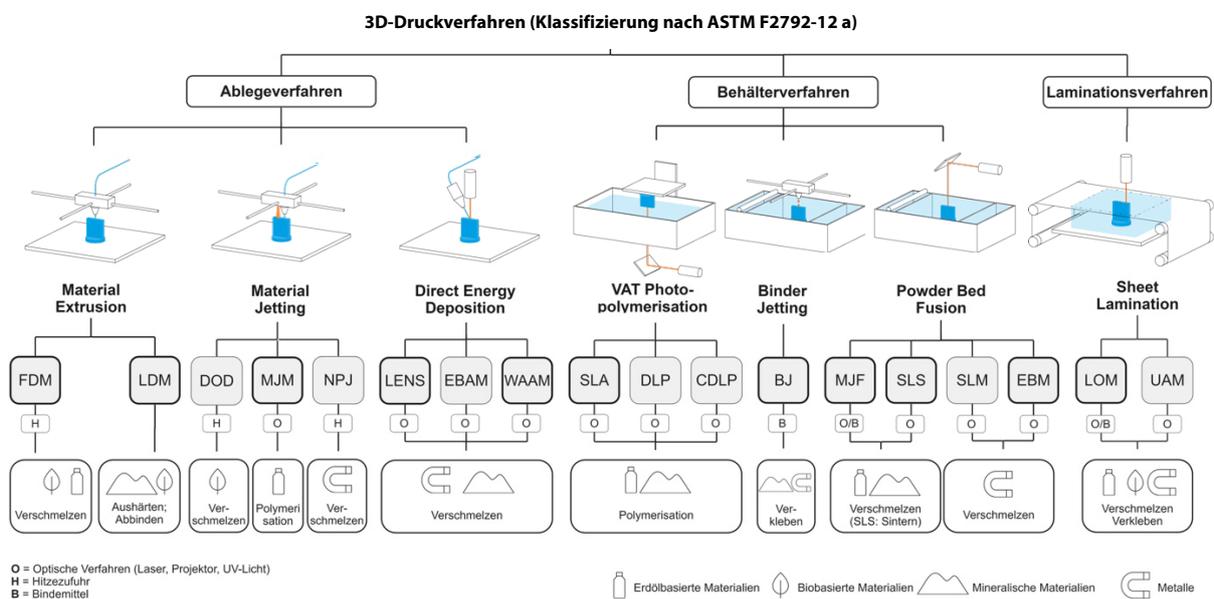
1.1 3D-Druck und 3D-Textilien im Produktbereich

1.1.1 3D-Druckverfahren im Produktbereich

1.1.1.1 Stand der Technik, gängige 3D-Druckverfahren im Produktbereich

Eine weltweite Umfrage bei über 1.900 befragten Firmen von Sculpteo (Statista 5.5.2022) aus dem Jahr 2022 ergab, dass der FDM-Druck mit über 95 % zu den meistgenutzten 3D-Druck-Technologien im Jahr 2021 zählt. Gefolgt von SLS-Verfahren mit knapp 70 %, SLA-Verfahren mit knapp über 60 % und weiteren Verfahren unter 50 %, der Reihe nach Digital Light Processing, Multi Jet Fusion, Polyjet und Binder Jetting. Im Jahr 2020 gaben zudem 64 % der Befragten an, dass sie als Material beim 3D-Druck Kunststoff verwenden. Der Trend geht dabei zur Verwendung nachhaltiger Druckmaterialien, der Entwicklung schnellerer Druckprozesse und der Entwicklung größerer Bauräume bzw. bauraumoffenen Prozessen. Letzteres schafft auch für die Bauindustrie neue Perspektiven. Abbildung 1 zeigt 3D-Druckverfahren unterteilt nach bauraumgebundenen, und potentiell bauraumoffenen Prozessen, die auf Ablegeverfahren (Ablegen und Erhärten von Material) basieren - im Vergleich zu behältergebundenen Verfahren, die auf dem Erhärten von Flüssigkeiten und Pulvern beruhen.

Abbildung 1, Übersicht 3D-Druckverfahren, gängige Verfahren gekennzeichnet mit stärkerem Rand : FDM (Fused Deposition Modeling), LDM (Liquid Deposition Modeling), DOD (Drop on Demand), MJM (Multi Jet Modeling / PJ = Poly Jet,) NPJ (Nano Particle Jetting) LENS (Laser Engineered Net Shaping) EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing), WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), SLA (Stereolithography), DLP (Digital Light Processing / Digital Light Projection), CDLP (Continuous Digital Light Projection), BJ (Binder Jetting, MJF (Multi Jet Fusion) SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting) EMB (Electron Beam Melting)



© Frankfurt UAS

1.1.1.2 Forschungsausblick

Neben der üblichen Verwendung von Kunststoffen, dem Trend zu biobasierten Kunststoffen und Forschungen zu 3D-Druckfilamenten aus nachwachsenden Rohstoffen, etablieren sich zunehmend Verfahren zum Drucken mit mineralischen Materialien. Neben 3D-Betondruck und 3D-Metalldruck wird insbesondere am 3D-Glasdruck geforscht, was im Zusammenhang mit Glasfasertextilien und die Rezyklierbarkeit Perspektiven im Bauwesen eröffnet. Das MIT in Amerika forscht und hat eigene Patente zum FDM-Druck mit Glas (Fused

Deposition Modeling), die KADK bzw. das CITA in Dänemark erforscht LDM (Liquid Deposition Modeling) mit nachfolgendem Sintern. An LGD-Verfahren (Laser Glass Deposition) mit Glas arbeitet das Laser Zentrum Hannover. SLA-Prozesse (Stereolithographie) mit nachfolgendem Sintering verfolgt u.a. die Glassomer GmbH.

1.1.2 3D-Textilherstellung im Produktbereich

Der Einsatz von 3D-Textilien bietet für viele Anwendungen erhebliche Vorteile: weniger Materialverbrauch durch reduzierte Prozessschritte wie Konfektionieren und kontinuierliche und gleichmäßige Garnarchitektur in unterschiedlich wählbaren Materialitäten.

1.1.2.1 3D-Textilien, Typologien

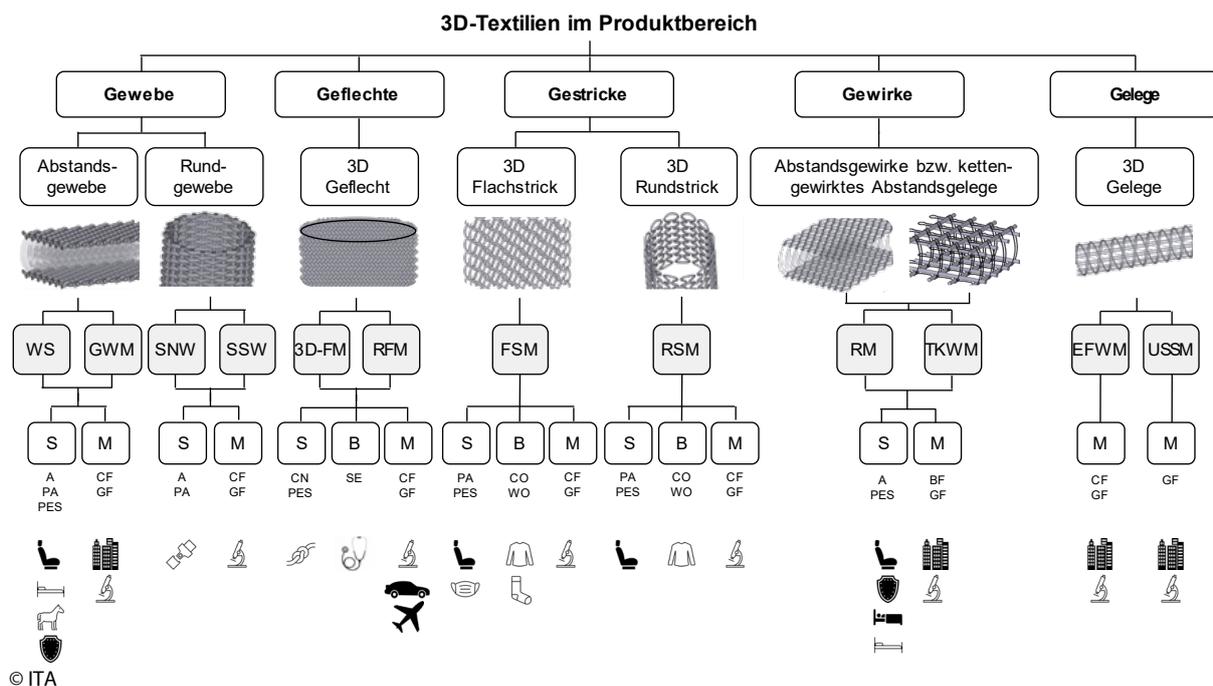
Abbildung 2 zeigt eine Übersicht derzeit gängiger 3D-Textilverfahren und Ihre Einordnung in gewebte, geflochtene, gestrickte, gewirkte und gelegte Strukturen.

Abbildung 2, 3D-Textiltechniken im Produktbereich

Zeile 3, Textilmaschinen: WS, Webstuhl; GWM, Greiferwebmaschine; SNW, Nadel-WS; SSW, Schmalere Shuttle-WS; 3D-FM, 3D-Flechtmaschine; RFM, Radialflechtmaschine; FSM, Flachstrickmaschine; RSM, Rundstrickmaschine; RM, Doppelraschelmaschine; TKWM, Trikot-Kettenwirkmaschine; EFWM, Einzelfilamentwickelmaschine; USSM, Ultraschallschweißmaschine

Zeile 4, Materialgruppen: S, synthetisch; B, biologisch; M, mineralisch

Zeile 5, Materialien: A, Aramid; BF, Basaltfasern; CF, Carbonfasern; CN, Chirurgicaler Nähgarn; CO, Baumwolle; GF, Glasfasern; PA, Polyamid; PES, Polyester; PP, Polypropylen; K, Keramik; SE, Seide; WO, Wolle



Innerhalb der genannten Strukturen sind 3D-Abstandsgewirke der Stand der Technik. Anwendungen finden sich z.B. im Bereich Polstermöbel. In Z-Richtung und unter Verwendung von überwiegend Polymerfasern behalten sie über Tausende von Zyklen eine hervorragende Druckkraftverteilung bei. Ihre offene, sandwichartige Struktur ist elastisch, isolierend, schalldämpfend und bietet Dämpfungs- und Filterungspotenzial. Technische Anwendungen finden sich derzeit in den Bereichen Matratzenauflagen, Polstermöbel und Filtersystemen, medizinische Textilien (z.B. Orthesen), Automobile (z.B. Klimakomfortschicht), Heimtextilien (z.B. Stuhlbezug), Kleidung (z.B. BHs) sowie in Schutz- und Sportbekleidung. Abstandsgewirke können als textiles Halbprodukt (vorübergehend) verformt oder gefaltet werden, ohne die Struktur zu zerstören.

Technisch bestehen Abstandsgewirke aus zwei parallelen Gewirken, die in Z-Richtung durch sogenannte Polfäden miteinander verbunden sind. Standard-Wirkmaschinen mit einem zusätzlichen Kettbaum können für Abstandsgewirke mit geringem Abstand zwischen Ober- und Unterseite verwendet werden. Abstandsgewirke können auf Doppelraschelmashinen und auf Trikot-Kettenwirkmaschinen hergestellt werden. Die Hauptvorteile von schussgewirkten Abstandstextilien sind die relativ kurze Maschinenaufbauzeit, die wirtschaftliche Herstellung und ihre Eigenschaften hinsichtlich Luftdurchlässigkeit und weicher Haptik.

Andere textile Geometrien sind 3D-gewebte Strukturen, die flächig oder als röhrenförmige Strukturen auf einer schmalen Nadelwebmaschine oder auf einem schmalen Schützenwebstuhl hergestellt werden. Dies ermöglicht eine durchgehende, nahtlose, geschlossene Struktur über den gesamten Umfang. Eine weitere Möglichkeit, kontinuierliche, nahtlose, schlauchförmige Strukturen zu weben ist das 3D-Rundwebverfahren. Gewebte Rohrstrukturen werden in der Bauindustrie (z. B. faserverstärkte Rohre für rohrförmige Bauteile), in der chemischen Industrie (z. B. Rohrfilter) und in medizinischen Textilien (z. B. für künstliche Gefäßprothesen) eingesetzt.

3D-Flechttechnologien ermöglichen die Herstellung von Strukturen mit komplexer Geometrie, die häufig für Leichtbaulösungen, zum Beispiel im Automobilbau, verwendet werden. Darüber hinaus bietet die Medizintechnik vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für die 3D-Flechttechnik. Als 3D-Flechtstrukturen werden solche bezeichnet, deren Fäden sich in allen drei Raumrichtungen kreuzen. 3D-Flechtverfahren ermöglichen eine einfache Beeinflussung der Faserorientierung und sorgen so für hohe Festigkeit und Steifigkeit bei reduzierter Masse (Gries et al. 2022).

3D-Strickttextilien können auf Flachbettstrickmaschinen in verschiedenen Formen hergestellt werden. Durch die hohe Flexibilität der Flachstrickmaschinen ist die Herstellung von Abstandsgewirken, endnahen Formtextilien, Schläuchen und anderen Formen von 3D-Textilien möglich. Wegen der recht komplexen Programmierung werden diese 3D-Formen immer noch hauptsächlich in der Bekleidungsindustrie für Socken, Handschuhe, Sweatshirts oder Schuhoberteile verwendet.

1.1.2.2 Forschungsausblick 3D-Textilien im Produktbereich

In der Automobilindustrie kommen verschiedene 3D-Textilstrukturen zum Einsatz. Mithilfe von 3D-Großrundstricken ist die Herstellung eines Autositzbezuges in ca. 8 min möglich (s. Abbildung 3 (h)). Dabei liegt der Forschungsfokus hauptsächlich in der Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit bei einer besseren oder gleichbleibenden Produktqualität. Im aktuellen Stand der Forschung werden mithilfe von 3D-Abstandsgewirken Dachhimmel und Klimakomfortschichten gefertigt.

In der Bekleidung für die Sportindustrie werden Schuhoberteile mithilfe von 3D-Flachstricken und Sport-BHs mithilfe von 3D-Großrundstricken oder 3D-Abstandsgewirke hergestellt (s. Abbildung 3 (c) und (f)). Auch hier wird im aktuellen Stand der Forschung die Produktionsgeschwindigkeit erhöht, wobei die Fertigung eines Sport-BHs in z.B. 5 Minuten möglich wird. Wärme- und Schweißableitung in den Sportbekleidungen können mit Strukturen aus 3D-Abstandsgewirken realisiert werden.

Als Heimtextilien werden z.B. Matratzen aus 3D-Abstandsgewirken gefertigt. Im heutigen Stand der Forschung werden hier vor allem die Textilmaschinen weiterentwickelt, um höhere Produktionsgeschwindigkeiten zu ermöglichen.

In der Medizinindustrie ermöglicht 3D-Geflecht die Herstellung von patientenindividuellen Verzweigungsstents in einem Schritt (Abbildung 3 (a)). Mithilfe von 3D-Abstandsgewirken sind synthetische Gefäßtransplantate (Abbildung 3 (b)) und Orthesen produzierbar. Rundgewebe werden wegen ihrer blutundurchlässigen Strukturen ohne zusätzliche Beschichtung für Gefäßimplantate verwendet (Abbildung 3 (d) und (e)).

Die in der Luftfahrtindustrie verwendeten 6G-Antennen (Abbildung 3 (g)) können mithilfe von 3D-Wirk- und 3D-Gitterstrukturen realisiert werden. Mithilfe von 3D-Geweben wie in Abbildung 3 (i) wird an der Verstärkung von aufblasbaren Produkten wie zum Beispiel bei Flößen geforscht.

Abbildung 3, verschiedene Produkte aus 3D-Textilien als Teil des Stands der Forschung: a/d Verzweigungsstent (3D-Geflechte); b synthetische Gefäßtransplantate / Orthesen (3D-Abstandsgewirke); c, Schuhoberteile (3D-Flachstricken); f, Sport-BHs (3D-Großrundstricken, 3D-Abstandsgewirke); g, 6G-Antennen (3D-Wirk-/3D-Gitterstrukturen); h, Autositzbezug (3D-Großrundstricken); i, Verstärkung von aufblasbaren Produkten (3D-Gewebe)



a, b, f, h © ITA; c © STOLL; d, e © JOTEC; g © ESA; i © VUTS

1.1.3 3D-Druck in Kombination mit 2D-Textilien im Produktbereich

Das einfache Bedrucken von Textilien gehört bei Fashion wie bei technischen Textilien zum Stand der Technik. Der 3D-Druck, bei dem Material Schicht für Schicht aufgetragen und so dreidimensionale Gegenstände (Werkstücke) erzeugt werden, findet ebenfalls nach und nach Anwendungsfelder in der Modeindustrie aber auch im Automotivbereich. Abbildung 4 zeigt links ein Beispiel von Stratasys (PolyJet Druck: Poly-Jet Photopolymere) und rechts ein weiteres Beispiel des Textilmaschinenherstellers Karl Mayer.

Abbildung 4, links: Julia Körner, Stratasys (PolyJet Druck: Poly-Jet Photopolymere); rechts: 3D-Druck auf 2D-Textilien (Technik KARL MAYER Holding GmbH & Co. KG); 3D- Textilmaschine mit direkt angeschlossenem 3D- Druckverfahren



© Frankfurt-UAS, links, © KARL MAYER Holding GmbH & Co. KG, rechts

1.2 Fazit 3D-Druck und 3D-Textilien im Produktbereich, Ausblick Bauwesen

3D-Druckverfahren: Im Produktbereich dominieren bislang FDM-Drucktechnologien. Hier werden derzeit hauptsächlich Bauräume und Druckgeschwindigkeiten erhöht, um höhere Produktionskapazitäten zu erreichen. Die verwendeten, zumeist erdölbasierten Druckwerkstoffe, werden dabei perspektivisch ersetzt durch nachwachsende Rohstoffe oder es wird recyceltes Material verwendet, um Kreisläufe zu schließen.

3D-Textilherstellung: Die zu Beginn genannten Vorteile dreidimensionaler Textilstrukturen gehen einher mit einer geringeren Produktivität im Vergleich zur herkömmlichen 2D-Textilproduktion. Diese sinkt je nach Technologie um das 5-bis 10-fache, während die Maschineninvestitionen und Prozesskosten aufgrund komplexer Maschinenteile und eines anspruchsvolleren Maschinenhandlings entsprechend steigen. Der Einsatz von Abstandstextilien macht deshalb dort Sinn, wo über die aufwendige Fertigung des textilen Halbfertigteils vorab Funktionalitäten integriert und Prozessschritte reduziert werden können.

Ausblick Bauwesen: 3D-Abstandsgewebe und 3D-Abstandsgewirke sind die meist verwendeten 3D - Abstandstextilstrukturen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse stammen meist aus älteren Quellen (Roye 2007; Eckers 2011). Im Bauwesen wird, wenn dann hauptsächlich die Kettenwirktechnologie verwendet und werden AR-Glasfasern sowie Carbonfasern in kettengewirkten 3D-Abstandsgelegen verarbeitet. Im Stand der Forschung kommen auch Basalt-, Aramid-, Natur- und PES-Garne zur Anwendung (Roye 2007; Janetzko 2013; Scheffler 2010; Peled/Bentur/Mobasher 2017). Der Einsatz für Bauanwendungen wie beispielsweise als Betonbewehrung erlaubt, klassische Prozessschritte auf der Baustelle und Kosten zu reduzieren, indem das additive Herstellen von Stahlbewehrungen vermieden wird. Bislang kommen die kettengewirkten 3D-Abstandsgelege noch hauptsächlich in Estrichen als Bewehrung und als Fassadenplatten zum Einsatz (Beispiel: HERING Architectural Concrete (HAC), Produkt betoShell®).

2 Problemstellung

2.1 3D-Druck und 3D-Textilien im Baubereich

2.1.1 Stand der Technik 3D-Druck sowie 3D-Textilien im Baubereich

2.1.1.1 Stand der Technik, 3D-Druck im Baubereich

Im Baubereich dominiert bei mineralischen 3D-Druckmaterialien hauptsächlich Beton. Teilweise werden auch mit Lehm bereits größerer Bauten realisiert, sowie Metalldruck. Beispielhaft für etabliertere Prozesstechniken verwendete Materialien und Beispielbauten sind:

LDM-Betondruck

- 2020 erstes 3D-gedrucktes Gebäude in Deutschland, ein 2-geschossiges Einfamilienhaus in Beckum, Deutschland (Hous3Druck, Mense Korte GbR, PERI GmbH, Heidelberg Materials gedruckt vor Ort mit einem Portalsystem, einem Cobod BOD2 Drucke und einem 3D-Druckmörtel der Heidelberg Materials (i.tech® 3D)
- Fibonacci House Procter, British Columbia, Kanada (2020, Twente Additive Manufacturing (TAM)), vorgefertigt mit einem 9-Achs-Druckroboter (6-Achs Roboter auf 3-Achs-System) in einem Bauraum von 40m x 15m x 9m und gedruckt mit M68 (Druckmörtel) von Laticrete sowie mit 230 printcrete von Baumit

LDM-Lehmdruck

- Projekt TECLA, Massa Lomparda, Italien (2021, WASP, Mario Cucinella Architects), vor Ort gedruckt mit einem Crane Drucker der Firma WASP und lokalem Lehm in einer Zusammensetzung von 25 % Erdboden von der Baustelle (30 % Ton, 40 % Schluff und 30 % Sand) sowie 40 % strohgehackerter Reis, 25 % Reishülsen, und 10 % hydraulischer Kalk

BJ-Sanddruck:

- Projekt "Sandwaves" in Diriyya, Riad, Saudi-Arabien (2019, Arthur Mamou-Mani und Studio Precht in Kollaboration mit Design Lab Experience), gedruckt mit einem ExOne Printer, vorgefertigt im Werk und

gedruckt mit Furan, einem Bindemittel aus Furanharz auf der Basis von Zellulose von Nadelbäumen und Maiskörnern.

- Projekt MX3D Bridge in Amsterdam, Niederlande (2021, MX3D, Joris Laarman Lab, Arup), im Werk gedruckter Edelstahl mit einem Roboterschweißsystem und einem ABB Industrie-Roboter auf einem Schienensystem

Tabelle 1 zeigt eine Auswahl derzeit erhältlicher Drucker für verschiedene Materialien.

Tabelle 1, Auswahl derzeit erhältlicher Drucker für verschiedene Materialien

Druckertyp Hersteller	Druck- verfahren	3D-Drucker	3D-Drucker Eigenschaften	Materialien
Crane WASP WASP Preis: 132.000 € + Maker Economy Starter Kit Projekt: 3.2.1 / 3.2.2 / 3.2.3	LDM	Druckerkonstruktion Crane WASP Modulares System Bauraum 1 Crane WASP Einheit: 50 m ² 2 Crane WASP Einheit >100 m ²	Extruder LDM WASP XL Extruder Layerhöhe: min. 9 mm Düsendurchmesser: 18-30 mm Druckgeschwindigkeit: max. 300 mm/s Temperaturbereich Temperatur: 20-30°C (Use) Temperatur: 0-30°C (Warehouse)	3D-Druckmaterial Erdbasierte Materialien Beton Mörtel Geopolymere Druckmaterial von Drittanbietern möglich
BOD 2 COBOD Preis, durchschnittlich: 300.000 - 500.000 € Projekt: 3.1.1 / 3.1.4	LDM	Druckerkonstruktion Gantry System (Bez. Peri: Portalsystem) Modulares System Bauraum Abmessungen min./max. X-Achse: 2 m - 14,5 m Y-Achse: 2 m - unbegrenzt Z-Achse: 0,6 m - 8,1 m (Gebäude bis 3 OG)	Extruder Layerhöhe: 5-30 mm (Standard: 20mm) Layerbreite: 30-300 mm (Standard: 50mm) Druckgeschwindigkeit : 400-500 mm/s (aktuelle Druckgeschwindigkeit (2020), max. Druckgeschwindigkeit: 1 m/s) Besonderheiten "Height Map" für den ersten Layer auf unebenen Untergründe "tangential controlled nozzle" - rotierende Düse passt sich an die Druckrichtung an	3D-Druckmaterial Beton, Mörtel -Zuschlagstoffe bis 10 mm (Beton: 8-10 mm) -"gut verflüssigbar"- kann extrudiert werden, trägt sein Eigengewicht und bleibt in der gedruckten Form -"gut pumpbar" - lässt sich über lange Strecken pumpen -"gut formstabil"- trägt nach dem Bau eines Layers die Schichten darüber (Layer-Time) Druckmaterial von Drittanbietern möglich Bewehrungsmaterial Zuschlag von Fasermaterialien möglich (PP, Glas, Stahl, u.a.)
S-Max Pro ExOne Projekt: 3.5.1	BJ	Druckerkonstruktion 3-Achs-System geschlossener Bauraum Bauraum X/Y/Z-Achse: 1.800x1.000x700mm Bauvolumen: 1.260 l	Extruder Layerhöhe: 0,26 - 0,38mm Druckgeschwindigkeit: 125 l/h	3D-Druckmaterial Sand Bindemittel Furan, KHP, HHP, Anorganik

© Frankfurt UAS

2.1.1.2 Stand der Technik, 3D-Textilien im Baubereich, Fokus Textilbeton

Neben der Verwendung von Textilien insbesondere im Membranbau oder als Material für beispielsweise Sonnenschutzelemente, werden Textilien im Baubereich hauptsächlich als zwei- oder dreidimensionale Bewehrungen für Betonanwendungen eingesetzt.

Textilbeton: Für 6dTEX ist der Stand der Technik und Forschung im Bereich Textilbeton von Bedeutung, da mit dem Druck eines mineralischen Materials auf eine 3D-Textilstruktur in Bezug auf die Aktivierung der textilen Bewehrung und die Verbundwirkung relevante Themen tangiert werden. Textilbeton zeichnet sich durch seine an die Bauteilbelastungen angepasste Faserausrichtung bei gleichzeitig dünnwandigen Bauelementen sowie durch Korrosionsbeständigkeit aus. Im Vergleich zu Stahlbeton werden abhängig vom Anwendungsfall bis zu 85 % geringere Betonüberdeckungen benötigt, sodass sehr dünne und leichte Bauteile mit hoher Tragfähigkeit realisiert werden können (Curbach/Jesse 2009). Ein Beispiel ist das Carbonbetongebäude CUBE in Dresden, das als weltweit erstes Gebäude mit ausschließlich nichtmetallischer Bewehrung hergestellt wurde. Der Rohbau wurde im Februar 2022 fertiggestellt und es wird gezeigt, dass Carbonbeton auch neue, freie Formen ermöglicht. Die Wände wurden im Fertigteilwerk hergestellt. Der Beton wurde von Hand eingespritzt.

Fasermaterial: Die meist verwendeten Glasfasern oder Carbonfasern haben eine zwei- bis sechsfach höhere Festigkeit als Stahl. Mit Textilbewehrungen aus diesen Fasern ist die Herstellung von dünnwandigen, tragenden und korrosionsfreien Konstruktionen möglich. 52 % der Textilbetonanwendungen entfallen auf den Bereich der Gebäudehülle, 30 % werden in der Sanierung von Stahlbetonbauwerken eingesetzt. Die eingesetzte Textilbewehrung aus kettengewirkten Abstandsgewirken ist von der Bauteilgeometrie abhängig. Polyester-, Aramid- und Basaltfasern finden ebenfalls eine Anwendung. Die leicht zerbrechlichen Fasermaterialien, wie Glas und Carbon, sind meist mit einer Schlichte versehen, sodass sie in textile Strukturen verarbeitet werden können.

Schichten und Beschichtungen: Bei der Herstellung der Glasfasern wird die Filamentoberfläche mit einer Schlichte versehen, welche als Schutzschicht dient. Diese verringert z.B. die Filamentbrüche, die durch die Reibung während der Textilproduktion zustande kommen (Scheffler 2010). Die bei Textilbetonanwendungen verwendeten Beschichtungsmaterialien sind Epoxidharz, Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR-synthetisches Kautschuk) oder Polyacrylat (Janetzko 2013; El Kadi et al. 2019; Kulas/Hegger 2013; Preinstorfer 2020). Beschichtung mit Epoxid, SBR oder Polyacrylat finden für 3D-Textilien durch Tränkung und für 2D-Textilien durch Quetschung statt (Kulas/Hegger 2013). Der Beschichtungsprozess von 3D-Textilien ist analog zu 2D-Textilien. Die Ware wird durch ein Chemiebad (Spannrahmen) im exakt getimten Verfahren gezogen. Das Trocknen erfolgt durch das Ziehen über eine längere Strecke bei einer geringen Wärmezufuhr. Im Anschluss wird das Produkt konfektioniert. Für Innenanwendungen ist 40 °C Styrol-Butadien (Lefatex) als Rollenware möglich. Für Außenanwendungen ist 80 °C Polyacrylat bei Verwendung von Carbon Gelege geeignet, aber als Rollenware nicht möglich, sondern wird in Platten geschnitten (WILHELM KNEITZ Solutions in Textile GmbH). Steife, mit Epoxidharz getränkte Bewehrungen werden in Gebäudehüllen mit 2D-Geometrien eingesetzt sowie für Strukturbauteile mit hohen Festigkeiten. Formflexible Textilbewehrungen mit Styrol-Butadien-Tränkung werden bei 3D-gekrümmten Bauteilen oder der Sanierung von Flächentragwerken verwendet. Ungetränkte Textilien wurden bis 2010 verwendet (Kimm/Gries 2021).

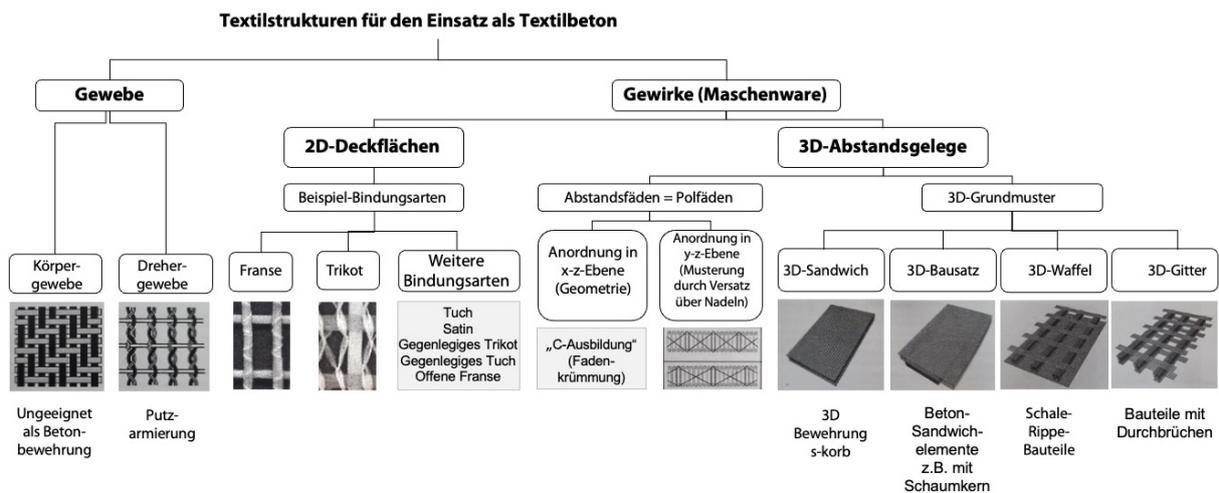
Textile Gebilde: Die textilen Geometrien der dreidimensionalen, kettengewirkten Abstandsgewirke und Abstandsgewirke lassen sich dabei in vier 3D-Grundmuster einteilen, die zu unterschiedlichen Produkten und Anwendungen führen (vgl. Abbildung 5). Das 3D-Sandwichmuster bildet die klassische Form eines Abstandsgewirkes. Es eignet sich für flächige Bauteile ohne Konturen, die insbesondere als Bewehrungskörbe beim Betongießverfahren eingesetzt werden. Durch die Integration eines Formkörpers, beispielsweise eines Schaumkernes in das Fadengebinde, lassen sich beim Grundmuster 3D-Bausatz Beton-Sandwich-elemente herstellen. Des Weiteren existieren die Grundmuster 3D-Waffel sowie 3D-Gitter. Das 3D-Waffelmuster besteht aus Stegen mit mehreren Rovings einer definierten Breite, welche sich in definierten Abständen wiederholen. Die Stehfäden auf der Unterseite des Textils sind dichter angeordnet, sodass sich die Ober- und Unterseite unterscheidet. Der Typ 3D-Waffel eignet sich als Bewehrung für Schale-Rippe Bauteile. Das Grundmuster 3D-Gitter besteht aus zwei exakt gegenüberliegenden Deckflächen aus Längs- und Querstegen, sodass große, durchgehende Aussparungen ermöglicht werden. Dieses Muster wird bei endkonturnaher Bewehrung von Bauteilen mit Durchbrüchen eingesetzt. Die gitterförmigen 2D- und 3D-Textilien werden mithilfe von Kettenwirken oder Dreherweben produziert. Die Herstellung der Textilbetonfertigteile erfolgt durch Befüllen / Laminieren oder Spritzgussverarbeitung.

Auch faserverstärkte Polymere (FRP) werden als korrosionsfreie Betonbewehrung verwendet. FRP-Stäbe und Textilbewehrung weisen keine deutliche Abgrenzung voneinander auf. Die Realisierung von 1D-, 2D- und 3D-Bewehrungsstrukturen sind möglich. 3D-Textilien lassen sich auch durch zusammengesetzte 1D-Stangen oder Produktionsverfahren aus der Textilindustrie herstellen (WILHELM KNEITZ Solutions in Textile GmbH). Polymerdispersionen führen zu einer geringeren Steifigkeit als reaktive Polymere (Reichenbach et al. 2021).

Anwendungen: Textilbewehrte Fassadenplatten aus Beton wurden 2002 erstmals am Institut für Massivbau der RWTH Aachen im Maßstab 1:1 realisiert. Nachteile dieses sehr einfachen, aber arbeitsintensiven Herstellungsverfahrens waren Schwierigkeiten bei der exakten Positionierung der textilen Verstärkungslage. Ist die textile Verstärkung nicht tragwerksrelevant, wie bei Anwendungen im Bereich Geotextilien, kommen auch Abstandsgewirke zum Einsatz: „Concrete Canvas“ nutzt beispielsweise textile 3D-Strukturen in

Kombination mit einer integrierten Trockenbetonmischung zur Herstellung von zementartigen Verbundstoffmatten für Böschungsbefestigungen oder auch zum Aufbau eingeschossiger Schutzhütten (Giglio/Paoletti/Conti 2022). Produktbeispiele für Anwendungen von 3D-Textilien im Baubereich sind Betonfassadenplatten, Fußböden, Uferschutzelemente sowie Betonmöbel wie beispielsweise Küchenzeilen und Treppen. Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit des Textils besteht zudem die Möglichkeit, einzelne Bereiche des Textils sichtbar an der Oberfläche zu lassen - entweder als Bewehrungsstruktur für einen zusätzlich aufgetragenen Ort beton oder als potentielle Unterspannung (Abbildung 6). Eingesetzt werden 3D-Textilien aus AR-Glasfasern oder Carbon mit einer Franse-Bindung. Ein gängiges 3D-Muster ist das 3D-Gitter.

Abbildung 5, Übersicht Textile Gebilde, Muster und Bauanwendungen



© ITA

Der Markteinsatz von 3D-kettengewirkten Gelegen ist minimal. In der Praxis gibt es nach einer Studie aus 2021 (Reichenbach et al., 2021) weltweit nur einen Hersteller, die Firma Kneitz, die mit einer entsprechenden Maschine 3D-Textilien herstellt, derzeit für Möbel, zur Estrichbewehrung und für Fassadenplatten, Beispiele siehe Abbildung 6. Eine Alternative zum klassischen Textilbeton bietet zuletzt verstärkter Verbundstoff auf Basis eines Abstandsgewirkes auf Zementbasis, das patentierte „Concrete Canvas“ („Concrete Canvas - Concrete Canvas® DE,“ n.d.). Die Hydratisierung erfolgt durch vollständiges Eintauchen in Süß- oder Salzwasser, die Fasern verstärken die Zementmischung nach dem Aushärten. Das Material kommt als Geotextil (nicht tragend) zum Einsatz und wird für reingeschossige Gebäude verwendet. Insbesondere der hohe Zementanteil stellt eine Herausforderung dar.

Abbildung 6, links: Küchenplatte aus kettengewirkten 3D-Abstandsgelegen, rechts: Oberflächennahe Positionierung des 3D-Textils



@ <https://solutions-in-textile.com/file/kuechenarbeitsplatte.pdf>

2.1.2 Stand der Forschung 3D-Druck sowie 3D-Textilien im Baubereich

2.1.2.1 Stand der Forschung, 3D-Druck im Baubereich

Im Wesentlichen lassen sich in der Forschung folgende Themen identifizieren: Druckmaterialien, Druckprozesse, die Integration von Bewehrung und die Reduktion des Schalungsaufwands.

Im Bereich des mineralischen Druckmaterials und der Druckprozesse steht vor allem Beton im Fokus. Nachdem druckbare Betonrezepturen verfügbar sind, geht es um Zementersatzstoffe unter Beibehalt der Druckfähigkeit sowie generell um Möglichkeiten der Materialreduktionen (Breseghello and Naboni, 2022) und Funktionserweiterungen (Dielemans et al., 2021). Bei den Prozessen wird vor allem an der Verbesserung der derzeit hauptsächlich verwendeten LDM-Verfahren gearbeitet, d.h. an der Entwicklung praxisorientierter Methoden für den 3D-Druck des Verbundwerkstoffs Stahlbeton (Zukunft Bau Projekt 10.08.18.7-21.23) und an flexibleren, bauraumoffenen Verfahren mit Großraumrobotern (Mechtcherine et al., 2020). Alternativ zu den LDM-Verfahren wird an Large Particle 3D Concrete Printing (LP3DCP), (Mai et al., 2021), Selective Cement Activation (SCA), (Talke et al., 2019) und Verfahren mit Spritzbeton (Kloft et al., 2019) geforscht. Zudem werden verschiedene Möglichkeiten der Integration von Bewehrungen untersucht (siehe Kapitel 2.1.2.2). Im Fokus stehen neben dem Betondruck außerdem der Lehmdruck in Kombination mit Beton (Zukunft Bau Projekt 10.08.18.7-22.259) und die robotergestützte Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm (Zukunft Bau Projekt 10.08.18.7-18.45). Vereinzelt werden auch erste Untersuchungen zum Glasdruck durchgeführt (Ramsgaard Thomsen et al., 2020), (Von Witzendorff et al., 2018). Daneben werden kreislauffähige Kunststoffe und nachwachsende Materialien betrachtet (Turhan et al., 2022), (Vieres et al., 2022), die auch die direkte Integration von Fasermaterialien beinhalten. Zu letzterem forscht das ITKE im Projekt 3DNaturDruck im Cluster of Excellence IntCDC. Zuletzt werden auch die Sekundärrohstoffkreise betrachtet, die den CO₂-Fußabdruck z.B. über Schalungsmaterial belasten. Erforscht werden kreislauffähige Schalungssysteme u.a. am ILEK in Stuttgart, bei denen die Herstellung dieser Schalungen auf einer Kombination von additiver Fertigung (3D-Druck in einem Pulverbett) sowie einer speziell entwickelten Mischung aus Sand und einem organischen wasserlöslichen Bindemittel besteht (Kovaleva et al., 2022).

2.1.2.2 Stand der Forschung, 3D-Textilien im Baubereich, Textilbeton

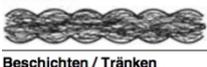
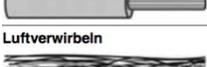
Der Stand der Forschung zum Thema Textilbeton zeigt zwei Tendenzen. Zum einen gibt es neuere FuE Projekte, die an die Textilbetonforschungen aus den 2010'er Jahren anknüpfen. Dazu gehören u.a. Forschungen der Universität Brüssel (El Kadi et al., 2022) die zeigen, wie durch zusätzliches und gezieltes Einfügen von wenigen Abstandshaltern in das 3D-Textil auch ein erheblicher mechanischer Mehrwert entsteht. Die Technik sollte ursprünglich nur die Herstellung erleichtern. Dieselbe Forschungsgruppe hatte bereits vorher festgestellt (El Kadi et al., 2019), dass im Vergleich zu ihren 2D-Äquivalenten beim Biegeverhalten der 3D-Textilbewehrung eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit der dritten Stufe um etwa 25 % bei den 3D-TRCs zu beobachten ist. Und dies ohne den Volumenanteil der Fasern in der Ebene des Verbundwerkstoffs zu erhöhen. Aus älteren Studien betreffen relevante Ergebnisse die Aktivierung des Faseranteils mit und ohne Beschichtung im Beton, die Oberflächenstrukturen der jeweiligen Rovings sowie die Integration von GFK Stäben in 3D-Textilstrukturen.

Beschichtung: Bei 3D-Textilien weisen getränkte, beschichtete Strukturen eine höhere Tragfähigkeit als ungetränkte Strukturen auf (Janetzko 2013). Die Beschichtung verbessert das Rissverhalten des Betons. Die Garne in Z-Richtung des 3D-Textils, d. h. die Verbundwerkstoffdicke, beeinflussen die Verbundwerkstoffleistung stark. Hochleistungsgarne in Z-Richtung, wie Aramid, verbessern die Festigkeit und Zähigkeit des zementbasierten Verbundstoffs im Vergleich zu Garnen mit geringer Leistung wie PES. Je größer der relative Anteil an Hochleistungsgarnen in Z-Richtung ist, desto besser ist die Verbundwerkstoffleistung (Sasi/Peled 2015). Neben den gängigen Epoxidharz- und SBR-Beschichtungen (SBR: Styrene Butadiene Rubber) gibt es auch PVA-Zement-Composite Beschichtungsmassen, die eine bessere Durchdringung des Rovings mit Zementleim aufweisen und somit den Verbund verbessern (Micheal Glowania et al. 2009). Bzgl. des Beschichtungsverfahrens wird ein Tauchbad für Epoxidharz und SBR in Kombination mit einer Heizstrecke verwendet. Hier kann die Epoxidharzbeschichtung zusätzlich mit Silikastaub versehen werden, um die Haftfestigkeit zu erhöhen (Nadiv et al. 2017). Ohne Beschichtung spielt die Bindungsart für die Eigenschaften

des Verbundkörpers eine Rolle. Die Verbundfestigkeit ist bei einer Trikot-Bindung besser als bei einer Franse-Bindung. Die Drucksteifigkeit zeigt eine Abhängigkeit von der Abstandsfadenbindung (Roye 2007).

Oberflächenstrukturen: Generell gibt es zur Verbesserung des inneren und äußeren Verbundes zwischen den Filamenten verschiedene Möglichkeiten, welche in Abbildung 7 dargestellt sind.

Abbildung 7, Möglichkeiten zur Verbesserung des Verbundes im Textilbetonbau (Kulas/Hegger 2013)

Textile Technologie Garnstruktur	Verbesserung des Verbundes
Friktionsspinnen 	äußerer Verbund: raue Oberfläche innerer Verbund: erhöhte Reibung zwischen den Filamenten
Cablieren 	äußerer Verbund: Rippenstruktur innerer Verbund: erhöhte Reibung zwischen den Filamenten
Zwirnen 	innerer Verbund: erhöhte Reibung zwischen den Filamenten
Profilieren 	äußerer Verbund: Strukturierung der thermoplastischen Oberfläche von Friktionsspinn-Hybridgarnen
Beschichten / Tränken 	innerer Verbund: erhöhte Reibung zwischen den Filamenten
Luftverwirbeln 	äußerer Verbund: Schaffung von Freiräumen für die Betonmatrix und durch Strukturierung der Garnoberfläche
Spreizen 	äußerer Verbund: Schaffung einer größeren Kontaktfläche zur Betonmatrix durch Aktivierung mehrerer Filamente

© Kulas/Hegger

GFK-Stäbe: Auch die Realisierung hybrider Bewehrungen mit GFK-Stäben in biaxialen Gewirken ist sinnvoll, da sie nicht schweißbar sind und einen aufwendigeren Zusammenbau zu Bewehrungskörben aufweisen. Dabei werden GFK-Stäbe in Schussrichtung integriert. Diese haben tragfähigkeitssteigernde Eigenschaften und finden eine Anwendung in großformatigen Fassadenplatten oder Textilbetonbrücken. Mit Stabwerken ist die Herstellung von vorgespannten Textilbetonbauteilen möglich. Herausforderung dabei ist, die GFK-Stäbe in Quer- und Produktionsrichtung in textile Strukturen zu integrieren. Das Produktionskonzept basiert auf einer modifizierten Abstandswirktechnologie für die Konstruktion von 2D- und 3D-Textilstrukturen mit GFK-Stäben (Janetzko 2013).

Abbildung 8, Integration von Textiler Bewehrung im 3D-Betondruckprozess



© ITA

Als aktuelles Thema des Textilbetons stellt sich zuletzt das 3D-Betondrucken dar. Varianten zur Integration textiler Bewehrungen in den 3D-Druckprozess sind:

- einseitiges, vertikales Bedrucken des Textils (Grolms 2021) s. auch Abbildung 8
- 3D-Spritzbetonverfahren mit gleichzeitiger, robotergestützter Integration linearer, lastpfadgerechter, textiler Bewehrungen (Deutsche BauZeitschrift 2019)
- Prepreg-Ansatz mit Einsatz von vorimprägnierten Textilien, deren Konsolidierung nach einem definierten Aushärtemechanismus während des Abbindens des Betons erfolgt. Ziel ist die lastpfadgerechte, materialminimierte Konstruktion (Scheurer, k.A.).

2.1.2.3 Stand der Forschung, 3D-Textilien im Baubereich

Beim Thema Textilbeton tritt das Textil optisch nicht in Erscheinung. Forschungen an der Frankfurt UAS zeigen alternativ, wie durch das Befüllen von Abstandstextilien mit geschäumten Materialien opake, leichte und in der Herstellung schalungsfreie Bauteile entstehen können. Im Projekt Ge3TEX wurden sortenreine Verbundwerkstoffen mit Gradientenpotential entwickelt, für neuartige, selbsttragende Leichtbauteile aus technischen Textilien bzw. Abstandstextilien. Das Projekt zeigt zwei mineralische und eine polymerbasierte Verbundmaterialvariante aus jeweils gleichen Werkstoffgruppen. Die Textilien werden dabei zur Stabilisierung und Dämmung mit geschäumten Werkstoffen kombiniert und dienen sowohl als verlorene Schalung, wie als strukturelles Element zur Aufnahme von Zugkräften (Lüling et al., 2021). Untersucht wurden:

- Basaltfaser-Abstandsgewebe in Kombination mit mineralisiertem Schaum und hochfestem Beton
- Glasfaser-Abstandsgewebe in Kombination mit einer Bläh-/Wasserglasmatrix
- Abstandstextilien aus recyceltem Polyethylenterephthalat (rPET) in Kombination mit rPET-Partikelschaum

Ebenso zeigen Forschungen an der Frankfurt UAS das Potential von Abstandstextilien im Bereich Sonnenschutz. Im Projekt „ReFaTex - Reversibel faltbare, energetisch wirksame 3D-Textilien im Baubereich“ wurden u.a. reversibel faltbare, biegbare und aufblasbare Elemente zur Optimierung von Sonnenschutzelementen mit kontrolliertem Tageslichteinfall zur Verhinderung von Überhitzungen im Innenraum (Lüling et al., 2022) untersucht. Forschungen am DITF (Deutsches Institut für Textil- und Faserforschung) zeigen darüber hinaus, wie der Zwischenraum von Abstandstextilien beispielsweise auch für thermische Zwecke und zur Ausbildung eines textilen Solarkollektors funktionalisiert werden kann (DITV 3.6.2017).

2.1.2.4 Zwischenfazit

Es gibt ausgereifte 3D-Druckverfahren im Baubereich, die aber noch nie im Zusammenhang mit 3D-Textilien betrachtet wurden. Weder unter dem Aspekt letztere als verlorene Schalung zu nutzen, noch um diese als Teil der Bewehrung zu nutzen. Gleichzeitig zeigen Forschungen im Bereich Textilbeton, wie die 3D-Textilien im Vergleich zu 2D-Textilien eine genauere Positionierung der Bewehrung in der Betonmatrix ermöglichen, u.a., weil die einzelnen Textillagen mithilfe von steifen Polfäden genau an der gewünschten Position gehalten werden können. Da die Produktionsgeschwindigkeit von 3D-Textilien aber ca. 10-fach langsamer ist als die von 2D-Textilien sind 3D-Textilien teurer als 2D-Textilien. Andererseits entstehen dafür Mehrwerte durch mögliche serielle Vorfabrikation und durch die höhere Robustheit der fertigen Betonteile, die eine reduzierte Delaminationsgefahr im Vergleich zur Bewehrung mit 2D-Textilien haben. In Kombination mit dem möglichen Befüllen der 3D-Textilstrukturen und deren gleichzeitige Verwendung als verlorene Schalung werden zudem potentiell Sekundärmaterialkreisläufe eingespart. Zuletzt sind in Kombination mit materialsparenden, linearen oder punktuellen Druckstrukturen lastflussgerechte Aussteifungs- und Tragwerkoptimierungen zu erwarten.

2.1.3 Stand der Forschung 3D-Druck auf Textilien

2.1.3.1 Stand der Forschung, 3D-Druck auf 2D-Textilien

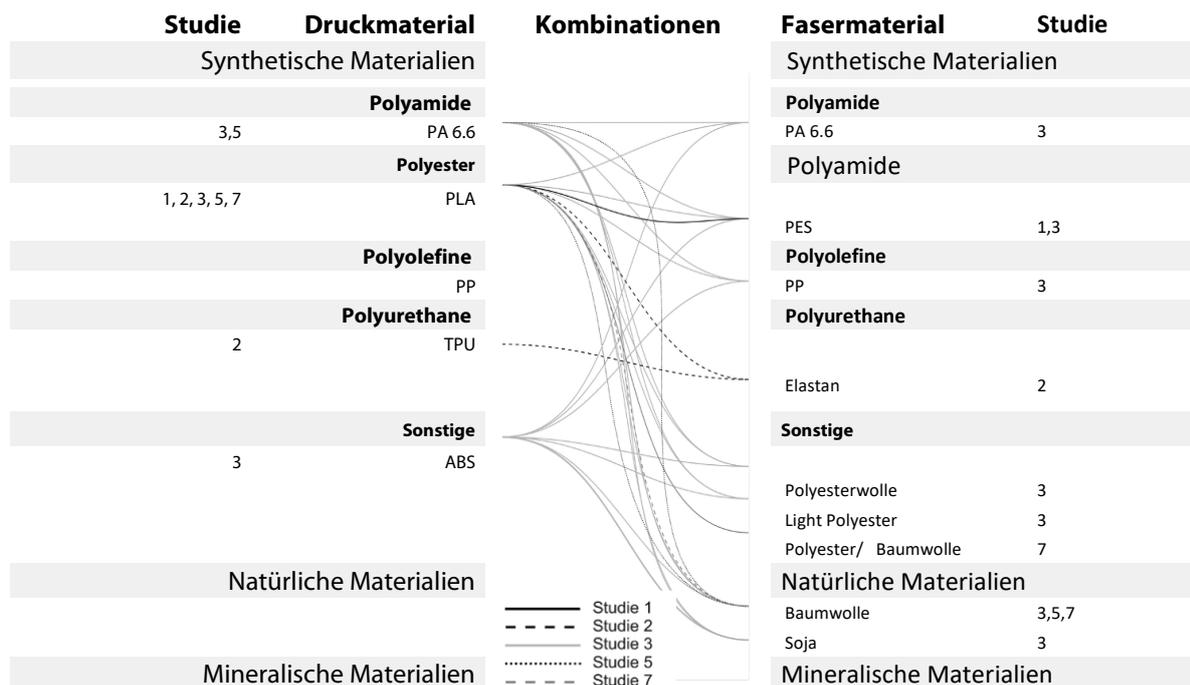
Für 6dTEX wurden mangels Studien zum 3D-Druck auf 3D-Textilien, Studien zum Druck auf 2D-Textilien ausgewertet. Insgesamt wurden im Wesentlichen fünf Studien verglichen. Keine der Studien behandelt den 3D-Druck mit mineralischem Druckmaterial. Die Studien umfassen Fragen zu den Einflüssen von gestrickten Oberflächen auf das Ablösen von aufgedruckten Elementen, Studie 1 (Narula et al., 2018), den Druck mit Polymermaterialien auf Textilien, Studie 3 (Pei et al., 2015), Untersuchungen zu Haftungskriterien beim 3D-Druck auf textile Oberflächen, Studie 5 und 8 (Gorlachova and Mahltig, 2021), (Malengier, B et al., 2018) sowie

3D-Druck auf Textilien und mögliche Zusatzfunktionalisierungen über das Bedrucken, Studie 7 (Čuk et al., 2020). Wesentliche Informationen und Parameter für 6dTEX und für den 3D-Druck auf 3D-Textil betreffen folgende Punkte:

- die Art der Versuche, um den Haftverbund nachzuweisen
- wesentliche Druckparameter die den Haftverbund verbessern
- wesentliche Textilparameter die den Haftverbund verbessern
- die Art der untersuchten Werkstoffkombinationen (Kreislauffähigkeit)

Es werden Haft-, Schäl-, und Scherversuche aufgeführt, am wichtigsten sind die erstgenannten. Nach Studie 8 eignet sich der Haftzugversuch am besten um die Druckparameter einzustellen (Scher- und Schältest sollten danach durchgeführt werden). Als häufigster Druckparameter für den Kunststoffdruck werden die Z-Distanz, dann die Drucktemperatur sowie zuletzt Druck- und Fördergeschwindigkeit, die Druckbetttemperatur sowie Outline, Infill und Druckrichtung genannt. Wichtige Aussagen betreffen die Tatsache, dass eine lineare Abnahme der Haftung bei Erhöhung der Druckgeschwindigkeit festzustellen ist (Studie 1) und die Tatsache, dass hohe Drucktemperaturen und ein zähflüssigeres Filament, das tiefer in das Textil eindringt, ebenfalls die Haftung verbessern (Studie 5). Was die Textilparameter betrifft, wurden gleichermaßen die Themen Porengeometrie, Bindung/Webdichte, Textilgewicht und -höhe, hydrophiles bzw. hydrophobes Verhalten und zuletzt Haarigkeit und Rauigkeit genannt.

Tabelle 2, Auswertung der Materialkombinationen von Forschungsstudien zu 3D-Druck auf 2D-Textil



© Frankfurt UAS

Wichtig für 6dTEX sind hier u.a. geometrische Aussagen aus der Studie 1. Hier wird eine bessere Haftung bei kreisförmigen Poren festgestellt und dokumentiert, dass eine größere Porenfläche die Haftung erhöht; die Kombination von Porengeometrie und Fläche steht in indirekter Abhängigkeit zur Schälfestigkeit (Haftung). Keine der gefundenen Studien beschäftigt sich mit dem Druck von mineralischem Material auf Textil, siehe Tabelle 2. Nur eine Abschlussarbeit der Universität Bologna (Naldoni, 2016) beschäftigt sich mit Lehmdruck auf vorgespannte textile Schalenkonstruktionen für temporäre Unterkünfte. Ebenfalls wird in keiner Studie das Thema Multimaterial und die damit verbundenen Nachteile in Bezug auf die Kreislauffähigkeit thematisiert.

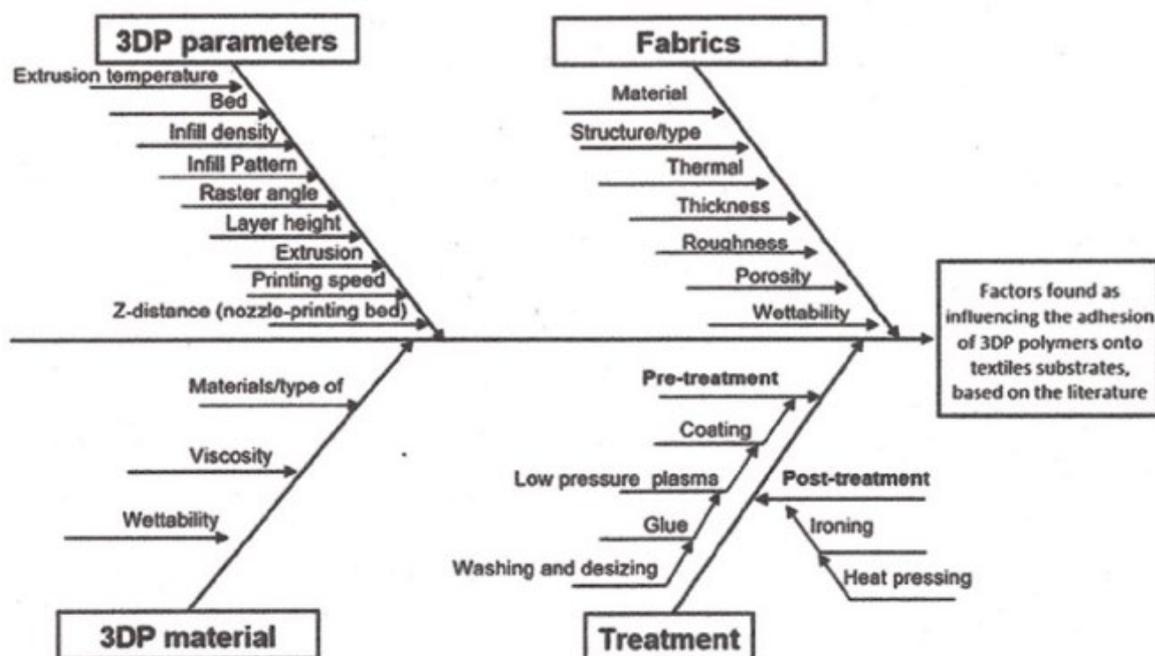
2.2. Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Additive Herstellungsverfahren sind sowohl im Bereich Drucken wie auch im Bereich Textilherstellung Stand der Technik. Konkrete Anwendungen und weiterführende FuE-Projekte im Bauwesen finden sich aber nur zu den jeweils einzelnen Teilbereichen 3D-Druck und 3D-Textilien.

Als Stand der Technik der additiven Fertigung im Bauwesen hat sich inzwischen der Betondruck bzw. das 3D Concrete Printing etabliert (3DCP). Offen ist die Frage der Integration von Bewehrung in den Druckprozess, welche aktuell in unterschiedlichen Varianten in FuE Projekten erforscht wird. Alternativ wird der Druck mit anderen, nichtbrennbaren Druckmaterialien, wie Lehm oder Metallen untersucht. Zusätzlich werden in FuE-Projekten zudem erste Versuche mit Glasdruck durchgeführt (Von Witzendorff et al., 2018), (Ramsgaard Thomsen et al., 2020). Stand der Technik im Bauwesen für 3D-Textilien ist ihr Einsatz als textile Bewehrung. Konkrete Anwendung finden die 3D-Textilstrukturen aber bislang nur in Form von Fassadenplatten und als Estrichbewehrung. In der Praxis gibt es nach einer Studie aus 2021 (Reichenbach et al., 2021) weltweit nur einen Hersteller, der mit einer entsprechenden Maschine 3D-Textilien herstellt und vertreibt. Weitere Einsatzmöglichkeiten von 3D-Textilien im Bauwesen wie z.B. die synergetische Kombination als verlorene Schalung und Bewehrungsstruktur wurden bislang nur in FuE-Projekten untersucht.

Eine komplette Forschungslücke besteht in der Kombination beider 3D-Technologien, obwohl theoretisch durch die Verbindung des 3D-Drucks mit 3D-Textilien zu erwarten ist, dass neuartige Leichtbauelemente für den Dach- und Wandbereich entstehen können. Sie bestehen aus einer gezielt lastflussgerecht aufgetragenen 3D-Druckstruktur zusammen mit einem als verlorene Schalung wie als Bewehrung eingesetztem 3D-Textil. Als wissenschaftliche Grundlage für die dafür notwendige Haftung zwischen Druck- und Textilmaterial dienen Studien zum 3D-Druck auf 2D-Textilien. Eine neue Studie (Abbildung 9) zum Thema fasst die bisherigen Erkenntnisse bezüglich 2D-Textil zusammen und identifiziert als wesentliche Faktoren für den Verbund den Abstand des Druckkopfs zum Textil, zusammen mit der Porosität des Textils und seiner Benetzbarkeit (Popescu and Amza, 2022). In den Studien wurde der Druck mit mineralischen Materialien bislang ebenso wenig untersucht wie eine verbesserte Kreislauffähigkeit durch die Verwendung von Druck- und Textilmaterialien gleicher Werkstoffgruppen.

Abbildung 9, Faktoren, die die Haftung zwischen 3D gedruckten Polymeren und 2D-Textilien beeinflussen



© Popescu und Amza, 2022

3 Zielstellung

3.1 Konkrete Projektziele

Mit der Kombination von 3D-Textilien mit Verfahrenstechniken des 3D-Drucks sollen die Grundlagen für die Herstellung nachhaltiger, recycelbarer Leichtbauteile für den Neubau wie für die Sanierung gelegt werden. Beide Verfahren ermöglichen die individuelle Definition des verwendeten Materials wie auch die Definition einer im Verbund funktionsoptimierten, geometrisch-räumlichen Gestaltung. Ziel ist die Ausbildung anwendungsbezogener Mesomaterialstrukturen für neue Mono-Verbundmaterialien aus faser- und porenbasierten Werkstoffen. Zuletzt sollen erste Demonstratoren aus einem mineralischen Materialverbund wie aus einem nicht-mineralischem Materialverbund erste Bauteile im Maßstab 1:1 hergestellt werden.

Konkrete Forschungsfragen sind:

- Material: Wie ist eine ausreichende Haftung/Anbindung zwischen den in Abstandstextilien eingesetzten Rovings bzw. Garnen aus Polymermaterialien und mineralischen Materialien und den Druckwerkstoffen entsprechender Materialität sicherzustellen?
- Prozess: Wie kann eine Fixierung der Abstandstextilien im 3D-Drucker ohne Störung des Druckprozesses erfolgen und wie reagiert der Drucker auf den Untergrund des elastischen, nicht steifen 3D-Textils in den beiden Werkstoffgruppen mineralisch und nicht-mineralisch?
- Mesostruktur: Welche Strukturen lassen sich generell herstellen? Welche Steifigkeiten für selbsttragende Bauteile sind erreichbar bzw. alternativ? Welche Bewegungsoptionen ergeben sich im Verbund?
- Gestaltung: Welche Gestaltungsoptionen ergeben sich zuletzt für Anwendungen im Bereich Wand-/Fassadenbauteile oder im Bereich Decken-/Dachbauteile?

3.2 Übergeordnete Ziele, Beitrag des Projekts

Das Projekt ist Teil der Arbeiten des Forschungslabors ReSULT (Research Lab for Sustainable Lightweight Building Technology). Alle Projekte haben das Ziel klassische Aspekte des Leichtbaus mit Nachhaltigkeitsthemen zu verbinden. Es geht um minimalen Materialverbrauch zur Herstellung zukunftsfähiger Bauteile bei maximaler Funktionalität der Elemente - dies in Verbindung mit Kreislauffähigkeit und Reduktion des CO₂-Fußabdrucks. 6dTEX untersucht in diesem Zusammenhang inwieweit durch die Verbindung von dreidimensionalen Textil- und Druckstrukturen formaktive Bauteile herstellbar sind, die mit geringen Materialverbrauch durch lastflussgerechte, konstruktive Gestaltung überzeugen und eine hohe Funktionalität haben.

4 Forschungsdesign

Abbildung 10, 6dTEX Methodik



4.1 Arbeitshypothesen

Durch additive Materialeinträge auf und in anwendungsbezogen produzierte Abstandstextilien können gezielt Funktionalisierungen für nachhaltige Leichtbauelemente erreicht werden, differenziert nach statischen und beweglichen Bauteilen.

Statische Elemente:

- reliefartige 3D-Druckstrukturen auf oder in den textilen Decklagen steifen das Textil aus und erhöhen seine tragenden Eigenschaften
- das Biegeverhalten der aufgedruckten 3D-Tragstrukturen verbessert sich durch den Verbund mit dem 3D-Textil
- beidseitig aufgedruckte Tragstrukturen ermöglichen thermisch getrennte Tragkonstruktionen
- das 3D-Textil dient als verlorene Schalung mit Dämmeigenschaften für selbsttragende Halbfertigteile
- die aufgedruckten Strukturen können passgenau für die Fügung individueller Serienelemente gestaltet werden

Bewegliche Elemente:

- reliefartige 3D-Druckstrukturen auf das vorkomprimierte oder vorgedehnte Abstandstextil bewirken Krümmungen, Biegungen oder Raffungen der Elemente
- das gezielte Bedrucken des in X-, Y- und Z-Richtung geometrisch wirksamen Textils bewirkt die mechanische Bündelung vordefinierter Textilbereiche, die dadurch im Verhältnis zu anderen Bereichen des Textils separat gefasst und bewegt werden können

4.2 Methodischer Ansatz

Die Untersuchungen zur erstmaligen Verknüpfung der beschriebenen Technologien werden experimentell und iterativ durchgeführt, s. Abbildung 10.

Die Frankfurt UAS fokussiert sich dabei auf die 3D-Drucktechnologien und die Entwicklung von Anwendungsszenarien, aus denen geometrische Parameter für den 3D-Druck wie für die 3D-Textilherstellung, für die Prüfserien und zuletzt für Demonstratoren im Maßstab 1:1 abgeleitet werden. Das ITA ergänzt dies mit der Entwicklung und Herstellung unterschiedlicher textiler Geometrien, der Bewertung der entstandenen textilen 3D-Strukturen wie die der neuen Verbundelemente aus 3D-Druck und 3D-Textil in Form von Haftzug- und Biegezugmessungen. Abbildung 10 zeigt die einzelnen Schritte des iterativen Prozesses, vom Material über die damit verbundenen Herstelltechniken bis hin zur Verbundoptimierung - angefangen mit Tests auf 2D-Textilien (Flächentextilien) hin zu 3D-Textilien (Abstandstextilien) - und der Herstellung von Demonstratoren in zwei Monomaterialverbunden.

4.3. Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Das Projektteam besteht aus der Frankfurt University of Applied Sciences (Frankfurt UAS) und dem Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University. Die organisatorische und inhaltlich-konzeptionelle Projektleitung liegt bei der Frankfurt UAS, ebenso der 3D-Druck. Für die Herstellung der 3D-Textilien ist das ITA verantwortlich, ebenso für die erforderlichen mechanischen Prüfungen der neuen Verbundwerkstoffe und die Auswertung der Testreihen.

Im Lauf des Projekts konnten als Kooperationspartner die Heidelberg Materials gewonnen werden, die das Projekt in der Phase der Skalierung des Betondrucks mit Material und Druckkapazitäten unterstützt hat. Außerdem konnte das Laserzentrum Hannover e.V. für erste orientierende Versuch zum 3D-Glasdruck auf 2D-Glastextilien gewonnen werden.

4.4 Arbeitspakete und Meilensteine

Geplant waren vier Arbeitspakete:

AP 1: Es wird ein Verfahrensvergleich mit Bewertung von Kombinationen aus textilen Flächen- bzw. Sandwichstrukturen und 3D-Druckverfahren gleicher Werkstoffgruppen durchgeführt. Basierend auf etablierten 3D-Textilstrukturen erfolgen erste Druckversuche (FFF, MJM, SLA (SLM/SLS)) zur Untersuchung der Materialhaftung polymerer und mineralischer Druck- und Fasermaterialien. Dazu werden bisherige Produktionstechnologien modifiziert. Dies betrifft u. a. die Entwicklung einer Spannvorrichtung für die 3D-Textilstrukturen zur positionsgetreuen Ausrichtung der Textilien während des Druckverfahrens.

AP 2: Auf Basis der Ergebnisse aus AP 1 werden neue 3D-Textilstrukturen (Material- und Designvarianten) entwickelt und erste Druckstrukturen gezielt entworfen und experimentell untersucht, die zunächst AUF das 3D-Textil gedruckt werden. Unterschieden wird dabei grundsätzlich zwischen glatten und reliefartigen Strukturen. Diesbezüglich stehen steife und elastische, sowie opake und transluzente Oberflächen- als flächige bzw. punktuelle Druckstrukturen im Fokus der grundlegenden Untersuchungen.

AP 3: Aufbauend auf AP 2 werden erstmalig Druckstrukturen IN bzw. innerhalb des 3D-Textils untersucht, d. h. die Herstellung von 3D-Druckstrukturen in X-, Y- und Z-Richtung. Dies insbesondere mit MJM- und SLA- (SLM/SLS) Druckverfahren, wobei die textile Struktur zugleich als Stützstruktur fungiert. Die 3D-Verstärkungen innerhalb des 3D-Textils bieten neue Möglichkeiten hinsichtlich Steifigkeit, Formbarkeit und Funktionalisierung.

AP4: Zuletzt werden erste Anwendungsszenarien entwickelt, die das architektonische Potential der neuen Technologiekombination im Bereich Gebäudehülle aufzeigen (Wand-/Dachbereich). Betrachtet werden unterschiedliche Funktions- und Gestaltmechanismen im Verbund: z.B. Licht, Wärme, Feuchte und Faltung, Biegung, Dehnung sowie Fügung. Ein Leitfaden macht die Ergebnisse des 6dTEX-Projekts für Externe nutzbar.

5 Projektverlauf

5.1 6dTEX: Verfahrens- und Prozessparameter sowie Prüfreihen

5.1.1 Ziele

Für die Wahl geeigneter Druck- und Textilmaterialien sind mit Hinblick auf Anwendungen als Wand-, Decken- und Sonnenschutzelemente wesentliche Eigenschaften wie Brandschutzklassifizierung aber auch UV-Beständigkeit relevant. Bei Betonanwendungen kommen zudem Anforderungen an die Alkalibeständigkeit des textilen Materials hinzu. Darüber hinaus muss in Bezug auf das verwendete Fasermaterial die Verarbeitbarkeit auf der 3D-Kettenwirkmaschine gewährleistet werden. Des Weiteren ist langfristig das Preis-Leistungs-Verhältnis zu berücksichtigen. Generell werden zwei Werkstoffgruppen betrachtet: mineralische Werkstoffe und nicht mineralische/nicht metallische Materialien. Letztere werden unterteilt in biologisch basierte, natürliche Materialien und in erdölbasierte, synthetische Materialien. Im Bereich der erdölbasierten, synthetischen Materialien wird zuletzt noch unterschieden zwischen Polyamiden (PA), Polyestern (PES), Polyolefinen ((PE (Polyethylen, PP (Polypropylen))), Polyurethanen (PU) und Sonstigen.

Ziel ist die Definition eines Verbunds aus Faser- und Druckmaterial gleicher Werkstoffgruppenherkunft.

5.1.2 Synthetische Materialien: 3D-Druckmaterialien/-verfahren und Fasermaterialien

5.1.2.1 Synthetische Materialien: 3D-Druckmaterialien mit Potential für den Baubereich

Gemäß den in Kapitel 5.1.1 definierten Materialgruppen wird auf dem Markt verfügbares Druckfilament hinsichtlich seiner erforderlichen Materialeigenschaften für Bauanwendungen und Verarbeitbarkeit im FDM-Druck unterschieden und gegenübergestellt. Anlage 1 zeigt eine tabellarische Übersicht und bau- bzw. projektspezifische Auswahlkriterien aus über 50 betrachteten synthetischen Druckmaterialien

In der Gruppe der Polyamide (PA) bieten sich unter anderem PA 6 (Perlon) und PA 6.6 (Nylon) als Druckfilament auf dem Markt an. Nylon lässt sich an dem verwendeten Prusa i3MK3S an der Frankfurt UAS für erste Tests ohne zusätzliche Umbaumaßnahmen verarbeiten. Bei glasfaserverstärkten Polyamiden, welche im Vergleich zu konventionellen Materialien eine bessere Brandschutzklasse aufweisen, aber gleichzeitig aufgrund der Faseranteile schwieriger werkstofflich zu recyceln sind, müsste zur Verarbeitbarkeit eine robustere Edelstahlöse eingebaut werden. Zudem stellt die maximale und sichere Drucktemperatur von ca. 280 °C für orientierende Tests den vorhandenen Prusa i3MK3S vor Herausforderungen, da die Düsenbauteile des Prusa-Druckers der thermischen Belastung nicht standhalten können. Aufgrund des Marktangebots, Fertigung und Materialeigenschaften, wie die für Kunststoffe vergleichsweise hohe chemische, UV- und Temperaturbeständigkeit, wird letztendlich das Nylon FX256-Filament von Filamentum aus der Gruppe der Polyamide in die Auswahl der synthetischen Materialien für die orientierenden Vorversuche aufgenommen.

Druckmaterialien der Polyester-Gruppe sind in zahlreichen Ausführungen auf dem Markt für FDM-Drucker vorhanden. Aufgrund der guten Verarbeitbarkeit, Kreislauffähigkeit, dem geringem Materialpreis, großem Textilangebot, der gleichen Werkstoffgruppe und je nach Additiven auch einer vergleichsweise guten Temperaturbeständigkeit werden zwei verschiedene PETG-Filamente für die ersten Druckversuche gewählt. Es werden zwei Druckfilamente ausgesucht: PETG Flammschutz der Firma Filament, hier liegt der Fokus auf eine hohe Temperaturbeständigkeit und „ReForm rPET“, ein recyceltes Polyethylenterephthalat modifiziert mit Glycol (rPETG) von Formfutura, welches komplett aus Ausschussmaterial der Filamentproduktion recycelt wird. Polycarbonat (PC) würde sich ebenfalls für eine mögliche Anwendung im Baubereich eignen, wird allerdings aufgrund der schweren Verarbeitbarkeit im FDM-Verfahren, insbesondere in Bezug auf Warming-Effekte und einer vergleichsweise hohen Drucktemperatur nicht in die Werkstoffauswahl aufgenommen.

Aus der Gruppe der Polyolefine fallen Polypropylen (PP) und High-Density Polyethylen (HDPE) in die engere Auswahl. Formfutura bietet mit PP-Druckfilament ein Material an, welches einen replizierbaren Druckprozess bei ähnlichen Materialeigenschaften verspricht, es wird das Centaur PP-Filament von Formfutura ausgewählt.

Sonstige Materialien, wie zum Beispiel Polymethylmethacrylat (PMMA), auch bekannt als „Plexiglas“ und Polyvinylidenfluorid (PVDF) werden ebenfalls in die Auswertung mit aufgenommen, allerdings für eine weitere Versuchsuntersuchung in der 6dTEX Grundlagenforschung wegen Maschinengrenzen, fehlenden Textilkombinationen und Verarbeitbarkeit nicht untersucht.

5.1.2.2 Synthetische Materialien: Fasermaterialien mit Potential für den Baubereich

Die Auswahlkriterien für das Bauwesen sind u.a. Brandschutz, UV-Beständigkeit, Wasseraufnahme, Form- und Temperaturbeständigkeit, chemische Beständigkeit, gute mechanische Werte (z.B. E-Modul / Biegezugfestigkeit) und Kreislauffähigkeit.

Anlage 2 zeigt eine tabellarische Übersicht der betrachteten Fasermaterialien. Polyolefine zeigen im Vergleich zu Polyester und Polyamid eine geringere Schmelztemperatur und geringere UV-Beständigkeit auf und eignen sich daher nicht für die Anwendung als Sonnenschutzelement im Rahmen des Projektes. Auch Polyamide (Nylon) sind u.a. aufgrund ihrer im Vergleich zu Polyester beispielsweise höheren Wasseraufnahmefähigkeit und geringeren Hitzebeständigkeit weniger geeignet. Das letztendlich ausgewählte PES-Multifilamentgarn 121031A53D der Walter Textil GmbH hat sich am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen in der Vergangenheit als Wirkfadenmaterial bewährt, weswegen es für vergleichbare Ergebnisse ebenfalls in diesem Projekt hinzugezogen wird. Beschaffungen außerhalb Deutschlands wären zudem ein nicht gerechtfertigter Aufwand gewesen, weswegen u.a. das TP Industrial Yarns 785 PET (Polyester) s. Anlage 2 nicht genutzt wurde. Um ein Monomaterial aus Wirk-, Schuss-, Steh- und Polfäden umsetzen zu können, wurden das hochfeste, gut verarbeitbare PES-Multifilamentgarn Diolen 174S von PHP Fibers GmbH für die Anwendung als Schuss- sowie Stehfäden ausgewählt und PET-Monofilament 900S mit einem 0,25 mm Durchmesser von Perlon Nextrusion Monofil GmbH für die Anwendung als Polfäden ausgewählt.

5.1.2.3 Synthetische Materialien: Fazit potentielle Materialmatches 3D-Druck und Textil

Es wurde entschieden, im Rahmen von 6dTEX mit Polyester (PET) als Druck- und Fasermaterial zu arbeiten. Das Material ist ebenfalls als Rezyklat erhältlich, ist kreislauffähig und kann mit entsprechenden Additiven ausgerüstet werden, um die Brandschutzklasse „schwerentflammbar“ und eine höhere UV-Beständigkeit zu erreichen.

5.1.3 Natürliche Materialien: 3D-Druckmaterialien/-verfahren und Fasermaterialien

5.1.3.1 Natürliche Materialien: 3D-Druckmaterialien mit Potential für den Baubereich

Anlage 3 zeigt eine tabellarische Übersicht der betrachteten natürlichen Druckmaterialien und deren Werkstoffeigenschaften unter bauspezifischen Auswahlkriterien. Im Gegensatz zu den synthetischen Druckfilamenten ist die Auswahl von marktreifen biobasierten FDM-Druckmaterialien noch ausbaufähig. Polylactid (PLA), welches neben Acrylnitrilbutadienstyrol (ABS) als synthetisches Material eines der am meisten verwendeten 3D-Druckmaterialien ist, ist bereits als biobasiertes FDM-Material erhältlich. Andere biobasierte 3D-Druckmaterialien sind z.B. Lignin oder Compounds, welche zusätzlich Füllstoffe wie zum Beispiel Algen, Flachs, Hanf, Holz oder anderen Fasern und Verstärkungsstoffen enthalten. Sie verringern den Kunststoffanteil im Material. Für die eigentliche Kunststoffgranulatmatrix wird hierfür vorwiegend ebenfalls PLA verwendet. Wie bereits in Kapitel 5.1.2.1 erwähnt, verringern Compounds zwar den Kunststoffanteil und ergänzen zusätzliche Werkstoffeigenschaften, erschweren jedoch insbesondere das werkstoffliche Recycling. Andere biologische Materialien für das FDM- bzw. LDM-Druckverfahren finden sich in der Forschung und Entwicklung. Arbeiten mit Cellulose und Pilzmyzel, welches auf einem Nährboden von beispielsweise Sägemehl, Stroh, Zellulose, Chitin und anderen Materialien wachsen kann, sind hier vermehrt vertreten (Vieres et al., 2022), ebenso Ansätze zum Druck mit Lignin (Gleuwitz et al., 2020). Für den Baubereich erfüllen biobasierte und biologische Materialien in der Regel noch geringere Materialeigenschaften hinsichtlich der Temperatur-, Brandschutzklasse und chemischer Beständigkeit, als etablierte synthetische oder mineralische Materialien. Die Kreislauffähigkeit natürlicher Materialien schneidet dabei unter den drei Materialüberguppen naturgemäß am besten ab, wobei zudem die Drucktemperaturen verhältnismäßig gering ist.

Aufgrund der geringen Brandschutzklasse von natürlichen Druckmaterialien und im Allgemeinen zu geringen chemischen und mechanischen Materialeigenschaften, die für eine Anwendung im Baubereich benötigt sind, werden für 6dTEX zuletzt synthetische und mineralische Druckmaterialien ausgewählt.

5.1.3.2 Natürliche Materialien: Fasermaterialien mit Potential für den Baubereich

Als natürliche, nachwachsende Fasermaterialien wurden pflanzliche Fasern wie z.B. Flachs und Hanf betrachtet, die hohe Zugfestigkeiten aufweisen wie Flachs bis max. 0,85 GPa ("Verstärkungsfasern - Einführung und Überblick – R_G Wiki," n.d.). Auch Biopolymere wie PLA wurden betrachtet. Letztere haben deutlich geringere Zugfestigkeiten und auch geringerer Schmelztemperaturen als z.B. Flach, s. Anlage 4. All diese Fasermaterialien sind als brennbare Stoffe (B1: schwerentflammbar oder B2: normalentflammbar) klassifiziert und dadurch für den Einsatz im Bauwesen nicht optimal. Zudem ist die Verarbeitbarkeit dieser Materialien auf der 3D-Kettenwirkmaschine bisher unklar. Daher wurde der Fokus im Rahmen des 6dTEX-Projektes auf die synthetischen und mineralischen Fasermaterialien gelegt.

5.1.3.3 Natürliche Materialien: Fazit potentielle Materialmatches 3D-Druck und Textil

Denkbar sind zukünftig Verbundwerkstoffe aus beispielsweise Lignin als Druckmaterial in Kombination mit Flachsfasern. Voraussetzung ist die Weiterentwicklung entscheidender Materialparameter wie Brandschutz und der Aufbau von entsprechendem Know-how zur Verarbeitbarkeit der Naturfasern auf den komplexen Abstandstextilmaschinen.

5.1.4 Mineralische Materialien: 3D-Druckmaterialien/–verfahren und Fasermaterialien

5.1.4.1 Mineralische Materialien: 3D-Druckmaterialien mit Potential für den Baubereich

Zur Übersicht der mineralischen Druckmaterialien wird in Beton, Glas, Keramik, Lehm und Sand unterschieden. Die unterschiedlichen Materialgruppen sind in verschiedenen additiven Herstellungsverfahren vertreten. Sowohl Ablage- als auch Behälterverfahren (vgl. Kapitel 1.1.1) verarbeiten die in Anlage 5 im Rahmen von 6dTEX tabellarisch aufgeführten und betrachteten mineralischen Druckmaterialien. Die im mineralischen Bereich am meisten für die Anwendung im Bauwesen geeigneten Materialgruppen sind Beton und Lehm. Hier gibt es bereits zahlreiche Projekte, welche erfolgreich im Baubereich umgesetzt wurden s. Kapitel 2.1.1. Im Vergleich zu Lehm, der wie Beton ebenfalls im LDM-Verfahren verarbeitet wird, existieren bereits marktreife, für den 3D-Druck geeignete Betonmaterialien mit dazugehörigen Rezepturen, s.

Tabelle 1. Dies erleichtert die Forschung in diesem Materialbereich etwas und zählt zum Hauptargument der Auswahl von Beton bzw. Mörtel für weitere Untersuchungen. Allerdings sind die Fertigmischungen teils patentiert bzw. der Zugang zu Datenblättern eingeschränkt. Keramische Materialien finden sich in der Herstellung im LDM-, SLA- und BJP-Verfahren. In der additiven Fertigung von Keramik werden die Bauteile im Postprocessing unter hohen Temperaturen von um die 1000 – 1300 °C gesintert und nachbehandelt. Der zusätzliche Prozessschritt, der die Bauteilfertigung an die Bauraumgrößen der Sinteröfen koppelt sowie der hohe Energieaufwand machen die Verfahren für 6dTEX eher uninteressant. Druckverfahren, welche Pulver (BJ) als Ausgangsmaterial verwenden, kommen ebenfalls kaum in Frage, da der Bauraum ebenfalls meist begrenzt ist. Denkbar wäre theoretisch ein Verfahren ähnlich zu den von Mai et al. untersuchten „Large Particle 3D Concrete Printing“. Da der schichtweise Aufbau des Druckmaterials in dem Fall aber durch die volle Höhe des 3D-Textiles behindert wird, wurde aufgrund der zu erwartenden Prozesskomplexität der Herstellung in 6dTEX darauf verzichtet. Auch aus diesem Grund und der hohen Sprödigkeit und geringen Festigkeit kommt auch Sand nicht für weitere Untersuchungen mit Textilien in Frage. Additive Fertigung mit Glas hat gleichermaßen noch keine echte Marktreife außer über erste Behälterverfahren (Firma Glasomer), bei denen das Flüssigharz durch das Textil verschmutzt würden. Trotzdem bietet Glas als Material Eigenschaften wie eine hohe Temperaturbeständigkeit und ein großes Angebot von Glastextilien auf dem Markt, welches es als geeignete Werkstoffwahl für mögliche Anwendungen im Bauwesen auszeichnet.

Aus diesen Gründen werden Glas- und Betonmaterialien für weitere Untersuchungen mit Textilien ausgewählt. Da die Frankfurt UAS insbesondere bei Glas nicht über benötigte Maschinen verfügt, konnte das Laserzentrum in Hannover für erste Versuche zu einer Glas-Werkstoffkombination gewonnen werden. Für

Beton wurde für orientierende Erstversuche ein vorhandener LDM-Drucker Delta WASP 40100 von WASP mit einem entsprechenden Trichter genutzt, der über Extruder Beton bzw. Mörtel verarbeitet. Als Basis für die Druckrezeptur des Betons wurde im Laufe des Projekts eine Rezeptur von WASP weiterentwickelt.

5.1.4.2 Mineralische Materialien: Fasermaterialien mit Potential für den Baubereich

Zu den mineralischen Werkstoffen gehören Carbon-, Basalt- sowie AR-Glasrovings, letztere mit Zugfestigkeiten zwischen 1,8 GPa - 3,0 GPa, was ungefähr der Zugfestigkeit von Stahlfasern entspricht (siehe Anlage 6).

Basaltrovings zeichnen sich durch eine geringe Alkaliresistenz aus. Internationale Untersuchungen zeigen eine höhere Alkalibeständigkeit von Basaltfasern als von herkömmlichen E-Glasfasern, aber dennoch deutliche Massen- und Festigkeitsverluste unbehandelter Fasern in alkalischen Lösungen (Lee/Song/Kim 2014). Die fortschrittliche alkaliresistente (AR) Glasfaser sind der E-Glasfaser überlegen und sogar besser als Basaltfasern, was ihre Abbaubeständigkeit in alkalischer Umgebung betrifft (Leone et al. 2017; Lee/Song/Kim 2014; Brameshuber 2006; Butler/Mechtcherine/Hempel 2009; Carozzi/Poggi 2015; Mader et al. 2004; Orlowsky 2005). Entsprechend notwendige Beschichtungen der Basaltfasern reduzieren normalerweise zudem die Verarbeitbarkeit auf Textilmaschinen. Im Vorprojekt ge3TEX wurde deshalb mit Beschichtungen experimentiert, die zumindest eine Verwebbarkeit der Rovings erlauben. Diese Fasern wurden in 6dTEX gesondert geprüft. Dazu wurden 20 Basaltroving-Proben mit einer Länge von $L = 30$ cm für 24 h in Normalklima nach DIN EN ISO 139 klimatisiert, im Anschluss gewogen (m_1) und in die Lauge eingebracht (Abbildung 11). Die Fasern weisen leichte Feinheitsschwankungen auf, welche auf das Separieren des Materials aus einem ge3TEX Gewebe und die damit entstandene mechanische Belastung der Proben zurückzuführen sind. Einige der Proben der Serie brachen bereits beim Schließen der Klemmen, was ebenfalls auf eine Vorschädigung des Materials schließen lässt. Die Ermittlung der Festigkeit wurde mit den Einstellungen nach DIN EN ISO 5079 durchgeführt. Die Basaltfasern haben in der alkalischen Lösung ca. 2/3 an ihrer Zugfestigkeit verloren. Dieser Verlust an der Zugfestigkeit ist bei den AR-Glasfasern ist in 50 Jahren ca. 2/5 (Büttner/Raupach 2013). Es wurde entschieden, Basaltfasern aufgrund ihrer im Vergleich zu AR-Glas geringen Alkalibeständigkeit zunächst für 6dTEX nicht zu nutzen.

Abbildung 11, Alkalibeständigkeit Basaltfasern: links: Waage Ermittlung der Festigkeit nach DIN EN ISO 5079, Mitte gealterte/ungealterte Faser, rechts: Prüfmaschine mit Bereich Faserprüfung (orange)



© ITA

Carbonrovings können aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit nicht an der 3D-Kettenwirkmaschine verarbeitet werden. Beide Materialgruppen werden für die weitere Betrachtung ausgeschlossen. Verwendet wird alkaliresistentes Glas CemFil 5325 von OwensCorning. Es ist UV-beständig und weist gute Eigenschaften für die Textilverarbeitung auf, sodass es als Material in Kombination mit 3D-Betondruck Sinn macht.

5.1.4.3 Mineralische Materialien: Fazit potentielle Materialmatches 3D-Druck und Textil

Mineralische Fasermaterialien wie Carbon, AR-Glas und Basalt brennen allgemein nicht. Es wird bei diesen zerbrechlichen Fasern immer eine Schlichte aufgetragen, um die Verarbeitbarkeit in die textilen Strukturen zu ermöglichen. Durch die Schlichtematerialien entsteht ein Nachteil bzgl. der Brennbarkeit, da diese Schlichtematerialien i.A. brennbar sind. Das genaue Schlichterezept von Unternehmen wird geheim gehalten. Da alle in Frage kommenden mineralischen Fasermaterialien diesen Nachteil durch Schlichte haben, ist der Vergleich zu Brennbarkeit ähnlich. An der Abstandswirkmaschine, die im Rahmen von 6dTEX-Projekt verwendet wurde, können keine Carbonfasern verarbeitet werden, weil diese elektrisch leitfähig sind. Dadurch wurden Carbonfasern am Anfang des Projektes eliminiert. Im Vergleich von AR-Glas- und Basaltfasern zeigt sich, dass die Alkalibeständigkeit der Basaltfasern geringer ist. Es wurde entschieden, für 6dTEX als Textilmaterial AR-Glas im Verbund mit 3D-Betondruck zu untersuchen.

Um ein kreislauffähiges Endprodukt zu realisieren, sind in dem geplanten Verbund Erkenntnisse aus dem Textilbeton relevant: Die Bewehrungstextilien werden beim Rückbau stark geschädigt und können daher nur bei entsprechender Verarbeitung in z.B. Kurzfaserbeton eingesetzt werden. So können alle Bestandteile des Textilbetons wiederverwendet werden (Kimm 2021).

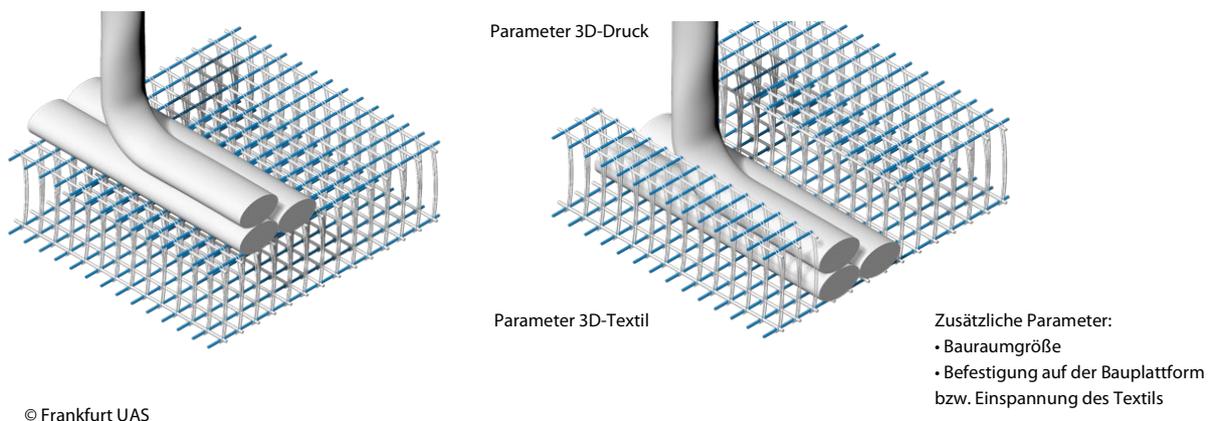
5.1.5 Zwischenresümee 3D-Druckmaterialien und Fasermaterialien

Aus den drei Materialgruppen für Druck- und Fasermaterialien scheiden die biobasierten Werkstoffe im Rahmen von 6dTEX aus. Der Entwicklungsaufwand insbesondere in Bezug auf die Verarbeitbarkeit an der Textilmaschine und zur Herstellung kettengewirkter Abstandsgewebe wäre zu zeitintensiv für die Projektlaufzeit. Es verbleiben erdölbasierte, synthetische Werkstoffe, hier wird für Polyester als Druck- und Textilmaterial entschieden. Bei den mineralischen Werkstoffen wird AR-Glas als Material für Textil und Beton als Druckwerkstoff gewählt.

5.1.6 Prozessparameter 3D-Druck auf 3D-Textilien

Generell müssen zunächst die wesentlichen Parameter der Herstellung eines 3D-Textils ebenso wie die Parameter der Herstellung eines 3D-Drucks definiert werden (Abbildung 12). Erst im nächsten Schritt können tatsächlich Verbundbauteile aus 3D-bedruckten 3D-Textilien entstehen und zuletzt deren mechanische Eigenschaften geprüft werden. Nachfolgend werden wesentliche Druck- und Textilparameter erläutert sowie die gewählten Prüfmethode dargestellt.

Abbildung 12, Prinzipdarstellung zum Druck auf und in 3D-Textilien, Prozessparameter



5.1.6.1 Parameter Textil

a.) Herstellung eigener und projektbezogener, kettengewirkter 2D-Gelege: Maschinenparameter und beispielhafte Oberflächenstrukturen von PES-Textilien für rPETG-Druck und Glastextilien für Betondruck

Für Vorversuche zum 3D-Druck auf Textil sind im Projektplan Standard Flächentextilien ebenso wie spezielle, kettengewirkte 2D-Biaxialgelege vorgesehen: Erstere für orientierende Vorversuche zur ersten Fixierung variabler Druckparameter; letztere für orientierende Vorversuche zur Definition von textilen 2D-Oberflächengeometrien. Diese wurden dann im Anschluss vergleichbar als kettengewirkte 3D-Gelegestrukturen hergestellt. Tabelle 3 zeigt geometrische und materialbedingte Abhängigkeiten der 2D-Textilproduktion. Abbildung 13 zeigt das Prinzip der Herstellung kettengewirkter 2D-Gelege. Die Achsabstände der Stehfäden werden durch Belegung der Bleie definiert. Die Achsabstände der Schussfäden werden durch die Schussleger definiert.

Tabelle 3, Maschinenparameter kettengewirkte 2D Biaxialgelege

Kettengewirkte 2D-Biaxialgelege								
	Achsabstände		Glasrovings		Basaltrovings		PESRovings	
	mimimal (mm)	maximal (mm)	mimimal (tex)	mimimal (tex)	mimimal (tex)	mimimal (tex)	mimimal (tex)	mimimal (tex)
Stehfäden	4,23	bevorzugt 25,4	600	2.400	600	2.400	1.100	2.200
Schussfäden	1	bevorzugt 25,4	320	2.400	600	2.400	220	2.200
Wirkfäden	Abbindeart: Offene Franse		nur PES möglich	nur PES möglich	nur PES möglich	nur PES möglich	16,7	16,7
Produktionsbreite	Kettengewirkte Biaxialgelege / Karl Mayer / BIASTRONIC max Produktionsbreite 2500 mm							
			bevorzugt 1.250 mm	2.500 mm	bevorzugt 1.250 mm	2.500 mm	bevorzugt 1.250 mm	2.500 mm

© ITA

Zur Ersteinschätzung der zu erwartenden textilen Oberflächenstrukturen aus PES-Textilmaterial im Verhältnis zum PET-Druckmaterial wurden auf Basis der Daten aus Tabelle 3 und der Funktionsweise der Textilmaschine zeichnerisch zwei Varianten abgebildet, eine maximal dichte und eine maximal offene, textile Geometrie. Die in Abbildung 14 zeichnerisch maßstäblich dargestellten Varianten gehen von theoretisch angenommenen, minimalen bzw. maximalen Durchmesser der Rovings aus. Sie resultieren aus dem Verhältnis der jeweiligen tex-Zahl und der Materialdichte:

PES Stehfäden: 1.100 tex, theoretisch $\varnothing = 1,0$ mm; 2.200 tex theoretische $\varnothing = 1,4$ mm

Glas Stehfäden: 600 tex, theoretisch $\varnothing = 0,6$ mm; 2.400 tex, theoretisch $\varnothing = 1,1$ mm

PES Schussfäden: 220 tex, theoretisch $\varnothing = 0,5$ mm; 2.200 tex, theoretisch $\varnothing = 1,4$ mm

Glas Stehfäden: 320 tex, theoretisch $\varnothing = 0,4$ mm; 2.400 tex, theoretisch $\varnothing = 1,1$ mm

Für die Kombination aus Glastextil und 3D-Betondruck wurde entsprechend verfahren, s. Abbildung 15. In der Übersicht wird deutlich, dass für die Planung der Vorversuche für das Polyester material mit deutlich dichteren Textiloberflächen als beim Glasmaterial gearbeitet werden muss.

Abbildung 13, Prinzip Herstellung kettengewirkter Biaxialgelege

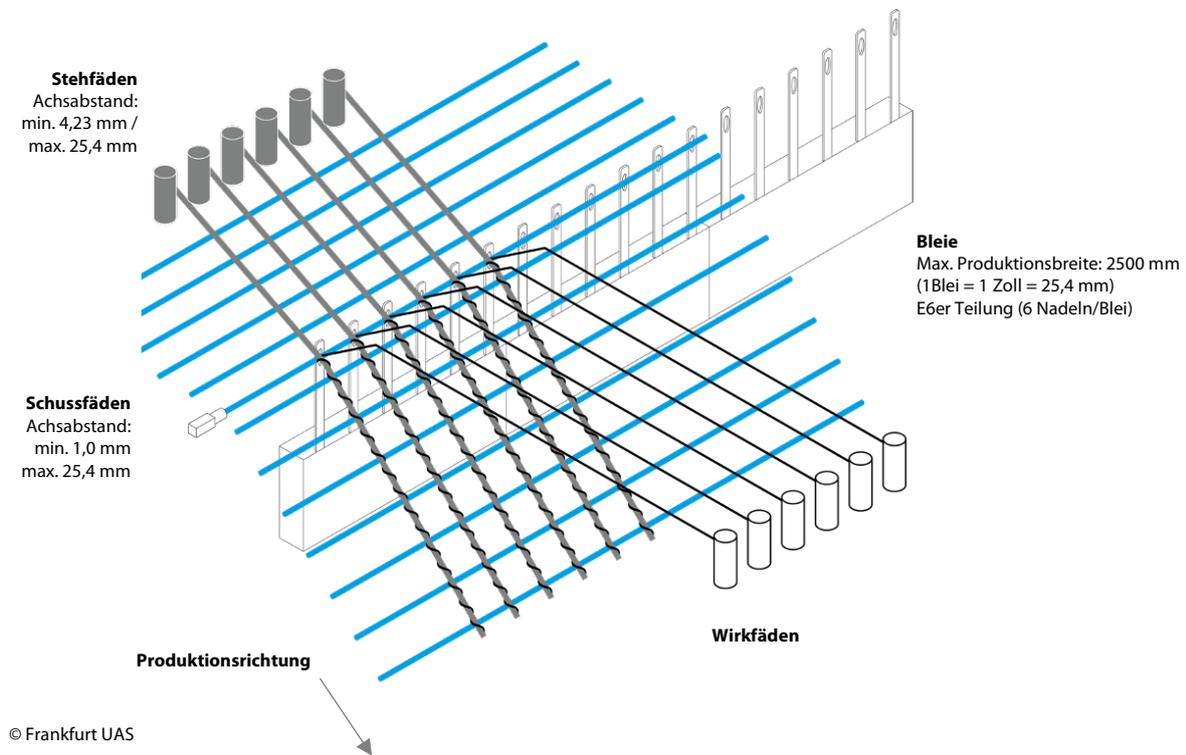
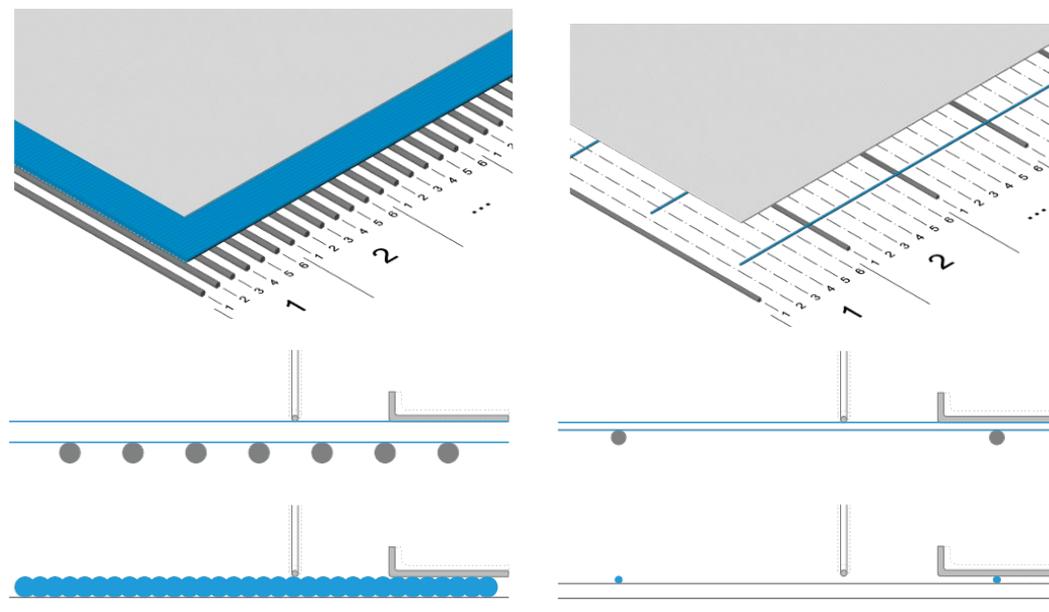
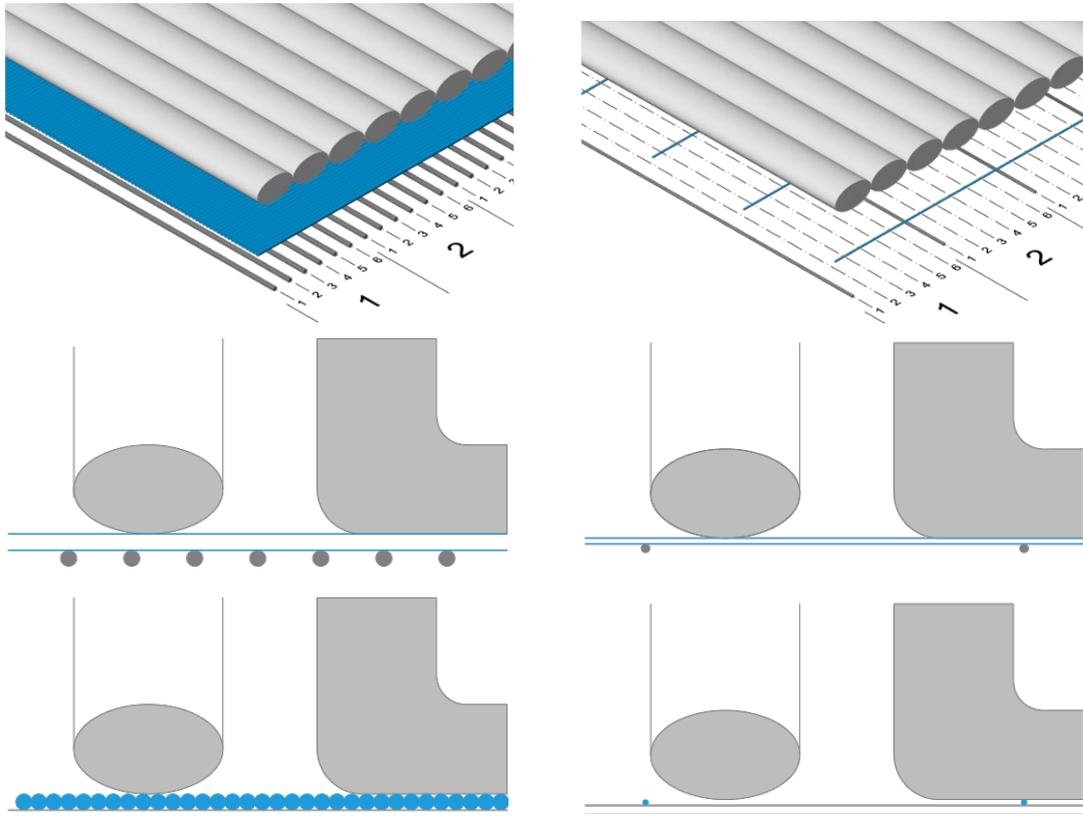


Abbildung 14, Oberflächenstrukturen kettengewirkter Biaxialgelege aus PES-Rovings, oben: Axonometrie, unten: jeweils Schnitte, links: dichte Variante, Schussfäden 2.200 tex, Stehfäden 2.200 tex; rechts: weiteste Variante Schussfäden 220 tex, Stehfäden 1.100 tex, Düsendurchmesser Druckmaterial = 0,4 mm; jeweils darunter ein Schnitt durch die Ebenen der Steh- und Schussfäden



© Frankfurt UAS

Abbildung 15, Oberflächenstrukturen kettengewirkter Biaxialgelege aus Glas-Rovings (Stehfasern PES), links: dichte Variante, Schussfäden 2.400 tex, Stehfäden 2.400 tex; rechts: weiteste Variante Schussfäden 320 tex, Stehfäden 600 tex, Düsendurchmesser Druckmaterial = 8 mm; jeweils darunter ein Schnitt durch die Ebenen der Steh- und Schussfäden



© Frankfurt UAS

b) Herstellung eigener und projektbezogener, kettengewirkter 3D-Gelege: Maschinenparameter und beispielhafte Oberflächenstrukturen von PES-Textilien / PET-Druck und Glastextilien / Betondruck

Für die Versuche mit dreidimensionalen, kettengewirkten Abstandsgelagen wurden ebenso wie für die zweidimensionalen, kettengewirkten Biaxialgelege Maschinen- und Materialparameter zusammengetragen, tabellarisch katalogisiert (Tabelle 4) und auf das Prinzip der 3D-Textilherstellung gem. Abbildung 16 übertragen. Auch bei einer zeichnerisch maßstäblichen Darstellung für kettengewirkte Abstandsgelage analog zu Abbildung 14, muss von folgenden, theoretisch angenommenen minimalen bzw. maximalen Durchmessern der Rovings ausgegangen werden. Sie resultieren aus dem Verhältnis der jeweiligen Tex-Zahl und der Materialdichte:

PES-Steh- und Schussfäden:

1.100 tex, theoretische $\varnothing = 1,0$ mm; 2.200 tex, theoretisch $\varnothing = 1,4$ mm

Glas-Steh- und Schussfäden:

600 tex, theoretisch $\varnothing = 0,55$ mm; 2.400 tex, theoretisch $\varnothing = 1,1$ mm

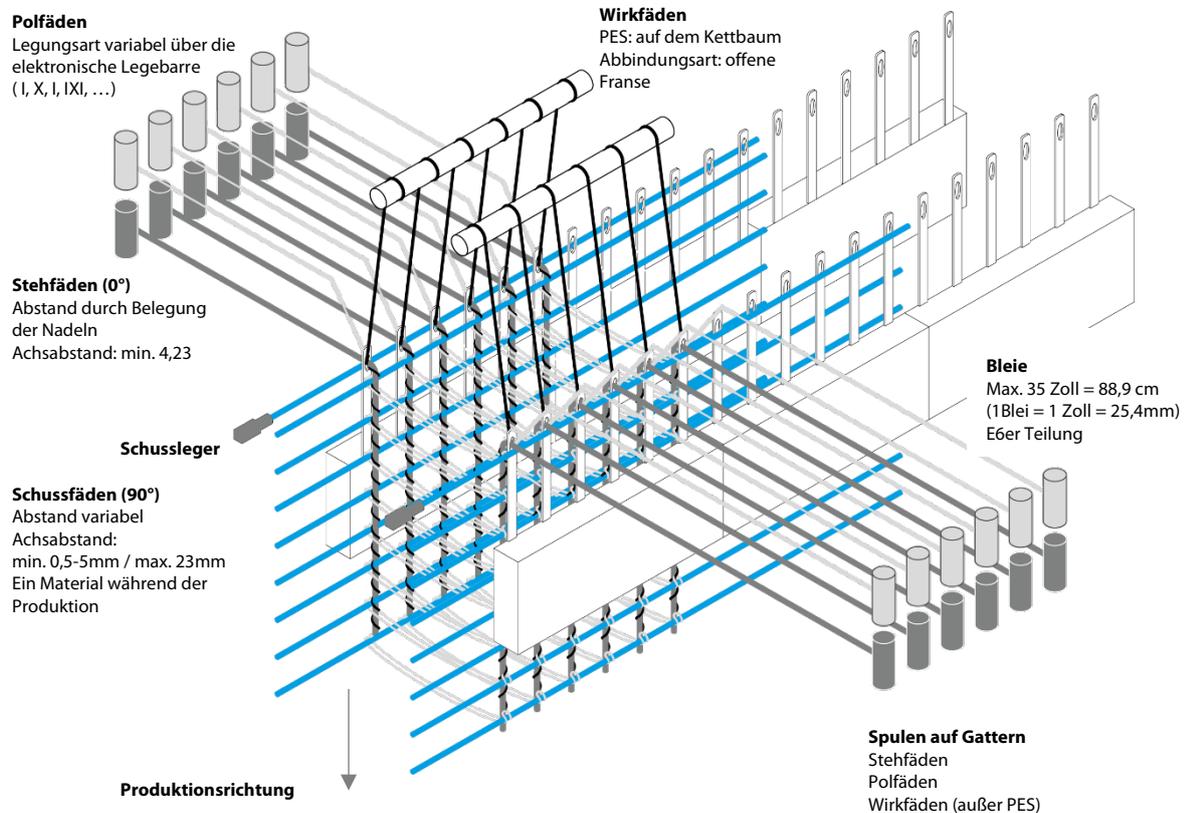
Es wird deutlich, dass für die Planung der Versuche für das Polyester material aufgrund der geringeren Düsendurchmesser und des feineren Materials auch hier mit deutlich dichteren Textiloberflächen als beim Glasmaterial gearbeitet werden muss.

Tabelle 4, Maschinenparameter kettengewirkter 3D-Abstandsgelege

Kettengewirkte 3D Abstandsgelege								
	Achsabstände		Glasrovings		Basaltrovings		PESRovings	
	Mimimal (mm)	maximal (mm)	mimimal (tex)	maximal (tex)	mimimal (tex)	maximal (tex)	mimimal (tex)	maximal (tex)
Stehfäden	4,23	bevorzugt 25,4	600	2.400	600	2.400	1.100	2.200
Schussfäden	0,5 - 5	bevorzugt 23	600	2.400	600	2.400	1.100	2.200
Wirkfäden	Abbindeart: Offene Franse		34	34	?	?	16,7	16,7
Wirkfäden	Abbindeart: I, X, /, IXI		ca. 100	ca. 100	ca. 100	ca. 100	ø 0,25 mm	ø 0,25 mm
Produktionsbreite	steh- und schussfadenverstärkte kettengewirkte Abstandsgelege / Karl Mayer / 3D-Abstandsgewirkmaschine/ max Produktionsbreite in mm							
	237 mm Wirkfäden als Spulen auf Gatter			237 mm Wirkfäden als Spulen auf Gatter		355 mm Wirkfäden am Kettbaum		
Produktion Höhe	Steh- und Schussfadenverstärkte kettengewirkte Abstandsgelege / Karl Mayer / 3D-Abstandsgewirkmaschine Fräsblechabstand = Lagenabstand < 30 mm							

© ITA

Abbildung 16, Prinzip Herstellung kettengewirkter 3D Biaxialgelege



c) Herausforderungen bei der Umsetzung der Herstellung von 3D-kettengewirkten Gelegen: Bei der Herstellung von 3D-Textilien kam es während der Projektbearbeitung zu den im Folgenden beschriebenen Herausforderungen:

- Die Produktionsgeschwindigkeit war aufgrund von nicht vorhandenen digitalen Fadenüberwachungstechnologien, nichtexistierender aktiver Fadenzuführung, nicht identisch einstellbaren Blattfederbremsen und häufiger Einstellungsänderungen, die der Grundlagenforschung geschuldet ist, sehr langsam.
- Die Verwendung von verschiedenen Fasermaterialien macht die Änderung der Maschineneinstellungen nötig. Abhängig vom Fasermaterial werden auf dem Markt unterschiedliche Spulenformen angeboten. Bei den PES-Faserspulen werden die Fäden von außen abgezogen. Bei den AR-Glas-Faserspulen erfolgt der Fadenabzug von innen. Zusätzlich besitzen die PES-Fasern eine Bruchdehnung von 19,3 %, während AR-Glasfasern eine Bruchdehnung von 3,5 % besitzen. Diese materialbedingten Eigenschaften verursachen unterschiedliche Fadenspannungen. Für die Projektbearbeitung wurde eine hohe Anzahl von AR-Glasfaser spulen benötigt. Dies erforderte das Umspulen der Fasern auf mehreren Spulen. Dieser zusätzliche Prozessschritt verringerte die Faserqualität und verursachte Fehler bei der Produktion.
- Im Standort der 3D-Textilmaschine war Vorort keine Werkstatt vorhanden, um mechanische Probleme zu lösen. Zudem ist die Maschine nicht mehr neu und es existieren beim Hersteller keine Ansprechpartner mehr.

5.1.6.2 Parameter Druck

a) Textilbefestigung für 3D-Druckverfahren - Befestigung von 2D-Textilien und 3D-Textilien

Im ersten Schritt wurden Befestigungen eines Flächentextils auf der Bauplattform eines FDM-Druckers untersucht, basierend auf dem in Kapitel 2.1.3.1 dargestellten Stand der Forschung. Fazit:

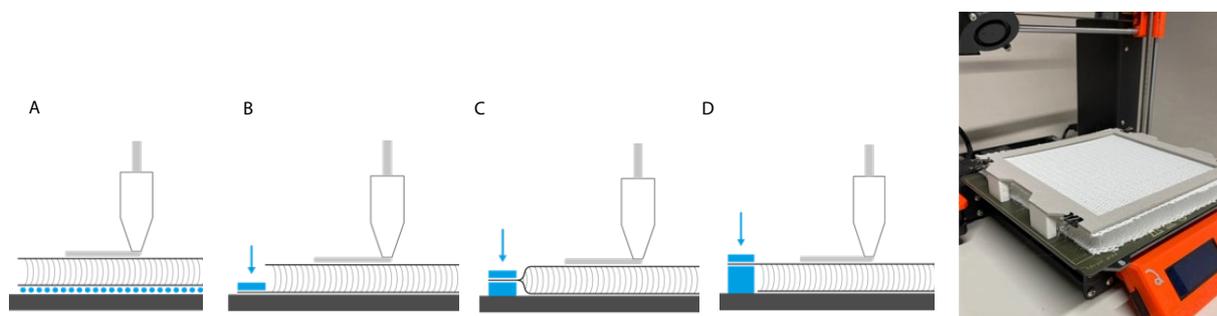
- Klemmklammern bzw. Schiebklammern: Die Einspanndicke ist nur schlecht variierbar und keine starke Vorspannung des Textils möglich; das gilt auch für Schiebklammern, die zudem beim Schieben das Textil zerstören.
- Haarspray bzw. Doppelklebeband: Das Textil wird verunreinigt und die Oberfläche des Textils kann nicht ausreichend gespannt werden.

Im nächsten Schritt wurden die Befestigungen eines 3D-Textils auf der Bauplattform eines FDM-Druckers, basierend auf den Erkenntnissen mit dem Flächentextil, untersucht. Zusätzlich muss entschieden werden wie und welche der beiden Decklagen befestigt wird. Fazit zu der gewählten Variante D (Abbildung 17)

- Der Halt des Textils bietet nicht ausreichende Stabilität während des gesamten Druckprozesses.
- Das Textil wird nicht ausreichend und gleichmäßig vorgespannt - die Mitte des Textils hängt durch.

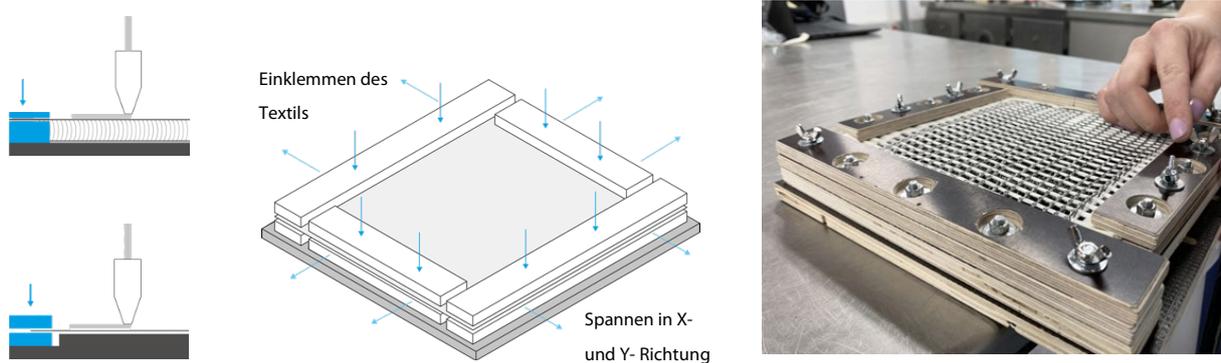
Final wurde für das Projekt ein eigener Spanrahmen entwickelt mit dem sowohl 2D- wie 3D-Textilien variabel eingespannt werden können.

Abbildung 17, links: Optionen zur 3D-Textilbefestigung bei FDM-Druck, rechts: erste Versuche mit Klemmklammern



© Frankfurt UAS

Abbildung 18, viergeteilter, offener Spannrahmen für 6dTEX zum Einspannen von Flächentextilien und 3D-Textilien



© Frankfurt UAS

b) Druckparameter FDM-Druck

Im FDM-Druck sind die nachfolgend aufgelisteten Parameter im Herstellprozess zu beachten. Für 6dTEX wurden zunächst Parameter auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 2.1.3 definiert, die für den Haftverbund entscheidend sein werden und deshalb besonders beachtet werden sollten. Sie wurden als „variabel“ bezeichnet und wurden in den Prüfreihe (Kapitel 5.1.7/8 und 5.1.9/10) mit dem Prusa i3 MK3S FDM-Drucker nach und nach optimiert:

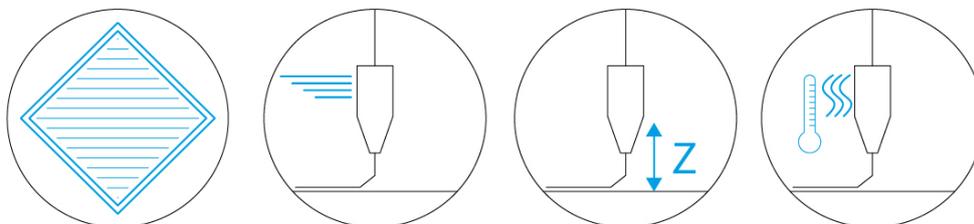
Konstante Druckparameter:

- Druckbetttemperatur (Einfluss auf Effekte wie Warping)
- Bauraumtemperatur
- Wandschichten / Perimeter
- Flow / Extrusionsmenge (Einfluss auf Materialdicke und Eindringtiefe)
- Düsendurchmesser (0,4 / 0,8 mm), damit entscheidet sich die
 - > Schichthöhe (min. ca. 0,25 / max. ca. 0,75 mal der Düsendurchmesser)
 - > Schichtbreite (i.d.R. min. 1 - 1,2x / max. 0,6 – 2 mal der Düsendurchmesser)
 (Anmerkung: Ventilator als auch die Düsendurchmesser wurden während der Druckprozesse verändert und waren nicht konstant. Innerhalb einer Prüferie wurden sie allerdings nicht speziell untersucht)

Variable Druckparameter (Abbildung 19):

- Infill und Druckrichtung
- Druckgeschwindigkeit (Einfluss auf Materialdicke und Eindringtiefe)
- Drucktemperatur (Einfluss auf die Eindringtiefe)
- Z- Offset (Einfluss auf Materialbreite und Eindringtiefe)

Abbildung 19, FDM-Druck, wesentliche 3D-Druck Prozessparameter zur Verbesserung der Haftung zwischen Textil und Druckmaterial, von links nach rechts: Infill, Druckgeschwindigkeit, Z-Offset und Drucktemperatur



© Frankfurt UAS

c) Druckparameter LDM-Druck

Auch für den LDM-Druck wurden entsprechende, wesentliche variable Druckparameter im Vorfeld definiert. Hier allerdings ohne auf einen Stand der Forschung zurückgreifen zu können. Die Parameter wurden im Rahmen der Prüfreihe (Kapitel 5.1.9/10 und 5.1.11/12) mit dem WASP Drucker (Typ 40100) nach und nach optimiert.

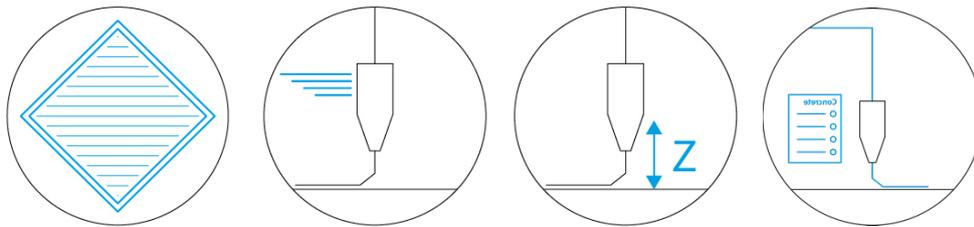
Konstante Druckparameter

- Wandschichten / Perimeter
- Flow / Extrusionskraft (Einfluss auf Materialdicke und Eindringtiefe)
- Düsendurchmesser (4/6/8 mm), damit entscheidet sich die
 - > Schichthöhe (min. ca. 0,25 / max. ca. 0,75 mal der Düsendurchmesser)
 - > Schichtbreite (i.d.R. min. 1 - 1,2x / max. 0,6 – 2 mal der Düsendurchmesser)

Variable Druckparameter

- Infill und Druckrichtung
- Druckgeschwindigkeit (Einfluss auf Materialdicke und Eindringtiefe)
- Z- Offset (Einfluss auf Materialbreite und Eindringtiefe)
- Druckmaterial Rezeptur und Beschichtung (Einfluss auf die Eindringtiefe und Schichtaufbau)

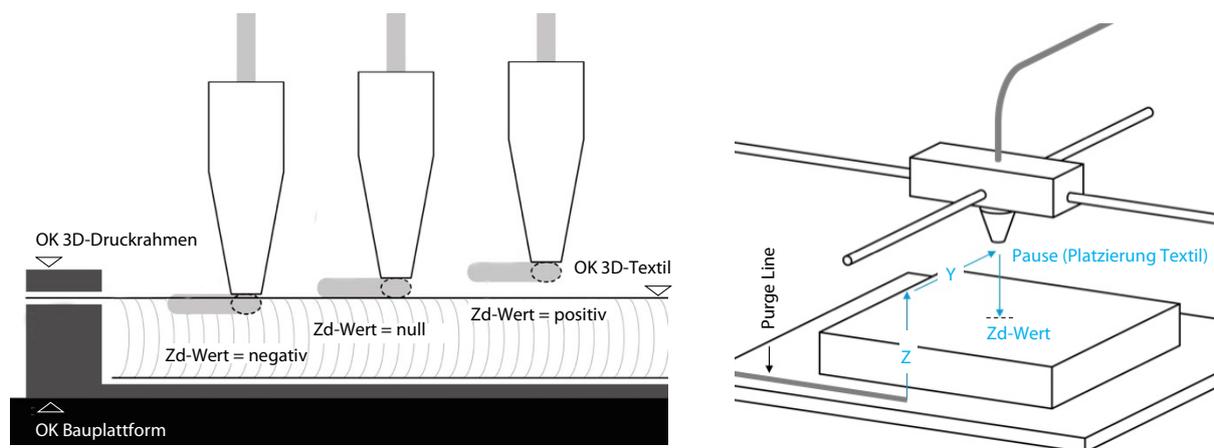
Abbildung 20, LDM-Druck, wesentliche 3D-Druck Prozessparameter zur Verbesserung der Haftung zwischen Textil und Druckmaterial, von links nach rechts: Infill, Druckgeschwindigkeit, Z-Offset und Rezeptur Druckmaterial



© Frankfurt UAS

d) Fazit Druckparameter

Abbildung 21, links: Definition des Zd-Werts; rechts: Extruder Bewegung: Start-G-Code, 1) Leveln auf der Bauplattform, 2) Standard Start-G-Code: Purge Line vorne, links, außerhalb des Bauraums 3), Neue G-Code Zeilen: s. blaue Linien in der Grafik



© Frankfurt UAS

Nach dem Stand der Technik und Forschung s. Kapitel 2.1.3 ist einer der wesentlichen Druckparameter der Z-Offset. Üblicherweise wird damit die vertikale Distanz zwischen Bauplattform und Druckkopf/Düse bezeichnet. Der Z-Offset wird manuell am 3D-Drucker, über den G-Code oder im Slicer eingestellt. Für 6dTEX wurde zusätzlich ein Zd-Wert definiert, s. Abbildung 21. Der Druckkopf druckt auf die obere Decklage des eingespannten 3D-Textils, die deutlich über der Bauplattform liegt. Der Zd-Wert beschreibt den Abstand von der Unterkante des Druckmaterials zur Oberkante der Textiloberfläche, s. Abbildung 21. Die Einstellung wird beim FDM-Druck über den Slicer und einer zusätzlichen händischen Modifizierung des G-Codes vorgenommen. Beim LDM-Druck wird die Einstellung manuell ausgeführt, da es die Bedienung des Druckers so vorsieht. Generell ist der Prozessablauf, welcher in Abbildung 21 (rechts) dargestellt ist, sowohl im Slicer als auch manuell im G-Code einstellbar. Wie die Einstellungen vorgenommen werden ist abhängig von der AnwenderIn und der Maschinenbedienung.

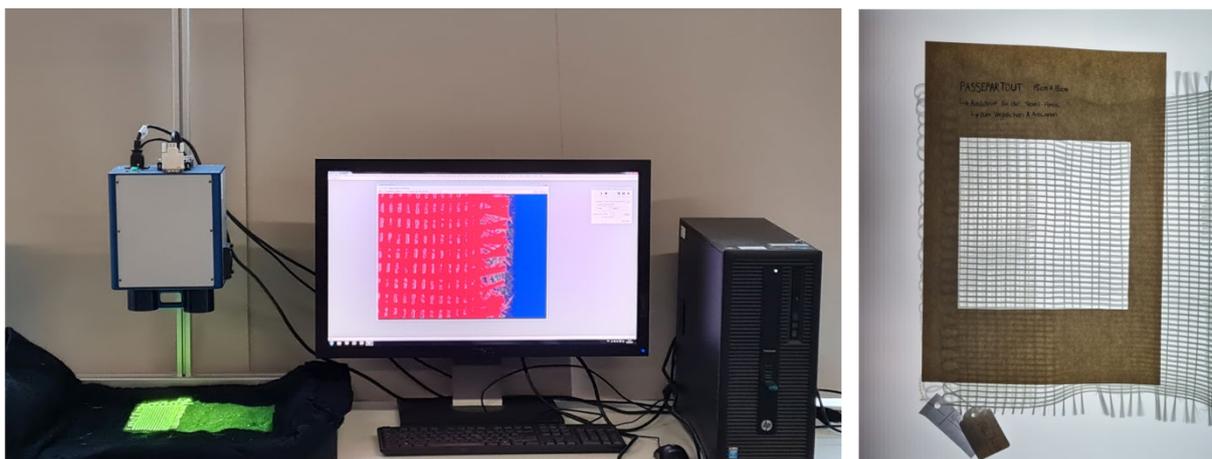
5.1.6.3 Ausgewählte Testverfahren

a.) Feststellung der Oberflächenrauigkeit: Elektrooptische 3D-Messung

Die mechanische Haftung zwischen Druck- und Textilmaterial wird maßgeblich über die Oberflächentopographie der textilen Oberfläche und die Rauigkeit der Fasern bzw. Rovings bestimmt (s. Abbildung 9). Um dazu quantifizierbare Aussagen zu bekommen wurde eine elektrooptische Erfassung durch ein Lasermessverfahren mit einer 3D-Kamera als Prüfmethode untersucht, s. Abbildung 30. Das Gerät, arbeitet nach dem Prinzip der Laser-Triangulation und wird ursprünglich zur Prüfung von Rutschfestigkeiten von beispielsweise Bodenbelägen eingesetzt. Das Gerät erfasst Profiltiefen und Flächen mit einem Fringe Prozessor. Die Datei wird mit dem Programm Gwyddion bearbeitet, zur Fehlerausbesserung und zur Erstellung von Schnitten durch das Material. Die Daten können zuletzt in Excel eingepflegt und in Balkendiagrammen gegenübergestellt werden. Der Prozess stellte sich letztendlich aber als ungeeignet heraus:

- Reflektierende Materialien sind ungeeignet. Geeignet sind nicht-weiße Materialien, die nicht reflektieren; auch durch Nutzung eines Scannerspray für 3D-Messung konnten die Ergebnisse nicht verbessert werden
- Trotz messtechnisch notwendiger Parametereinstellungen, die je Textil individuell vorgenommen werden müssen, entstehen nur bedingt geeignete Dateien, die zudem untereinander nicht vergleichbar sind
- Kleine Ausschnittveränderungen, unterschiedliche Abstände und kleine Fehler erzeugen große Unterschiede, zumal die 3D-Kamera lediglich eine Fläche von 8,5 cm x 11,5 cm erfassen kann.

Abbildung 22, links: elektrooptische Erfassung der textilen Oberfläche; rechts: Vorbereitung der Auswertung mit Photoshop und ImageJ



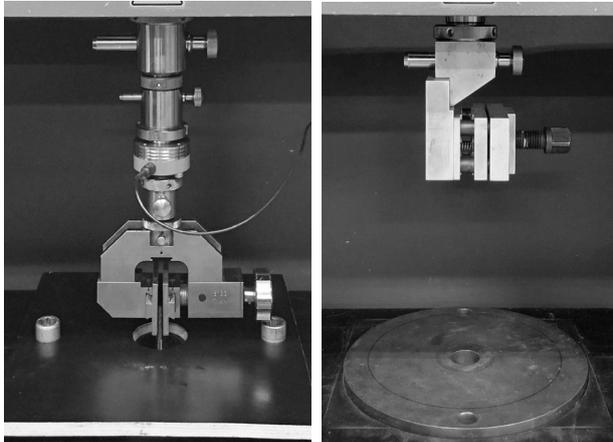
© Frankfurt UAS

Alternativ wurde gem. Studie 1 aus Kapitel 2.1.3 (Narula et al., 2018) versucht zumindest den Porenanteil der textilen Oberflächen über eine photographische Auswertung mit Photoshop und ImageJ zu erreichen. Die Textilien werden auf einen Leuchttisch gelegt, die Kontraste in Photoshop erhöht und in ImageJ die Pixelanzahl

(weiß und schwarz) ausgewertet und zur besseren Darstellung in Excel exportiert. Im Ergebnis kann der prozentuale Lochanteil gezeigt werden.

b.) Haftzugtests für 6dTEX

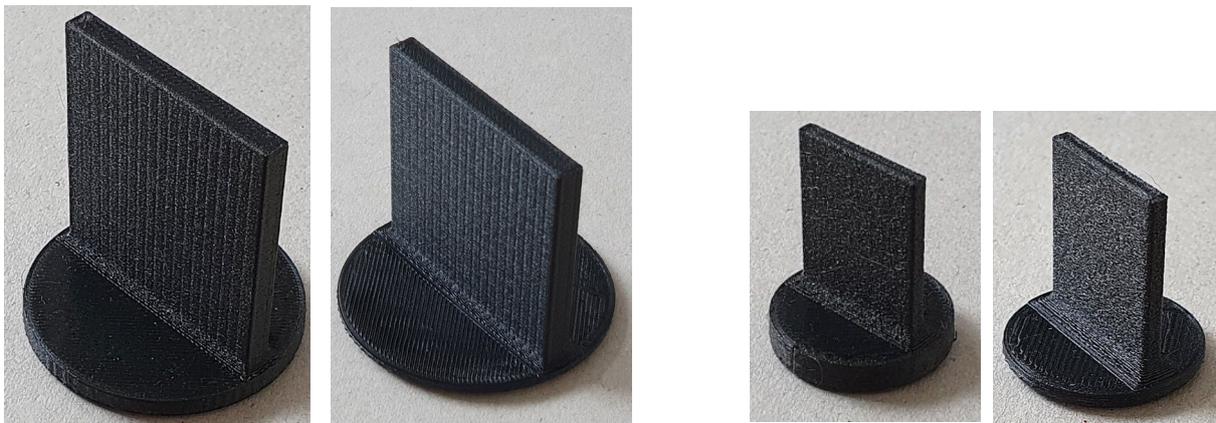
Abbildung 23, Versuchsaufbau Haftzugtests 3D-Druck auf 2D-Textil, links: Kraftmessaufnehmer von 1kN; rechts: Kraftmessaufnehmer von 20 kN



© ITA

Die Haftzugversuche werden nach einer am ITA entwickelten Prüfmethode unter der Normatmosphäre DIN EN ISO 139 durchgeführt. Die Temperatur beträgt 20 °C und die relative Luftfeuchtigkeit 65 %. Die Grenzabweichungen für die Temperatur liegen bei $\pm 2,0$ °C. Die Grenzabweichungen für die relative Luftfeuchtigkeit sind: $\pm 4,0$ %. Der Versuchsaufbau, der in Abbildung 23 dargestellt ist, enthält eine Maschine vom Typ 1455 mit einem Greifer und einer Befestigungsbasis, sowie einem Kraftmessaufnehmer von 1 kN (links) und 20 kN (rechts). Der Befestigungssockel besteht aus einem 275 mm x 275 mm großen quadratischen Holz Brett auf der Oberseite und einem runden Metallsockel darunter. Die Holzplanke wird mit zwei Bolzen auf dem runden Metallsockel befestigt, sodass das Textil in den Befestigungssockel eingespannt werden kann. Um die Reibung zwischen dem Brett und dem Textil zu erhöhen, ist die Unterseite des Bretts angeraut.

Abbildung 24, Haftzugtests, links: Prüfkörpergeometrie Druckstempel mit einem Durchmesser von 50 mm, Klemmfläche des linken Stempels beträgt 1575 mm², Basehöhe 5 mm (rechter Stempel 1687 mm²/ 2,5 mm); rechts: Druckstempel mit einem Durchmesser von 25 mm, die Klemmfläche des linken Stempels beträgt 300 mm² / Base 5mm (rechter Stempel 350 mm²/ 2,5 mm)



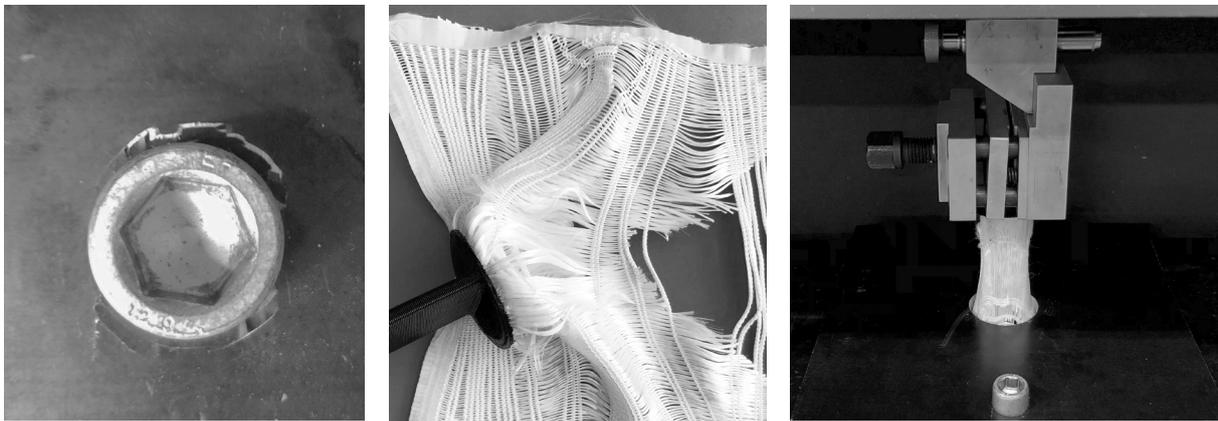
© ITA

Haftzugversuche Kunststoff auf 2D-Textil: Durch die Beobachtungen aus Vortests wird der Versuchsaufbau schrittweise angepasst. Als Haftzugprüfkörper werden Druckstempel mit einem Durchmesser von 50 mm und

einer Steghöhe von 50 mm sowie einem Durchmesser von 25 mm und einer Steghöhe von 25 mm gewählt (Abbildung 24). Der Vergleich der Prüfergebnisse mit den genannten Geometrien zeigt, dass die größere Base von 50 mm auch für offene Textiloberflächen gut geeignet ist. Zudem wird deutlich, dass der Prüfkörper mit 25 mm in der Höhe nicht vollständig in der Haftzugprüfmaschine eingeklemmt werden kann. Bei der Basishöhe zwischen 2,5 mm sowie 5 mm ist kein signifikanter Kraftunterschied erkennbar, sodass aufgrund von Material- und Druckersparnis die flachere Base gewählt wird. Insgesamt wird die Geometrie mit einem Durchmesser sowie einer Höhe von 50 mm sowie einer Basishöhe von 2,5 mm für nachfolgende Versuche ausgewählt.

Die ersten Haftzugversuche mit orientierenden Vorversuchen (PES Textil und T-Druckform PETG Flammschutz 220105_HZ_1.1-3, Testreihe PES, T-Druckform rPETG 220120_HZ_1.1-3, sowie die Testreihe PP, T-Druckform PP 220421_HZ_1.1-3) können erfolgreich mit dem Kraftmessaufnehmer von 1 kN durchgeführt werden. Bei den orientierenden Vorversuchen der Testreihe rPETG auf PES/Glas 2D-Textil 220607_HZ_1.1-3 erweist sich der Kraftaufnehmer von 1 kN als nicht ausreichend, sodass für weitere Experimente ein Kraftaufnehmer von 20 kN gewählt wird.

Abbildung 25, Herausforderungen während der Versuchsdurchführung, links: Riss um Schraubenloch, Mitte: herausgezogener Prüfkörper nach dem Versuch, rechts: Aufnahme während der Versuchsdurchführung

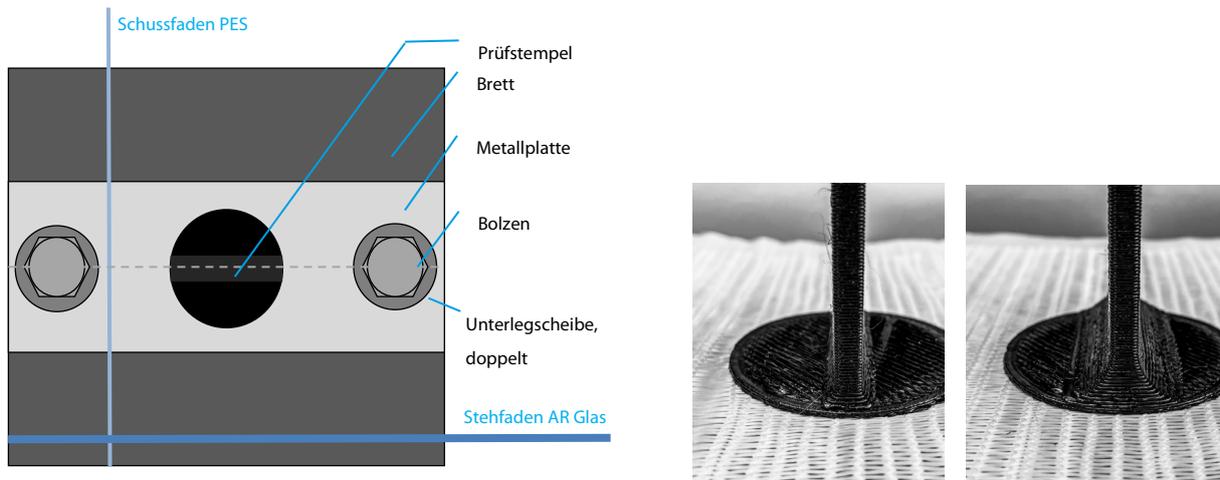


© ITA

Der Ablauf der Adhäsionsprüfung sieht eine vertikale Bewegung der Klemme mit einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min und einer Vorspannung von 0,5 N vor. Die Kraftabschaltswelle liegt bei 95 % F_{max} . Die ersten Versuche der Testreihe rPETG auf PES/Glas 2D-Textil (Prüfnummern 220330_HZ_1.1-3) zeigen, dass die Fasern des Textils herausgezogen werden und die Holzplatte um das Schraubenloch herum reißt (Abbildung 25). Das Herausziehen ist darauf zurückzuführen, dass das Einklemmen des Textils durch die Holzplatten für die vorhandenen Kräfte nicht ausreicht. Viele Prüfstempel sind zudem während der Versuchsdurchführung in der Mitte an der Basis durchgebrochen. Als Maßnahmen gegen die Risse und dem Verbiegen an der Holzplatte wurden Unterlegscheiben sowie eine Metallplatte hinzugefügt (Abbildung 26, links). Gegen die Schwachstelle in der Mitte der Prüfstempel wurden zusätzliche Rippen hinzugefügt (Abbildung 26, rechts).

Haftzugversuche Kunststoff auf 3D-Textil: Die Haftzugversuche mit 3D-gedrucktem Kunststoffstempel auf 3D-Textil werden in Analogie zu den beschriebenen Versuchen mit 2D-Textilien durchgeführt. Einen Unterschied im Prüfaufbau bildet die Verwendung eines Doppelrahmens, um das 3D-Textil in der Prüfvorrichtung einzuspannen. Dafür werden in zwei Siebdruckplatten- und eine Metallplatte jeweils ein Loch gebohrt. Zunächst wird die untere Siebdruckplatte auf das Maschinenbett gelegt, darauf wird der Probekörper gelegt und darüber wiederum die andere Siebdruck- und Metallplatte. Das 3D-Textil wird vor der Versuchsdurchführung durch die Siebdruckplatten zusammengedrückt.

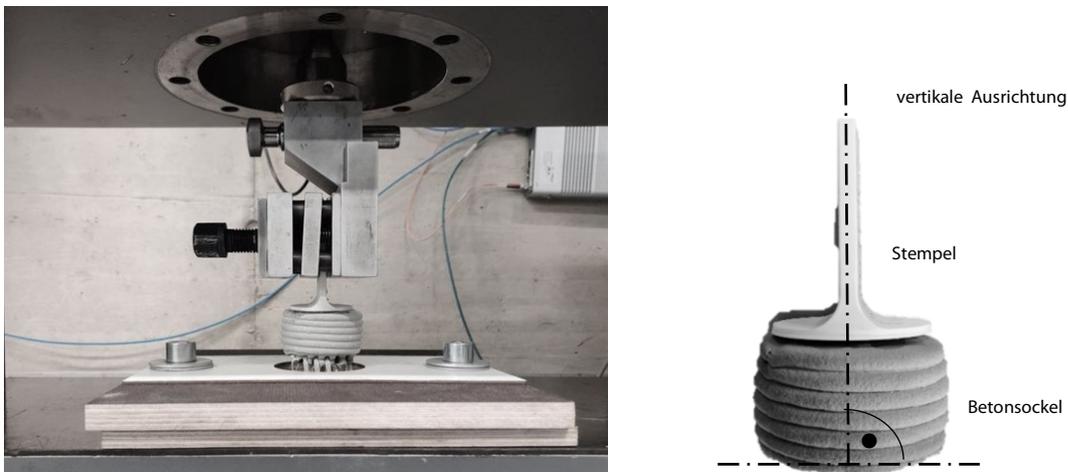
Abbildung 26, links: Versuchsaufbau mit angepasster Klemmplatte, rechts: Stempelgeometrie ohne und mit Verstärkungsrippen



© ITA

Haftzugversuche Beton auf 2D-Textil: Die Haftzugversuche mit Betondruck auf kettenwirkte Glasgelege weist einen ähnlichen Prüfaufbau zu den zuvor beschriebenen Versuchen mit Kunststoffstempeln auf (Abbildung 27). Hierbei wird das Textil ebenfalls zwischen zwei Siebdruckplatten eingespannt. Auf dem Textil befindet sich ein 3D-gedruckter Betonsockel, der an der Oberseite mit einem Haftzugstempel aus PLA verklebt ist. Der PLA-Stempel ist für die Versuchsdurchführung in der oberen Klemme der Prüfmaschine fixiert.

Abbildung 27, Versuchsaufbau Haftzugversuche Betondruck



© ITA

Die ersten Haftzugversuche (Nummer 220811_HZ_2.2-3) mit mineralischen Werkstoffen zeigen, dass insgesamt eine geringe Kontaktfläche zwischen dem Stempel und der Stirnfläche des Betonsockels vorliegt. Alle PLA Stempel lösen sich vom Beton ($F_{max} = 46,7 \text{ N}$ (HZ_2.1), $F_{max} = 541,5 \text{ N}$ (HZ_2.3)). Bei den Versuchen liegt die Quote, dass sich der Stempel vom Beton löst, bei insgesamt 66,67 %. Eine größere Klebefläche kann verhindern, dass sich der Stempel verfrüht vom Beton trennt Abbildung 28, links. Die Oberfläche des Betonsockels darf zudem nicht gekrümmt sein, da sich beim Einspannen des PLA Stempels Spannungen an der Klebverbindung aufbauen Abbildung 27 rechts.

Abbildung 28, links: Stirnfläche des Stempels mit Klebefläche, rechts: Betonoberfläche mit Kleberückständen sowie eine geschliffene Oberfläche

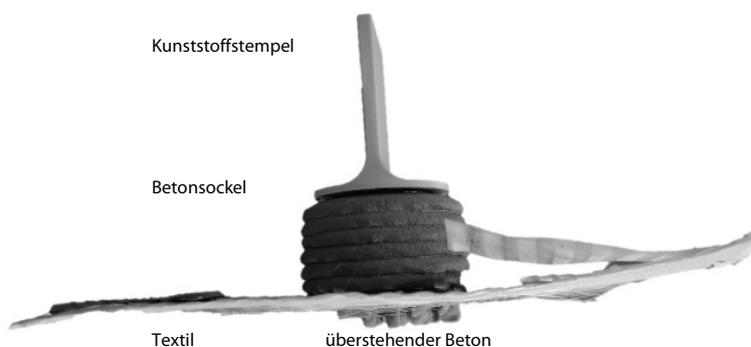


© ITA

Um das Durchfließen des Betons durch das Textil zu begrenzen, bzw. die später zu erwartenden Perforation des 3D-Textils zu simulieren, wurde während des 3D-Druckvorganges der Textilabstand (TA) zwischen dem Textil und dem Untergrund begrenzt.

Abbildung 29 zeigt einen Betonprobekörper, an der Unterseite des Textils ist der überstehende Beton zu erkennen, welcher bei der Herstellung durch das Textil geflossen ist. Um den Beton beim Einspannen nicht abzureißen oder das Textil vor den Versuchen zu beschädigen, wurde in die untere Platte eine Bohrung eingebracht. Somit wird der überstehende Beton nicht belastet und die Proben können, ohne zu verbiegen, eingespannt werden. Vorgespannt wird der Versuch mit einer Kraft von $F_v = 0,5 \text{ N}$. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 50 mm/min , mit einer Kraftabschaltswelle der Betonversuche von $95 \% F_{max}$. Sobald die an dem Kraftaufnehmer anliegende Kraft unter einen Wert von 5% der vorherigen Maximalkraft fällt, wird der Versuch angehalten. Hier besteht ein Unterschied zu den Kunststoffversuchen, bei diesen die Kraftabschaltswelle $90 \% F_{max}$ beträgt. Die Haftzugversuche mit mineralischen Werkstoffen auf 3D-Textilien finden in Analogie zu den beschriebenen Versuchen mit 2D-Textilien statt.

Abbildung 29 Haftzug Probekörper mit überstehendem Beton



© ITA

Haftzugversuche Beton auf 3D-Textil: Die Haftzugversuche mit 3D-gedrucktem Betonstempel auf 3D-Textil werden in Analogie zu den beschriebenen Versuchen mit 2D-Textilien durchgeführt. Das 3D-Textil wird vor der Versuchsdurchführung durch die Siebdruckplatten zusammengedrückt.

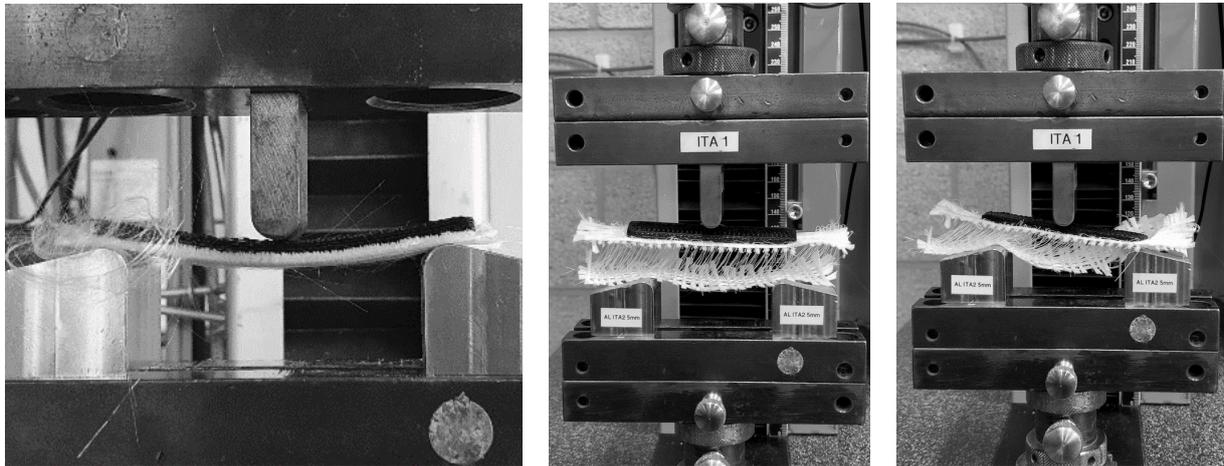
c.) Biegezugtests für 6dTEX

Biegezugtests Kunststoff auf 2D-Textil: Die Prüfungen der Versuchsserien Kunststoff auf 2D-Textil werden als 3-Punkt-Biegeversuch im Labor des Instituts für Textiltechnik Aachen (ITA) durchgeführt. Zum Einsatz kommt eine Zugprüfmaschine des Typs Z100 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland. Da es für diese Materialkombination noch keine genormte Durchführung gibt, werden die Versuche in Anlehnung an DIN EN ISO 14125 für die Bestimmung der Biegeeigenschaften faserverstärkter Probekörper durchgeführt, siehe Abbildung 30, links. Der Auflagerabstand wird auf 64 mm eingestellt und die Radien der Auflager sowie des Biegestempels betragen 5 mm . Es wird eine Vorkraft von $0,1 \text{ N}$ eingestellt, damit es beim Start des eigentlichen

Versuchs zu keinen Diskrepanzen zwischen den verschiedenen Proben kommt. Die Prüfgeschwindigkeit ist auf 1 mm pro Minute eingestellt und der maximale Verfahrensweg beträgt 15 mm. Eine Kraftabschaltswelle von 90 % der Maximalkraft ist für den Fall des Bruchs einer Probe vorhanden. Die Auswertung der verschiedenen Proben erfolgt in einem Diagramm mit der Spannung in Megapascal (MPa) auf der Y-Achse und der Verformung in mm auf der X-Achse.

Biegezugtests Kunststoff auf 3D-Textil: Die Einstellungen der Prüfmaschine werden zu den Versuchen mit 2D-Textilien gleichgehalten, mit der Ausnahme, dass bei diesen Versuchen ein Verfahrensweg von 20 mm möglich ist. Um ein Herunterrutschen der Proben von den beiden Auflagern zu vermeiden ist es notwendig die Textilien der Proben vor Versuchsstart flach zu drücken. Dazu wird der Abstand zwischen Biegestempel reduziert, sodass die zusammengedrückten Proben locker darunter passen. Die Proben werden von Hand zusammengedrückt und in die Prüfmaschine eingelegt. Durch den höheren Widerstand der Proben, aufgrund der Rückstellkraft der 3D-Textilien, kommt eine Vorkraft von in etwa 2,6 N zustande. Eine Prüfung der Proben ohne zusammendrücken ist nicht möglich. Da die Polfäden der Textilien keinen 90° Winkel aufweisen, rutschen die Proben bereits beim Anfahren der Vorkraft von den Auflagern herunter. In Abbildung 30, rechts ist die Problematik zu sehen.

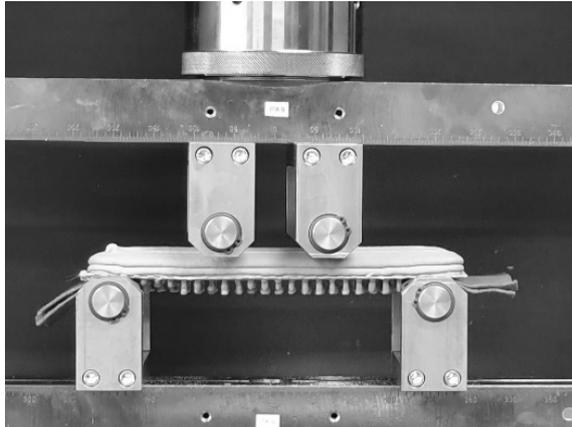
Abbildung 30, links: 3-Punkt-Biegeversuch mit eingespanntem Kunststoff auf 2D-Textil Probekörper, rechts: Kunststoff auf 3D-Textil, Probe ohne Zusammendrücken des Textils rutscht von Auflagern



© ITA

Biegezugtests Beton auf 2D-Textil: Die 3D-gedruckten Betonproben auf 2D-Textilien werden auch im Prüflabor des ITA untersucht. Auch hier gibt es noch keine genormte Vorgehensweise, weshalb die Prüfungen in Anlehnung an die DIN EN 1170-5 für die Biegezugfestigkeit von Glasfaserbeton als 4-Punkt-Biegezugversuch durchgeführt werden. Die Prüfungen werden auf einer Zugprüfmaschine des Typs ZMART.PRO von der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland untersucht. Die Stützweite beträgt 200 mm und die Spannlänge 67 mm. Somit ergibt sich der Abstand der Belastungsrollen von 66 mm. Die Klemmbeläge weisen einen Radius von 10 mm auf. Einige Proben weisen an den Auflageflächen Unebenheiten durch Betonknoppen oder Rückstände von den entfernten Betonknoppen auf. Um diese Unebenheiten auszugleichen und eine möglichst einheitliche Kräfteinleitung zu gewährleisten, wird ein handelsübliches Vlies als Unterlage verwendet. Das Vlies wird doppelt zwischen Auflagefläche der Probe und Auflager gelegt, wie in Abbildung 31, links gezeigt. Der Einsatz des Vlieses wurde in Vorversuchen mit der Messreihe 220715 untersucht. Dort ist bei Probe 2, welche mit dem Vlies geprüft wurde, ein homogener Verlauf der Messkurve mit einem definierten Abfall der Spannung nach dem Bruch zu erkennen. Beim Versuch der Probe 1 ohne die Vliesunterlage ist der Kurvenverlauf deutlich inkonstanter.

Abbildung 31, links: Vliesunterlage zum Ausgleich von Unebenheiten; rechts: Einfluss der Betonoberfläche auf die Versuchsdurchführung

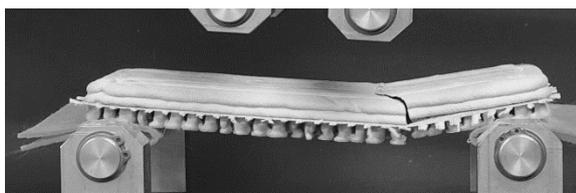
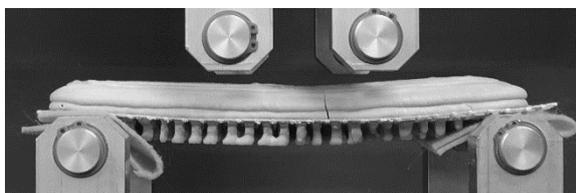
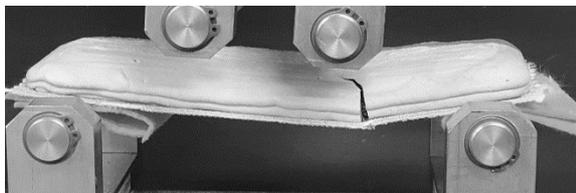


© ITA

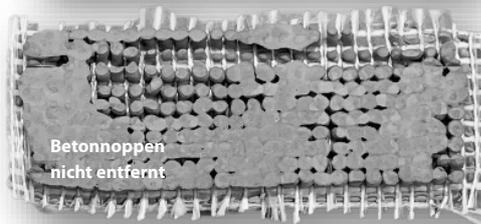
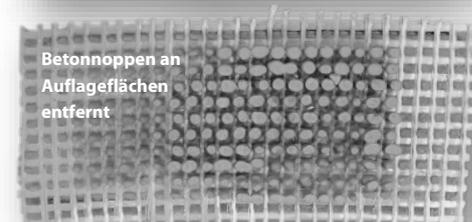
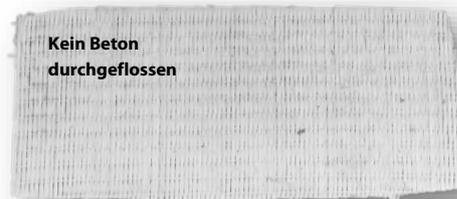


Bei der Prüfung der gedruckten Betonkörper auf 2D-Textilien ergeben sich Herausforderungen, die mit der Prüfkörpergeometrie und der Größe der Öffnungen im Textil zusammenhängen. Zum einen variiert die Dicke des Betons über den Verlauf der Proben, sodass Abweichungen von der Geometrie Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben können, zum anderen ist die Oberfläche der Proben uneben, sodass die Druckfinne nur auf einzelnen Punkten aufliegen kann. Die Größe der Öffnungen im Textil beeinflusst die Menge des Betons, die durch das Textil hindurch auf die Unterseite fließen kann. Bei einem dichten Textil bleibt die Unterseite der Proben weitestgehend frei vom Beton (siehe Abbildung 32, oben).

Abbildung 32, oben: Prüfnummer 221006_4BZ_1.1, Beton fließt nicht durch das Textil hindurch; Mitte: Beton fließt durch das Textil, Betonrippen wurden an den Auflageflächen entfernt; unten: Das Textil wird vom Beton eingeschlossen und kann auf den Auflagestellen nicht entfernt werden



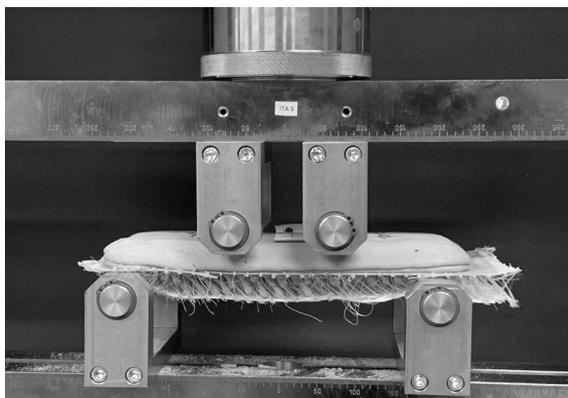
© ITA



Bei größeren Öffnungen fließt so viel Beton hindurch, dass es sich unterhalb der Probe verbindet (siehe Abbildung 32, unten). Bei weiteren Proben tritt der Beton nur an einzelnen Stellen hindurch und kann an den Auflagerstellen für die Versuchsdurchführung abgenommen werden (siehe Abbildung 32, Mitte). Hieraus ergeben sich drei geometrische Konstellationen, die zu einer unterschiedlichen Belastung des Textils führen.

Biegezugtests Beton auf 3D-Textil: Die Prüfversuche mit 3D-gedruckten Betonproben auf 3D-Textilien werden an derselben 4-Punkt-Biegezugvorrichtung mit denselben Einstellungen wie die 2D-Textilien durchgeführt. Im Unterschied zu den Betonproben auf 2D-Textilien kann der durch die Textilöffnungen fließende Beton an den Auflagerstellen nicht entfernt werden, da sich die untere Deckschicht samt den Polfäden des Textils darunter befindet. Der Beton befindet sich in dem Raum zwischen den beiden Textildecklagen. Während der Versuchsdurchführung wird der Prüfkörper auf die Auflagerstellen gelegt, das 3D-Textil drückt sich dabei soweit zusammen, bis der Beton die Auflagerstellen der Prüfvorrichtung berührt (Abbildung 33).

Abbildung 33, Aufbau des Biegezugversuchs 3D-Textil

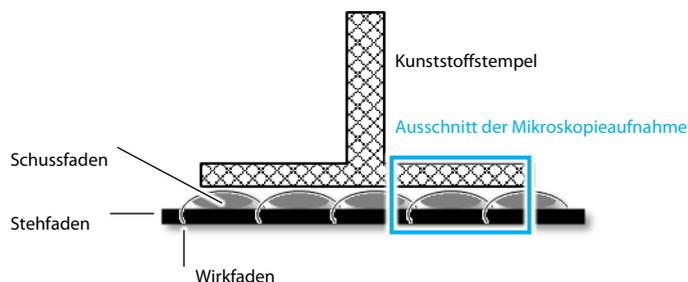


© ITA

d.) Mikroskopie zum Haftverbund

Zur genaueren Untersuchung der Verbundeigenschaften wurden einzelne Proben aus den Kunststoffbiegezugversuchen auf 3D-Textilien unter einem Mikroskop untersucht. Vorbereitend wurde aus den Proben ein Würfel mit 20 mm Kantenlänge herausgeschnitten (Abbildung 34, blau gekennzeichnet) und in Harz eingegossen.

Abbildung 34, Position der Mikroskopie am Kunststoffstempel, schematisch



© ITA

5.1.6.4 Versuchsablauf

Abgeleitet aus dem in Kapitel 4.2 skizzierten, methodischen Ansatz unterscheiden die nachfolgenden Testreihen generell nach den verwendeten Verbundmaterialien und dann nach Versuchsreihen mit Flächentextilien (Vorversuche) und zuletzt mit 3D-Textilien (Versuche). Sowohl in den Versuchsreihen mit Flächentextilien wie mit 3D-Textilien werden im ersten Schritt die textilen Geometrien geplant, die

entsprechenden Textilien hergestellt sowie die Druckparameter final justiert. Zuletzt werden die Prüfkörper hergestellt um die eigentlichen Haft- und Biegezugversuche durchzuführen.

5.1.7 Orientierende Vorversuche Kunststoffe: 3D-Druck auf marktgängige 2D-Textilien

5.1.7.1 Orientierende Vorversuche PA, PES, PP: Druckform Quadrat- und T-Körper

Mit den in Kapitel 5.1.6.2 definierten variablen und konstanten Druckparametern werden die ersten Druckversuche im FDM-Verfahren auf marktgängigen Textilien durchgeführt. Ausgangspunkt ist der aktuelle Stand der Forschung gem. Kapitel 2.1.3. Hier werden für die Haftung positiv vermerkte Einstellungen vorgenommen, beispielsweise eine eher hohe Drucktemperatur, eine vergleichsweise langsame Druckgeschwindigkeit und ein geringer Z-Wert. Ziel ist es, die optimalen Druckparameter für die jeweilige Mono-Materialkombination zu ermitteln. Hierfür werden zunächst einfache quadratische Flächen mit einer Größe von 50 x 50 mm und einer Höhe von vier Druckschichten auf die vorher gespannten Textilien gedruckt. Mit der one-factor-at-a-time Methode werden die variablen Versuchsparameter Drucktemperatur, Druckgeschwindigkeit, der neu definierte Zd-Wert gem. Kapitel 5.1.2.6 d) und Infillausrichtung nacheinander getestet und mit Hilfe von händischen Zug- und Schältests bewertet. Die konstanten Parameter der Perimeter, Strangbreite, des Flows und der Schichthöhe sowie die Bauraumtemperatur bleiben unverändert. Mit den jeweils besten Druckparametern werden nach der Parameterdefinierung T-Körper gedruckt, welche anschließend in Haftzugversuchen geprüft werden. Die Druckparameter der Druckkörper mit den besten Prüfergebnissen dienen als Grundlage für die Parametereinstellungen der kommenden orientierenden Versuche der jeweiligen Materialkombinationen und helfen bei der Werkstoffwahl für die weitere Versuchsplanung im Projekt.

a) Testreihe PA 6.6 Nylon

Für das Nylon-Materialmatch wird das FX256 Nylon-Filament von Fillamentum mit einem Nylongewebe kombiniert (Leinwandbindung, Nr.1.04_PA6.6_2D_N.Weber). Die ersten Nylon-Druckversuche führen zu nahezu keiner Haftung an Bauplattform oder Textil und zeigen starke Warming-Effekte. Da der große Temperaturunterschied von erhitztem Druckmaterial und kalter Bauplattform sowie Temperaturschwankungen der Umgebung die Ursache für Warming-Effekte sind, wird der Drucker eingehaust. Trotz des Housings können die Warming-Effekte nur verringert werden und nicht komplett eliminiert. Außerdem wird die Bauplattform beheizt und die Ventilatoreinstellungen angepasst. Ergänzend wird über zusätzliche Adhäsive wie zum Beispiel Sprühkleber, Anti-Warming-Spray und Klebestift versucht, eine bessere Bindung von Druckmaterial und Untergrund zu erzeugen.

Parameter die in der Versuchsreihe nicht variiert werden: Perimeter = 2; Strangbreite = 0,4 mm; Druckbetttemperatur = unbeheizt, Flow = 100 %, Schichthöhe = 0,2 mm; Bauraumtemperatur = Raumtemperatur (zusätzlich Housing)

Parameter, die in der Versuchsreihe variiert und optimiert wurden: Drucktemperatur = 255 °C; Ventilator = 0%; Wand und Schicht 1-4 Druckgeschwindigkeit 20 mm/s, Druckgeschwindigkeit Infill = 40 mm/s; Zd-Wert = 0 mm; Infillausrichtung = 100 %, Linien 45°/135° zur Kettrichtung des Textils

Die Haftung des Drucks am Textil kann dadurch ebenfalls nicht hergestellt werden. Zusammenfassend kann auch nach 18 Druckversuchen kein ausreichender Zusammenhalt zwischen Nylon-Druckmaterial und Nylon-Textil erzeugt werden. Die Testreihe wird abgebrochen. Abbildung 35 zeigt die Druckergebnisse der Versuchsreihe und das verwendete Nylongewebe.

Abbildung 35, links: 3D-Druck mit PA 6.6 Nylon Material auf Nylogewebe, rechts: Beispiel Warpingeffekt



© Frankfurt UAS

b) Testreihe PES: PETG Flammschutz (Parameter die in der Versuchsreihe nicht variiert wurden: Perimeter = 2; Strangbreite = 0,4 mm; Druckbetttemperatur = unbeheizt; Flow = 100 %, Schichthöhe = 0,2 mm, Ventilator = 100 %; Bauraumtemperatur = Raumtemperatur

Parameter die in der Versuchsreihe variiert, optimiert und im Ergebnis wie folgt festgehalten wurden: Drucktemperatur = 240 °C; Wand und Schicht 1-4 Druckgeschwindigkeit 12,5 mm/s, Druckgeschwindigkeit Infill = 25 mm/s; Zd-Wert = 0 mm; Infill = 100 %, Linien 45°/135° zur Kettrichtung des Textils

Abbildung 36.)

Die Monomaterialstrukturen aus Polyester werden mit einem Gewebe des DITF der Nr. 2.07_PET_2D-DITF (Leinwandbindung) und einem entsprechenden PETG-Filament in Flammschutzqualität kombiniert. Das Material lässt sich gut am vorhandenen Prusa i3MK3S verarbeiten lässt. Nach 19 Druckversuchen konnten die variablen Druckparameter hinsichtlich der Haftung weitestgehend optimiert werden. Die optimierten Druckparameter für das PETG Flammschutz-Filament in Kombination mit dem hier verwendeten PES-Textil sind:

Parameter die in der Versuchsreihe nicht variiert wurden:

Perimeter = 2; Strangbreite = 0,4 mm; Druckbetttemperatur = unbeheizt; Flow = 100 %, Schichthöhe = 0,2 mm, Ventilator = 100 %; Bauraumtemperatur = Raumtemperatur

Parameter die in der Versuchsreihe variiert, optimiert und im Ergebnis wie folgt festgehalten wurden:

Drucktemperatur = 240 °C; Druckgeschwindigkeit Infill = 40 mm/s und Wand und Schicht 1-4 Druckgeschwindigkeit 20 mm/s; Zd-Wert = 0 mm; Infill = 100 %, Linien 45°/135° zur Kettrichtung des Textils

Mit den aufgelisteten Parametern werden drei T-Körper für die Haftzugprüfung hergestellt und anschließend hinsichtlich der maximalen Haftzugkraft untersucht.

c) Testreihe PES: rPETG Rezyklat (Abbildung 36)

Parameter die in der Versuchsreihe nicht variiert wurden: Perimeter = 2; Strangbreite = 0,4 mm; Druckbetttemperatur = unbeheizt; Flow = 100 %, Schichthöhe = 0,2 mm, Ventilator = 100 %; Bauraumtemperatur = Raumtemperatur

Parameter die in der Versuchsreihe variiert, optimiert und im Ergebnis wie folgt festgehalten wurden:

Drucktemperatur = 240 °C; Wand und Schicht 1-4 Druckgeschwindigkeit 12,5 mm/s, Druckgeschwindigkeit Infill = 25 mm/s; Zd-Wert = 0 mm; Infill = 100 %, Linien 45°/135° zur Kettrichtung des Textils

Das PETG Druckmaterial ist auch auf Rezyklatbasis erhältlich. Ergänzend zum PETG Flammschutz-Material wird deshalb in der zweiten Polyester-Versuchsreihe ein Druckfilament mit Recyclinganteil verwendet. Das rPETG-Filament von Formfutura wird ebenfalls mit dem Gewebe des DITF (Leinwandbindung, Nr. 2.07_PET_2D-DITF)

bedruckt, die Druckparameter werden die aus der Testreihe mit PETG Flammenschutzmaterial übernommen. Zu beobachten ist, dass sich der Druckkörper beim Druckprozess etwas nach oben wölbt und Warping Effekte zeigt. Auch hier werden im Anschluss drei T-Körper auf das Textil gedruckt für abschließende Haftzugtests hergestellt.

Parameter die in der Versuchsreihe nicht variiert wurden:

Perimeter = 2; Strangbreite = 0,4 mm; Druckbetttemperatur = unbeheizt; Flow = 100 %, Schichthöhe = 0,2 mm, Ventilator = 100 %; Bauraumtemperatur = Raumtemperatur

Parameter die in der Versuchsreihe variiert, optimiert und im Ergebnis wie folgt festgehalten wurden:

Drucktemperatur = 240 °C; Wand und Schicht 1-4 Druckgeschwindigkeit 12,5 mm/s, Druckgeschwindigkeit Infill = 25 mm/s; Zd-Wert = 0 mm; Infill = 100 %, Linien 45°/135° zur Kettrichtung des Textils

Abbildung 36, links: 3D-Druck mit PETG Flammenschutzmaterial auf PES Textil; rechts: 3D-Druck mit PETG Rezyklat auf PES-Textil



© Frankfurt UAS

d) Testreihe PP

Abbildung 37, links: 3D-Druck mit PP-Druckmaterial auf PP-Textil, rechts: Unterseite des bedruckten Textils mit sichtbarem Druckmaterial



© Frankfurt UAS

Für die Untersuchung der Monomaterialkombination aus Polypropylen wird das Centaur PP-Filament der Marke Formfutura verwendet. Kombiniert wird dieses mit dem Gewebe Nr.3.01_PP_2D_ITA (Leinwandbindung). Innerhalb von 15 Druckversuchen konnten die Parameter schrittweise hinsichtlich der Haftung optimiert werden. Beim Drucken mit PP lässt sich eine besonders starke Durchdringung des Materials beobachten, welche auch auf die im Vergleich zu den anderen Materialien lockerere Textilstruktur zurückzuführen ist. Parameter die in der Versuchsreihe nicht variiert wurden:

Perimeter = 2; Strangbreite = 0,4 mm; Druckbetttemperatur = unbeheizt; Flow = 100 %, Schichthöhe = 0,2 mm, Ventilator = 0 %; Bauraumtemperatur = Raumtemperatur

Parameter die in der Versuchsreihe variiert, optimiert und im Ergebnis wie folgt festgehalten wurden: Drucktemperatur = 245 °C; Wand und Schicht 1-4 Druckgeschwindigkeit 10 mm/s, Druckgeschwindigkeit Infill = 20 mm/s; Zd-Wert = 0,3 mm; Infill = 100 %, Linien 45°/135° zur Kettrichtung des Textils

Abbildung 37 zeigt die Unterseite einer der gedruckten Quadratflächen mit dem durch das Textil gedrungene Druckfilament. Eignet sich die offene Textilstruktur einerseits gut für eine Durchdringung des Materials, so erschwert sich durch die bewegliche Struktur andererseits der Herstellungsprozess. Das verwendete PP-Textil lässt sich leichter in sich verschieben als die anderen Textilien. Es muss zusätzlich mit Sprühkleber befestigt und auch an den Rändern mit Klebeband fixiert werden. Auf Basis der evaluierten Parameter werden auch hier drei T-Körper für nachfolgende Haftzugversuche hergestellt.

Parameter die in der Versuchsreihe nicht variiert wurden:

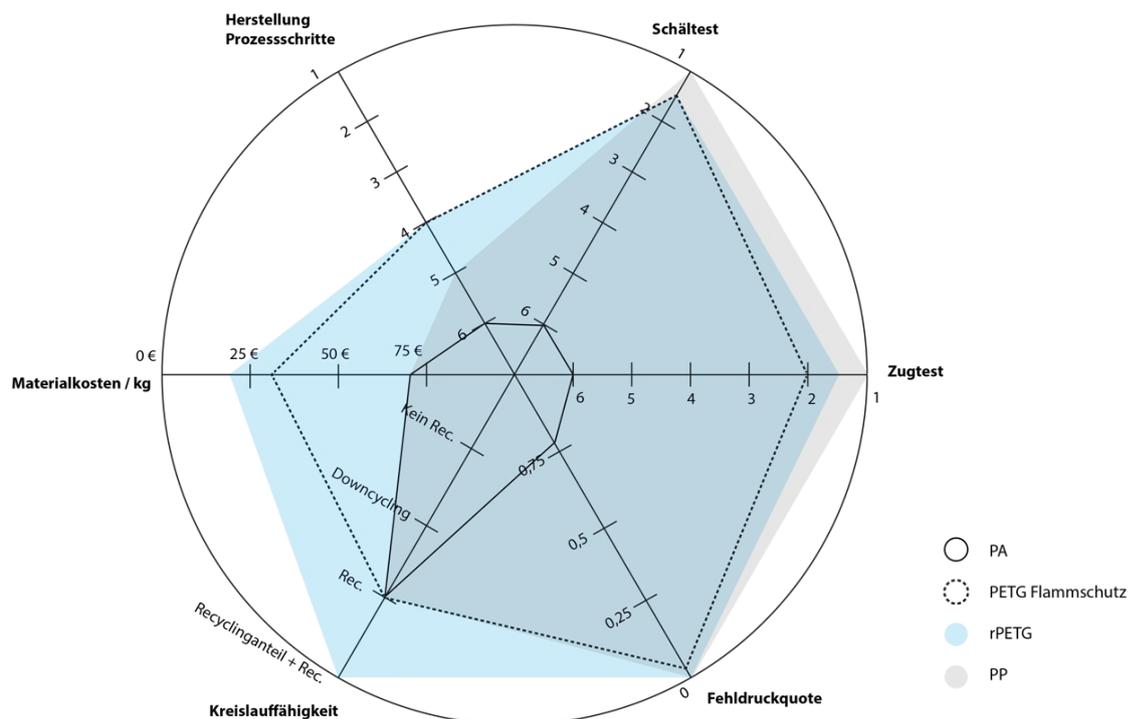
Perimeter = 2; Strangbreite = 0,4 mm; Druckbetttemperatur = unbeheizt; Flow = 100 %, Schichthöhe = 0,2 mm, Ventilator = 0 %; Bauraumtemperatur = Raumtemperatur

Parameter die in der Versuchsreihe variiert, optimiert und im Ergebnis wie folgt festgehalten wurden:

Drucktemperatur = 245 °C; Wand und Schicht 1-4 Druckgeschwindigkeit 10 mm/s, Druckgeschwindigkeit Infill = 20 mm/s; Zd-Wert = 0,3 mm; Infill = 100 %, Linien 45°/135° zur Kettrichtung des Textils

5.1.7.2 Orientierende Vorversuche, Zwischenresümee Drucken

Abbildung 38, Auswertung orientierende Vorversuche mit PA-, PETG- und PP-Druckmaterialien auf Flächentextilien aus derselben Werkstoffgruppe



© Frankfurt UAS

Abbildung 38 zeigt anhand unterschiedlicher Kriterien die Auswertung der durchgeführten orientierenden Vorversuche mit verschiedenen Mono-Materialkombinationen:

- Schältest/Zugtest: Beste Haftung des jeweiligen Werkstoffs, Auswertung orientierender Vorversuche
- Fehldruckquote: Stabilität und Replizierbarkeit des gleichen Druckversuchs bezogen auf das Material
- Kreislauffähigkeit: Recyclingfähigkeit des Kunststoffes
- Materialkosten / kg
- Herstellung Prozessschritte: Herstellungsschritte und Zeit, die für die Parameterfindung und allgemeine Einstellung des Druckers sowie Herstellung eines gleichen Druckkörpers benötigt sind

Auffällig ist die geringere Reproduzierbarkeit von Nylon, welche sich aus der Fehldruckquote ergibt. Aus diesem Grund und der nicht vorhandenen bzw. schlechten Haftung von Nylon auf dem Textil, wird Nylon als Materialmatch nicht weiter im Rahmen des Projekts und gegebenem Maschinenaufbau verfolgt. Polypropylen erzielt die besten mechanischen Schäl- und Zugtestergebnisse, ergibt allerdings hinsichtlich der Kreislauffähigkeit eine schlechtere Bewertung als die rPETG-Materialkombination. rPETG hat in allen Bereichen, bis auf den Schäl- und Haftzugtest, die besten Ergebnisse. Und die Schäl- und Zugtestergebnisse sind annähernd gut wie die Ergebnisse der Polypropylen-Versuche.

5.1.7.3 Orientierende Vorversuche Haftzugtests PES (PET), PP: T-Körper

a) Versuchsaufbau Haftzugtests, Festlegung von Material- und Druckparametern: Für die folgenden drei Versuchsreihen mit je drei Versuchen wurden gängige Textilien und Druckmaterialien aus jeweils PES- (PET-) und PP-Druck- und Textilmaterial kombiniert (Abbildung 39). Die Textilien für die orientierenden Vorversuche wurden vom DITF und ITA aus Restbeständen zur Verfügung gestellt. Sie variieren entsprechend in Materialdichte und Materialgewicht:

- 2.07_PET_2D_DITF: Gewebe (Leinwandbindung), Fadendichte: 25 Fd./cm (Kette), 20 Fd./cm (Schuss), Flächengewicht: 180 g/m²
- 3.01_PP_2D_ITA, Gewebe (Leinwandbindung), Fadendichte: 7,5 Fd./cm (Kette), 7,6 Fd./cm (Schuss), Flächengewicht: 166 g/m²

Abbildung 39, Versuchskörper (Prüfreihe), links: PETG Flammenschutz auf PET-Textil (220105_HZ_1.1-3); Mitte: rPETG auf PET-Textil (220120_HZ_1.1-3), rechts: PP auf PP-Textil (220421_HZ_1.1-3)



© Frankfurt UAS

Die gewählten Druckparameter werden je Werkstoffgruppe gemäß den besten Ergebnissen der orientierenden Vorversuche aus Kapitel 5.1.7.2 eingestellt. Es werden die nachfolgenden 3D-Druckmaterialien verwendet:

- PETG: PETG Flammenschutz, Hersteller: Das Filament
- rPETG: rPETG ReForm, Hersteller: Formfutura
- PP: Centaur PP, Hersteller: Formfutura

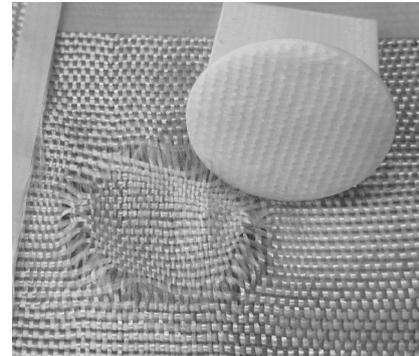
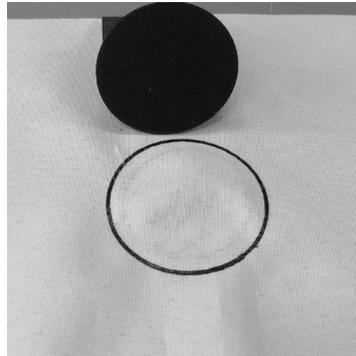
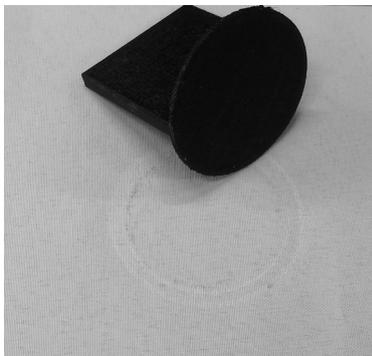
b) Beobachtungen Haftzugtests PES: PETG Flammenschutz, Prüfnummern 220105_HZ_1.1-3: Wie Abbildung 40, links zeigt, ist der Stempel vollständig vom Textil getrennt und es sind keine sichtbaren Fasern mehr vorhanden. Der Rand der kreisförmigen Basis des Stempels ist leicht erhöht. Aufgrund der maximalen Klebekraft verformt sich das Textil um die Verbindungsfläche herum deutlich. Die Ergebnisse der drei Proben

als Mittelwertdiagramm sind in Abbildung 41 dargestellt. Die maximalen Adhäsionskräfte der drei Proben betragen 92 N, 102 N und 97 N. Die Dehnungen bei der maximalen Kraft betragen 4,04 mm, 4,43 mm und 3,68 mm. Die Ergebnisse der drei Proben in dieser Reihe sind ähnlich, was bedeutet, dass die Abweichung der Ergebnisse gering ist. Daher ist ein Durchschnittswert angemessen. Die durchschnittliche maximale Adhäsionskraft beträgt 97,67 N, und die durchschnittliche Dehnung bei der Spitzenkraft beträgt 4,05 mm. Die maximale Dehnung dieser Serie beträgt im Durchschnitt 10,67 mm.

c) Beobachtungen Haftzugtests PES: PETG Rezyklat, Prüfnummern 220120_HZ_1.1-3: Wie Abbildung 40, (Mitte) zeigt, ist der Stempel vollständig vom Textil getrennt und es sind keine sichtbaren Fasern mehr vorhanden. Der Rand der kreisförmigen Basis des Stempels ist leicht erhöht. Aufgrund der maximalen Klebekraft weist das Textil im Bereich der Verbindungsfläche eine deutliche Verformung auf. Die Ergebnisse der Prüfnummer 220105_HZ_1.1-3 sind in Abbildung 41 dargestellt. Die maximale Haftkraft beträgt 168 N, 161 N und 153 N, und die Dehnungen bei der maximalen Kraft betragen 5,14 mm, 4,80 mm und 6,04 mm. Die durchschnittliche maximale Haftkraft beträgt 161 N mit einer durchschnittlichen Dehnung von 5,33 mm an diesem Punkt. Die maximale Dehnung dieser Serie beträgt im Durchschnitt 12,61 mm.

d) Beobachtungen Haftzugtests PP, Prüfnummern 220421_HZ_1.1-3: Der Verformungsgrad der drei Proben Textilien ist unterschiedlich. Bei der Probe 2, Abbildung 40, rechts sind alle Fäden um den Rand herum gedehnt und verformt, was zu einer höheren, von der Maschine gemessenen, maximalen Haftkraft führt. Bei den Proben 1 und 3 ist nur ein Teil der Fäden am Rand verformt. Die Delamination im Adhäsionstest lässt auf einen inhomogenen Kontakt zwischen dem 3D-gedruckten Objekt und dem textilen Substrat schließen. Die maximalen Haftzugkräfte liegen bei 236 N, 349 N und 216 N, die Dehnungen bei maximaler Kraft betragen 12,58 mm, 12,42 mm und 11,23 mm.

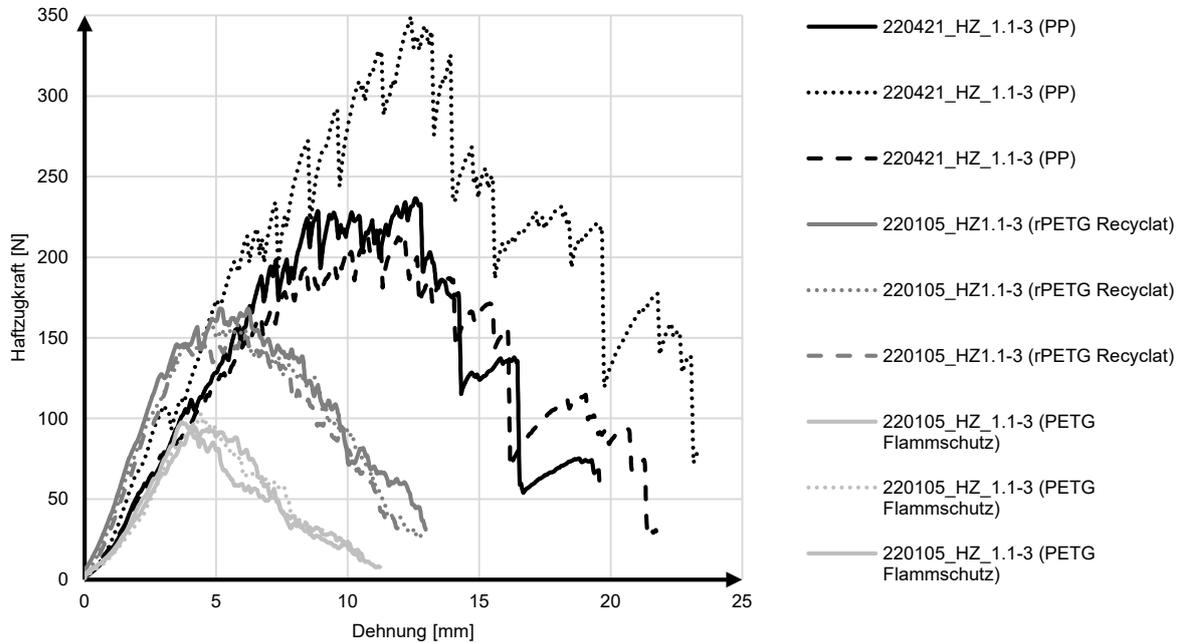
Abbildung 40, Proben nach der Haftzugprüfung, links: PETG Flammschutz auf PET-Textil (220105_HZ_1.1);Mitte: rPETG auf PET-Textil (220120_HZ_1.1), rechts: PP auf PP-Textil (220421_HZ_1.2)



© ITA

5.1.7.4 Resümee Orientierende Vorversuche, Haftzugtests mit PES (PET) und PP

Abbildung 41, Haftzugversuch, Kraft-Dehnungsdiagramm zu den 3D-Druck Prüfkörpern aus PETG Flammenschutz (Textil PET), rPETG Recyclat (Textil PET) sowie PP (Textil PP)



© ITA

Die Übersicht zu den Prüfergebnissen der drei Prüferien 220105_HZ_1.1-3 (PETG Flammenschutz), 220105_HZ_1.1-3 (PETG Rezyklat) sowie 220421_HZ_1.1-3 (PP) ist in Abbildung 41 dargestellt. Die Prüfnummer 220120_HZ_1.1-3 mit der Materialkombination aus 2.07_PET_2D_DITF und 2.14 rPETG weist höhere Kräfte auf als die Prüfnummer 220105_HZ_1.1-3 (PES: PETG Flammenschutz). Die Prüfnummer 220421_HZ_1.3 (PP) zeigt die Maximalkraft von 350 N. Die hohen Haftungsergebnisse von PP lassen sich dabei auf die Beschaffenheit des Textils zurückführen. Es wird angenommen, die bessere Durchdringung des PP-Textils im Gegensatz zum feinen PES-Textil erhöht die mechanische Haftung. Aufgrund von Materialkosten, Kreislauffähigkeit und Prozessstabilität des Druckprozesses (Reproduzierbarkeit) wird rPETG als Druckmaterial für den weiteren Projektverlauf gewählt, unter Beibehalt der in Kapitel 5.1.7.1 c) ausgewerteten Parameter (Abbildung 36).

Tabelle 5, Druckparameter rPETG-Druckmaterial

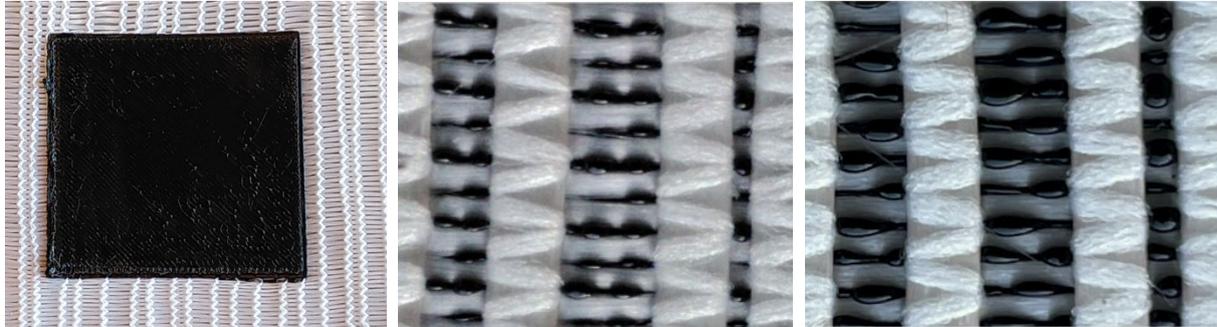
Parameter nicht variiert						
Perimeter	Strangbreite	Temp. Druckbett	Flow	Schichthöhe	Ventilator	Temp. Bauraum
2	0,8 mm	unbeheizt	100 %	0,6 mm	20 %	Raumtemperatur
Parameter variiert und optimiert						
Drucktemperatur	Wand/Schicht 1-4 Druckgeschwindigkeit	Infill Druckgeschw.	Zd-Wert	Infill		
240 °C	12,5 mm/s	25 mm/s	0 mm	45° / 135° zur Kettrichtung des Textils		

© Frankfurt UAS

Die maximale Haftzugkraft der rPETG-Proben in dieser Versuchsreihe liegt bei $F_{max} = 168,20$ N. Für die Entwicklung eigener Textilien aus PES ist das Fazit, dass die verwendeten Garne nicht zu fein und die Oberfläche nicht zu glatt sein dürfen.

Weitere Versuche zeigen, dass die Durchdringung des Druckmaterials durch das Textil auf der Unterseite (Abbildung 43) nur bei einem Infill mit Druckrichtung im 45° Winkel zur Schussrichtung erreicht werden kann. Der Zd-Wert ist optimal bei 1 mm, bei geringeren Abständen beschädigt der 3D-Drucker das Textil.

Abbildung 43, links und Mitte: rPETG-Druck, Düse = 0,4 mm auf Textil PET.2D.1.1, Druckversuch DP220210_DP_1.3; rechts: rPETG-Druck, Düse = 0,8 mm auf Textil PET.2D.1.1.



© ITA / Frankfurt UAS

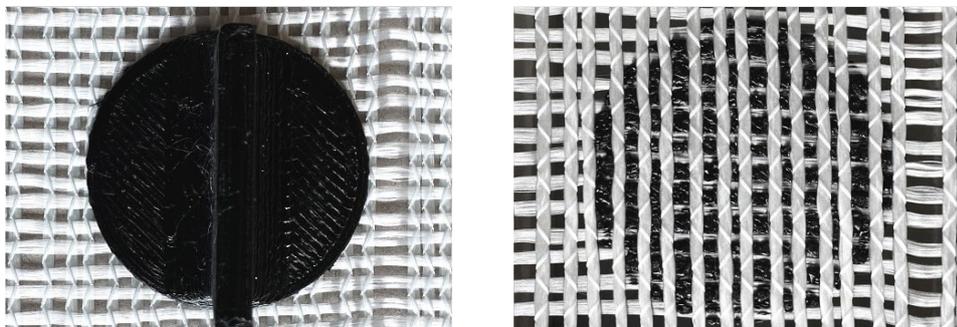
e.) Druckversuche Zwischenresümee

- Die Haftung auf kettengewirktem Biaxialgelege ist generell besser als auf marktgängigen 2D-Textilien.
- Eine 0,8 mm Düse deckt mehr Fläche mit einer Filamentbahn ab als eine 0,4 mm Düse und durchdringt das Textil besser.
- Händische Schäl- und Zugtestergebnisse sind fast identisch zwischen den verschiedenen Düsendurchmessern.
- Die Haftung wird vor allem an den Wirkfäden erzeugt.
- Die Durchdringung des Druckmaterials durch das Textil verbessert die Haftung deutlich (hierbei ist die richtige Einstellung des Zd-Werts entscheidend).
- Bei der Herstellung der Haftzugproben muss die Kühlung der Düse über den Ventilator verringert werden (100 % -> 20 %).

Die finalen Druckparameter sind Perimeter: 2, Düsendurchmesser: 0,8 mm, Druckbetttemperatur = unbeheizt, Schichthöhe/-breite: 0,6 mm/0,8 mm, Ventilator: 20 %, Drucktemperatur: 240 °C, Druckgeschwindigkeit Schicht 1-4: 12,5 mm/s, Zd-Wert: 0 mm und Schicht 1-4: Druckgeschw. 12 mm/s, Infill: 100 % / Linien 45°/135°

f.) Drucken der T-Körper für Haftzugversuche

Abbildung 44, links: Aufsicht und rechts Untersicht des finalen T-Körpers auf dem Textil PET.2D.1.3



© ITA / Frankfurt UAS

Mit den optimierten Druckparametern und der optimierten Prüfkörpergeometrie aus den Vorversuchen werden die finalen Haftzugprüfkörper zur Einspannung in die Prüfmaschine auf die beiden Textilgeometrien gedruckt (Abbildung 44).

5.1.8.2 Vorversuche Kunststoff rPETG-Druckmaterial und PES/Glastextil, Druckform: T-Körper

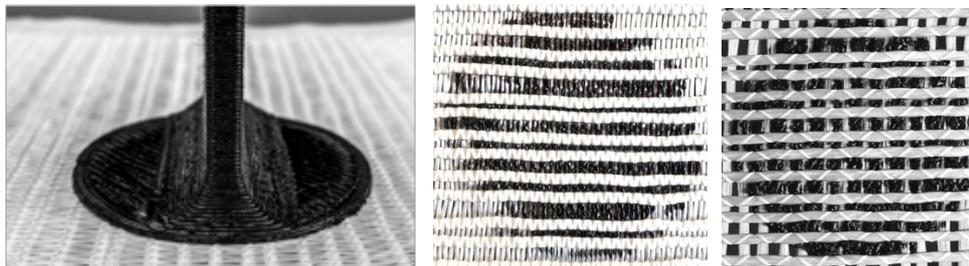
Für die folgenden Versuchsreihen mit je drei Versuchen wurden projektspezifische, kettengewirkte Gelege aus PES mit Schuss-, Kett- und Wirkfäden aus PES geplant. Sie kommen der Oberfläche der späteren 3D-kettengewirkten Abstandsgelege am nächsten. Aus zeit- und maschinentechnischen Gründen mussten die am ITA auf der entsprechenden Maschine bereits verwendete Stehfäden aus Glas genutzt werden, die restlichen Rovings sind aus PES. Es wurde also mit einem Mischtextil gearbeitet, dessen haftungsrelevante Schussfadenseite aber zumindest aus PES besteht.

a.) Versuchsaufbau Haftzugtests: Festlegung von Material- und Druckparametern: Es wurden zwei Textilien mit unterschiedlich dichten Oberflächen gefertigt. Sie unterscheiden sich bei gleichem Stehfadenabstand durch unterschiedliche Abstände der Schussfäden:

- PET.2D.1.1: Stehfäden AR Glas 2.400tex, Volleinzug (Achsabstand: 4,23mm), Schussfäden PES 220tex, Stichlänge/Achsabstand: geplant 1 mm, Wirkfäden: PES
- PET.2D.1.3: Stehfäden AR Glas 2.400tex, Volleinzug (Achsabstand: 4,23mm), Schussfäden PES 220tex, Stichlänge/Achsabstand: geplant 3 mm, Wirkfäden: PES

Die 3D-Druckparameter für das rPETG Druckmaterial wurden aus den Vorversuchen (Kapitel 5.1.8.1) übernommen. Die Druckgeschwindigkeit des Infills der Schicht 1-4 liegt wie gehabt bei 12,5 mm/s, die der Wand bei 25 mm/s. Abbildung 45 zeigt links exemplarisch den finalen Druckkörper mit einem weichen Übergang zwischen der vertikalen Greiffläche und der horizontalen Druckfläche. Daneben von unten (Stehfadenseite) sichtbar die unterschiedliche Durchdringung der textilen Oberfläche beim Druck auf die jeweils unterschiedlich poröse Schussfadenseite.

Abbildung 45, Versuchskörper (Prüfreihe) links: finaler Prüfkörper; Mitte: Textil PET.2D.1.1 (Prüfreihe 220617_HZ_1.1-3) und rechts: Textil PET.2D.1.3 (Prüfreihe 220630_HZ_1.1-3), beide Ansicht von der Stehfadenseite, bedruckt von der Schussfadenseite

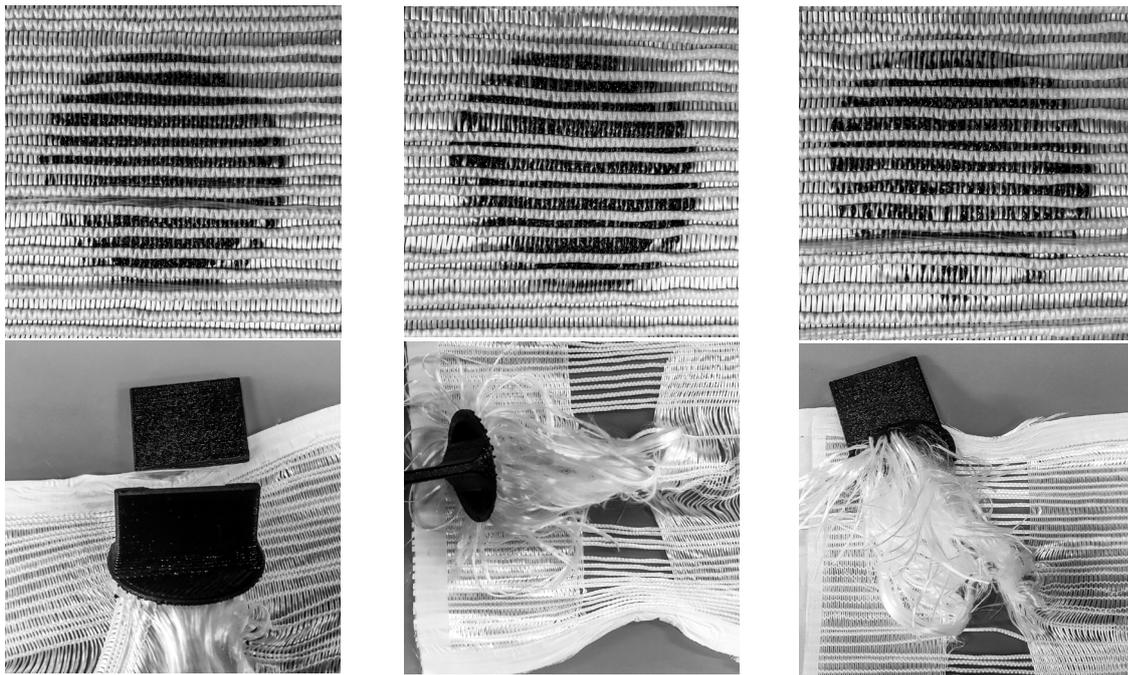


© ITA / Frankfurt UAS

b.) Beobachtungen Haftzugtests: Beim Textil PET.2D.1.1 (Prüfreihe 220617_HZ_1.1-3) bricht bei Probe 1 der Stempel ab. Durch das Hinzufügen von Gummi auf der Oberfläche der Klemmen wird bei den weiteren Proben der Druck bzw. die Klemmkraft verringert. Die Kurve der Probe endet bei einer Dehnung von 75 mm. Die Bruchstelle liegt am Rand der Kontaktfläche von der Klammer der Prüfvorrichtung. Die Prüfkörper 2 und 3 bleiben unbeschädigt. Die unterschiedliche Anzahl gerissener AR-Glasfasern, die an den Stempeln befestigt sind, trägt zum unterschiedlichen Verlauf der Kurven nach 30 mm Dehnung bei. Die gerissenen Fasern, die am Stempel befestigt sind, bewegen sich entlang des Stempels. Die Hauptverformung (angezeigt durch die Dehnung) wird nicht mehr durch das Textil, sondern durch die gerissenen Fasern verursacht. Wie Abbildung 46 zeigt, bleiben die Stempel der Proben 2 und 3 stark mit den Fasern verbunden. Die Fäden werden aus dem Textil herausgezogen.

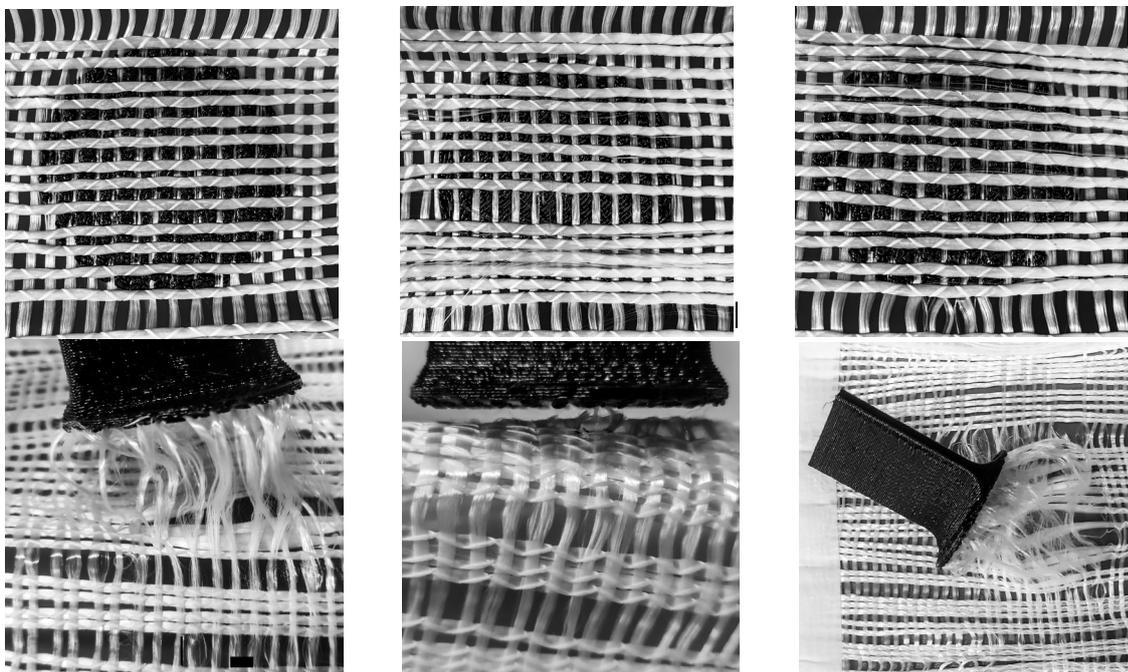
Beim Textil PET.2D.1.3 (Prüfreihe 220630_HZ_1.1-3) bleiben alle Stempel nach dem Test unversehrt. Bei den Proben 1 und 3 sind noch einige PES-Fäden an der Unterseite der 3D-gedruckten Objekte zu sehen, bei Probe 2 hingegen ist der Stempel vollständig vom Textil getrennt. Wie an der Unterseite von Probe 2 zu sehen ist, sickert das bedruckte Material nicht durch das Textil (Abbildung 47, unten). Daher stellt Probe 2 eine Ausnahme dar.

Abbildung 46, Textil PET.2D.1.1 (Prüfreihe 220617_HZ_1.1-3) (oben) Sicht der Proben 1-3 von der Stehfadenseite (unten) Proben 1-3 nach dem Versuch



© ITA

Abbildung 47, Textil PET.2D.1.3 (Prüfreihe 220630_HZ_1.1-3) (Oben) Sicht der Proben 1-3 von der Stehfadenseite (Unten) Proben 1-3 nach dem Versuch



© ITA

Die möglichen Gründe für das fehlende Durchsickern des Kunststoffmaterials von Probe 2 können die folgenden Parameter und Umstände des Druckprozesses sein:

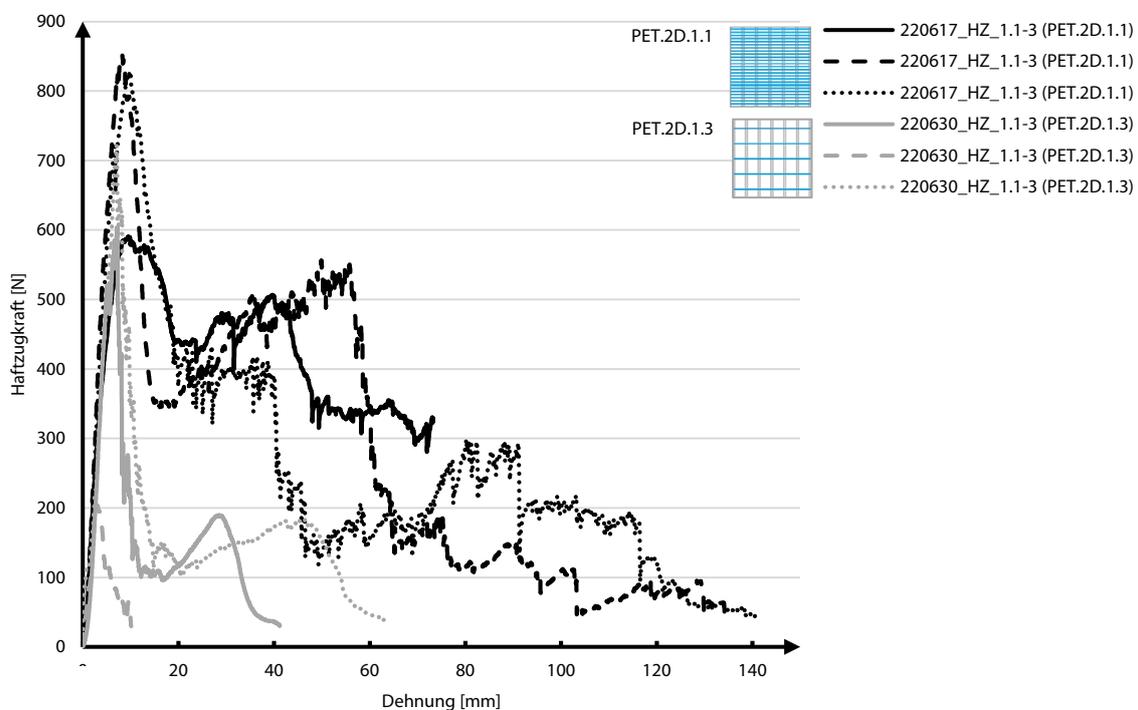
- Extrusions- und Druckbetttemperatur: Die niedrige Extrusionstemperatur im Vergleich zur Bauraumtemperatur bzw. das unbeheizte Druckbett bewirkt, dass die Verfestigung des Druckmaterials früher

eintritt. Des Weiteren entstehen aufgrund der Temperaturunterschiede Spannungen, die sich ebenfalls negativ auf die Haftung und dementsprechende Testergebnisse auswirken können. Bei höheren Umgebungstemperaturen bleibt das Kunststoffdruckfilament länger zähflüssig. Die Belüftung während des Druckvorgangs hat ebenfalls Einfluss auf die Temperatur und das Materialverhalten und begünstigt die frühere Verfestigung.

- Größerer Z_d -Wert: Bei gleichem Druckmaterial und gleicher Temperatur ist der Fließabstand zur Düse konstant. Ein größerer Z_d -Wert führt dabei zu einer größeren Distanz der Druckdüse zur Textiloberfläche während der Fertigung und wirkt sich auf die Penetration des Textils mit dem Druckmaterial aus.
- Äußere Einflüsse: Leichte Beschädigungen und unvorhersehbare Umwelteinflüsse während des Transports können ebenfalls zu Abweichungen der Testergebnisse führen.

c.) Resümee Vorversuche, Haftzugtests rPETG auf PES Mischtextil

Abbildung 48, Haftzugversuche, Kraft-Dehnungsdiagramm zu den 3D-Druck Prüfkörpern aus rPETG-Recyclat auf projektspezifische, kettengewirkte PES-Textilien (Stehfäden Glas)



© ITA

Eine Übersicht der Messwerte zeigt Abbildung 48:

- Textil PET.2D.1.1 (Prüfreihe 220617_HZ_1.1-3): Die Probe wird wegen des gebrochenen Stempels nicht betrachtet; Probe 2 (Prüfnummer 220617_HZ_1.2) hat eine Adhäsionskraft von 852 N, bei Probe 3 (Prüfnummer 220617_HZ_1.3) beträgt die Adhäsionskraft 828 N. Probe 2 hat eine maximale Dehnung von 134,13 mm und Probe 3 von 140,80 mm.
- Textil PET.2D.1.3 (Prüfreihe 220630_HZ_1.1-3): Die maximalen Adhäsionskräfte betragen 603 N bei einer Dehnung von 7,17 mm für Probe 1 und 722 N bei einer Dehnung von 7,05 mm für Probe 3. Probe 2 hat jedoch nur 206 N als maximale Haftkraft bei einer Dehnung von 2,69 mm. Die maximalen Dehnungen zu Versuchsende betragen 41,22 mm für Probe 1, 10,09 mm für Probe 2 und 63,63 mm für Probe 3.

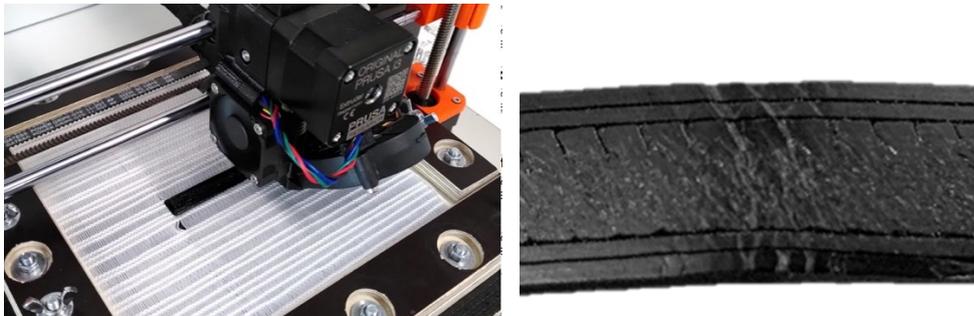
Insgesamt ist die Haftung beim Textil PET.2D.1.3 (offener) mit $F_{max} = 721,58$ N schlechter als beim Textil PET.2D.1.1 (geschlossener) mit $F_{max} = 852,15$ N. Eine mögliche Erklärung dafür ist die Oberflächendichte der unterschiedlichen textilen Materialien. Aufgrund des größeren Fadenabstands ist die Flächendichte der

Textilien PET.2D.1.3 (Porosität 26 %) deutlich geringer als die der Textilien PET.2D.1.1 (Porosität 14 %). Die Festigkeit der Verbindung sinkt bei kleinerer Kontaktfläche (gleiche Bodenfläche des Stempels und kleinere Fläche des Textils). Es wird entschieden die anschließenden Biegezugtests mit dem Textil PET.2D.1.1 (geschlossen) zu machen.

5.1.8.3 Vorversuche Kunststoff rPETG-Druckmaterial und PES/Glastextil, Druckform: Prisma

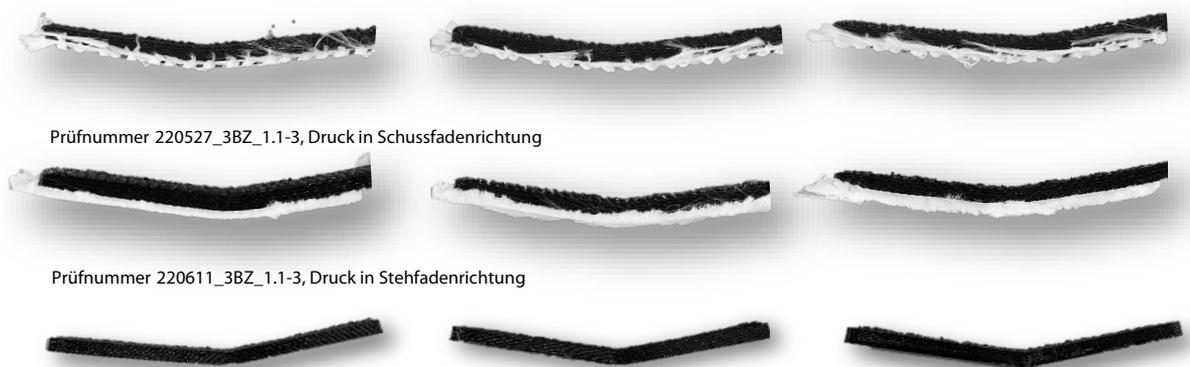
a.) Versuchsaufbau Biegezugtests, Festlegung von Material- und Druckparametern: Für die Biegezugversuche wurde nur noch das Textil PET.2D.1.1 verwendet, das in den Haftzugversuchen die besten Werte zeigt. Es wird zum einen in Schussfadenrichtung bedruckt, d.h. im 0° Winkel zu den Schussfäden (Prüfreiheiten 220527_3BZ_2.1-3). Zum anderen wurde in Stehfadenrichtung gedruckt, d.h. im 90° Winkel zu den Schussfäden (Prüfreiheiten 220611_3BZ_2.1-3). Zum Vergleich wird der reine Druckkörper separat getestet, s. Abbildung 49 (Prüfreiheiten 220604_3BZ_1.1-3.) Die 3D-Druckparameter für das rPETG Druckmaterial wurden beibehalten und sind identisch zu den Haftzugversuchen: Perimeter = 2; Düsendurchmesser = 0,8 mm; Druckbetttemperatur = unbeheizt; Schichthöhe/-breite = 0,6 mm/0,8 mm; Ventilator = 20 %; Drucktemperatur = 240 °C; Druckgeschwindigkeit Schicht 1-4 = 12,5 mm/s; Zd-Wert = 0 mm; Infill = Schicht 1-4 100 % / Linien 45°/135°

Abbildung 49, links: 3D-Druckprozess Biegezugprüfkörper auf PET.2D.1.1, rechts: Nahaufnahme der Probe 220604_3BZ_1.2 mit Rissen auf der Unterseite im Biegestempelbereich



© Frankfurt UAS / ITA

Abbildung 50, seitliche Ansicht der Kunststoff-Biegezugprüfkörper nach den Biegezugversuchen



© ITA Prüfnummer 220604_3BZ_1.1-3, ohne Textil

b.) Beobachtungen Biegezugtests: Die bleibende plastische Verformung aller Proben nach der Durchführung der Biegezugversuche ist deutlich zu erkennen. In der Mitte der Probe, wo der Biegestempel auf die Probe gedrückt hat, ist die Verformung am stärksten. Besonders gut sichtbar ist die Verformung auf der Unterseite der Referenzproben. Auf der Unterseite der Probe entstehen Risse (Abbildung 49, rechts). Im Vergleich dazu ist die Durchbiegung der Proben mit Textil deutlich runder und fast über die gesamte Probenlänge verteilt

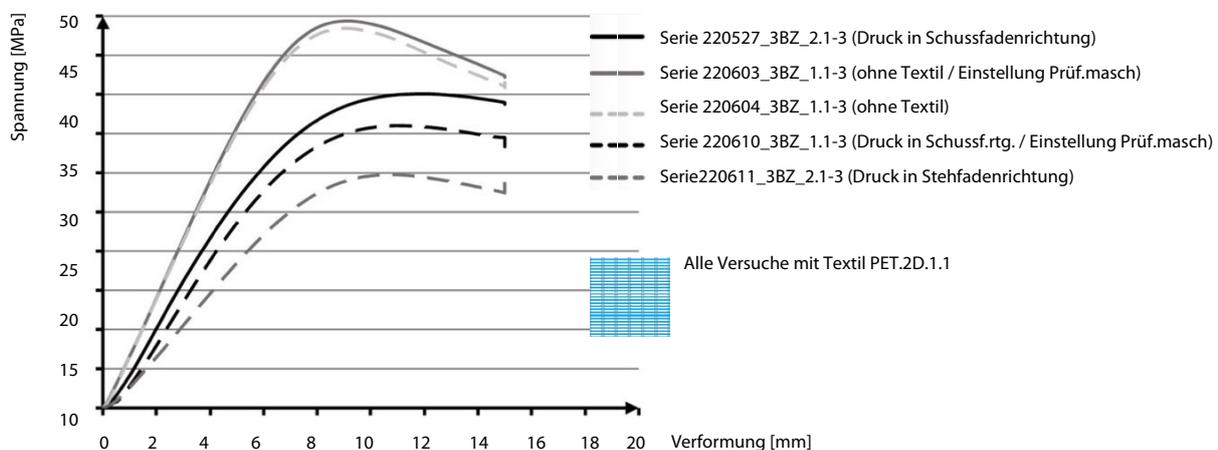
(Abbildung 50). Daraus lässt sich schließen, dass das Textil für eine gleichmäßigere Spannungsverteilung über die Länge der Probe sorgt. Es ist zu erwarten, dass die Proben mit Textil eine höhere Spannung aufnehmen können.

c.) Resümee Vorversuche, Haftzugtests rPETG auf PES Mischtextil: Eine Übersicht aller fünf geprüften Kunststoffproben auf 2D-Textilien ist in Abbildung 51 dargestellt. Hier sind zusätzlich zu den in Abbildung 50 abgebildeten Prüfreiheiten die zur Einstellung der Maschine verwendeten Prüfreiheiten 220610_3BZ_1.1-3 (Druck in Schussrichtung) und 220603_3BZ_1.1-3 (ohne Textil) abgebildet.

Druck in Schussfadenrichtung: Die Proben mit der Prüfnummer 220527_3BZ_2.1-3 weisen zu Beginn der Messungen zunächst nur eine geringe Spannungszunahme auf. Der Grund dafür sind die Setzerscheinungen des Textils auf den Auflagern. Danach beginnt ein lineares Wachstum des Spannungsverlaufs. Ab einer Verformung von ungefähr 6 mm fällt die Steigung der Messkurve ab, bis es ab circa 10 mm keine Spannungserhöhung mehr gibt und die Messungen einen horizontalen Verlauf erreichen. Der Maximalwert der Spannung von den drei Proben liegt zwischen 39,6 und 40,4 MPa. Die Standardabweichung (Stabw.) beträgt 0,36 MPa. Die Serie mit den Prüfnummern 220610_3BZ_1.1-3 (verwendet zur Prüfmaschineneinstellung) weist ähnliche Kurvenverläufe auf und zeigt auch zu Beginn leichte Setzerscheinungen. Die Probe 1.2 weist einen etwas höheren Spannungswert auf. Grund könnte eine höhere Ordnung der Stehfäden und damit folglich auch der Schussfäden sein. Insgesamt liegen die Maximalspannungen vergleichbar zwischen 34,7 und 38,5 MPa mit einer Stabw. von 1,75 MPa.

Druck in Stehfadenrichtung: Die Prüfnummern 220611_3BZ_2.1-3 zeigen ebenfalls am Anfang der Messungen leichte Setzerscheinungen und danach den gleichen Kurvenverlauf wie die bisherigen Serien. Die Spannungswerte streuen stärker zwischen 26,3 und 32,4 MPa mit einer Stabw. von 2,57 MPa. Die Diskrepanz der Probe 2.1 in Serie 220611 ist durch die Dicke zu erklären, welche bei dieser Probe ungefähr 0,4 mm größer ist als bei den anderen beiden.

Abbildung 51, Biegezugversuche, 3D-Druck Prüfkörper aus rPETG-Recyclat auf projektspezifische, kettengewirkte PES-Textilien (Stehfäden Glas), Mittelwerte aller Prüfreiheiten



© ITA

Referenzproben ohne Textil: Die Ergebnisse zu den Prüfnummern 220604_3BZ_1.1-3 zeigen Maxima bei circa 8 mm mit Werten zwischen 46,6 und 50,1 MPa. Die Standardabweichung liegt bei 1,43 MPa. Danach fallen die Kurven auf 40-43 MPa ab. Die Probe 1.3 wies vor Beginn der Messungen mittig einen kleinen Riss auf. Dieser zeigt sich im Kurvenverlauf durch einen kleinen Überschwinger im höchstbeanspruchten Bereich. Die Ergebnisse zu den Prüfnummern 220603_3BZ_1.1-3 (verwendet zur Prüfmaschineneinstellung) verlaufen wie die eigentliche Prüfserie parallel zueinander und steigen bis ungefähr 6 mm linear an. Danach sinkt die Spannungszunahme und erreicht ihr Maximum bei ungefähr 8,5 mm bei Werten zwischen 49,0 und 49,7 MPa. Die Stabw. liegt bei 0,29 MPa. Danach fallen die Messkurven linear bis auf Werte zwischen 42 und 45 MPa ab. Die leichten Unterschiede zwischen den Referenzserien 220603 und 220604 lassen sich durch unterschiedliche

Umgebungsbedingungen bei der Herstellung erklären, da die Serien an zwei unterschiedlichen Tagen produziert wurden. Mögliche Gründe hierfür können eine nicht kontinuierliche Materialzufuhr beim Druckprozess oder leichte Temperaturunterschiede sein.

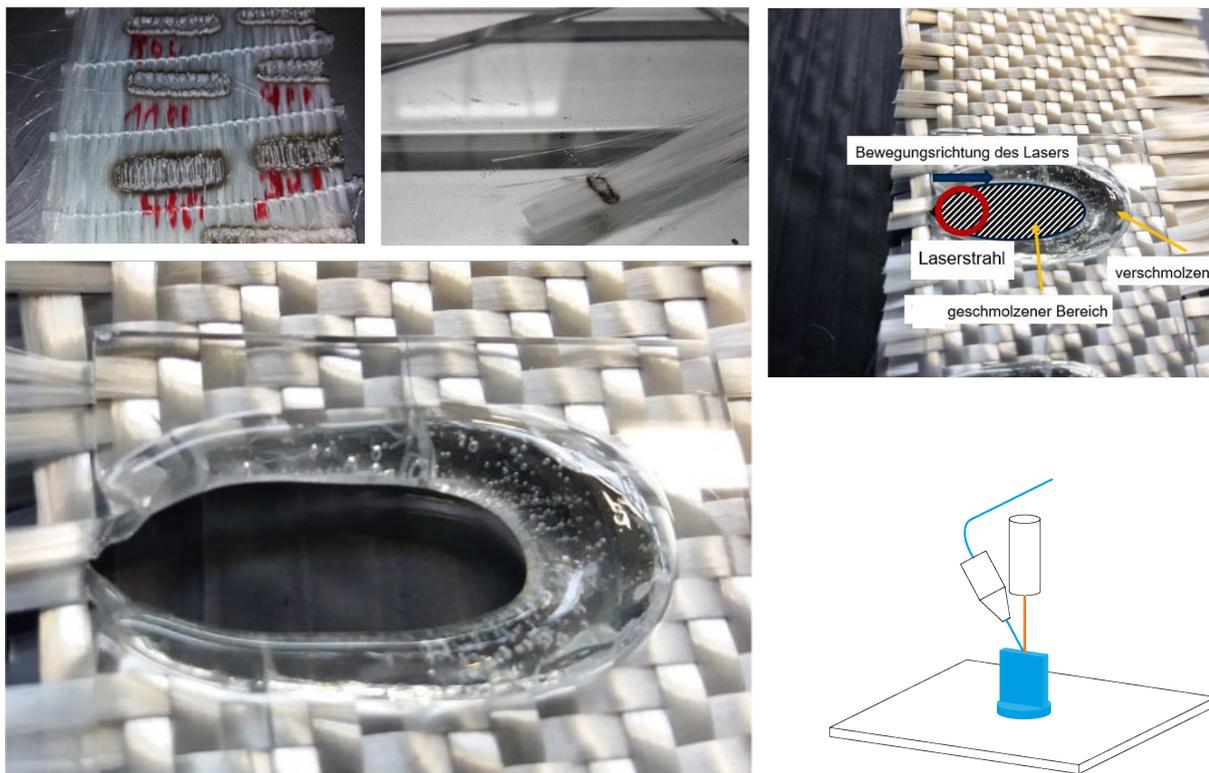
Insgesamt mindert das Textil die Biegezugwiderstandsfähigkeit des Verbundbauteils im Vergleich zum reinen Druckkörper durch die Mikroschädigung der dem Textil zugewandten Druckseite. Dies ist insbesondere der Fall, wenn in Stehfadenrichtung gedruckt wird. Die Schussfäden liegen senkrecht zum Druckkörper und stellen eine ungerade Druckbasis dar. Die 3D-Druckmasse wird dadurch in welliger Form gedruckt und es entstehen Mikrorisse im Druckmaterial. Der Abminderungsfaktor ist bei Druck in Richtung der Schussfäden geringer als bei Druck senkrecht zu den Schussfäden (parallel zu den Stehfäden).

5.1.9 Orientierende Vorversuche mineralische Werkstoffe: 3D-Druck auf Resttextilien und kettengewirkte Biaxialgelege

5.1.9.1 Orientierende Vorversuche, Glasdruck auf Glas-Resttextilien

Aufgrund des hohen Kreislaufpotentials von Glas wurde untersucht, ob ein Verbundwerkstoff aus Glasdruck und Glastextilien grundsätzlich zumindest darstellbar wäre. Es existieren dazu keine Forschungen unserer Kenntnis nach. Die Untersuchungen wurden in Kooperation mit dem Laserzentrum Hannover durchgeführt, die zum Thema Direct Energy Deposition forschen. Ziel ist es, die Laserwechselwirkung mit Glastextilien zu untersuchen. Dabei wird die Strahlung eines CO₂-Lasers mit einer voreingestellten Leistung senkrecht auf ein Stück Glastextil (Glas-/PES-Textil) gerichtet und in einer Richtung mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt. Die resultierende Temperatur in der Prozesszone wird über ein Pyrometer gemessen.

Abbildung 52, Glasdruck (Direct Energy Deposition) auf Glastextilien, Versuchsreihe in Kooperation mit dem Laserzentrum Hannover



© Laserzentrum Hannover e.V.

Es werden drei orientierende Versuchsreihen durchgeführt, s. Abbildung 52. Bei Temperaturen $\leq 1000^\circ\text{C}$ entstehen hauptsächlich Verbrennungen und keine Schmelze. Bei Temperaturen $> 1100^\circ\text{C}$ entsteht eine Schmelze und starke Evaporationen sind beobachtbar. Die Glasschmelze verläuft dabei stets entlang der Faserbindung. Aufgrund der schwer reproduzierbaren Schmelze wurde das Bedrucken der Textilien (noch) nicht getestet. Weiterführende Untersuchungen an geeigneten/angepassten Glasfilamenten, derselben chemischen Komposition, wären in der Zukunft denkbar.

Es wurde dann die Laserwechselwirkung (Nah-Infrarot Laser bei 1064 nm, wirkt transmittiv auf Glas) mit reinen Glastextilien zum Verschweißen mit einer Glasplatte untersucht. Dabei wurde eine Glasplatte auf einem Bündel Glasfasertextilien platziert, sodass die Laserstrahlung das Glas passieren kann und nur vom Textil absorbiert wird. Durch die Wärmeleitung und dem Druck durch die Glasplatte konnte das Glastextil erfolgreich an die Glasplatte angeschweißt werden, s. Abbildung 52. Ebenso konnte die Verschmelzung mit einer Borosilikatglasplatte erreicht werden (getestet mit CO_2 -Laser), jedoch war der Wärmeeintrag zu hoch, sodass das Textil teilweise „weggeschmolzen“ ist. Die Versuchsreihe konnte im Rahmen von 6dTEX nicht fortgeführt werden.

5.1.9.2 Orientierende Vorversuche Betondruck auf Basalt-Resttextilien und kettengewirkte Glasgelege

a.) Beton“druck“versuche mit Resttextilien Frankfurt UAS: Erste orientierende Vorversuche wurden mit einem Resttextil aus Basaltrovings (Flächentextil, Drehergewebe, Basalt.2D.01) aus dem Vorprojekt „ge3TEX“ gemacht. Im ersten Schritt wurde der Betondruck simuliert. Es wurde Beton in einer Schalung auf das Textil aufgebracht. Die verwendete Betonrezeptur orientiert sich an den Herstellerangaben des 3D-Betondruckers der Firma WASP:

- Zement: 500 g, CEM III 42,5 R (frühfester Normalzement)
- Sand: 1000 g, Oberrhein Kiesel, Korngröße 0-1 mm
- Wasser: 150 g
- Fließmittel / Zusätze: 66 g, ADVA flow 342
- Wasser/Zement-Verhältnis: 0,33
- Zement/Sand-Verhältnis: 0,5

Fazit: Es konnte keine Haftung erreicht werden, auch nicht mit einem ähnlich dichten 2D-kettengewirktem Biaxialgelege aus Glas. Die Oberflächen sind zu dicht, das Textil kann einfach abgezogen werden (Abbildung 53). Bei der Planung projektspezifischer Textilien muss eine höhere Porosität Ziel sein.

Abbildung 53, oben: Versuch Beton“druck“ auf Basalt-Drehergewebe (ge3TEX); rechts: Unterseite Basalttextil; unten: dichtes, kettengewirktes Biaxialgelege aus Glas und Beton“druck“körper

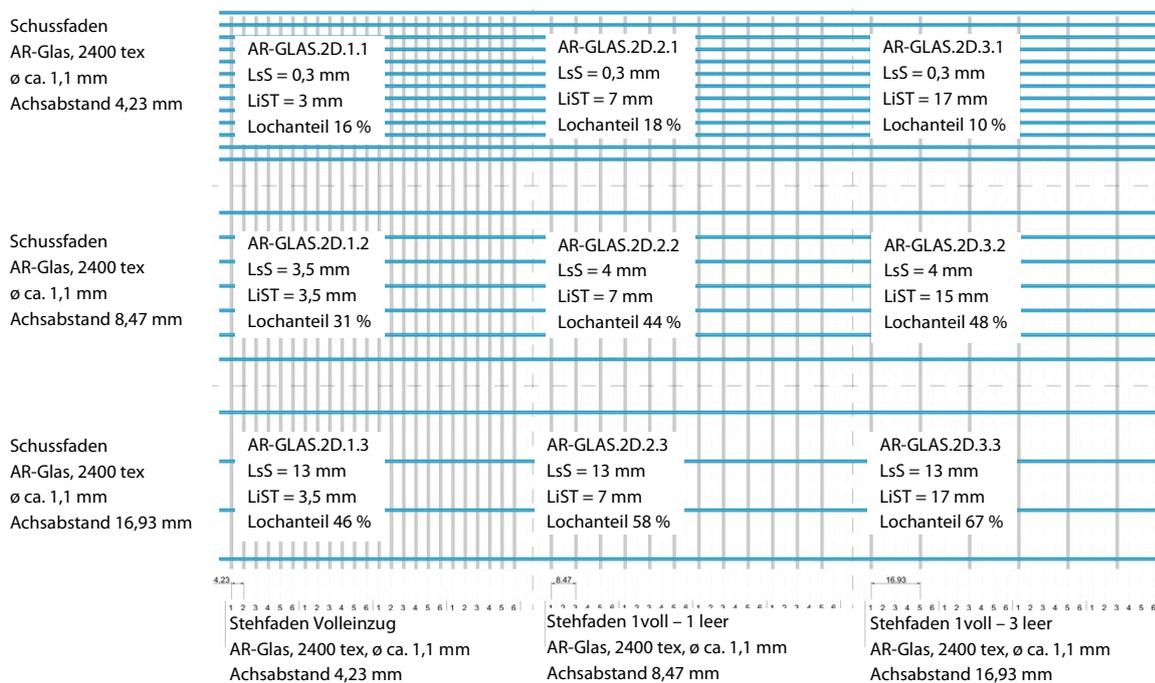


© Frankfurt UAS

b.) Planung und Herstellung projektspezifischer, textilen 2D-Geometrie (kettengewirktes Biaxialgelege) aus Glas und erste Beton“druck“versuche: Ausgehend von den in Kapitel 5.1.6.1 aufgelisteten Parametern wurde ein Flächentextil in unterschiedlichen Porositäten aus Steh- und Schussfäden aus AR-Glas Rovings mit je 2.400 tex geplant. Zur Abschätzung der Porosität wurden zeichnerisch theoretisch angenommenen Werte verwendet, berechnet auf Basis von tex-Zahl und Dichte des Materials. Diese liegen für die genannten Rovings bei einem Durchmesser von 1,10 mm. Die Erfahrungswerte des ITA liegen eher bei einem Durchmesser von ca. 2 mm für die Steh- und ca. 3 mm für die Schussfäden. Manuell gemessen wurden am Ende Durchmesser von ca. 2,5 – 3 mm für die Steh- und ca. 3 – 4 mm für die Schussfäden.

Insgesamt wurden neun verschiedene Oberflächen durch die Kombinationen von je drei Steh- und Schussfadenabständen hergestellt, siehe Abbildung 54. Abbildung 55 zeigt die hergestellten Biaxialgelege und demonstriert wie gering die Schiebefestigkeit der Gelege ist. Dieselbe Abbildung zeigt auch die Durchlässigkeiten der jeweiligen Textiloberflächen für die gewählte Betonrezeptur.

Abbildung 54, Planung kettengewirkter Biaxialgelege aus Glas in unterschiedlichen Dichten (LiS = Lichte zwischen den Schussfäden, LiST = Lichte zwischen den Stehfäden; manuelles Aufmaß)

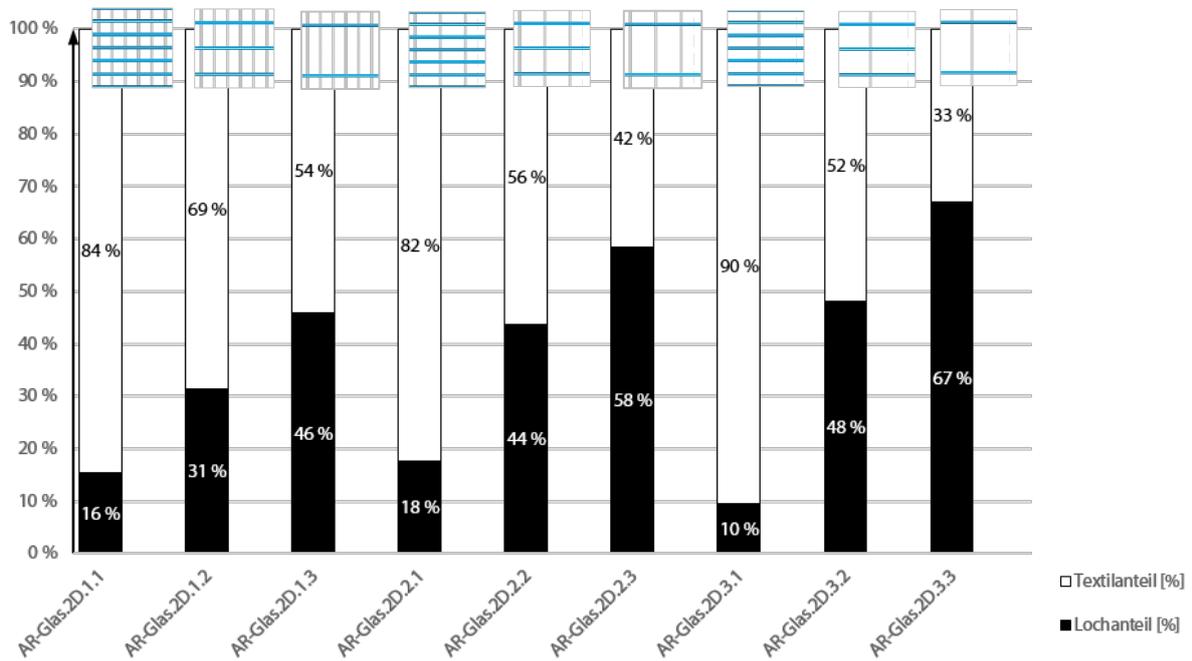


© Frankfurt UAS

c.) Aufmaß der textilen Geometrie, Messung der Oberflächenporigkeit

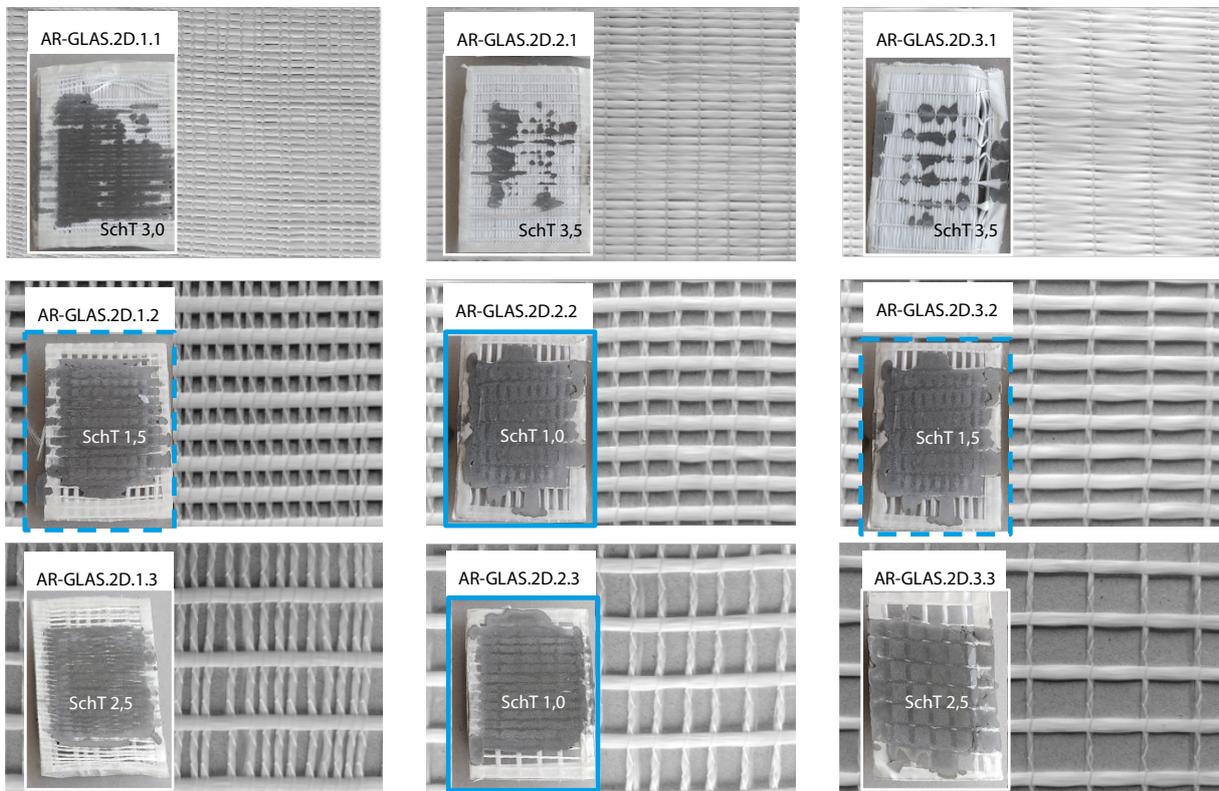
Tabelle 6 zeigt die Porigkeit der Oberflächen nach dem Versuchsaufbau wie in Kapitel 5.1.6.3 d.) beschrieben. Die Zahlen wurden auch in Abbildung 64 ergänzt. Bis auf eine Abweichung bei Textil AR-GLAS.2D.3.1. erwartungsgemäß müsste der Lochanteil höher als bei 10% in der Reihe zwischen AR-GLAS.2D.1.1 und AR-GLAS.2D.2.1.

Tabelle 6, Messung des Porenanteils in der Oberfläche 2D-kettengewirkter Glasgelege: Photographische Erfassung und digitale Auswertung



© Frankfurt UAS

Abbildung 55, Kettengewirkte Biaxialgelege aus 2.400 tex Glasrovings, neun Oberflächen, Aufsicht Schussfadenseite; Untersicht nach Beton“druck“, blau gekennzeichnet Favoriten der Schältestauswertung (Scht = Schältest)



© Frankfurt UAS

d.) Zwischenfazit: Alle neun Versuche wurden tabellarisch erfasst und qualitativ vergleichend durch drei Versuchspersonen bewertet. Die Schäl- und Zugtests wurden zwischen 1-6 bewertet (sehr gut bis ungenügend), s. auch Abbildung 55. Erwartungsgemäß durchdringt der Beton die offeneren Textilstrukturen mit geringerer Schussdichte mehr bis dahin, dass auf der Unterseite eine geschlossene Betonfläche entsteht. Insgesamt wurden neun verschiedene Oberflächen durch die Kombinationen von je drei Steh- und Schussfadenabständen hergestellt, siehe Abbildung 54.

Abbildung 55 zeigt die hergestellten Biaxialgelege und demonstriert wie gering die Schiebefestigkeit der Gelege ist. Dieselbe Abbildung zeigt auch die Durchlässigkeiten der jeweiligen Textiloberflächen für die gewählte Betonrezeptur. Die Haftung ist in den Bereichen mit Wirkfäden, die die Stehfäden einbinden, stärker als in den Bereichen in denen der Beton nur auf den Schussfäden haftet - die Wirkfäden bilden zusätzlich eine rauere Oberfläche. Das Durchdringen des Textils führt zuletzt zu besseren Haftungsergebnissen als eine raue Textiloberfläche allein.

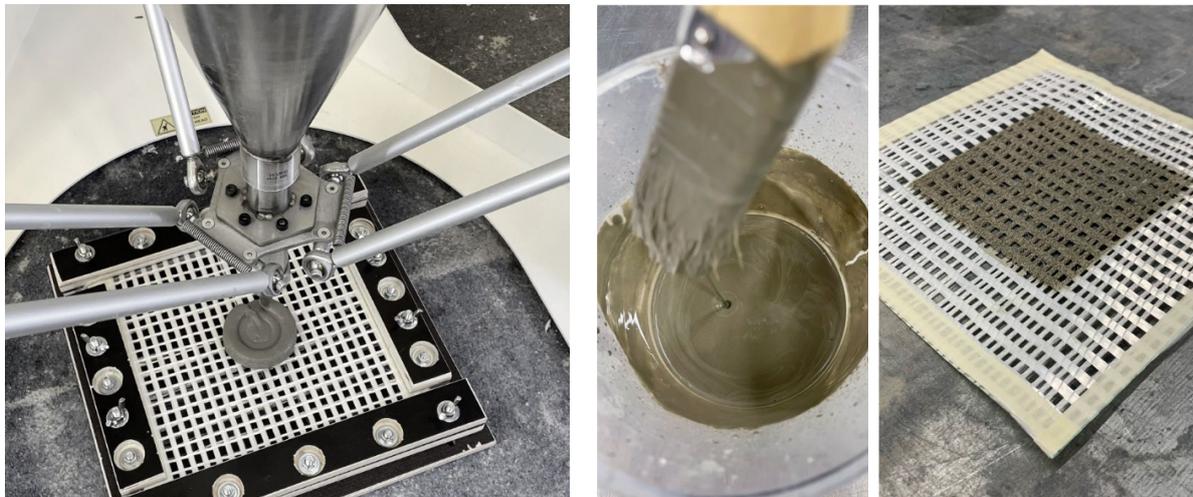
Die qualitativ vergleichende Auswertung ergibt vor allem Unterschiede bei den Schältests. Die in Abbildung 55 blau gekennzeichneten Versuchsreihen haben mit der Note 1,0 bzw. 1,5 am besten abgeschnitten.

Für die nachfolgenden Haft- und Biegezugversuche wird entschieden, mit den Textilien mit mittlerem Stehfadenabstand (Einzug 1 voll – 1 leer, Achsabstand = 8,47 mm) und mit mittlerem Schussfadenabstand (Achsabstand = 8,47 mm) fortzufahren.

5.1.10 Vorversuche mineralische Werkstoffe: 3D-Druck auf 2D-kettengewirkte Gelege

5.1.10.1 Vorversuche mineralische Werkstoffe Betondruck auf 2D-kettengewirkte Glasgelege

Abbildung 56, links: Delta WASP 40100 Betondruck auf eingespanntem 2D-Textil; Mitte und rechts: Beschichtung



© Frankfurt UAS

a.) Druckversuche, Betonrezeptur: Für die Herstellung der Haftzugkörper wurde der Delta WASP 40100 Drucker verwendet (Abbildung 56). Für die Herstellung musste die vom Hersteller nicht ausreichend konkretisierte Druckrezeptur weiterentwickelt sowie die Druckparameter für den Druck auf Textil optimiert werden.

Druckrezeptur Ziel: Die Mischung soll min. die Herstellung 80 mm hohen Probekörpern für die Haftzugversuche bzw. von min. $L \times B \times H = 225 \times 100 \times \text{ca. } 15 \text{ mm}$ erlauben. Letzteres entspricht ca. einer klassischen Biegezugprüfkörpergeometrie. Dies ohne an Grünstandfestigkeit zu verlieren und bei gleichzeitiger Durchdringung des Textils. Die Rezepturbestandteile in Anlehnung an WASP-Rezepturen sind: Zement, Sand (maximale Korngröße = 0,5 mm), Wasser (WZ-Verhältnis = 0,3) und Fließmittel (Menge abhängig von Temperatur und Alter des Zements) und Beschleuniger.

Druckrezepturenentwicklung: Auf Grundlage der von WASP empfohlenen Rezepturen und den Anforderungen des Herstellprozesses, werden erste eigene Mischungen hergestellt. Zu Beginn werden vier verschiedene Beschleuniger und Zemente miteinander kombiniert, um erste Erkenntnisse und Erfahrungen mit möglichen Betondruckmaterialien zu sammeln. Anlage 7 zeigt eine grafische Übersicht der miteinander kombinierten Bestandteile unterschiedlicher Betonrezepturen und die Beobachtung hinsichtlich der Kompatibilität für den Druckprozess.

Druckrezepturenentwicklung Erkenntnisse: Die Beobachtungen zeigen, dass die richtige Mischreihenfolge und -zeit entscheidend für die Reproduzierbarkeit der Mischung ist. Teilweise ändert sich die Betonkonsistenz nach einigen Minuten Wartezeit enorm, weshalb eine gute Einstellung der Mengenverhältnisse wichtig für einen kontinuierlichen Druckprozess ist. Beschleuniger wird aufgrund der unzureichenden Mischungsergebnisse und Druckbauteilanforderungen, welche dies nicht zwingend benötigen, nicht verwendet.

Fazit: Es wurden ca. 50 Mischungen mit verschiedenen Zementen, WZ-Werten, Fließmittelmengen und unterschiedlichen Beschleunigern hergestellt, bis eine für das Projekt und den Betondrucker geeignete Mischung erzielt werden konnte. Die Mischungen der Betonrezepturenentwicklung sind in Anlage 7 dokumentiert. Die bis dahin entwickelte Mischung erfüllt die Grundanforderungen an den Fertigungsprozess, wie beispielsweise eine thixotrope Materialkonsistenz, bei Verwendung der richtigen Fließmittelmenge, ist allerdings überhaupt nicht replizierbar. Trotz gleicher Rezeptur und Mengenverhältnissen ist das Ergebnis zweier identischer Mischungen unterschiedlich. Grund dafür können schwankende Lufttemperatur und -feuchtigkeitsverhältnisse sein, da das Labor der Frankfurt UAS über keine Klimatisierung verfügt. Deshalb wurden im weiteren Prozess die Luftfeuchtigkeit und -temperatur gemessen und mit in die Optimierung der Mischung aufgenommen. Des Weiteren wird vor jedem Druckprozess die richtige Fließmittelmenge der aktuellen klimatischen Bedingungen und dem Zementalter eingestellt. Trotz der Einbeziehung der klimatischen Verhältnisse konnte kein stabiles Mischungsergebnis eingestellt werden. Deshalb wird im nächsten Schritt die Sieblinie des verwendeten Sandes geprüft. Da der Sand keine geführte Sieblinie aufweist, werden große Mengen des Sandes durchmischt und dieser in kleinere Mengen abgepackt, um das Entmischen zu verhindern. Vor allem das Durchmischen des Sandes hat einen großen Einfluss auf die Mischung. Anlage 7 zeigt den gesamten Versuchsablauf. Das finale, im Projekt verwendete Betonrezept für einen Druckdurchlauf am Delta WASP 40100-Drucker ergibt sich wie folgt:

- Zement: 750 g, CEM I 52,5 R (sb)
- Sand: 750 g, Quick-mix Quarzsand, Korngröße 0,1 - 0,4 mm
- Wasser: 250 g
- Fließmittel: 9 g (abhängig von Lufttemperatur und -feuchtigkeit), MC PowerFlow evo 301
- Wasser/Zement-Verhältnis = 0,33

b.) Druckversuche, Druckparameter: In einer ersten Prüfreihe wurden neun Druckversuche auf Textil AR-Glas.2D.2.2 durchgeführt um die Druckparameter zu optimieren. Untersucht wurden die Druckgeschwindigkeit (Verfahrenesgeschwindigkeit des Extruders), die Wartezeit (nach Fertigstellung der Mischung), der Z_d-Wert (Δ UK Druckmaterial bis OK Textil), die Schichthöhe und Schichtbreite, der Flow (Fördergeschwindigkeit der Schnecke) sowie der Infill (konzentrisch).

Beobachtungen zeigen: Die Erhöhung der Druckgeschwindigkeit führt zu einer schlechteren Maßhaltigkeit. Eine langsame Druckgeschwindigkeit eignet sich generell besser für den Fertigungsprozess. Die Erhöhung des Flows begünstigt einen kontinuierlicheren Materialfluss, da dieser die Durchmischung des Betons im Trichter beeinflusst. Durch einen höheren Flow wird die Betonmischung stärker durchmischt, wodurch das Material aufgrund des thixotropen Materialverhaltens besser extrudiert werden kann und länger verarbeitbar bleibt ohne, dass die Druckdüse verstopft. Die evaluierten Druckparameter sind für die kommenden Druckversuche und zur Herstellung der Prüfkörper verwendbar. Lediglich die Stranggeometrie (Breite und Höhe) wird an die Geometrie der Druckform angepasst, um ein homogenes Druckbild zu gewährleisten.

Die für den verwendeten Delta WASP 40100-Drucker und die Druckform „Kubus“ optimierten Druckparameter, welche im weiteren Vorgehen des Projekts für das Drucken auf und in Textilien verwendet werden, ergeben sich wie folgt:

Düsendurchmesser = 8 mm; Schichthöhe/-breite = 5 mm/8 mm; Flow = 125 %; Bauraumtemperatur = Raumtemperatur; Druckgeschwindigkeit = 20 mm/s; Zd-Wert = -4mm; Infill = Konzentrisch

c.) Druckversuche, Beschichtung: Ziel ist die Haftung zwischen Textil und Druckmaterial zu erhöhen. Die Hypothese ist, dass damit gleichzeitig mit einer besseren mechanischen Wirksamkeit des textilen Materials unter Belastung zu rechnen ist, s. Kap. 2.1.2.2.

Es wurden 15 Druckversuche auf Textil AR-Glas.2D.2.2 mit unterschiedlichen Beschichtungen durchgeführt (Abbildung 56, Mitte und rechts). Verwendet wurden keine Beschichtung, eine Zementschlämme (CEM I 52,5 R (sb), WZ = 0,7), eine Zementschlämme (CEM I 52,5 R (sb), WZ = 0,8), eine Zementschlämme (CEM III 42,5 N, WZ = 0,8) und Epoxidharz, welches mit Sand (0,09 - 0,25 mm) berieselt eine raue Oberfläche bietet. Die Zementschlämme wird kurz vor dem Druckstart mit einem Pinsel auf das Textil aufgetragen, sodass diese noch möglichst frisch ist, wenn der Beton durch die Druckdüse auf das Textil trifft. Die Epoxid + Sand-Beschichtung wird mindestens ein Tag vorher mit einem Farbröller aufgetragen. Dazu wird der benötigte Sand vorgesiebt (0,09 - 0,25 mm). Die Beschichtung wird hierbei nur einseitig aufgetragen, um die Ergebnisse der Prüfung besser auf 3D-Textilien übertragen zu können.

Beschichtung Beobachtungen: Die Zementschlämme löst sich mit der Zeit und durch Bewegungen des Textils. Für eine gleichmäßige Bedeckung des Textils und gleichzeitiger Haftung ist der richtige WZ-Anteil entscheidend. Bei der Verwendung von Epoxid und Sand lösen sich die Fäden des Textils umso mehr, je fester das Epoxidharz geworden ist, da mehr Druck mit der Rolle ausgeübt werden muss um das Epoxidharz gleichmäßig aufzutragen. Für eine gleichmäßige Beschichtung wird das Epoxidharz in beide Richtungen des Textils aufgetragen, sodass die Oberseite aller Fäden vollständig beschichtet wird. Der Sand lässt sich manuell nicht komplett gleichmäßig auf die beschichtete Oberfläche auftragen. Bei kleineren Textilöffnungen verschließt die Epoxid + Sand-Beschichtung das Textil so, dass kein Beton mehr durch die Öffnung gelangen kann.

Beschichtung Fazit: Mit Epoxid + Sand-Beschichtung konnten die besten manuellen Haftzugtestergebnisse erreicht werden.

d.) Druckversuche Zwischenresümee

Bereits in den ersten Druckversuchen zeigt sich, dass die Vor- und Nachbereitungszeit additiver Fertigung mit Beton deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt, als die Druckzeit an sich. Insbesondere die Einstellung der richtigen, thixotropen Betonkonsistenz mittels der richtigen Fließmittelmenge und gegebenen äußeren Einflüssen ist zeitintensiv. Aus der ersten Versuchsreihe zur Optimierung der Druckparameter schließt sich die Erkenntnis, dass ein Zusammenspiel aus richtiger Materialkonsistenz, Zeitmanagement und den eingestellten Druckparametern entscheidend für einen erfolgreichen Fertigungsprozess ist. Hinsichtlich der Druckparameteroptimierung wird eine eher langsame Druckgeschwindigkeit und ein hoher Flow (Materialförderung) angestrebt. Außerdem begünstigt ein geringer Zd-Wert die Penetration des Textils. Beim Beschichten wird weiterhin mit Epoxidharz und Sand gearbeitet. Hierzu werden die Textilien mindestens 24 h vorbereitet und eingespannt. Das Spannen von Epoxid + Sand beschichteten Textilien hat wenig Auswirkungen auf die Oberfläche, da diese sich nach dem Aushärten der Beschichtung nur noch gering verformen lassen. Trotzdem ist eine möglichst ebene Oberfläche sinnvoll, um eine gleichmäßige Durchdringung des Materials zu erzielen. Für die folgenden Versuche im Projekt wird sich weiter auf die Replizierbarkeit des Prozesses konzentriert, sodass Vor- und Nachbereitungszeiten optimiert und Druckergebnisse konstanter werden.

5.1.10.2 Vorversuche mineralische Werkstoffe Betondruck auf kettengewirkte Glasgelege, Druckkörper: Kubus

Tabelle 7, Prüfreihe Haftzugversuche Beton auf die Schussfadenseite des 2D-Glastextils

2D-Textil			3D-Druck		Prüfung
Textil-Nummer	Bild	Lochanteil %	3D-Druck-Nummer		Prüfnummer
Einstellung der Prüfmaschine					
AR-Glas.2D.1.2		16	220708_2		220708_HZ_1.1-1.3
Untersuchung von verschiedenen Textiloberflächen: Drucken auf Schussfäden („auf“ das Textil)					
AR-Glas.2D.2.1		18	220708_3		220708_HZ_3.1-3.3
AR-Glas.2D.2.2		44	220714_1		220714_HZ_1.1-1.3
AR-Glas.2D.2.3		58	220719_1		220719_HZ_1.1-1.3
AR-Glas.2D.3.2		48	220802_1 und 220802_4		220802_HZ_1.2 und 220802_HZ_4.1-4.2
AR-Glas.2D.1.2		16	220708_1		220708_HZ_2.1 und 220811_1.1-1.2

© Frankfurt UAS

Tabelle 8, Prüfreihe Haftzugversuche Beton auf die Stehfadenseite des 2D-Glastextils

2D-Textil			3D-Druck		Prüfung
Textil-Nummer	Bild	Lochanteil %	3D-Druck Nummer	Bemerkungen	Prüfnummer
Untersuchung von verschiedenen Textiloberflächen: Drucken auf Stehfäden („in“ das Textil)					
AR-Glas.2D.2.1		16	220802_2	kein definierter Textilabstand	220802_HZ_2.1-2.2 und 220802_HZ_4.3
AR-Glas.2D.2.2		44	220802_3	kein definierter Textilabstand	220802_HZ_3.1-3.3
AR-Glas.2D.2.2		44	220809_2	5 mm Textilabstand	220809_HZ_2.1-2.3
AR-Glas.2D.2.3		58	220804_1	3 mm Textilabstand	220804_HZ_1.1-1.3
AR-Glas.2D.2.3		58	2208011_2	5 mm Textilabstand	2208011_HZ_2.1-2.3
AR-Glas.2D.3.2		48	220805_1	5 mm Textilabstand	220805_HZ_1.1-1.3

© Frankfurt UAS

Tabelle 7 zeigt die Planung zum Druck auf die Schussfadenseite mit unterschiedlichen Oberflächen. Dies entspricht beim Druck auf 3D-Textil dem Druck auf die Deckflächen von außen. © Frankfurt UAS

Tabelle 8 zeigt die Versuchsreihen zum Druck auf die Stehfadenseite, das entspricht beim Druck in 3D-Textil dem Druck von innen auf die Deckflächen.

b.) Haftzugtests – Herstellung

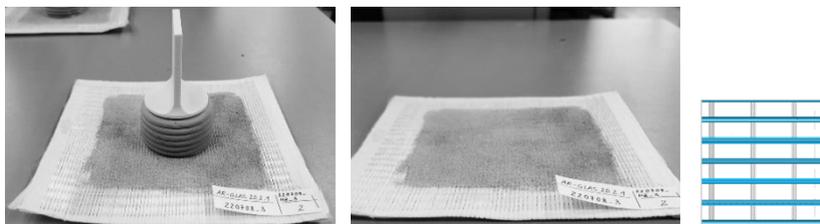
Bei der Herstellung ist zu beachten, dass das Textil min. 24 Stunden vor dem Druck mit Epoxid und Sand zu beschichten ist. Das Textil muss biaxial in den Druckrahmen eingespannt werden. Anschließend ist der Zd-Wert einzustellen. Nach dem Druck sind die Betonprüfkörper mit Wasser einzusprühen und anschließend min. ein Tag mit Folie abzudecken. Die Haftzugstempel werden ebenfalls mittels additiver Fertigung aus PLA hergestellt und mit 2K-Kleber auf der Oberseite des Betonkörpers befestigt.

Beobachtungen: Die Druckrezeptur ist aufgrund wechselnder Temperaturen und Luftfeuchtigkeit schwer reproduzierbar. Es müssen vor jedem Druck die Fließmittelmengen angepasst werden. Hierbei hat das Alter des Zements Auswirkungen auf die Konsistenz der Betonmischung. Beim Drucken auf die Stehfadenseite wird eine komplette Durchdringung und ein Verschließen der unteren Textiloberfläche durch den Beton angestrebt. Hierzu wird der Abstand von Textil zur darunterliegenden Fläche untersucht, um die optimale Distanz zur Sammlung des Betonmaterials unter dem Textil zu ermitteln. Bei einem Abstand von 3 mm zur darunterliegenden Fläche kann keine komplette Durchdringung und Verschließung bei offeneren Textilgeometrien sichergestellt werden. Es wird ein Textilabstand von 5 mm für die kommenden Versuche auf Stehfadenseite gewählt.

c.) Haftzugtests auf die Schussfadenseite - Prüfung

Der Druck auf die Schussfäden des 2D-Textils ähnelt dem späteren Druck auf die äußeren Deckflächen des 3D-Textils. Bei allen Drucken wurden unter dem Textil keine Abstandshalter gelegt. Die gesandete Epoxidharzbeschichtung verschleißt insbesondere bei engen Textilstrukturen die Oberfläche.

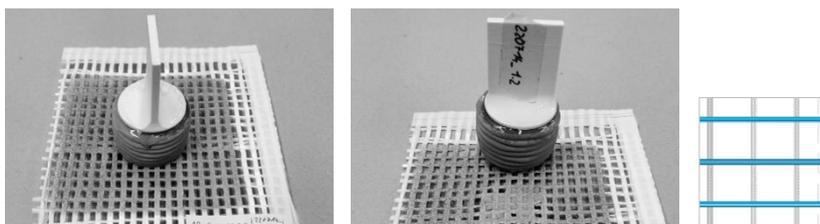
Abbildung 57, Haftzugversuche Prüfnummer 220708_HZ_3.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor und rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Alle Proben des Textil s AR-Glas.2D.2.1 (Prüfnummern 220708_HZ3.1-3) mit einem Porenanteil von 18 % (Stehfäden $a = 8,47$ mm Schussfäden $a = 4,23$ mm) weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 3 vor und beträgt 0,075 MPa (Abbildung 57).

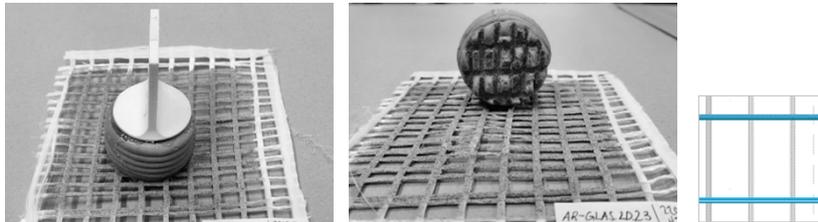
Abbildung 58, Haftzugversuche Prüfnummer 220714_HZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor und rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Bei den Proben des Textils AR-Glas.2D.2.2 (Prüfnummern 220714_HZ1.1-3) mit einem Porenanteil von 44 % (Stehfäden / Schussfäden $a = 8,47$ mm) kommt es bei der ersten Probe mit der Prüfnummer 220714_HZ1.1 zu einem Bruch des Kunststoffstempels. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 2 vor und beträgt 0,22 MPa (Abbildung 58).

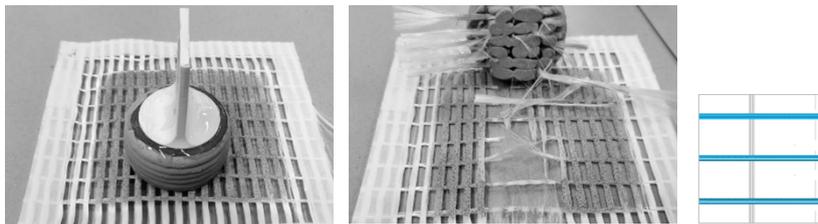
Abbildung 59, Haftzugversuche Prüfnummer 220719_HZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Bei den Proben des Textils AR-Glas.2D.2.3 (Prüfnummern 220719_HZ1.2 und 3) mit einem Porenanteil von 58 % (Stehfäden Achsabstand $a = 8,47$ mm, Schussfäden $a = 16,93$ mm) kommt es bei der Probe mit der Prüfnummer 220719_HZ1.3 nach Erreichen von einer Haftzugfestigkeit von 0,28 MPa zu einem Bruch des Kunststoffstempels (Abbildung 59). Die zweite Probe mit der Prüfnummer 220719_HZ_1.3 erreicht eine maximale Haftzugfestigkeit von 0,17 MPa.

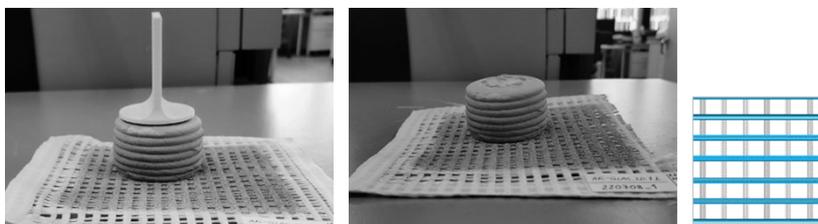
Abbildung 60, Haftzugversuche Prüfnummer 220802_HZ_4.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Bei den Proben des Textils AR-Glas.2D.3.2 (Prüfnummern 220802_HZ 1.2 und 220802_HZ 4.1-2) mit einer Porigkeit von 48 % (Stehfäden $a = 16,93$ mm Schussfäden $a = 8,47$ mm) kommt es beim Prüfkörper 220802_HZ 4.1 kommt es zu einem Stempelbruch. Bei dem Prüfkörper 220802_HZ 4.2 reißt das Textil. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 220802_HZ 1.2 bei ca. 0,2 MPa (Abbildung 60).

Abbildung 61, Haftzugversuche Prüfnummer 220708_HZ_2.1: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch

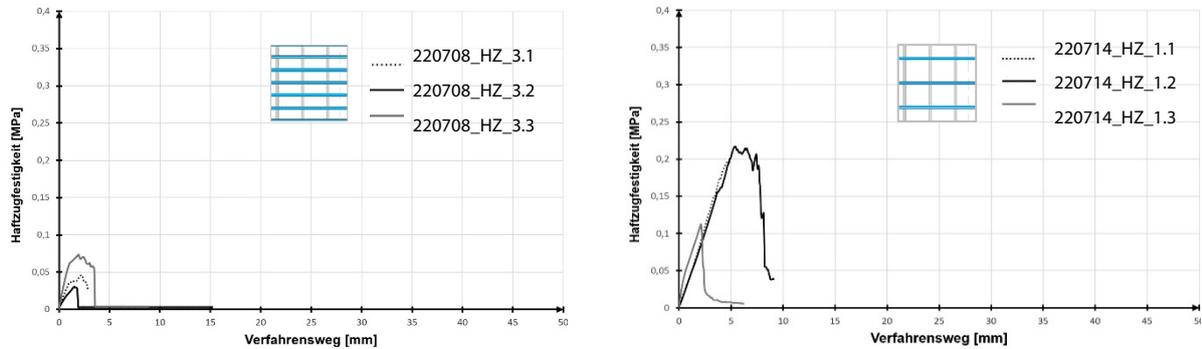


© ITA / Frankfurt UAS

Bei den Proben des Textils AR-Glas.2D.1.2 (Prüfnummern 220708_HZ 2.1 und 220811_HZ 1.1-2) mit einer Porigkeit von 16 % (Stehfäden $a = 4,23$ mm, Schussfäden $a = 8,47$ mm) kommt es beim Prüfkörper 220811_HZ 1.1 zu einem Stempelbruch. Bei den Prüfkörpern 220708_HZ 2.1 und 220811 lösen sich die Stempel vom Beton, es gibt keine Haftung (Abbildung 61).

Zwischenfazit: Die Haftzugwerte differieren je nach Porigkeit der textilen Oberfläche zwischen min 0,075 MPa (18 % Porenanteil) und max. Werten von min 0,22 bei offeneren Oberflächen ab 44% Porenanteil (Abbildung 62).

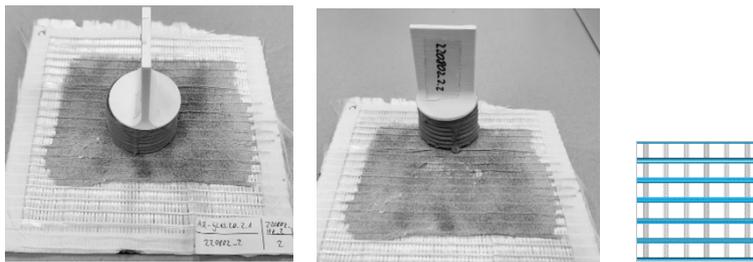
Abbildung 62, Vergleich Haftzugversuche Betondruck auf 2D-Textil, links AR-Glas.2D.1.2 Porigkeit Textil = 18 %, rechts AR-Glas.2D.2.2, Porigkeit = 44%



© ITA

c.) Haftzugtests auf die Stehfadenseite - Prüfung

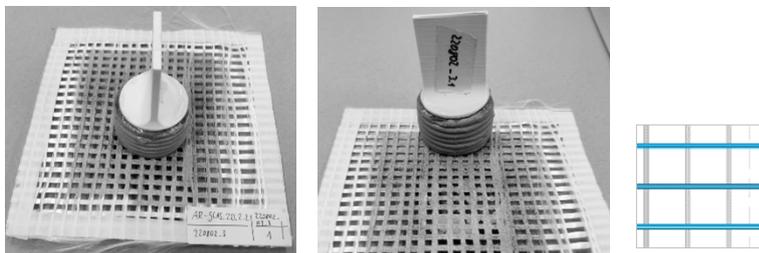
Abbildung 63, Haftzugversuche Prüfnummer 220802_HZ_2.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Alle Proben des Textil AR-Glas.2D.2.1 (Prüfnummern 220802_HZ_2.1-2 und 220802_HZ_4.3) weisen einen Porenanteil von 16 % (Stehfäden $a = 8,47$ mm Schussfäden $a = 4,23$ mm) auf. Das Textil hatte keinen Abstand zum Boden. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 220802_HZ_2.1 vor und beträgt 0,11 MPa (Abbildung 63).

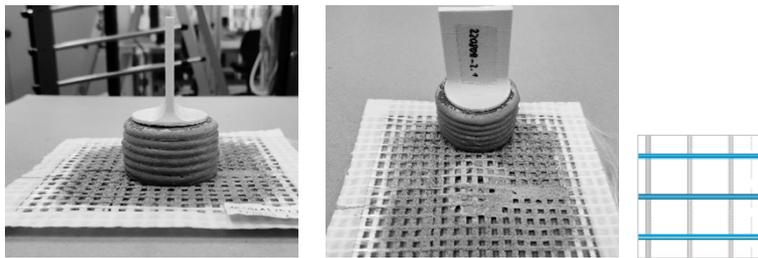
Abbildung 64, Haftzugversuche Prüfnummer 220802_HZ_3.1: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Alle Proben des Textil AR-Glas.2D.2.2 (Prüfnummern 220802_HZ_3.1-3) mit einem Porenanteil von 44% (Stehfäden $a = 8,47$ mm Schussfäden $a = 8,47$ mm) weisen einen gleichmäßigen Verlauf auf. Das Textil hatte keinen Abstand zum Boden. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 220802_HZ_3.1 vor und beträgt 0,17 MPa (Abbildung 64).

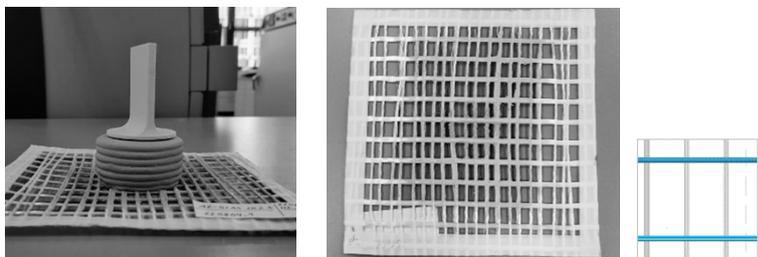
Abbildung 65, Haftzugversuche Prüfnummer 220809_HZ_2.1: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Bei den Proben des Textil AR-Glas.2D.2.2 (Prüfnummern 220809_HZ_2.1-3) mit einem Porenanteil von 44% (Stehfäden $a = 8,47$ mm Schussfäden $a = 8,47$ mm) kommt es bei der Prüfnummer 2 zu einem Stempelbruch, bei der Probe 3 löst sich der Stempel vom Beton. Das Textil hatte 5 mm Abstand zum Untergrund. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 220809_HZ_2.2 vor und beträgt 0,17 MPa (Abbildung 65).

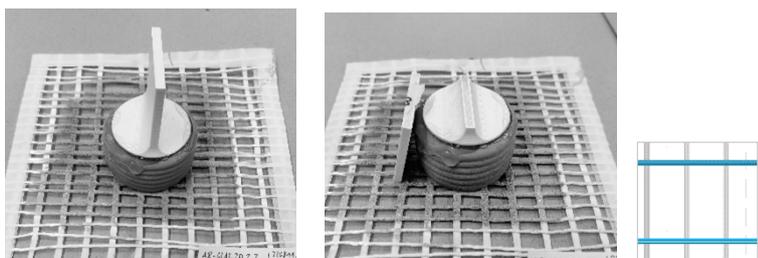
Abbildung 66, Haftzugversuche 220804_HZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Die Proben des Textils AR-Glas.2D.2.3 (Prüfnummern 220804_HZ_1.1-3) weisen einen Porenanteil von 58 % (Stehfäden $a = 8,47$ mm Schussfäden $a = 16,93$ mm) auf. Das Textil hatte 3 mm Abstand zum Untergrund. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 220804_HZ_1.1 vor und beträgt 0,13 MPa (Abbildung 66)

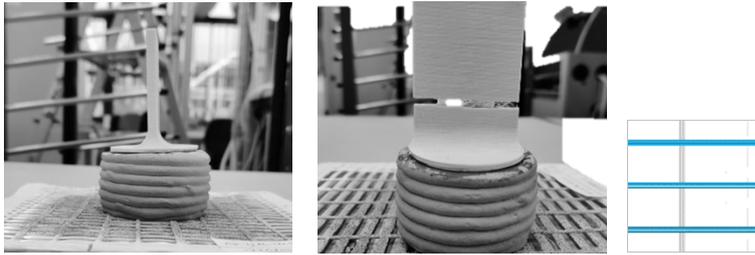
Abbildung 67, Haftzugversuche Prüfnummer 220811_HZ_2.3: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

Bei den Proben des Textil AR-Glas.2D.2.3 (Prüfnummern 220811_HZ_2.1-3) mit einem Porenanteil von 58 % (Stehfäden $a = 8,47$ mm Schussfäden $a = 16,93$ mm) kommt es bei allen Prüfkörpern der Serie kommt zu einem Bruch des Kunststoffstempels. Das Textil hatte 5 mm Abstand zum Untergrund. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 220811_HZ_2.1 vor und beträgt 0,26 MPa (Abbildung 67)

Abbildung 68, Haftzugversuche Prüfnummer 220805_HZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch



© ITA / Frankfurt UAS

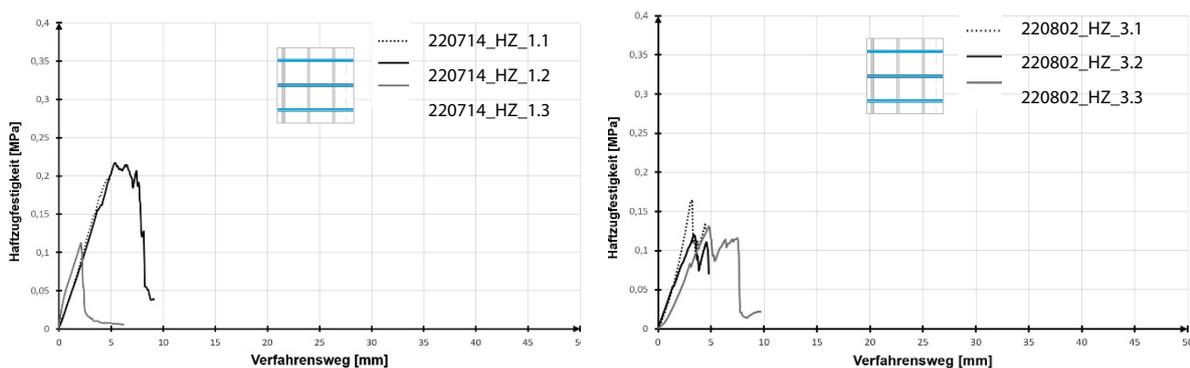
Bei den Proben des Textil AR-Glas.2D.3.2 (Prüfnummern 220805_HZ_1.1-3) mit einem Porenanteil von 48 % (Stehfäden $a = 16,93$ mm Schussfäden $a = 8,47$ mm) kommt bei den Proben 2 und 3 zu einem Bruch des PET-Stempel, bei Probe 1 löst sich der Stempel vom Beton. Das Textil hatte 5 mm Abstand zum Untergrund. Die maximale Haftzugfestigkeit liegt bei der Probe 220805_HZ_1.3 vor und beträgt 0,18 MPa (Abbildung 68)

Zwischenfazit: Die Haftzugwerte differieren je nach Porigkeit der textilen Oberfläche zwischen min. 0,11 MPa (16 % Porenanteil) und max. Werten von bis zu 0,26 MPa bei 58 % Porenanteil. Grundsätzlich erhöht ein größerer Abstand des Textils vom Unterboden die Haftung des Betonkörpers am Textil.

e.) Resümee

Abbildung 69 zeigt einen Vergleich von Einzelwerten der Haftzugversuche auf und in das Textil. Eine Übersicht der Mittelwerte für Haftzugversuche wurde nicht erstellt, da die Ergebnisse innerhalb der Prüfserien sehr starke Abweichungen aufweisen. Bei den Proben des Textils AR-Glas.2D.2.2 (Schussfadenseite Prüfnummern 220714_HZ1.1-3, Stehfadenseite Prüfnummern 220802_HZ_3.1-3) s. Abbildung 58 mit einem Porenanteil von 44 % (Stehfäden/Schussfaden $a = 8,47$ mm) liegen die Maximalwerte für die Haftzugfestigkeit des Drucks auf die Schussfadenseite mit 0,22 MPa über dem Maximalwert von 0,17 MPa beim Druck auf die Stehfadenseite (Abbildung 64).

Abbildung 69, Vergleich Textil AR-Glas.2D.2.2: Kraft-Dehnungsdiagramm links: Prüfnummern 220714_HZ_1.1-3 (Druck auf das Textil / Schussfadenseite); rechts: Prüfnummern 220802_HZ_3.1-3 (Druck in das Textil / Stehfadenseite)



© ITA

Eine Erklärung für die geringere Haftzugfestigkeit beim Druck auf die Stehfadenseiten des Textils ist, dass die Druckoberfläche der Stehfäden geringer ist, die Stehfäden zudem verrutschen und sie im Gegensatz zu den Schussfäden nicht homogen verteilt sind.

5.1.10.3 Vorversuche mineralische Werkstoffe Betondruck auf kettengewirkte Glasgelege, Druckkörper: Prisma

a.) Biegezugtests – Versuchsplan

Tabelle 9 zeigt die Planung zum Druck auf die Schussfadenseite mit unterschiedlichen Oberflächen. Dies entspricht beim Druck auf 3D-Textil dem Druck auf die Deckflächen von außen. Tabelle 10 © Frankfurt UAS

Tabelle 8 zeigt die Versuchsreihen zum Druck auf die Stehfadenseite, das entspricht beim Druck in 3D-Textil dem Druck von innen auf die Deckflächen.

Tabelle 9, Prüfreihe Biegezugversuche Beton auf die Schussfadenseite des 2D-Glastextils

Textil			3D-Druck	Prüfung
Textil-Nummer	Bild	Porenanteil [%]	3D-Druck-Nummer (Coating bzw. Beschichtung: Epoxid, wenn nicht anders benannt)	Prüfnummer
Einstellung der Prüfmaschine				
AR-Glas.2D.1.2		31	220715_1	220715_4BZ_1.1-1.2
Druck ohne Textil			220818_2 220818_4 220818_5 221117_1 221122_1 221122_2	Serie 1: 220818_4BZ_2.1 220818_4BZ_3.1 (Probe gebrochen) 220818_4BZ_4.1 (Probe gebrochen) 221117_4BZ_1.1 221122_4BZ_1.1 221122_4BZ_1.2
Untersuchung von verschiedenen Textiloberflächen: Drucken auf Schussfäden („auf“ das Textil)				
AR-Glas.2D.2.1		18	220930_2, 220930_3, 220930_4	Serie 2 220930_4BZ_1.1 220930_4BZ_1.2 220930_4BZ_1.3
AR-Glas.2D.2.2		44	221005_3 221005_4 221006_4 221122_3 221122_4	Serie 3 und 8 221005_4BZ_1.2 221005_4BZ_1.3 (Probe gebrochen) 221006_4BZ_2.1 (Probe gebrochen) 221122_4BZ_2.1 221122_4BZ_2.2
AR-Glas.2D.1.2		31	220819_5, 220819_6 221006_6 221018_2	Serie 4 220819_4BZ_2.1 220819_4BZ_3.1 221006_4BZ_2.3 221018_4BZ_2.1
AR-Glas.2D.2.3		58	221005_7 221011_1 221011_2	Serie 5 221005_4BZ_2.1 221011_4BZ_1.1 221011_4BZ_1.2
AR-Glas.2D.3.2		48	220818_6 220819_4 221006_5	Serie 6 220818_4BZ_5.1 220819_4BZ_4.1 221006_4BZ_2.2
AR-Glas.2D.2.2		44	221020_1 Coating Zementschlämme 221020_2 Coating Zementschlämme 221020_3 Coating Zementschlämme 221122_5 Coating Zementschlämme	Serie 7 221020_4BZ_1.1 1 (Probe gebrochen) 221020_4BZ_1.2 221020_4BZ_1.3 221122_4BZ_3.1

© Frankfurt UAS

Tabelle 10, Prüfreihe Biegezugversuche Beton auf die Stehfadenseite des 2D-Glastextils

Textil			3D-Druck		Prüfung
Textil-Nummer	Bild	Porengröße	3D-Druck-Nummer	Bemerkungen (Coating bzw. Beschichtung Epoxid, wenn nicht anders benannt)	Prüfnummer
Untersuchung von verschiedenen Textiloberflächen: Drucken auf Stehfäden („in“ das Textil)					
AR-Glas.2D.2.2		44	221011_4 221013_2 221013_3	Abstand zu Druckunterlage ca. 5 mm	Serie 9 221011_4BZ_2.1 221013_4BZ_2.1 221013_4BZ_2.2
AR-Glas.2D.2.1		18	221006_1 221006_2 221006_3	Abstand zu Druckunterlage ca. 5 mm	Serie 10 221006_4BZ_1.1 221006_4BZ_1.2 221006_4BZ_1.3 (evtl. mit 103 mm zu groß für Prüfmaschine)
AR-Glas.2D.2.3		58	221012_1 221012_2 221012_3	Abstand zu Druckunterlage ca. 5 mm	Serie 11 221012_4BZ_1.1 221012_4BZ_1.2 221012_4BZ_1.3
AR-Glas.2D.3.2		48	221013_1 221018_2 221018_3	Abstand zu Druckunterlage ca. 5 mm	Serie 12 221013_4BZ_1.1 221018_4BZ_1.1 221018_4BZ_1.2
AR-Glas.2D.3.2		48	230201_1 230201_2 230201_3	5 mm Textilabstand zwischen den Auflagerflächen und 0 mm Textilabstand an den Auflagerflächen des Prüfgeräts	230201_4BZ_1.1 230201_4BZ_1.2 230201_4BZ_1.3

© Frankfurt UAS

b.) Biegezugtests – Herstellung

Es sind folgende generelle Parameter beim 3D-Betondruck auf Textil zu beachten (Abbildung 70):

- Die Reproduzierbarkeit der Betonrezeptur für qualitativ gleichwertige Druckergebnisse ist eine Herausforderung. Eine Fehlerquelle für die inkonsistenten Ergebnisse sind fehlende Sieblinien des verwendeten Sands. Der Sand entmischt sich bei größeren Chargen und bindet je nachdem unterschiedlich viel Flüssigkeit. Fazit: Es werden 50 kg Chargen des Sandes gemischt und in kleinere, luftdichte Mengen verpackt.
- Durch die unterschiedliche Spannkraft der Textilien sind diese teilweise nicht eben im Rahmen. Dies hat zur Folge, dass sich der Zd-Wert über die Fläche ändert.
- Der verwendete Drucker hat keine Pumpe, ausgehärtetes, älteres Material blockiert die Düse
- Die Drucke müssen mehrere Stunden aushärten, bevor sie aus dem Rahmen gelöst werden können, da die Unterseite sonst vom Textil abgelöst wird.
- Aufgrund der unterschiedlich großen Textilöffnungen und Betonkonsistenzen ist eine Maßhaltigkeit mit einer Abweichung von 5 % wie in der Norm gefordert nicht umsetzbar.

Der Druck selber wurde hergestellt mit einem Perimeter von 1, Düsendurchmesser 8 mm, Schichthöhe/ -breite 5mm / 9mm, einer Bauraumtemperatur entsprechend Raumtemperatur, Druckgeschwindigkeit 20mm/s, Druck auf das Textil mit einem Zd-Wert von –4 mm und einem rectilinearen Infill.

Da der durch das Textil gedrungene Beton Noppen erzeugt, welche eine ebene Auflagerfläche bei der Biegezugprüfung verhindern (Abbildung 70), wird abschließend eine Prüfserie ohne Noppen an den Auflagerstellen hergestellt. Ziel ist die Herstellung von Prüfkörpern mit ebenen Auflagerflächen. Dazu wird eine Unterlage beim Drucken in den Textilrahmen gelegt, welche das Durchdringen des Betons in das Textil an den Auflagerflächen verhindert, s. Abbildung 70 rechts außen.

Abbildung 70, links, Mitte: Biegezugprüfkörper 221013_4BZ_2.1,; rechts 230201_4BZ_1.1-1.3 mit ebenen Auflagerflächen

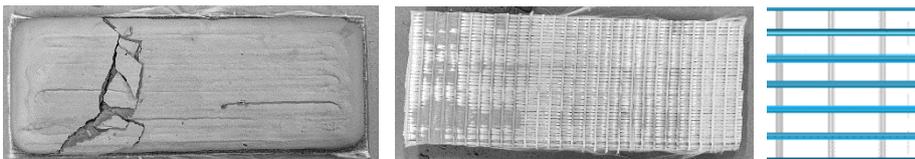


© Frankfurt UAS

c.) Biegezugtests auf die Schussfadenseite, Prüfung

Serie 1 (ohne Textil, Prüfnummern 220818_4BZ_2.1, 221117_4BZ_1.1, 221122_4BZ_1.1-2): Die Referenzproben der Serie 1 verlaufen mit einem exponentiell steigenden Verlauf bis zum Bruch, der bei allen Proben zwischen 1,0 und 1,2 mm liegt. Die dabei maximal erreichten Spannungen liegen zwischen 5,16 und 6,50 MPa mit einer Standardabweichung von 0,55 MPa. Diese und alle folgenden Proben wurden mit Epoxid + Sand beschichtet, wenn nicht anders vermerkt.

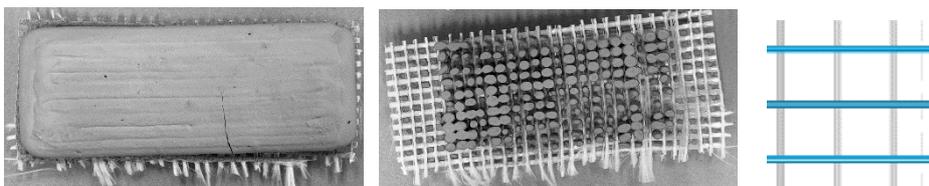
Abbildung 71, Serie 2 Biegezugversuche Prüfnummer 220930_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite



© ITA / Frankfurt UAS

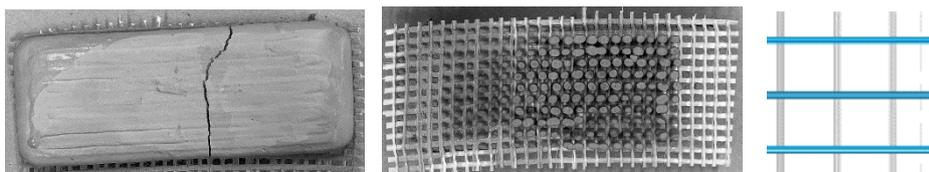
Serie 2 (Textil 2D.2.1, Porosität 18 %, Beton fließt nicht durch das Textil): Die Proben der Prüfnummern 220930_4BZ_1.1-3 verlaufen bis ungefähr 4 mm linear mit leichtem Setzen bei 1 mm. Zwischen 4,0 und 4,4 mm brechen alle Proben bei Spannungen zwischen 36,89 und 44,52 MPa. Die Standardabweichung liegt bei 3,58 MPa (Abbildung 71).

Abbildung 72, Serie 8 Biegezugversuche Prüfnummer 221005_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite



© ITA / Frankfurt UAS

Abbildung 73, Serie 3 Biegezugversuche Prüfnummer 221122_4BZ_2.1: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite

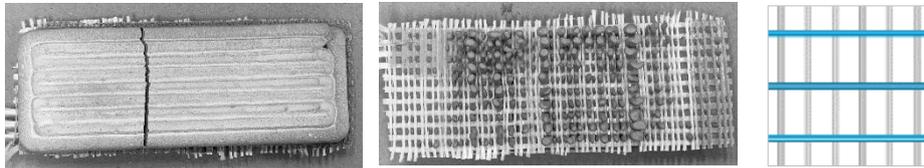


© ITA / Frankfurt UAS

Serie 3 und 8 (Textil GLAS2D.2.2, Porosität 44 %, Betonrippen entfernt): Die Prüfnummer 221005_4BZ_1.2 hat eine Maximalspannung von 20,75 MPa. Bei der dazugehörige Serie 3 mit den Prüfnummern 221122_4BZ_2.1-

brechen die Proben zwischen 3,61 und 4,26 mm. Bis dahin steigen die Messkurven linear mit Setzerscheinungen bei 1 mm an. Die Spannungen erreichen Werte bis 22,95 MPa mit einer Standardabweichung von 0,90 MPa (Abbildung 72, Abbildung 73).

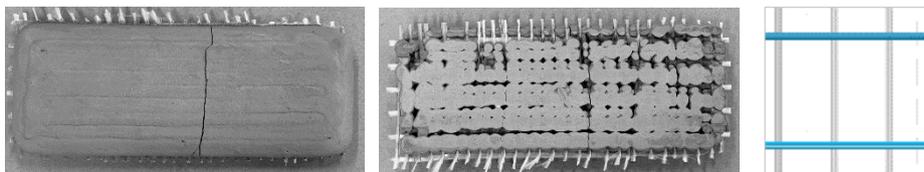
Abbildung 74, Serie 4 Textil Prüfnummer 221018_4BZ_2.1: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite



© ITA / Frankfurt UAS

Serie 4 (Textil Glas.2D.1.2, Porosität 31 %, Betonrippen entfernt): Die Proben der Prüfnummern 220819_4BZ_2.1, 220819_4BZ_3.1, 221006_4BZ_2.3, 221018_4BZ_2.1 setzen bis ungefähr 1 mm und steigen dann bis 4 mm linear an. Dann bricht die Probe der Prüfnummer 221006_4BZ_2.3 bei einer Maximalspannung von 19,25 MPa. Die anderen Proben brechen zwischen 5 und 5,5 mm bei Spannungen zwischen 21,32 und 24,78 MPa. Die Standardabweichung beträgt 2,24 MPa (Abbildung 74)

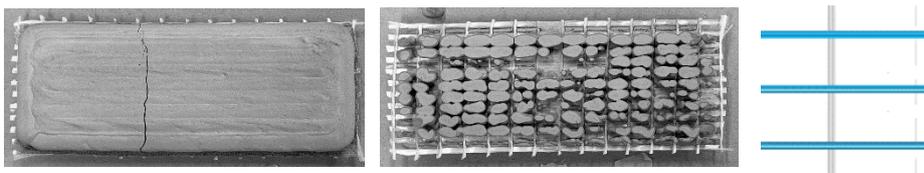
Abbildung 75, Serie 5 Textil Prüfnummer 221011_4BZ_1.2



© ITA / Frankfurt UAS

Serie 5 (Textil: Glas.2D.2.3, Porosität 58 %, Betonrippen wurden nicht entfernt): Die Proben der Prüfnummern 221005_4BZ_2.1, 221011_4BZ_1.1-2 zeigen starke Abweichungen. Es sind sehr starke Setzerscheinungen bis zum Bruch der jeweiligen Probe zu erkennen. Die Proben brechen zwischen 2 und 4 mm bei Werten von nur 3,92 und 4,63 MPa mit einer Standardabweichung von 0,29 MPa. Nach dem Bruch laufen die Versuche bei Spannungen zwischen 0,5 und 1 MPa weiter (Abbildung 75).

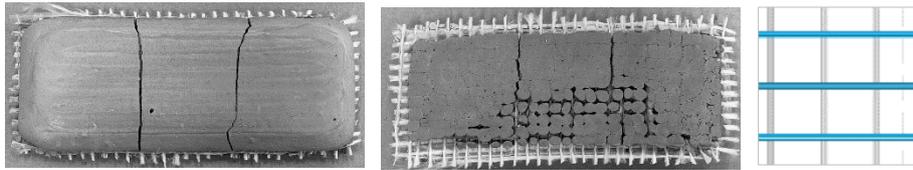
Abbildung 76, Serie 6 Biegezugversuche Prüfnummer 220819_4BZ_1.1: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite



© ITA / Frankfurt UAS

Serie 6 (Textil Glas.2D.3.2, Porosität 48 %, Betonrippen nicht entfernt): Bei den Prüfnummern 220818_4BZ_5.1, 220819_4BZ_1.1, 221006_4BZ_2.2 verlaufen die Spannungs-Verformungskurven bei den Prüfnummern 220818_4BZ_5.1, 220819_4BZ_1.1 ähnlich und brechen bei circa 4,5 mm mit Spannungen zwischen 10,74 und 11,78 MPa. Lediglich die Prüfnummer 221006_4BZ_2.2 bricht schon bei einer Verformung von 3,5 mm mit einer Spannung von 9,42 MPa. Die Standardabweichung dieser Messungen beträgt 0,97 MPa (Abbildung 76).

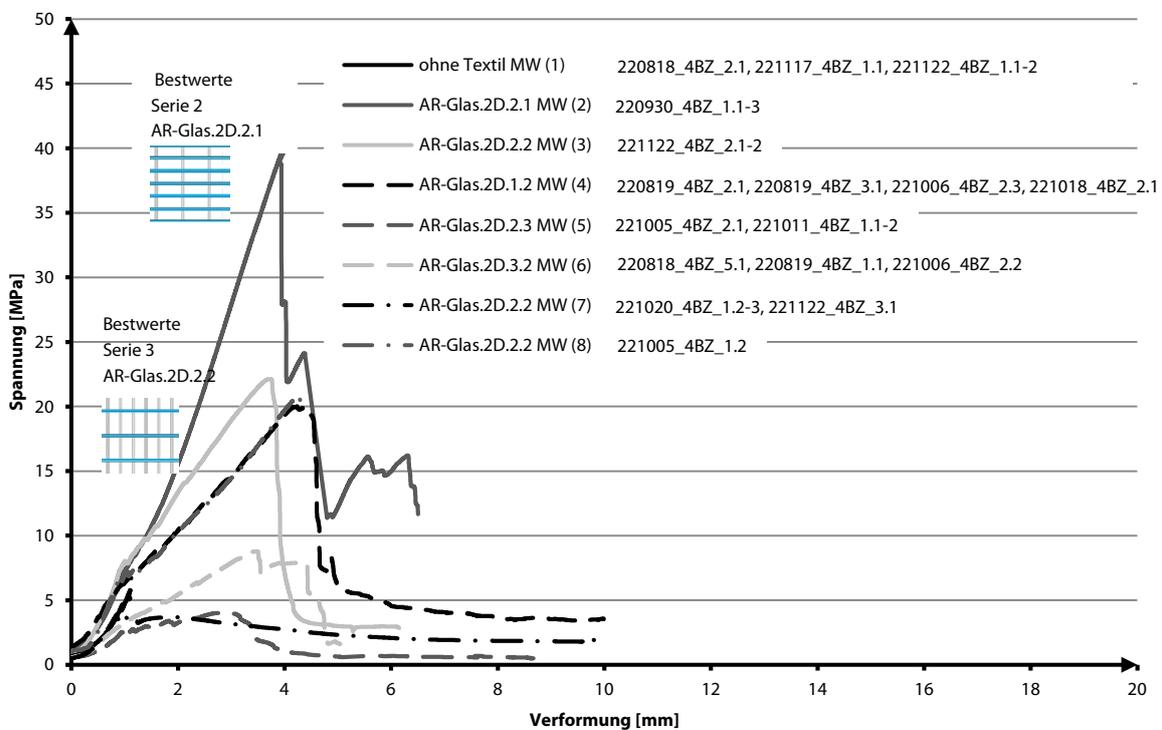
Abbildung 77, Serie 7 Biegezugversuche Prüfnummer 221020_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite



© ITA / Frankfurt UAS

Serie 7 hat eine Beschichtung aus Zementschlämme (Textil Glas.2D.2.2, Porosität 44%, Betonrippen wurden nicht entfernt): Die Prüfnummern 221020_4BZ_1.2-3 zeigen ein ähnliches Verhalten. Die Prüfnummer 221122_4BZ_3.1 weicht davon ab. Bis 0,8 mm steigen die Spannungen schnell an und danach sind sehr starke Setzerscheinungen zu erkennen. Ab 2 mm sinkt die Spannung in allen Proben kontinuierlich ab und verläuft ab 8 mm horizontal. Die Proben brechen zwischen 0,8 und 2 mm bei Werten zwischen nur 3,80 und 4,27 MPa. Die Standardabweichung beträgt 0,20 MPa (Abbildung 77).

Abbildung 78, Biegezugprüfungen, Mittelwerte der Prüfnummern, Druck auf die Schussfadenseite, Bestwerte Serie 2 und 3



© ITA

Zwischenfazit: Die besten Ergebnisse konnten bei der Serie 2 und einem Textil mit nur 18 % Porenanteil erzielt werden (Abbildung 78). Hier liegt in Belastungsrichtung der Schussfäden der geringste Fadenabstand mit einem Wert von 4,23 mm vor. Es ist kein Beton durch das Textil geflossen, Das Textil liegt in der Prüfmaschine perfekt auf den Prüfauflagern und das Textil wurde optimal auf Zug belastet. Bei den Serien 3 und 4, bei denen zumindest die Betonrippen entfernt wurden und somit die Textilien auch komplett auf Zug belastet wurden, zeigt sich bei einer Porosität von 31%, doppelt so weitem Schussfadenabstand in Belastungsrichtung und doppelt dichtem Stehfadenabstand ein circa 50 % geringere Spannungsaufnahme bis zum Bruch.

Bei den Proben, bei denen die Betonrippen nicht mehr entfernt werden konnten (Serien 5-7,) fallen die Werte extrem ab. Da das Textil im Vergleich nicht auf, sondern über den Prüfauflagern liegt, können die Auswertungen nicht mit den anderen Tests verglichen werden. Serie 7 (Porenanteil Textil 44%) und Serie 6 (Porenanteil Textil 48 %) haben dabei trotz vergleichbarer Textiloberfläche unterschiedliche Festigkeitswerte.

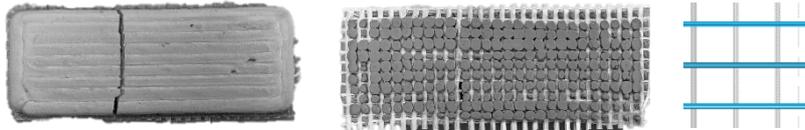
Die mit Zementschlämme beschichtete Serie hat nur ca. 50 % der Festigkeiten im Vergleich zu der mit Epoxid beschichtete Serie.

Generell haben im Vergleich zum Probekörper ohne Textil alle anderen Proben außer der Serie 7) bessere Werte. Serie 2 (ohne Noppen) mit einer Porosität des Textils von ca. 18 % hat bis zu 8-fach bessere Werte, Serie 4 (ohne Noppen) mit einer Porosität von 31 % hat immerhin noch 4-fach bessere Werte.

d.) Biegezugtests auf die Stehfadenseite– Prüfung

Bei allen nachfolgenden Proben wurden die Textilien mit Epoxid + Sand gecoatet.

Abbildung 79, Serie 9, Biegezugversuche Prüfnummer 221013_4BZ_2.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite



©ITA / Frankfurt UAS

Serie 9 (Textil 2D.2.2, Porigkeit 44 %, Betonrippen unter den Auflagern nicht entfernt): Bei den Prüfnummern 221011_4BZ_2.1, 221013_4BZ_2.1, 221013_4BZ_2.2 Bis ungefähr 1 mm steigen die Spannungen rasch an. Danach setzen sich die Proben bis 1,5 mm. Nachdem, sich die Proben gesetzt haben steigen hier die Spannungen nochmals bis 3 mm auf Werte zwischen 9,20 und 10,90 MPa an. Dann brechen die Proben und die Spannung fällt auf Werte zwischen 2 und 3 MPa ab. Die Standardabweichung liegt hier bei 0,75 MPa (Abbildung 79).

Abbildung 80, Serie 10, Biegezugversuche Prüfnummer 221006_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite



©ITA / Frankfurt UAS

Serie 10, (Textil Glas 2D.2.1, Porigkeit 18 %, Beton durchdringt die Oberfläche nicht): Bei den Prüfnummern 221006_4BZ_1.1-3 zeigt sich auch ein starker Spannungsanstieg bis 1 mm und Setzungen bis 1,5 mm. Danach sind immer noch Setzerscheinungen bis circa 3 mm zu erkennen. Dort brechen die Proben zwischen 13,02 und 15,05 MPa. Probe 3 verläuft bis 1,5 mm parallel zu den anderen Proben. Danach liegt die Spannung unterhalb der anderen Messkurven. Bei knapp über 3 mm bricht die Probe das erste Mal und bei 5 mm bricht sie erneut an einer anderen Stelle. Die maximale Spannung beträgt 16,28 MPa mit einer Standardabweichung von 1,34 MPa (Abbildung 80).

Abbildung 81, Serie 11 Biegezugversuche Prüfnummer 221012_4BZ_1.1: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite

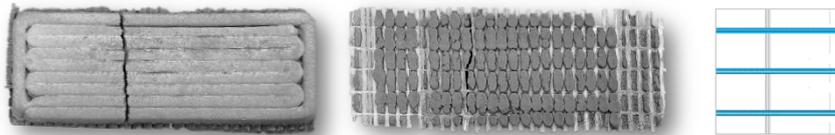


©ITA / Frankfurt UAS

Serie 11, (Textil 2D.2.3, Porosität 58 %, Betonrippen nicht entfernt): Bei den Prüfnummern 221012_4BZ_1.1-3 ist nach einem starken Anstieg bis 0,8 mm ein Setzen der Proben zu erkennen. Bis zum Bruch steigen die Messverlaufe linear an. Probe 1 und 2 brechen bei 15,07 bzw. 12,54 MPa bei Verformungen von 4,03 bzw. 3,20 mm. Probe 3 zeigt beim Bruch keinen rapiden Spannungsabfall, sondern ein langsames Sinken der

Spannung. Der Bruch findet bei 2,74 mm mit einer Spannung von 10,47 MPa statt. Alle Proben pendeln sich zwischen 1 und 2 MPa ein. Die Standardabweichung beträgt 1,88 MPa (Abbildung 81).

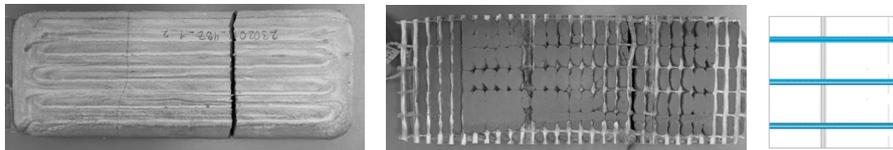
Abbildung 82, Serie 12 Biegezugversuche Prüfnummer 221018_4BZ_1.1: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite



©ITA / Frankfurt UAS

Serie 12, (Textil 2D.3.2, Porigkeit 48 %, Betonrippen nicht entfernt): Bei den Prüfnummern 221013_4BZ_1.1, 221018_4BZ_1.1-2 liegen die Maximalspannungen zwischen 6,16 und 7,25 MPa mit einer Standardabweichung von 0,45 MPa. Die Proben brechen zwischen 0,99 und 3,07 mm Verformung (Abbildung 82).

Abbildung 83, Serie 13 Biegezugversuche Prüfnummer 230201_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite



©ITA / Frankfurt UAS

Serie 13 Bei den Prüfnummern 230201_4BZ_1.1-3 (Textil GLAS.2D.3.2, Porosität 48 %, Betonrippen entfernt, Beschichtung Epoxid) beträgt die Dicke in Probenmitte 17 bis 22 mm und am Rand 13 bis 18 mm. Die Prüfnummer 230201_1.2 weist bereits vor der Versuchsdurchführung einen Riss auf. Die Maximalspannungen der drei Proben liegen im Bereich zwischen 9,41 MPa und 10,98 MPa (Abbildung 83).

Zwischenfazit (Abbildung 84): Die Serien 9, Serie 10, Serie 11, 12 und 13 haben alle ähnliche Spannungsverläufe. Wie im Abschnitt 5.1.6.3 c.) beschrieben, beeinflusst der Textilöffnungsanteil die Menge des Betons, der durch das Textil hindurchfließen kann. Bei einem dichten Textil bleibt die Unterseite der Proben weitestgehend frei vom Beton (Serie 10). Bei größeren Öffnungen fließt so viel Beton hindurch, dass es sich unterhalb der Probe verbindet (Serien 9, 11). Bei weiteren Proben tritt der Beton nur an einzelnen Stellen hindurch und kann an den Auflagerstellen für die Versuchsdurchführung abgenommen werden (Serien 12, 13). Hieraus ergeben sich drei geometrische Konstellationen, die zu einer unterschiedlichen Belastung des Textils während der Versuchsdurchführung führen. Die Serie 10 erreicht dabei die größten Spannungswerte dieser fünf Serien. Hier ist kein Beton durch das Textil durchgeflossen das somit optimal auf Zug belastet wurde. Bei den anderen vier Serien liegt das Textil mittiger und ist somit näher an der neutralen Faser, wodurch es nicht optimal gemessen werden kann. Die Serie 12 hat mit 16,93 mm die größten Fadenabstände in Belastungsrichtung und hat deshalb auch sehr geringe Spannungswerte.

e.) Fazit

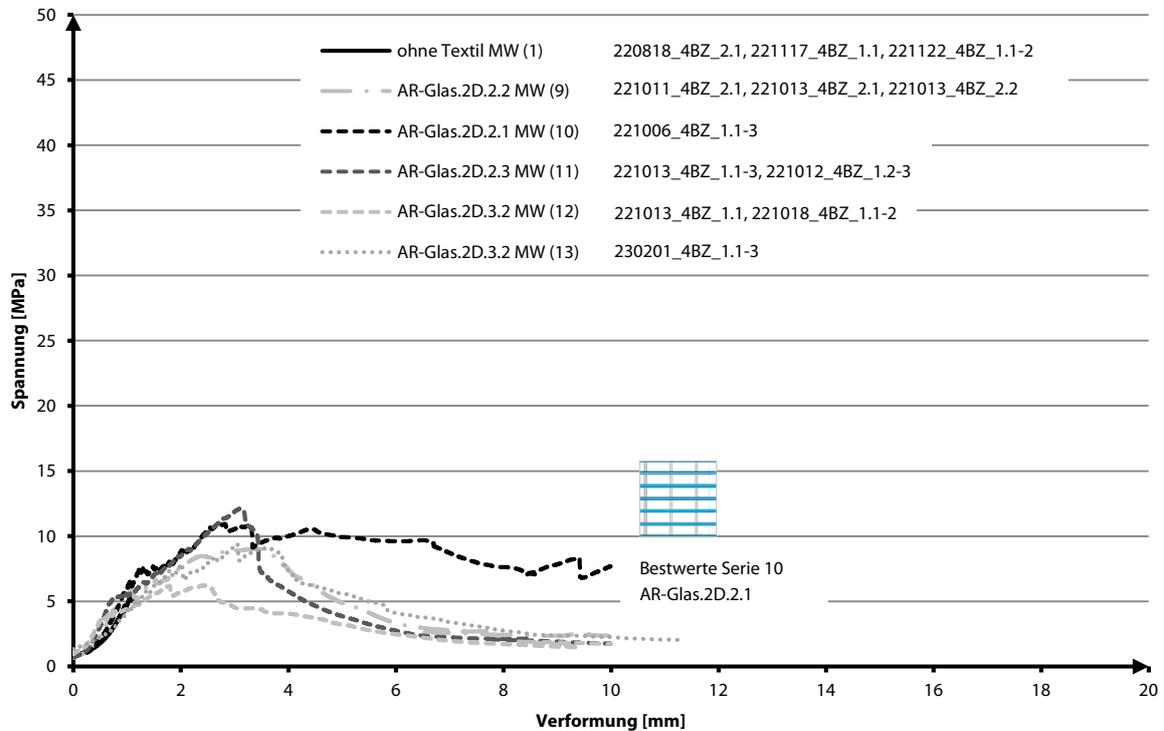
Generell lässt sich sagen, dass alle Proben Setzerscheinungen aufweisen. Diese können gering, aber auch deutlich stärker ausfallen. Am Anfang der Messungen entstehen in diesen Bereichen schon Mikrorisse im Beton, welche durch Material-Inhomogenität oder bedingt durch Stöße beim Transport der Proben im Paket entstehen können. Die Unebenheiten der Auflageflächen konnten durch das Vlies weitestgehend beseitigt werden.

Was die potentielle Zugbewehrung des Betondrucks betrifft kann man feststellen, dass durch größere Fadenabstände der Textilien in Belastungsrichtung weniger Fäden im Eingriff sind und dadurch geringere Spannungen aufgenommen werden können. Der Fadenabstand senkrecht zur Belastungsrichtung hat einen geringen Einfluss. Die Textillage innerhalb des Betons hat einen starken Einfluss auf die Spannungsmessung der Proben. Liegen die Textilien beim Prüfen am unteren Ende der Probe und auf den Prüflagern auf, werden

doppelt so hohe Spannungen erreicht wie bei Proben, bei denen das Textil bei der Prüfung weiter oben und weiter entfernt von den Prüfauflägern liegt, da die Betonnoppen nicht oder nur teils entfernt werden konnten.

Die Beschichtung mit Zementschlämme erweist sich als nicht effektiv.

Abbildung 84, Biegezugprüfungen, Mittelwerte der Prüfnummern, Druck auf Stehfäden, in das Textil, Bestwerte Serie 10 (die Linie ohne Textil verläuft nur bis zu einer Verformung von 1 mm und ist in der Grafik ebenfalls enthalten aber kaum sichtbar)

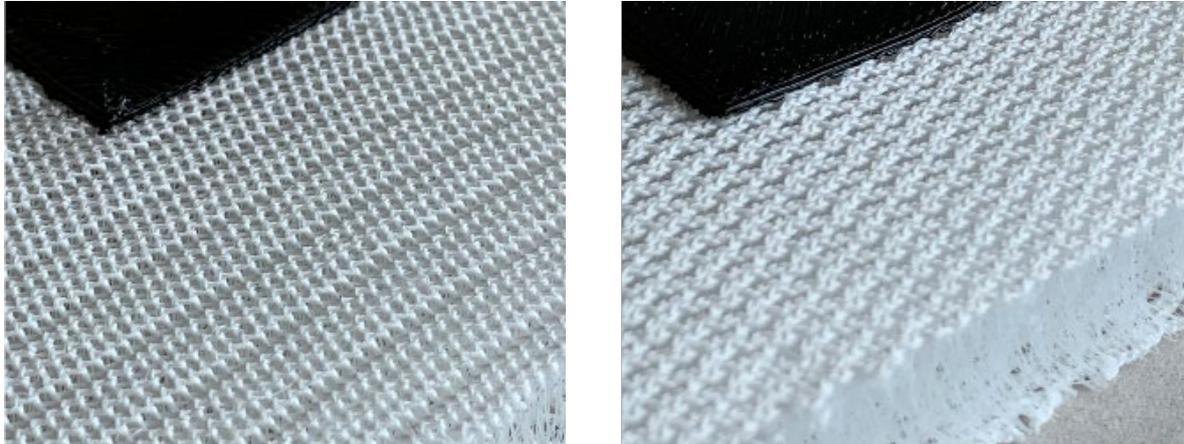


© ITA

5.1.11 Orientierende Versuche PES/PET, 3D-Druck auf 3D-Textilien

5.1.11.1 Druckparameter für marktgängige 3D-Textilien

Abbildung 85, marktübliche Abstandsgewirke, links: Oberfläche A, rechts: Oberfläche B



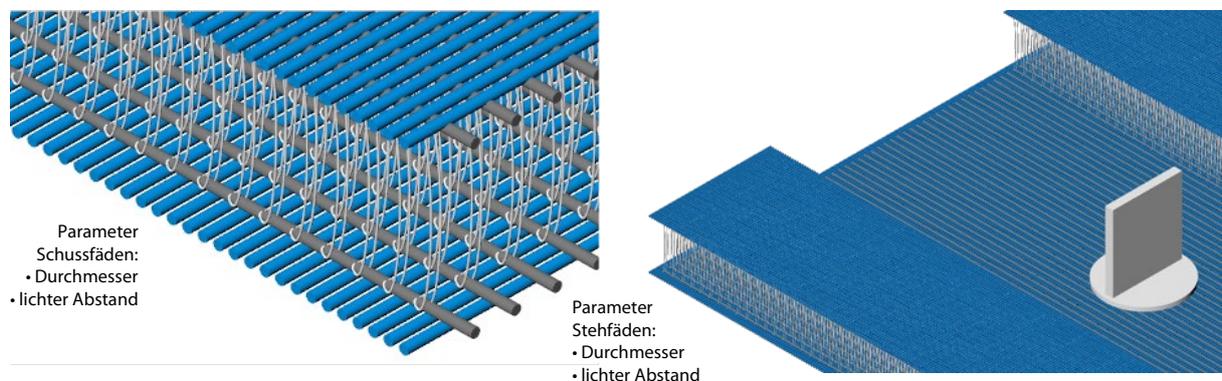
© Frankfurt UAS

Anders als kettengewirkte Abstandsgewebe bestehen Abstandsgewirke aus einer reinen Maschenstruktur. Sie sind entsprechend elastisch und bieten perspektivisch anderen Anwendungsoptionen. Für 6dTEX wurden marktübliche Abstandsgewirke mit zwei verschiedenen Textiloberflächen betrachtet. Textil A mit einer eher geschlossenen Oberfläche und mit einem eher festen Verhalten bei Druck senkrecht zur Oberfläche, sowie Textil B mit einer offeneren Oberfläche und mit einem eher weichen Verhalten bei Druck senkrecht zur Oberfläche. Gedruckt wurde mit einem Prusa Drucker und rPETG Filament (Abbildung 85). Die Versuche ergeben, dass die Druckparameter aus den Versuchen mit 2D-Textilien beibehalten werden können: Perimeter 2; Düsendurchmesser = 0,8 mm; Flow = 100 %; Schichthöhe/-breite = 0,6 mm/ 0,8 mm, Ventilator = 20 %, Drucktemperatur = 240 °C, Zd-Wert = 0 mm; Schicht 1-4: Geschwindigkeit 12 mm/s, Infill 100 %, Linien 45°/ 135°.

5.1.11.2 Textilherstellung projektspezifischer 3D-Textilien

Alternativ zu kettengewirkten, marktüblichen Abstandsgewirken wurden projektspezifische, kettengewirkte Abstandsgewebe konzipiert und hergestellt.

Abbildung 86, links: PET 3D-Textil mit oberflächenrelevanten Parametern; rechts: PET 3D-Textil, Teilbereich mit nur einseitiger Decklage



© Frankfurt UAS

a) Planung der textilen Geometrie kettengewirkter Gelege: Ausgehend von den Haft- und Biegezugversuchen auf kettengewirkte 2D-Gelege, bei denen deutlich bessere Haftungen bei dichteren und rauerer Oberflächen erreicht werden konnten, wurden fünf Oberflächen für die Versuche mit 3D-kettengewirkten

Abstandsgelegen geplant. Dabei wurden insbesondere die Parameter der Schussfäden bedacht (potentieller Durchmesser und lichter Abstand, Abbildung 86). Vier der Oberflächen sind für Drucke auf die textile Außendeckfläche, eine fünfte für Drucke auf die Innenseite und die Stehfadenoberfläche einer der Deckflächen vorgesehen. Die geplanten Lichten zwischen den Rovings, die im Ende die Porosität der Oberfläche definieren, basieren auf den in den Vorversuchen erfassten Verformungen der Rovings bei der Verarbeitung. Sie basieren weiter auf dem gewählten Düsendurchmesser des Druckers mit 0,8 mm. Angedacht waren Porengrößen, die mit Lichten von geplant 0,4 mm bis zu 0,6 mm max. 75 % der Breite des Druckfilaments haben.

Abbildung 87, links: Textil PET.3D. 11 zum Drucken in das Textil; rechts: Textil PET.3D.13 zum Drucken in das Textil



© Frankfurt UAS

Abbildung 87 zeigt Beispiele der produzierten Textilien.

PET. 3D.01 > Stehfaden 1.100 tex, Volleinzug /// Schussfaden 1.100 tex, geplante Lichte a = ca. 0,6 mm

PET. 3D.05 > Stehfaden 1.100 tex, Volleinzug /// Schussfaden 1.100 tex, geplante Lichte a = ca. 0,0 mm

PET. 3D.07 > Stehfaden 1.100 tex, Volleinzug /// Schussfaden 660 tex, geplante Lichte a = ca. 0,6 mm

PET. 3D.11 > Stehfaden 1.100 tex, Volleinzug /// Schussfaden 660 tex, geplante Lichte a = ca. 0,0 mm

PET. 3D.13 > Stehfaden 1.100 tex, Volleinzug /// Schussfaden 1.100 tex, geplante Lichte a = ca. 0,6mm

b) Herausforderungen bei der Textilherstellung: Die Herausforderungen bei der Herstellung der Textilien sind sowohl mit der Maschine, dem Produktionsort, als auch der Wahl der Fasermaterialien verbunden. s. auch Kap. 5.1.6.1.

5.1.11.3 Analyse der textilen 3D-Struktur

Ein erstes händisches Aufmaß ergab folgende Werte in Bezug auf die entstandenen Öffnungsgrößen:

PET. 3D.01 > Stehfaden 1.100 tex, Lichte a = 2,4mm /// Schussfaden 1.100 tex, Lichte a = 0,6 mm

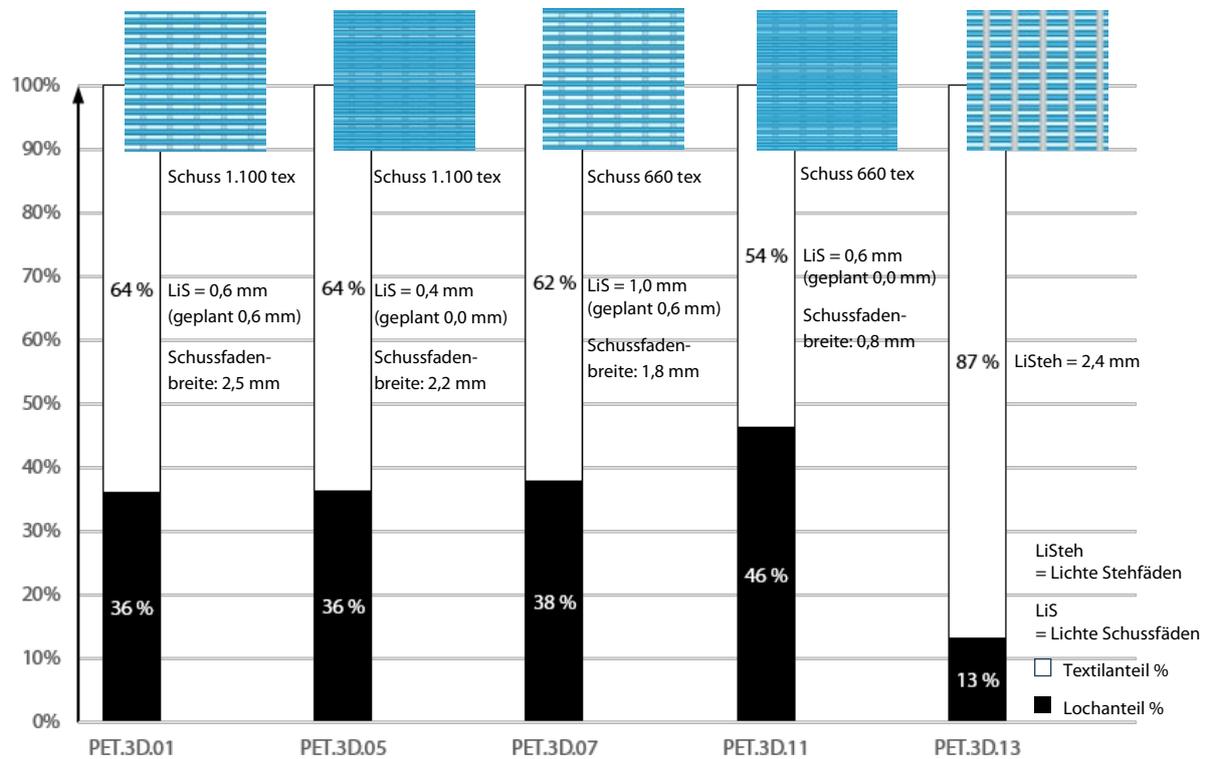
PET. 3D.05 > Stehfaden 1.100 tex, Lichte a = 2,4mm /// Schussfaden 1.100 tex, Lichte a = 0,4 mm

PET. 3D.07 > Stehfaden 1.100 tex, Lichte a = 2,4mm /// Schussfaden 660 tex, Lichte a = 1,0 mm

PET. 3D.11 > Stehfaden 1.100 tex, Lichte a = 2,4mm /// Schussfaden 660 tex, Lichte a = 0,6 mm

Abbildung 88 zeigt die Auswertung der photographischen Erfassung des Porenanteils. Sie korreliert nur teilweise mit den manuell gemessenen lichten Abständen der Steh- bzw. Schussfäden. Grund dafür können die Polfäden sein, die je nach Ausrichtung der Kamera die Poren verdecken und das Ergebnis verfälschen.

Abbildung 88, Analyse des Porenanteils der Oberflächen der kettengewirkten Abstandsgelege, fotografisch-digitales Verfahren im Vergleich zu manueller Auswertung



©Frankfurt UAS

5.1.11.4 Druckparameter für projektspezifische 3D-Textilien

Für das Drucken wurden die Parameter aus den Versuchen mit 2D -Textilien übernommen:

Perimeter = 2; Düsendurchmesser = 8 mm; Flow = 100 %; Schichthöhe/-breite 0,6 mm/0,8 mm, Ventilator = 20 %, Drucktemperatur = 240° C, Zd-Wert = 0 mm; Schicht 1-4 : Geschwindigkeit 12 mm/s, Infill 100 %, Linien 45°/135°. Überprüft wurde erneut der Zd-Wert. Mit dem Textil PET.3D.01 wurden vier Versuche mit unterschiedlichen Zd-Werten zwischen minus 0,5 mm, 0,0 mm und plus 0,5 mm gemacht (s. Abbildung 89). Im Ergebnis ist festzuhalten, dass bei einem Zd-Wert von plus 0,5 mm kein Verziehen des Textils und kein Kratzen auf der Oberfläche zu erkennen ist. Die Oberfläche zeigt gleichmäßige Rillen im 45° Winkel. Bei einem Zd-Wert von 0,0 mm bricht ein Druck nach 50 % der ersten Schicht ab, der Drucker ist aus ungeklärten Gründen mit dem Rahmen kollidiert. Im zweiten Versuch mit einem Zd-Wert von 0,0 mm gibt das Textil beim Druck leicht nach. Es kommt zu keinem Verzug in der Oberfläche, obwohl die Textilstruktur in der ersten Druckschicht noch erkennbar ist. Bei einem Zd-Wert von minus 0,5 mm berührt die Sonde des Druckers das Textil und kommt der Druckfläche sehr nahe. Die Oberfläche des 3D-Drucks zeigt starke Furchen. Es wird entschieden die Prüfkörper mit einem Zd-Wert von 0,0 mm herzustellen.

Abbildung 89, Schnitt durch 3D-Druck PET auf 3D-Textil PES, Verzahnung zwischen Textil- und Druckmaterial



© Frankfurt UAS

5.1.12 Versuche PES/PET: 3D-Druck auf 3D-Textilien

5.1.12.1 Versuchsplan und Herstellung Prüfmuster Haft-und Biegezug

Tabelle 11, Haftzugversuche Prüfreihe rPETG Druck auf und in 3D-PES Textilien, © Frankfurt UAS

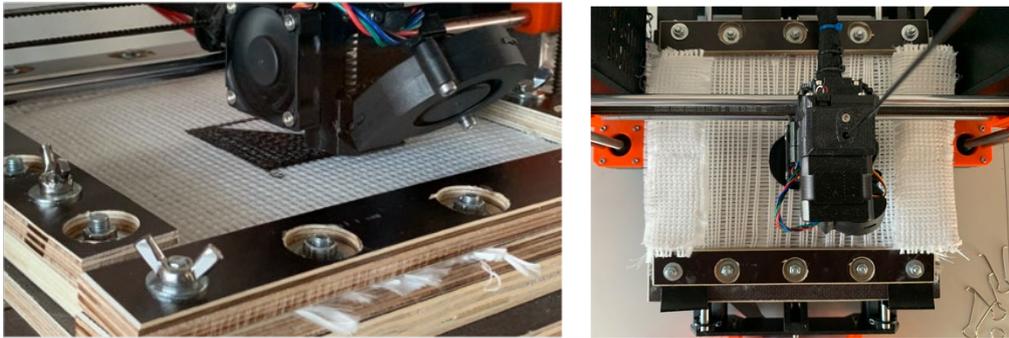
3D-Textil			3D-Druck		Prüfung
Textil-Nummer	Bild	Parameter Deckfläche	3D-Druck-Nummer	Bemerkungen	Prüfnummer/ Versuchsnummer
Einstellung der Prüfmaschine					
PET.3D.05			2.14_rPETG	Druck auf Schussoberfläche	Serie 0 220818_HZ_2.1-2
Untersuchung von 4 verschiedenen Textiloberflächen: Drucken <u>auf</u> das Textil					
PET.3D.01		LiS = 0,6 mm Schussf.:1.100tex, Stichl.: 3,0 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	Druck auf Schussfadenoberfläche Deckfläche außen Probekörper: T-Körper	Serie 1 220812_HZ_1.1-3
PET.3D.05		LiS = 0,4 mm Schussf.:1.100tex, Stichl.: 2,5 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	s.o.	Serie 2 220816_HZ_1.1-3
PET.3D.07		LiS = 1,0 mm Schussf.: 660tex, Stichl.: 3,0 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	s.o.	Serie 3 220817_HZ_1.1-3
PET.3D.11		LiS = 0,6 mm Schussf.: 660tex, Stichl.: 2,5 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	s.o.	Serie 4 220818_HZ_1.1-3
Untersuchung von einer Textiloberfläche: Drucken <u>in</u> das Textil					
PET.3D.13		LiSteh = 2,4 mm 1.100tex, Stichl.: 3,0 mm, Vollschuss, Kanal ohne Polfäden	2.14_rPETG	Druck auf Stehfadenoberfläche Deckfläche außen Probekörper: T-Körper	Serie 5 221004_HZ_1.1-3

Tabelle 12, Biegezugversuche Prüfreihe rPETG-Druck auf 3D-PES-Textilien in Schussfadenrichtung einer Deckfläche, © Frankfurt UAS

Textil			3D-Druck		Prüfung
Textil-Nummer	Bild	Parameter Deckfläche	3D-Druck-Nummer	Bemerkungen	Prüfnummer/ Versuchsnummer
Einstellung der Prüfmaschine					
PET.3D.05		LiS = 0,4 mm Schussf.:1.100tex, Stichl.: 2,5 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	Druck auf Schussoberfläche Probekörper: Prisma	220825_3BZ_1.1-3
kein Textil			2.14_rPETG	Referenzprobekörper ohne Textil	220824_3BZ_5.1-3
Untersuchung von Textilgeometrien: Drucken <u>auf</u> das Textil in Schussrichtung					
PET.3D.01		LiS = 0,6 mm Schussf.:1.100tex, Stichl.: 3,0 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	Druck auf Schussoberfläche in Schussfadenrichtung; Probekörper: Prisma	220824_3BZ_1.1-3
PET.3D.05		LiS = 0,4 mm Schussf.:1.100tex, Stichl.: 2,5 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	s.o.	220824_3BZ_2.1-3
PET.3D.07		LiS = 1,0 mm Schussf.: 660tex, Stichl.: 3,0 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	s.o.	220824_3BZ_3.1-3
PET.3D.11		LiS = 0,6 mm Schussf.: 660tex, Stichl.: 2,5 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	s.o.	220824_3BZ_4.1-3

Herstellung der Prüfmuster: Für den Druck auf das Textil wird die obere Decklage biaxial eingespannt. Für den Druck in das Textil wird die untere Decklage monoaxial in Richtung der Stehfäden gespannt (Abbildung 90). Die Prüfkörper für die Haftzugversuche (T-Form) haben folgende Größe, Platte: \varnothing 50 mm, $h = 2,5$ mm und Flansch: $H*B*L = 50 * 5 * 45$ mm. Die Probekörper für die Biegezugkörper werden in Schussrichtung auf das Textil gedruckt und haben eine Größe von $L*B*H = 10 * 8 * 4$ mm.

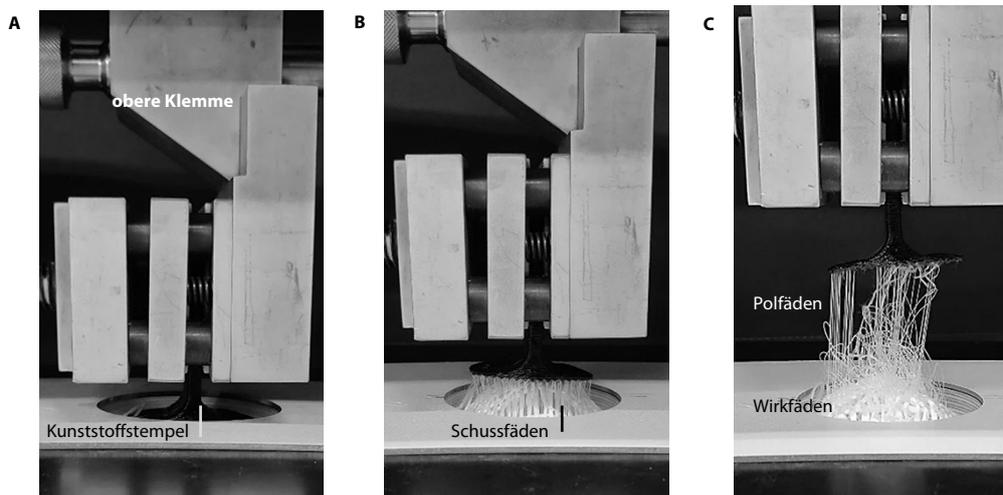
Abbildung 90, links: Druck auf eine Deckfläche von außen, Einspannung biaxial; rechts: Druck auf die Deckfläche von innen, Einspannung monoaxial



© Frankfurt UAS

5.1.12.2 Ergebnisse Haftzugprüfung

Abbildung 91, Versuchsablauf Haftzugprüfung PES/PET 3D-Druck auf 3D-Textil: (A) vor dem ersten Maximum, (B) erstes Maximum, (C) zweites Maximum



© ITA

Abbildung 91 zeigt den Versuchsablauf zu Beginn des Versuchs, während des ersten sowie während des zweiten Maximums. Dabei hat die Haftzugkraft-Weg-Kurve hat in vielen Fällen zwei Maxima:

Zu Beginn des Zugversuchs ist der Stempel sowohl mit den Schuss- als auch mit den Wirkfäden verbunden. Die Schuss- und Wirkfäden werden zusammen mit dem Stempel angehoben. Während des ersten Maximums lösen sich die Schussfäden ab (Abbildung 91 B). Danach fällt die Haftzugkraft ab, da die Verbindung zwischen den Schussfäden und dem Kunststoff versagt. Die Wirkfäden sind weiterhin mit dem Kunststoff verbunden und es kommt zu einem zweiten Maximum, sobald diese unter Spannung stehen (Abbildung 91 C). Nach dem zweiten Maximum reißen einzelne Wirkfäden, wodurch sich Belastungsspitzen in der Messkurve ergeben. Diese sind vor allem nach dem zweiten Maximum erkennbar, wenn die Schussfäden bereits gelöst sind und nur noch die Polfäden mit dem Stempel verbunden sind. Einzelne Wirkfäden sind in Abbildung 91 C zu erkennen.

a) Druck auf die Deckfläche (Schussfäden), Haftzugversuche Auswertung: Abbildung 92 zeigt eine Übersicht der Prüfkörper (links) vor und (rechts) nach der Versuchsdurchführung. Die dazugehörigen Diagramme werden in Abbildung 93 dargestellt.

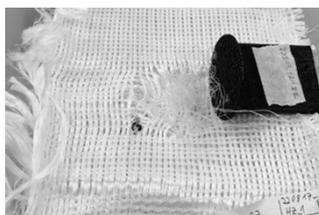
Abbildung 92, Haftzugprüfung PES/PET 3D-Druck auf 3D-Textilien Übersicht der Prüfnummern (links) vor und (rechts) nach der Prüfung



Serie 1: Prüfnummer 220812_HZ_1.2



Serie 2: Prüfnummer 220816_HZ_1.3



Serie 3 Prüfnummer 220817_HZ_1.2



Serie 4: Prüfnummer 220818_HZ_1.3

© ITA

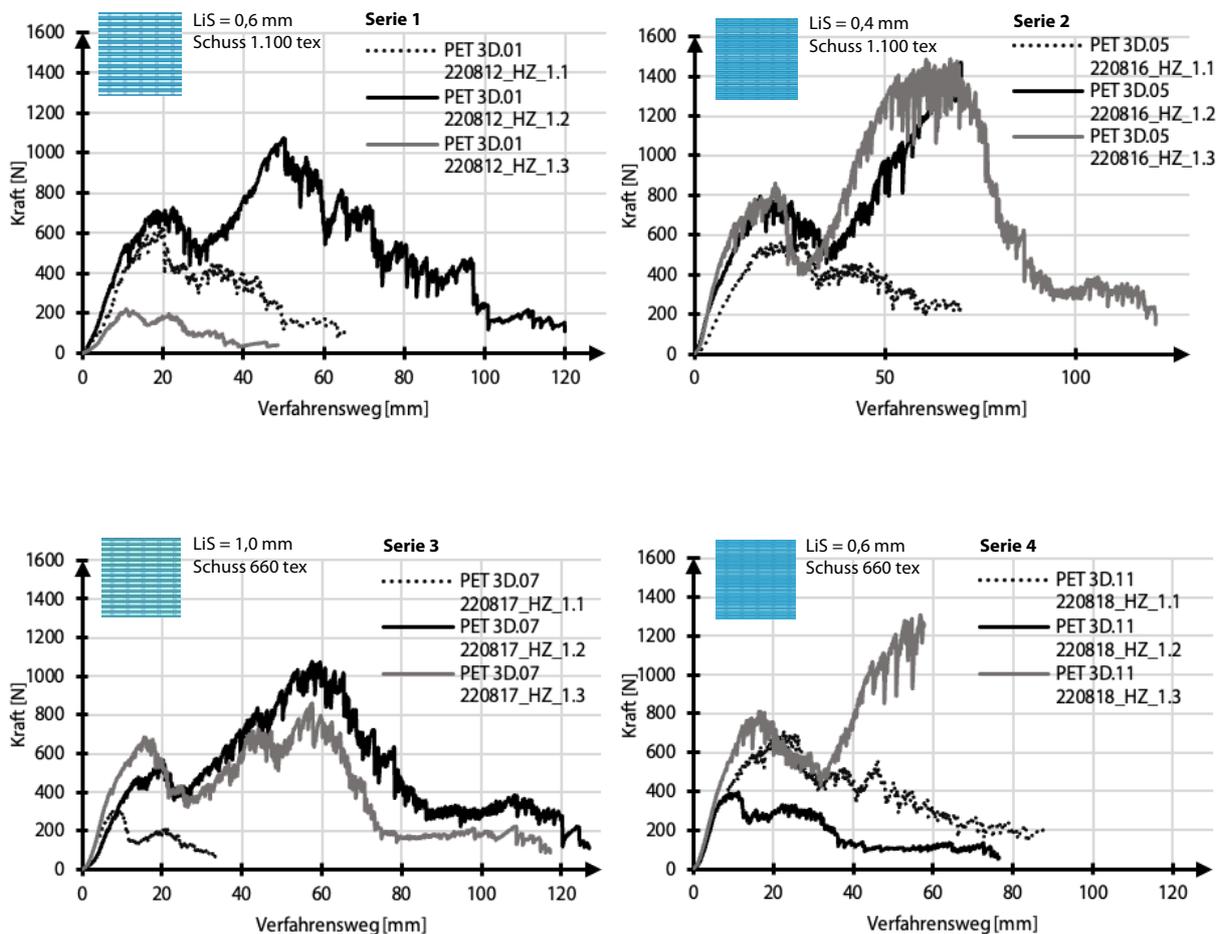
Bei der Serie 1 (Prüfnummern 220812_HZ_1.1-3) mit Textil 3D.01 (Schussfäden 1.100 tex, lichter Schussfadenabstand 0,6 mm, Stichelänge 3 mm) wird das Maximum der Haftzugkraft bei der Probe 2 bei 1076,2 N erreicht.

Bei der Serie 2 (Prüfnummern 220816_HZ_1.1-3) mit Textil 3D.05 (Schussfäden 1.100 tex, lichter Schussfadenabstand 0,4 mm, Stichelänge 2,5 mm) wird das Maximum der Haftzugkraft bei der Probe 3 bei 1489,7 N erreicht. Probe 2 weist ähnlich hohe Kräfte bei beiden Maxima auf.

Bei der Serie 3 (Prüfnummern 220817_HZ_1.1-3) mit Textil 3D.07 (Schussfäden 660 tex, lichter Schussfadenabstand 1,0 mm, Stichelänge 3,0 mm) wird das Maximum der Haftzugkraft bei der Probe 2 mit 1077,7 N erreicht.

Bei der Serie 4 (Prüfnummern 220818_HZ_1.1-3) mit Textil 3D.11 (Schussfäden 660 tex, lichter Schussfadenabstand 0,6 mm, Stichelänge 2,5 mm) wird das Maximum der Haftzugkraft bei der Probe 3 mit 1308,8 N erreicht. Nach dem ersten Maximum steigt hierbei die Kraft über einen kurzen Weg schnell an.

Abbildung 93, Haftzugprüfung 3D-Druck rPETG auf 3D-PES-Textil, Kraft-Weg-Diagramm; von links nach rechts Serie 1 bis 4



©ITA

Zwischenfazit: Der Vergleich der Prüfserie 1 (LiS = 0,6 mm) und Prüfserie 2 (LiS = 0,4 mm) zeigt, dass bei einer Feinheit der Schussfäden von 1.100 tex mit abnehmender Stichlänge und abnehmendem lichten Abstand der Schussfäden untereinander die maximale Haftzugkraft bei Serie 2 zu nimmt (Abbildung 93). Auch die Prüfserien 3 und 4 mit einer Feinheit der Schussfäden von 660 tex zeigen in Serie 4 (LiS = 0,6 mm) in den ersten Maximalwerten, wenn das Textil noch intakt ist, bessere Werte im Verhältnis zur Prüfserie 3 (LiS = 1,0 mm). Die Auswertung ist aufgrund der geringen Probenanzahl aber nicht völlig eindeutig. Insgesamt sind die Mittelwerte der Serien 3 und 4 mit Schussfäden von jeweils 660 tex etwas geringer als die der Serien 1 und 2 mit Schussfäden von 1.100 tex.

Die Serien mit geringerer Oberflächenporosität weisen eine höhere Haftzugfestigkeit im ersten Maximum auf, da sie eine größere Auflagefläche haben. Die größere Kontaktfläche verteilt die Kräfte besser, die auf die Verbindung wirken und es kommt zu einer Erhöhung der Haftzugfestigkeit. Eine geringere Oberflächenporosität verteilt die Kraft auf eine kleinere Fläche, was in einer höheren Spannung und höheren Deformationsrate resultiert. Wenn der Verbund stärker belastet wird und die Kräfte über eine kleinere Fläche geleitet werden, reduziert sich die Haftzugfestigkeit. Werden die Rovings zu fein und die Lichten zwischen den Schussfäden proportional größer als bei einem voluminöseren Roving, lässt die Haftfähigkeit etwas nach.

b) Druck auf Stehfäden im Textil, Haftzugversuche Auswertung: Die Abbildung 94 zeigt exemplarisch Prüfkörper vor (links) und nach (rechts) der Versuchsdurchführung. Die dazugehörigen Diagramme werden in Abbildung 95 dargestellt.

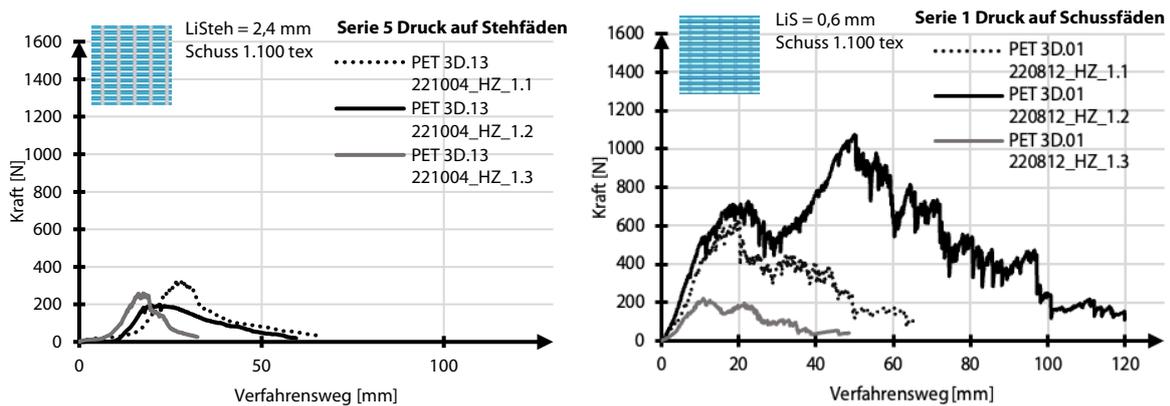
Bei den Prüfnummern 221004_HZ_1.1-3 wurde in das Textil gedruckt. Es handelt es sich um das Textil 3D.13 mit Schussfäden von 1.100 tex sowie einem lichten Schussfadenabstand von 0,6 mm und einer Stichlänge von 3,0 mm (LiSteh = 2,4 mm). Das Maximum der Haftzugkraft wird bei der Probe 1 mit 321,5 N erreicht. Es werden insgesamt deutlich geringere Zugkräfte als bei den Proben mit Druck auf die Schussfäden erreicht. Die Stehfäden und Schussfäden lösen sich teilweise schon vor der Versuchsdurchführung voneinander.

Abbildung 94, Haftzugprüfung PES/PET 3D-Druck in 3D-Textilien, Prüfnummer 221004_HZ_1.1, (links) vor und (rechts) nach der Prüfung



© ITA

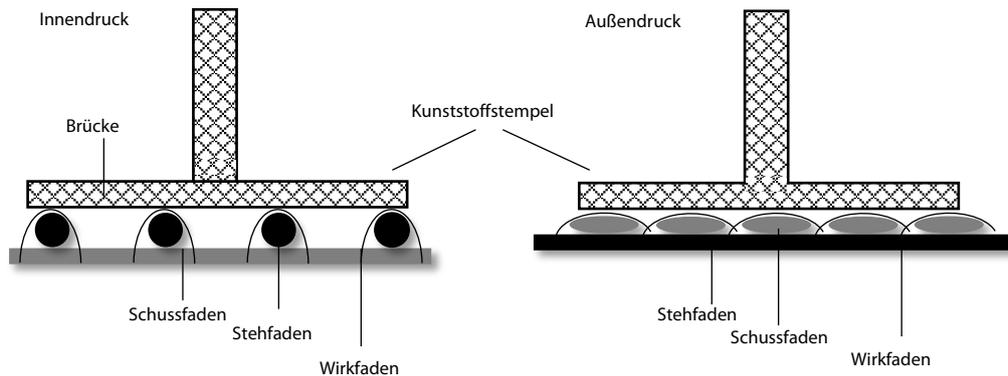
Abbildung 95, Haftzugprüfung PES/PET 3D-Textil (Stehfaden 1.100 tex, Schuss 1.100 tex, LiS = 0,6 mm, LiSteh = 2,4 mm) Kraft-Weg-Diagramm; links: Druck auf Stehfadenseite (IN das Textil); rechts: Druck auf Schussfadenseite (AUF das Textil)



© ITA

c) Fazit: Insgesamt werden insgesamt deutlich geringere Zugkräfte beim Innendruck wie beim Außendruck erreicht. Abbildung 96 zeigt dies im Vergleich zwischen dem Druck auf die Stehfäden im Inneren des Textils (Textilnummer 3D.13) und dem Druck von außen auf die Schussfäden. Beide Textilien - PET.3D.01 und PET3D.13 - sind identisch in der Tex-Zahl (Steh- und Schussfäden 1.100 tex) und haben identische Steh- und Schussfadenabständen. Die Ergebnisse der durchgeführten Haftzugversuche zeigen, dass die Haftzugfestigkeit im ersten Maximum bei dem Außendruck deutlich höher ist als bei dem Innendruck. Der Unterschied in der Haftzugfestigkeit beim ersten Maximum beträgt 102,27 % und stellt den größten Unterschied unter allen verglichenen Kunststoffreihen dar. Eine nähere Betrachtung der Kontaktflächen zwischen Prüfkörper und textiler Oberfläche lieferte Erkenntnisse über die Ursache dieses Phänomens.

Abbildung 96, Schematische Darstellung Druck in das Textil (links) und Druck auf das Textil (rechts)



© ITA

Beim Außendruck ist der Stempel zum einen in Kontakt mit mehr Schussfäden und zum anderen sind diese elliptisch geformt. Schussfäden sind nur an Stellen, an denen sie mit den Stehfäden in Kontakt kommen von den Wirkfäden umwunden, s. Abbildung 96. Aus diesem Grund entsteht eine elliptische Form bei den Schussfäden. Die Betrachtung des Innendrucks zeigt, dass der Stempel auf einer deutlich reduzierten Anzahl von Fäden gedruckt ist und dass die Geometrie der Stehfäden eine Kreisform, anstatt einer elliptischen Form aufweisen. Der Kunststoff kühlt beim Bedrucken der Textilien schnell ab. Daher bilden sich Brücken zwischen den Auflagepunkten auf den Fäden und der Kunststoff fließt nicht in das Textil hinein. Der Stempel steht daher nur im Kontakt mit den Fäden, auf die er gedruckt wird. Die Ergebnisse der Zugversuche unterstützen die Aussage, dass die Außendruck-Reihe höhere Haftzugfestigkeiten aufweist, weil der Stempel in Kontakt mit einer größeren Anzahl von Schussfäden steht und diese zudem elliptisch verformt sind durch den Herstellprozess, was die Kontaktfläche noch einmal erhöht. Dies führt zu einer Steigerung der Haftzugfestigkeit.

5.1.12.3 Ergebnisse Biegezugprüfung

a) Die 3D-Textil Kunststoffproben wurden im 3-Punkt-Biegeversuch geprüft und vor der Versuchsdurchführung zusammengedrückt. Der Verfahrensweg beträgt bei allen Versuchen bis 20 mm.

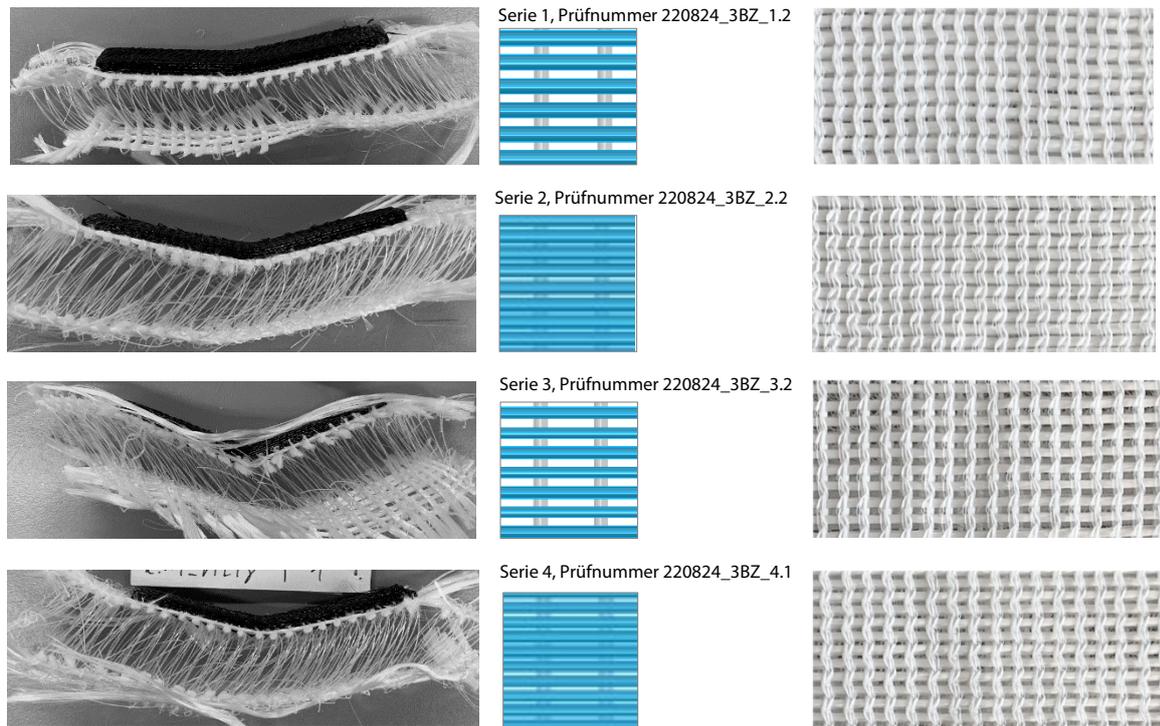
Der Schussfadenabstand (1.100 tex) der Biegezugproben der Serie 1, Textil 3D.PET.01 (Prüfnummern 220824_3BZ_1.1-3) beträgt 0,6 mm. Alle drei Proben verformen sich bis ungefähr 6 mm linear und haben danach eine sinkende Spannungszunahme bis zum Erreichen der Maximalspannung bei circa 11-15 mm). Bei den Proben 2 und 3 ist eine leichtfallende Tendenz zum Messende hin zu beobachten. Die Maximalspannungen liegen zwischen 36,7 und 41,8 MPa mit einer Standardabweichung von 2,10 MPa.

Die Serie 2 (Prüfnummer 220824_3BZ_2.1-3) zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Serie mit der Prüfnummer 220824_3BZ_1.1-3 mit Maximalwerten der Spannung von den Proben 2.1 und 2.2 zwischen 42 und 42,7 MPa. Der Schussfadenabstand (1.100 tex) beträgt 0,4 mm. Die Standardabweichung liegt bei 0,35 MPa. Die Probe 2.3 ist bei ungefähr 7 mm gebrochen und pendelt sich nach dem Bruch bei 32 MPa auf einem Level zwischen 16 und 18 MPa ein.

Die Serie 3 (220824_3BZ_3.1-3) hat ähnliche Verläufe zur Serie 220824_3BZ_2.1-3, nur, dass hier die Probe 3.2 bei einer Spannung von 24,8 MPa und einer Verformung von circa 6 mm bricht. Danach pendelt sich der Spannungsverlauf zwischen 12 und 14 MPa ein. Die Proben 3.1 und 3.3 steigen bis ungefähr 10 mm auf Werte von 36,2 und 42,8 MPa an. Die größere Diskrepanz lässt sich durch unterschiedliches Aufliegen der Proben auf den Auflagern und durch die experimentelle Herstellung erklären. Der Schussfadenabstand (660 tex) beträgt 1,0 mm.

Serie 4 (Prüfnummern 220824_3BZ_4.1-3) weist mit allen Proben einen parallelen Verlauf auf. Die Maximalspannungen liegen zwischen 36,7 und 37,6 MPa mit einer Standardabweichung von 0,37 MPa. Der Schussfadenabstand (660 tex) beträgt 0,6 mm.

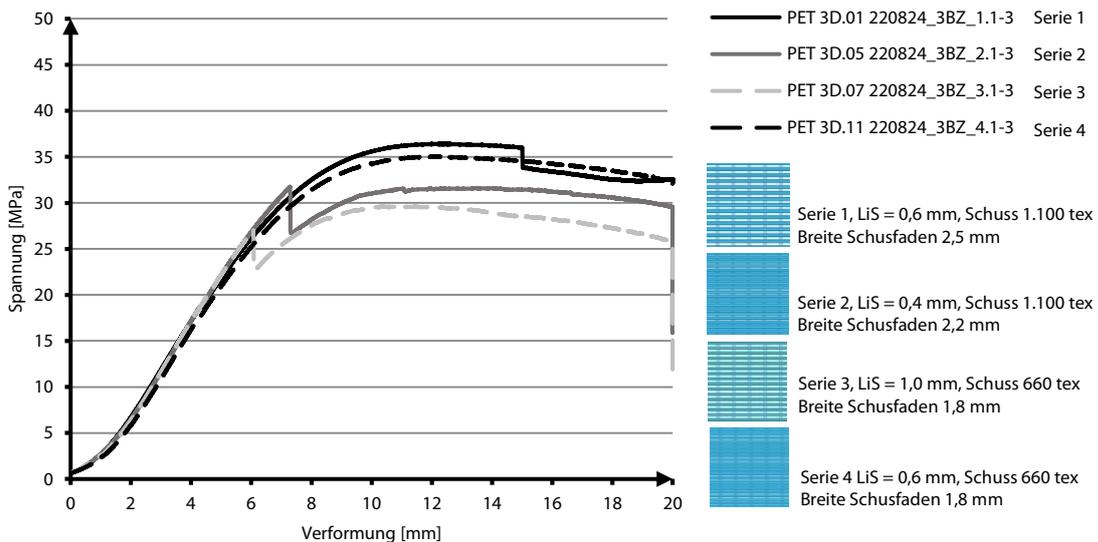
Abbildung 97, PET 3D-Textil Biegezugprüfungen der Prüfnummern mit den höchsten Biegezugspannungen



© ITA

b) Fazit: Eine Übersicht der Prüfkörper mit den höchsten Spannungen der Prüfserien ist in Abbildung 98 dargestellt.

Abbildung 98, Spannungs-Dehnungsdiagramm 3D-Textil Mittelwerte der Serien 1-4



© ITA

Insgesamt lässt sich sagen, dass bis ungefähr 5 mm Verformung der Kurvenverlauf aller Messserien, mit Ausnahme der Proben zur Einstellung der Maschine, nahezu identisch ist. Bis zu diesem Zeitpunkt haben die Textilien noch keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei einer Verformung über 5 mm zeigen sich unterschiedliche

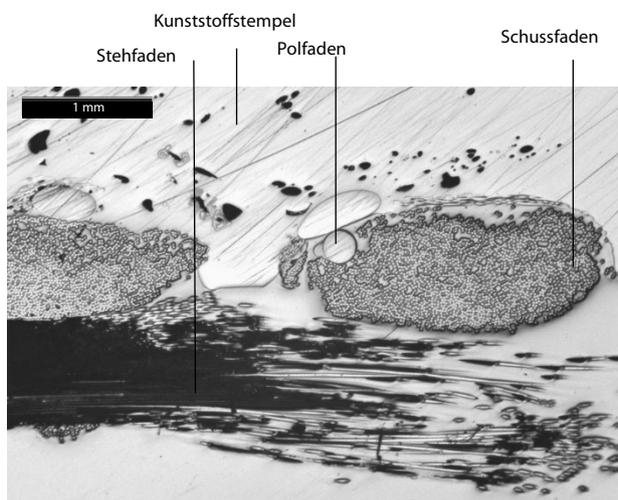
Kurvenverläufe. Bei einer Verformung über 5 mm zeigt sich, dass die Proben der Serie 1 und 4 die größten Spannungen aufnehmen können. Danach folgen die Serien 2 und 3. Das Verhältnis Breite der Schussfäden zu Lichte der Schussfäden beträgt gem. händischem Aufmaß (siehe Abbildung 88) in Bezug auf die Lichte bei Serie 1 beim 4,7-fachen, bei Serie 2 beim 5,5-fachen, bei Serie 3 beim 1,8-fachen und bei Serie 4 beim 3-fachen der Schussfäden. Die Biegezugfestigkeit ist bei der im Verhältnis zur Breite des Schussfadens größten Lichte (Serie 3) am schlechtestes, am besten bei Serie 1 und 4. Wobei Serie 5 mit dem im Verhältnis geringsten lichten Abstand des Schussfadens dann dagegen abfällt. Eine eindeutige Identifizierung des Einflusses ist somit nicht gegeben. Lediglich der Abstand der Schussfäden in Belastungsrichtung hat eine Auswirkung auf die Messergebnisse. Die beiden besten Messerien 1 und 4 haben einen Schussfadenabstand von 0,6 mm, bei gleichzeitig unterschiedlicher tex-Zahl der Rovings. Dort ist die Anbindung der Textilien an die aufgedruckten Kunststoffprobekörper vollständig vorhanden. Anzunehmen ist, dass bei einem Abstand von 0,4 mm in Serie 2 der aufgeschmolzene Kunststoff mit einer Austragungsbreite von 0,8 mm nicht weit genug in die Lücken hineingelangt und so eine gute Verbindung zwischen den Materialien verhindert wird. In Serie 3 mit einem Schussfadenabstand von 1,0 mm gelangt wiederum zu viel Material beim 3D-Druck in die Zwischenräume der Textilien und sorgt somit für eine ungleichmäßige Anbindung an das Textil sowie für eine ungeordnetere Anordnung in den ersten Schichten des Druckvorgangs.

Insgesamt lässt sich sagen, dass ein Schussfadenabstand von 0,6 mm die besten Ergebnisse liefert und die restlichen Parameter kaum einen Einfluss haben. 0,6 mm entspricht 80 % des Druckdüsendurchmessers. Insgesamt sind zu geringeren Spannungen im Vergleich zu Proben ohne Textil zu verzeichnen, s. Messreihe Abbildung 51 mit Werten um die 50 MPa, wobei unterschiedliche Auflagersituationen zu berücksichtigen sind.

5.1.12.4 Mikroskopische Untersuchungen

In Abbildung 99 ist eine Kunststoffprobe der Prüfnummer 220824_3BZ_2.1 dargestellt. Es handelt sich um die Textilnummer PET.3D.05. Darin ist der Ausschnitt markiert, welcher in der ersten Mikroskopieaufnahme in Abbildung 101 zu sehen ist.

Abbildung 99, Mikroskopieaufnahme mit sichtbaren StF (Stehfäden), ScF (Schussfäden) und Polfäden der Prüfnummer 220824_3BZ_2.1

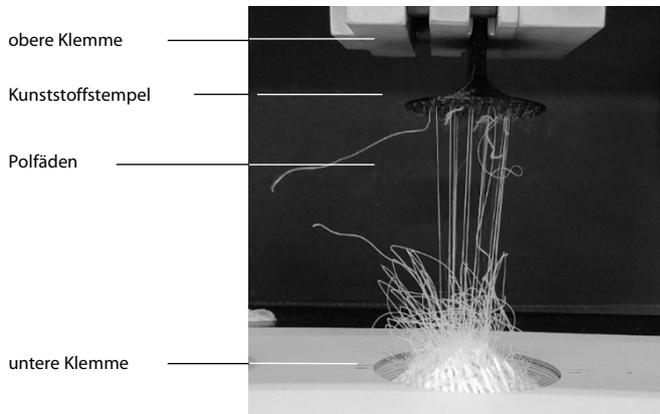


© ITA

Die Stehfäden haben wenig bis keinen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit der Verbindung, da sie nicht in Kontakt mit dem Kunststoffstempel kommen. Die Hauptkontaktpunkte des Kunststoffes sind die Schussfäden. Zwischen dem Kunststoffstempel und den Schussfäden herrscht eine kraftschlüssige Verbindung. Zudem ist anzumerken, dass die Polfäden nahezu bündig in die Kavität eingelassen sind, welche die Stehfäden im Stempel erzeugen. Durch die fast vollständige Umhüllung ergibt sich ein Formschluss. Damit ist die Haftung der Polfäden im Stempel höher als die der Schussfäden. Der bessere Halt an dem Stempel lässt sich nicht nur unter dem Mikroskop schlussfolgern, sondern war auch in den Versuchen zu beobachten. Bei den

Haftzugversuchen mit Kunststoff ist auffällig, dass sich unter Belastung die Schussfäden als erstes von Stempel lösen, gefolgt von den Polfäden (siehe Abbildung 100).

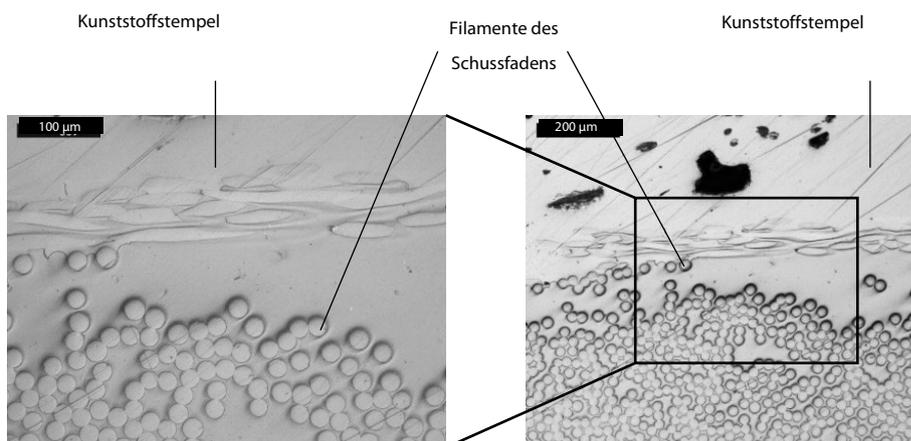
Abbildung 100, Endstadium eines Haftzugversuchs, nur noch die Polfäden befinden sich am Stempel



© ITA

Es wird deutlich, dass die Schussfäden aufgrund ihrer rein kraftschlüssigen Verbindung mit dem Stempel als erstes gelöst wurden, im Gegensatz zu den Polfäden, die sowohl eine kraftschlüssige als auch formschlüssige Verbindung aufweisen. Damit es zusätzlich zu einem Formschluss kommen kann, muss das Filament das Textil besser durchdringen und die Schussfäden mit einem größeren Umfang umhüllen. Warum zwischen Stempel und Schussfäden kein Formschluss herrscht, lässt sich durch Druckparameter erklären. Es ist möglich, dass die Druckintensität bei der Auftragung des Kunststofffilaments nicht hoch genug war, um das Textil ausreichend zu penetrieren und eine formschlüssige Verbindung zu etablieren. Ein weiterer Parameter, der bei Steigerung die Penetrierfähigkeit des Filaments in das Textil beeinflusst, ist die Drucktemperatur. Das PET-Filament wurde bei der Probenherstellung mit einer Drucktemperatur von 240 °C aufgetragen, welche nahe der Schmelztemperatur ist. Jedoch kann diese nicht noch weiter erhöhen werden, da es sonst zu einer stoffschlüssigen Verbindung, mit dem ebenfalls aus PET bestehendem Textil, kommt. Dabei würde das Textil aufgrund der hohen Temperaturen des Kunststoffs aufgeschmolzen werden.

Abbildung 101, Mikroskopieaufnahme, links: Vergrößerung des Ausschnitts, rechts: sichtbare Verbindung der Filamente mit Stempel



© ITA

Auf der größten Vergrößerungsstufe der Mikroskopieaufnahmen in Abbildung 101 rechts lassen sich keine Anzeichen eines Stoffschlusses feststellen.

Es ist nicht möglich, die Drucktemperatur weiter zu erhöhen. Daher ist der Druck, mit dem das Filament auf das Textil aufgebracht wird, der einzige beeinflussende Parameter für die Penetrierfähigkeit des Textils. Die Druckparameter für die ersten 4 Druckschichten, insbesondere Zd-Wert und Geschwindigkeit, wurde so gewählt, dass eine formschlüssige Verbindung mit den Polfäden entsteht, die Temperatur aber zu niedrig ist, um mit den Schussfäden zu verschmelzen.

5.1.12.4 Resümee PES/PET: 3D-Druck auf 3D-Textilien

Bei dem 3D-Kunststoffdruck auf 3D-Textilien entsteht eine kraftschlüssige Verbindung der Schussfäden mit dem Stempel, die Polfäden weisen sowohl eine kraftschlüssige als auch formschlüssige Verbindung auf und lösen sich zuletzt von dem Prüfstempel.

Bei den Haftzugversuchen zum Außendruck zeigen die Reihen mit Textilien geringerem lichterem Abstand im Schuss eine höhere Haftzugfestigkeit im ersten Maximum, da damit eine größere Auflagefläche einhergeht. Die Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche im Vergleich zeigen, dass die Haftzugfestigkeit im ersten Maximum bei dem Außendruck deutlich höher ist als bei dem Innendruck. Der Stempel steht beim Außendruck in Kontakt mit einer größeren Anzahl von Schussfäden, die elliptisch geformt sind, was die Kontaktfläche und noch einmal erhöht.

Bei den Biegezugproben lässt sich sagen, dass ein lichter Schussfadenabstand von 0,6 mm bei sowohl 1.100 tex wie 660 tex des Schussfades die besten Ergebnisse liefert. Die restlichen Parameter haben kaum einen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit.

Im Vergleich von Haftzug- und Biegezugversuchen konnte die Hypothese, dass bessere Haftzugversuche auch in besseren Biegezugversuchen resultieren, nicht bestätigt werden. Während beim Haftzug die Serien 1 und 2 mit Schussfäden aus 1.100 tex generell besser abschneiden als die Textilien mit Schussfäden aus 660 tex, liegen bei den Biegezugversuchen die Serien 1 und 4 vorne. Sie haben unterschiedliche Tex-Zahlen im Schuss, während der lichte Abstand zwischen den Schussfäden gleich ist.

5.1.13 Orientierende Versuche, Glas/Beton: 3D-Druck auf 3D-Textilien

5.1.13.1 Orientierende Versuche 3D-Betondruck auf kettengewirkte Abstandstextile aus AR-Glas (Restmaterial ITA)

Abbildung 102, Resttextilien ITA, kettengewirkte Abstandstextile, links: von oben nach unten Textil 0.05, Textil 0.08 und Textil 0.11; rechts: begrenzende Wirkung der Polfäden im Zwischenraum des Abstandstextils, © Frankfurt UAS



© Frankfurt UAS

a.) Textilmaterial und Betonrezeptur für erste "Druck"prozesse: Erste Tests wurden mit in kleine Schalungen für gegossenem Beton und mit Restmaterial kettengewirkter Abstandsgelege des ITA gemacht. Ziel war eine Abschätzung des Zusammenspiels von Betonrezeptur und Porengösse der Textiloberfläche. Zum Einsatz kamen drei unterschiedliche textile Geometrien (Abbildung 102):

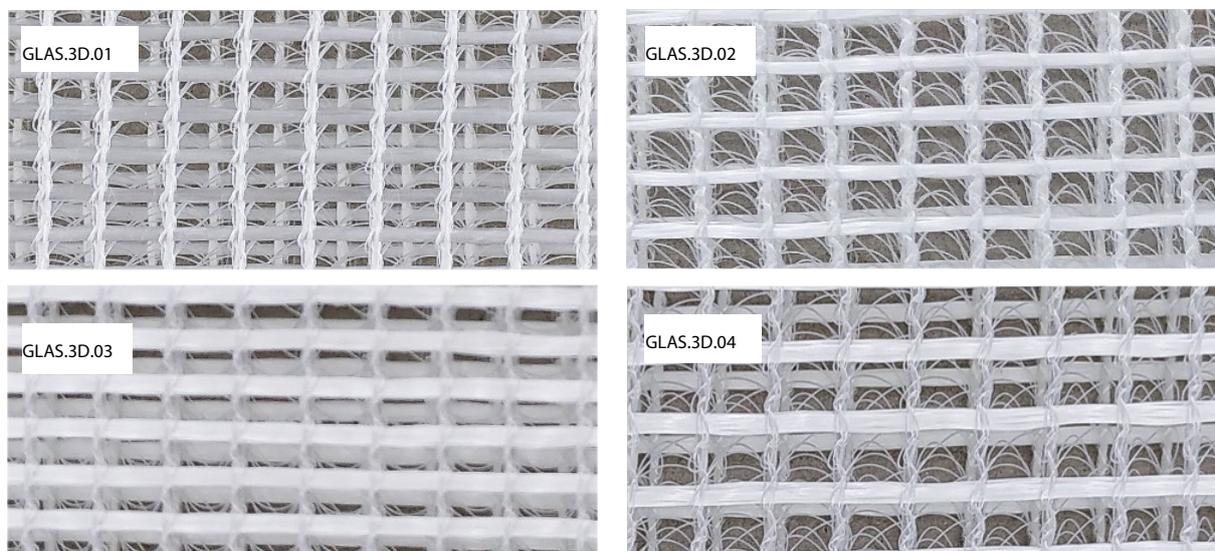
- Textil 0.05_Glas.3D_ITA: Stehfaden: voll, 400 tex, Schussfaden: voll 400 tex, Wirkfaden PES 167 dtex, Polfaden PET Monofil 0,25 mm, Stichlänge 3,5 mm
- Textil 0.08_Glas.3D_ITA: Stehfaden: 1v-1l, 1.200 tex, Schussfaden: 1v-2l 1.200 tex, Wirkfaden PES 167 dtex, Polfaden PET Monofil 0,25 mm, Stichlänge 3,0 mm
- Textil 0.11_Glas.3D_ITA, Obere Decklage: Stehfaden: 1v-1l, 2.400 tex, Schussfaden: 1v-1l, 2.400 tex, Wirkfaden PES 167 dtex, Polfaden PET Monofil 0,25 mm, Stichlänge 3,40 mm; untere Decklage Stehfaden: 3v-9l, 2.400 tex, Schussfaden: 1v-1l-1v-1l-1v-10l, 2.400 tex, Wirkfaden PES 167 dtex, Polfaden PET Monofil 0,25 mm, Stichlänge 3,40 mm

Als Beton wurde in Anlehnung an Angaben des Druckerherstellers WASP folgende Mischung gewählt: Wasser/ Zement-Verhältnis = 0,3, Zement/Sand-Verhältnis = 0,5, Zement: CEM III 42,5 R, Oberrhein-Kiesel, Korngröße 0-1 mm, Fließmittel: ADVA flow 342

b.) Zwischenfazit: Erste Beobachtungen zeigen, dass eine Haftung zwischen dem Beton und den 3D-Textilien erreicht werden kann. Der Beton durchdringt die dichten Oberflächen teilweise bis auf die untere Decklage. Textilien mit einer offenen Struktur werden vollständig durchdrungen. Eine dichte Polfadenstellung hat einen begrenzenden Effekt auf den Beton und dessen Ausbreitung innerhalb des Textils

5.1.13.2 Textilherstellung projektspezifische 3D-Textilien

Abbildung 103, kettengewirkte Abstandsgelege aus AR-Glas (Steh- und Schussfäden) und PES (Wirk- und Polfäden)



© Frankfurt UAS

Für die Tests mit 3D-Betondruck wurden fünf Textilien konzipiert. Bei gleichem Stehfaden (1.200 tex) und gleichem Einzug (1v/1l) wurden nur die Parameter der Schussfäden variiert. Für das Textil Glas.3D.01-02 wurde Schussfaden mit 1.200 tex und für Glas.3D.03-05 Schussfäden mit 2.400 tex eingesetzt. Dazu wurden zusätzlich die Stichlängen zwischen 2,2 und 2,5 variiert, um unterschiedliche Porengrößen zu erreichen:

- Glas.3D.01: Stehfaden 1.200 tex, Einzug 1v-1l; Schussfaden 1.200 tex, Einzug 1v-1l, Stichlänge 2,2 mm,
- Glas.3D.02: Stehfaden 1.200 tex, Einzug 1v-1l; Schussfaden 1.200 tex, Einzug 1v-2l, Stichlänge 2,2 mm,
- Glas.3D.03: Stehfaden 1.200 tex, Einzug 1v-1l; Schussfaden 2.400 tex, Einzug 1v-1l, Stichlänge 2,5 mm
- Glas.3D.04: Stehfaden 1.200 tex, Einzug 1v-1l; Schussfaden 2.400 tex, Einzug 1v-2l, Stichlänge 2,5 mm

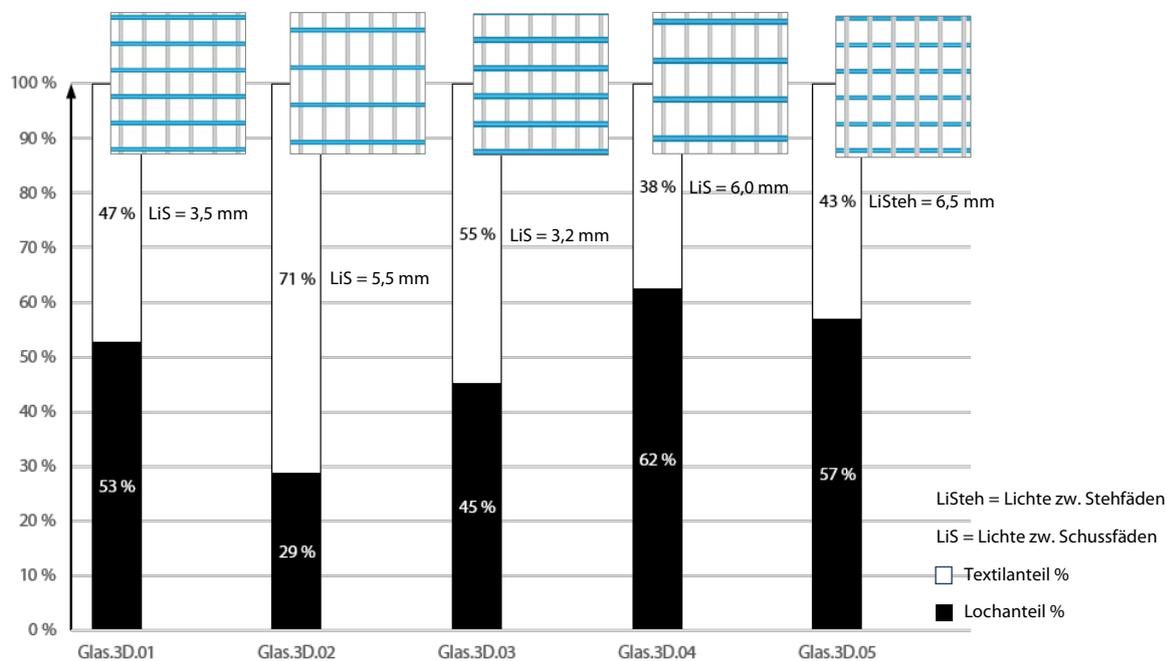
5.1.13.3 Analyse der textilen 3D-Struktur

Ein erstes händisches Aufmaß ergab folgende Werte in Bezug auf die entstandenen Öffnungsgrößen:

Glas.3D.01 > Stehfaden 1.200 tex, Lichte a = 6,5 mm /// Schussfaden 1.200 tex Lichte a = 3,5 mm
 Glas.3D.02 > Stehfaden 1.200 tex, Lichte a = 6,5 mm /// Schussfaden 1.200 tex Lichte a = 5,5 mm
 Glas.3D.03 > Stehfaden 1.200 tex, Lichte a = 6,5 mm /// Schussfaden 2.400 tex Lichte a = 3,2 mm
 Glas.3D.04 > Stehfaden 1.200 tex, Lichte a = 6,5 mm /// Schussfaden 2.400 tex Lichte a = 6,0 mm
 Glas.3D.05 > Stehfaden 1.200 tex, Lichte a = 6,5 mm /// Schussfaden 1.200 tex Lichte a = 3,2 mm

Abbildung 104 zeigt die Auswertung der fotografischen Erfassung des Porenanteils und des manuellen Aufmaßes. Die Ergebnisse der fotografischen Auswertung korrelieren nicht mit denen des manuellen Aufmaßes. Der Porenanteil kann für die weitere Auswertung nicht als Parameter herangezogen werden. Eine mögliche Erklärung sind die Polfäden. Diese scheinen in der Ebene unter der Deckfläche je nach Ausrichtung der Kamera die Poren zu verdecken und verfälschen so das Ergebnis.

Abbildung 104, Analyse des Porenanteils der Oberflächen der kettengewirkten Abstandselege aus AR-Glas, alle Stehfäden 1.200 tex



© Frankfurt UAS

5.1.13.4 Druckparameter für projektspezifische 3D-Textilien

a.) Beschichtung: Zur besseren Haftung des 3D-Betondrucks auf 3D-AR-Glas-Textilien wurde zunächst eine Optimierung der Textilbeschichtung von 3D-kettengewirkten Abstandselegen untersucht. Verglichen wurde der Auftrag der Beschichtung mit Farbroller, mit oder ohne zusätzliche Einspannung, sowie mit einem Schwamm.

Die Beschichtung mit Schwamm ist ungenau und durchdringt das Textil komplett. Eine kontrollierte und einheitliche Beschichtung des Textils ist nicht möglich. Es wurden weiter Farbroller verwendet. Außerdem muss eine Einspannung des Textils erfolgen (s. Abbildung 105). Ohne diese wird das Textil nach unten gedrückt und stellt sich nicht mehr ganz auf. Als Resultat lässt sich festhalten

- Das Textil wird uniaxial gespannt und die Leisten am Tisch festgeklemmt (siehe Foto).
- Das Textil wird mit einer Farbrolle in beide Fadenrichtungen der oberen Decklage mit Epoxidharz gecoatet.
- Der vorher gesiebte Sand (0,09 – 0,25 mm) wird gleichmäßig auf das Textil aufgetragen.
- Das Textil wird für mindestens 24 Stunden gerade zum Trocknen aufgehängt

Abbildung 105, Beschichtung der 3D-AR-Glas-Textilien, © Frankfurt UAS



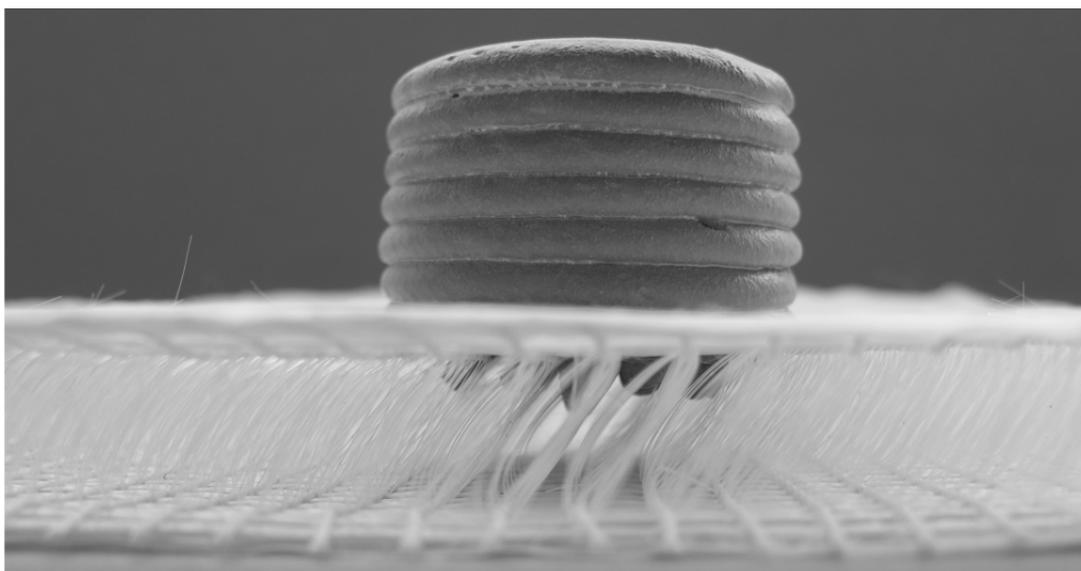
©Frankfurt UAS

Abbildung 106, Seitenansicht des in das Textil eingedrungenen Betons



©Frankfurt UAS

Abbildung 107, Ansicht eines Haftzugkörpers



© Frankfurt UAS

b) Druckereinstellungen: Es werden die gleichen Druckparameter für den WASP-Drucker verwendet wie bei der Herstellung von Haftzugprüfkörpern auf 2D-kettengewirkte Gelege: Druckgeschwindigkeit 20 mm/s, Zd-Wert = - 4 mm, Schichthöhe 5 mm, Schichtbreite 9 mm, Flow 125 %. Nach dem Druck müssen die Betonprüfkörper mit Wasser eingesprüht min. ein Tag mit Folie abgedeckt bleiben. Erste Druckversuche zeigen, wie der Beton die textile Oberfläche durchdringt (Abbildung 106, Abbildung 107). Der Beton folgt im inneren der Richtung der Polfäden. Selbst bei kompletter Durchdringung des Betons zur unteren Decklage verbindet sich das Material nicht zwischen den Polfäden – hierfür wäre eine andere Polfadenanordnung entscheidend. Weitere Versuche zeigen, dass insbesondere bei Punktlasten (Haftzugkörper) das Textil stärker vorgespannt werden muss um durch das Gewicht des Druckmaterials nicht durchzuhängen.

5.1.14 Versuche Glas/Beton: 3D-Druck auf 3D-Textilien

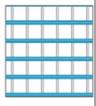
5.1.14.1 Versuchsplanung und Herstellung Prüfmuster Haft-und Biegezug

Die Haftzugversuche wurden in dieser Prüfreihe erst nach Auswertung der Biegezugversuche und nur noch mit dem Textil durchgeführt, das dort die besten Ergebnisse gezeigt hat.

Tabelle 13, Biegezugversuche Prüfreihe Betondruck auf 3D-Glastextil in Schussfadenrichtung einer Deckfläche

3D-Textil		3D-Druck			Prüfung
Textil-Nummer	Bild	Textilparameter Deckfläche alle Stehfäden 1.200 tex	3D-Druck-Nummer	Bemerkungen Beschichtungbzw. Beschichtung Epoxid, wenn nicht anders vermerkt	Prüfnummer/ Versuchsnummer
Einstellung der Prüfmaschine					
GLAS.3D.03		LiS = 3,2 mm Schuss 2.400 tex Stichl.: 2,5 mm Einzug 1v-!l	221214_2 221215_1 221215_2	Zur Einstellung der Prüfmaschine! Betonnoppen wurden nicht entfernt	221214_4BZ_1.1 221215_4BZ_1.1 221215_4BZ_1.2
Untersuchung von Textilgeometrien: Drucken <u>auf</u> das Textil in Schussrichtung					
ohne Textil			221214_6 221214_7 221214_8		Serie 1 221214_4BZ_3.1 221214_4BZ_3.2 221214_4BZ_3.3
GLAS.3D.01		LiS = 3,5 mm Schuss 1.200 tex Stichl.: 2,2 mm Einzug 1v-2l	221215_3 221215_4 221220_3	Betonnoppen wurden nicht entfernt	Serie 2 221215_4BZ_2.1 221215_4BZ_2.2 221220_4BZ_1.1
GLAS.3D.02		LiS = 5,5 mm Schuss 1.200 tex Stichl.: 2,2 mm Einzug 1v-!l	221214_3 221214_4 221214_5	Betonnoppen wurden nicht entfernt	Serie 3 221214_4BZ_2.1 221214_4BZ_2.2 221214_4BZ_2.3
GLAS.3D.04		LiS = 6,0 mm Schuss 1.200 tex Stichl.: 3,0 mm Einzug 1v-2l	221213_2 221213_3 221213_4	Betonnoppen wurden nicht entfernt und sind während der Versuchsdurchführung zum Teil abgebrochen	Serie 4 221213_4BZ_1.1 221213_4BZ_1.2 221213_4BZ_1.3
GLAS.3D.03		LiS = 3,2 mm Schuss 2.400 tex Stichl.: 2,5 mm Einzug 1v-!l	230207_2 230209_2 230209_3	keine Beschichtung, keine Angabe zu Betonnoppen (Auswahl des Textils nach dem besten Prüfergebnis am 30.01.23)	Serie 5 230207_4BZ_1.1 230209_4BZ_1.2 230209_4BZ_1.3
Untersuchung von Textilgeometrien: Drucken <u>in</u> das Textil in Stehfadenrichtung					
GLAS.3D.05		LiS = 3,5 mm Schuss 1.200 tex Stichl.: 2,2 mm Einzug 1v-2l	221220_4 221220_5 221220_6	(keine Angabe zu Betonnoppen)	Serie 6 221220_4BZ_2.1 221220_4BZ_2.2 221220_4BZ_2.3

Tabelle 14, Haftzugversuche Prüfreihe Betondruck auf 3D-Glastextil in Schussfadenrichtung einer Deckfläche

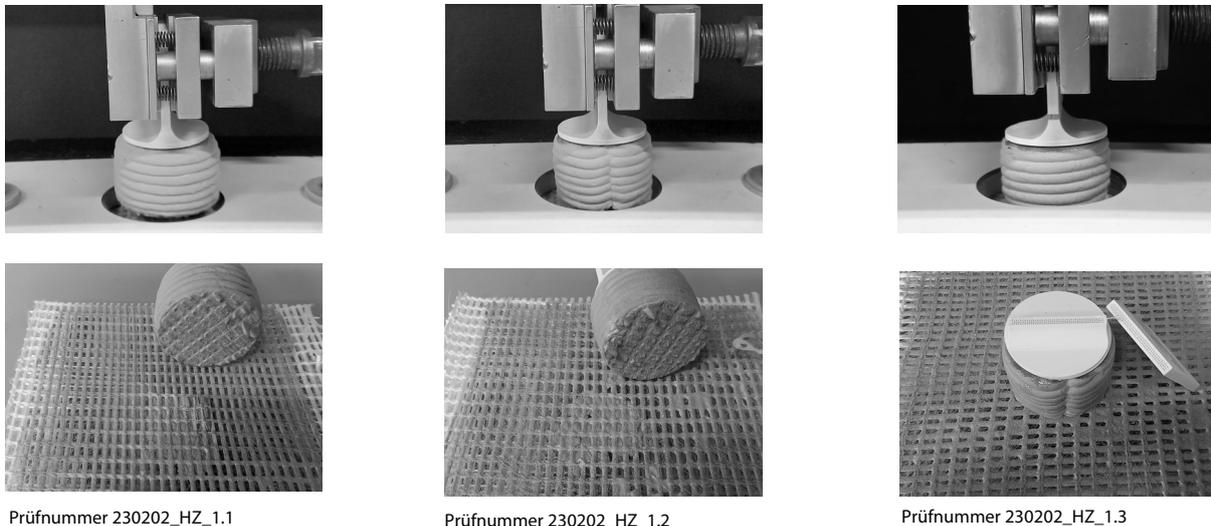
3D-Textil			3D-Druck		Prüfung
Textil-Nummer	Bild	Textilparameter Deckfläche alle Stehfäden 1.200 tex	3D-Druck Nummer	Bemerkungen	Prüfnummer
Untersuchung von verschiedenen Textiloberflächen: Drucken auf Schussfäden auf das Textil					
GLAS.3D.03		Auswahl eines Textils nach dem besten Prüf-ergebnis aus den 4-Punkt-Biegezugprüfungen am 30.01.23 und den Haftzugversuchen mit 2D-Textilien	230202_1 230202_1 230202_1	Beschichtung: Epoxy und Sand	Serie 1: 230202_HZ_1.1 230202_HZ_1.2 230202_HZ_1.3
GLAS.3D.03			230202_2 230207_1 230207_1 230209_2	Keine Beschichtung	Serie 2 230202_HZ_2.1 230207_HZ_1.1 230207_HZ_1.2 230209_HZ_1.1 (Betonprobe außermittig auf Textil)

©Frankfurt UAS

5.1.14.2 Ergebnisse Haftzugprüfung

Die Haftzugversuche mit Beton auf 3D-Textilien bestehen aus zwei Prüfserien. Bei der Serie 1 (Prüfnummern 230202_HZ_1.1-3) handelt es sich um das gleiche Textil wie bei der Prüfserie 2, aber das Textil wurde mit Epoxid und Sand gecoatet (Abbildung 108). Die Betonnoppen zwischen den Decklagen wurden nicht entfernt, sie sind nicht zugänglich. Bei der Prüfnummer 230202_HZ_1.3 kommt es zu einem Bruch des Kunststoffstempels, nachdem eine Maximalkraft von 382 N erreicht werden konnte (Abbildung 108 rechts). Die Prüfnummer 230202_HZ_1.1 wurde während der Versuchsdurchführung versehentlich vorbelastet, sodass die Ergebnisse nicht richtig abgebildet werden können.

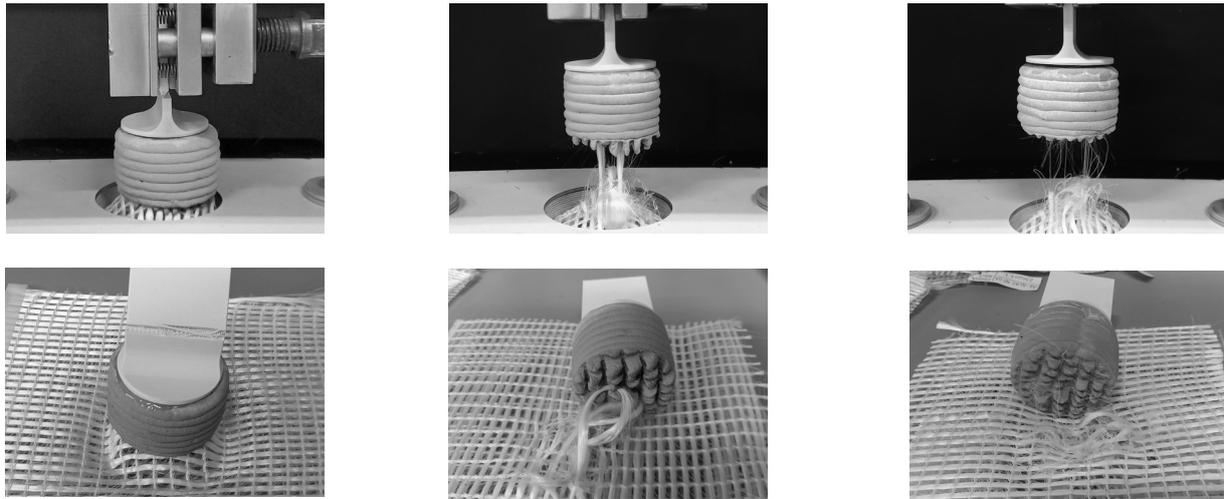
Abbildung 108, Prüfkörper (oben) während und (unten) nach der Versuchsdurchführung, Serie 1. Textil Beschichtung Epoxid/Sand



© ITA

Bei der Serie 2 (Prüfnummern 230207_HZ_1.1-2; 230209_HZ_1.1) wurde Textil Glas.3D.03 ungecoatet eingesetzt (Abbildung 111). Die Betonnoppen zwischen den Decklagen wurden nicht entfernt, sie sind nicht zugänglich. Bei der Prüfnummer 230207_1.1 kommt es zu einem Bruch des Kunststoffstempels, nachdem eine maximale Haftzugfestigkeit von 0,14 MPa erreicht werden konnte (Abbildung 109 links). Die Maximalkräfte der drei Prüfnummern liegen zwischen 364 und 411 N.

Abbildung 109, Prüfkörper (oben) während und (unten) nach der Versuchsdurchführung, Serie 2, Textil ohne Beschichtung, © ITA



Prüfnummer 230207_HZ_1.1

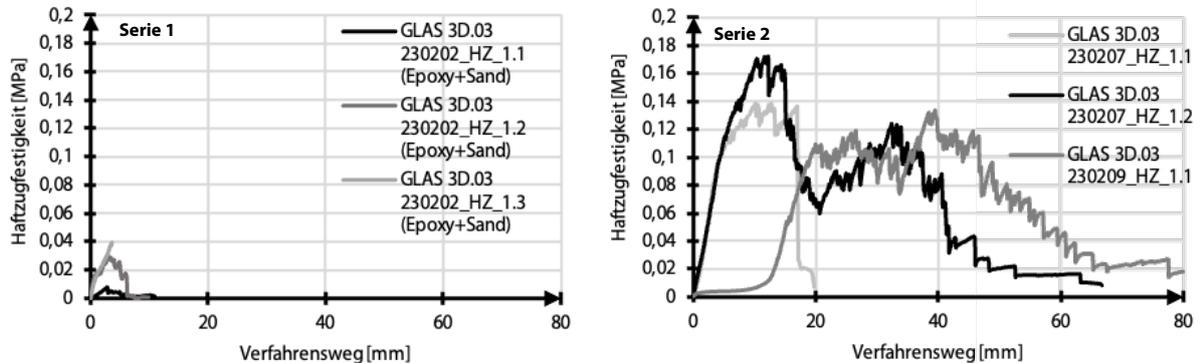
Prüfnummer 230207_HZ_1.2

Prüfnummer 230209_HZ_1.1

© ITA

Zwischenfazit: Insgesamt zeigt die Abbildung 110, dass die maximale Haftzugfestigkeit 0,17 MPa bei dem Prüfkörper ohne Textilbeschichtung bzw. Coating deutlich höher liegt als bei einer beschichteten Textilprobe mit Epoxid und Sand mit einer maximalen Haftzugfestigkeit von 0,04 MPa.

Abbildung 110, Haftzugversuche Beton auf Textil GLAS.3D.03, Spannungs-Verformungsdiagramm, links: Serie 1 mit Epoxid und Sand-Beschichtung, rechts: Serie 2 ohne Beschichtung



© ITA

5.1.14.3 Ergebnisse Biegezugprüfung

Die 4-Punkt-Biegezugversuche mit 3D-gedrucktem Beton wurden anhand von fünf unterschiedlichen 3D-Textilien getestet. Hierbei wurden vier Prüfserien zum Druck auf das 3D-Textil, eine Serie zum Drucken in das 3D-Textil sowie eine Referenzserie ohne Textil untersucht.

a) Druck auf die Deckfläche (Schussfadenseite Biegezugprüfung): Eine Übersicht der Prüfkörper mit den höchsten Spannungen ist in Abbildung 111 dargestellt.

Alle Probekörper (Abbildung 111) wurden auf Textilien mit einem Stehfaden 1.200 tex gedruckt. Der lichte Abstand zwischen den Stehfäden beträgt immer ca. 6,5 mm. Die Betonknoten zwischen den Decklagen des Textils konnten bei den nachfolgenden Versuchen während der Probenherstellung nicht begrenzt und vor der Versuchsdurchführung auch nicht entfernt werden. Alle Serien bis auf Serie 5 wurden gecooatet. Abbildung 100 zeigt die Referenzergebnisse der Serie 1, Prüfkörper ohne Textil, Abbildung 113 zeigt die Prüfergebnisse der restlichen Serien.

Die Maximalspannungen der drei Referenzproben ohne Textil der Serie 1 (Prüfnummern 221220_4BZ_2.1-3) liegen im Bereich zwischen 7,38 MPa und 8,35 MPa.

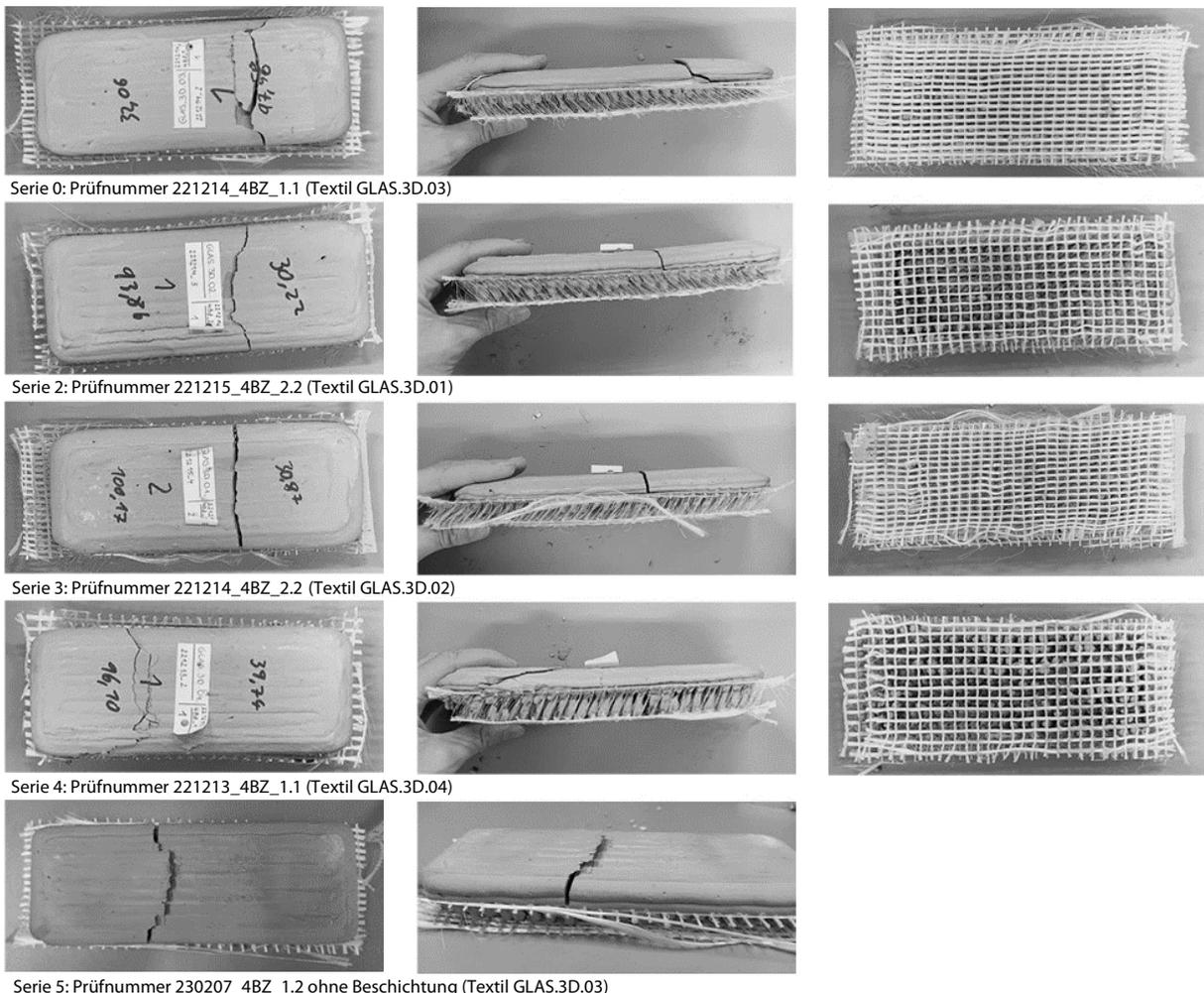
Die Probekörper der Serie 0 zur Einstellung der Prüfmaschine (Prüfnummern 221214_4BZ_1.1, 221215_4BZ_1.2, 221215_4BZ_1.1) aus dem Textil GLAS.3D.03 mit einem Schussfaden von 2.400 tex haben eine Lichte im Schuss von ca. 3,2 mm. Die Maximalspannungen der drei Proben liegen im Bereich zwischen 8,42 MPa und 12,43 MPa.

Die Probekörper der Serie 2 (Prüfnummern 221215_4BZ_2.1-2, 221220_4BZ_1.1) aus dem Textil GLAS.3D.01 mit einem Schussfaden von 1200 tex haben eine Lichte im Schuss von ca. 3,5 mm. Die Maximalspannungen der drei Proben liegen im Bereich zwischen 5,56 MPa und 6,28 MPa. Das Textil wurde bei allen Prüferien bis zu den Betonnoppen zusammengedrückt, stellenweise sind die Noppen während der Versuchsdurchführung abgebrochen.

Die Probekörper der Serie 3 (Prüfnummern 221214_4BZ_2.1-2) aus dem Textil GLAS.3D.02 mit einem Schussfaden von 1200 tex haben eine Lichte im Schuss von ca. 5,5 mm. Die Maximalspannungen der drei Proben liegen im Bereich zwischen 3,46 MPa und 5,08 MPa.

Die Probekörper der Serie 4 (Prüfnummern 221213_4BZ_1.1-3) aus dem Textil GLAS.3D.04 mit einem Schussfaden von 2.400 tex haben eine Lichte im Schuss von ca. 6,0 mm. Die Betonnoppen sind während der Versuchsdurchführung zum Teil abgebrochen. Die Maximalspannungen der drei Proben liegen im Bereich zwischen 2,94 MPa und 3,93 MPa.

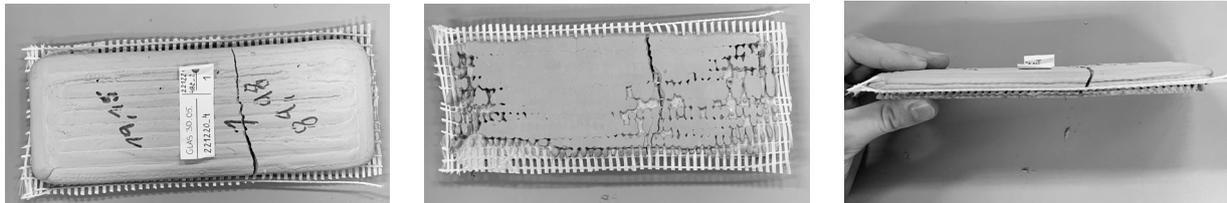
Abbildung 111, Biegezugversuch Druck auf Schussfäden, links: auf das Textil, Ansicht von oben, Mitte: Ansicht von unten, rechts: Ansicht von der Seite, © ITA



Die Probekörper der Serie 5 (Prüfnummern 230207_4BZ_1.1; 230209_4BZ_1.2-3), ebenfalls aus dem Textil GLAS 3D.03 wie Serie 0, haben einem Schussfaden von 2.400 tex und eine Lichte im Schuss von ca. 3,2 mm. Im Unterschied zur Serie 0 ist das Textil ungecoatet. Die Maximalspannungen der drei Proben liegen im Bereich zwischen 1,86 MPa und 2,98 MPa.

b) Druck in das Textil (Stehfadenseite):

Abbildung 112, Biegezugversuch Druck auf Stehfäden, in das Textil (links), Serie 6, Ansicht von oben, (Mitte) Ansicht von unten, (rechts) Ansicht von der Seite (die Restflächen des 3D-Textils seitlich wurden für den Versuch abgeschnitten)



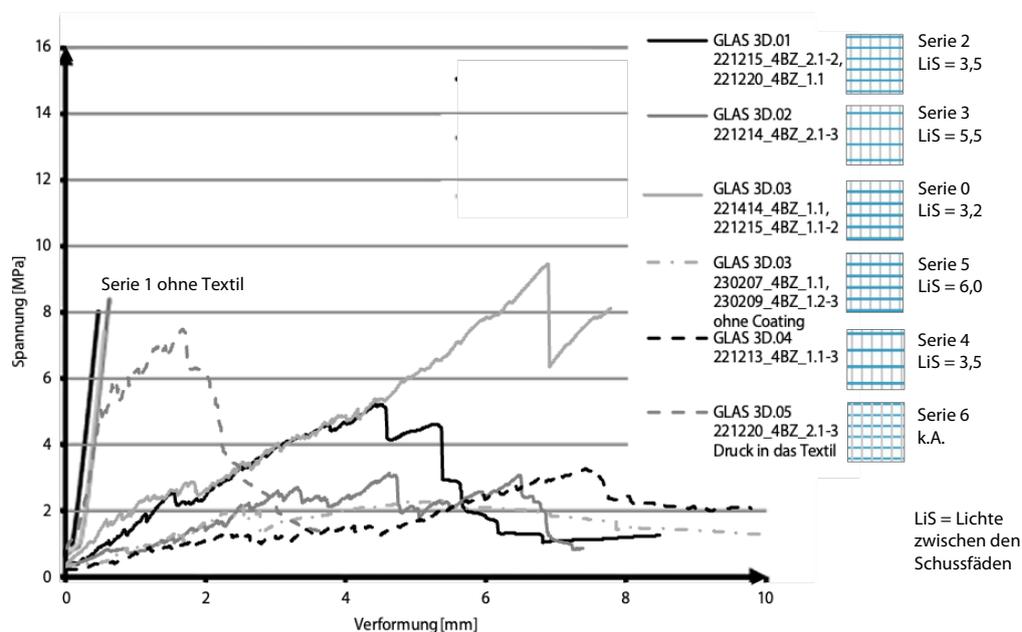
Prüfnummer 230202_HZ_1.1 (Textil GLAS.3D.01)

© ITA

Abbildung 112 zeigt die Versuchsreihe der Serie 6 (Prüfnummern 221220_4BZ_2.1-3) mit 3D-Betondruck in das Textil GLAS.3D.05 in Stehfadenrichtung. Mit einem Schussfaden von 1200 tex, und der Stichlänge 2,2 mm bei Einzug 1 voll 1 leer entspricht es de4m Textil GLAS.3.01 (Lichte der Stehfäden ca. 6,5 mm, lichte Schussfäden ca. 3,5 mm). Die Maximalspannungen der drei Proben liegen im Bereich zwischen 7,47 MPa und 7,7 MPa (Abbildung 113).

c) Zwischenfazit Biegezugversuche 3D-Betondruck auf 3D-Textil: Die Abbildung 113 zeigt das Spannungs-/Verformungsdiagramm der Mittelwerte der Prüfserien 3D-Betondruck auf 3D-Textil.

Abbildung 113, Biegezug Spannungs-/ Verformungsdiagramm der Mittelwerte der Prüfserien GLAS.3D.01-05



© ITA

Von allen Prüfserien weist die Serie 0 mit Textil Glas.3D.03. den höchsten Mittelwert der Spannungen von 10,56 MPa und dem höchsten Spannungswert von 12,43 MPa auf. Im Vergleich dazu zeigt die Serie 5 mit dem gleichen Textil ohne Beschichtung lediglich einen maximalen Spannungswert von 2,98 MPa auf. Die höchsten Spannungen werden bei einem lichten Schussfadenabstand zwischen 3 und 3,5 mm erreicht, das entspricht

ca. 40 % des Düsendurchmessers (8 mm) des Druckers. Das Öffnungsverhältnis zwischen Lichte Schussfäden zu Breite Schussfäden liegt bei den besten Serien 0 und Serie 2 zwischen 110 -180 %.

Die Werte der Serie 6 mit dem Textil Glas.3D.05, Druck in das Textil (Prüfnummern 221220 1.2-3) weist ähnliche Spannungswerte auf wie die Referenzprüfungen der Serie 1 ohne Textil. D.h. beim Druck in das Textil bewirkt die Textillage mit den dann obenliegenden Stehfäden keinerlei mechanische Verbesserung. Die Stehfäden haben mit einem lichten Abstand von 6,5 mm im Vergleich zu den Schussfäden eine fast doppelt so hohe Distanz. Hier müssten weitere Versuchsreihen zur Klärung gemacht werden.

5.1.14.4 Resümee Glas/Beton: 3D-Druck auf 3D-Textilien

Für die Haftzugversuche wurden nur noch 3D-Betondrucke auf das Textil GLAS.3D.03 getestet, welches zuvor die besten Biegezugauswertungen hatte. Ziel war es, Unterschiede zwischen gecoateten und ungecoateten Textil zu untersuchen. Im Ergebnis weisen beim Betondruck auf 3D-Textilien die Textilproben ohne Beschichtung dabei höhere Spannungswerte auf als Proben mit einer Epoxid-Sand Beschichtung. Offensichtlich setzt die Beschichtung die Textilöffnungen zum Teil zu, verhindert das Durchsickern und damit die mechanische Verzahnung des Betons mit der textilen Oberfläche.

Bei den Biegezugversuchen weist das gecoatete Textil GLAS.3D.03 den höchsten Mittelwert der Spannungen von 10,56 MPa und dem höchsten Spannungswert von 12,43 MPa auf. Im Vergleich dazu zeigt das gleiche Textil ohne Beschichtung lediglich einen maximalen Spannungswert von 2,98 MPa. Die Beschichtung hat somit einen positiven Einfluss auf die Biegezugfestigkeit, jedoch einen negativen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit. Ebenso haben kleinere Öffnungen (< 50% des Druckdüsendurchmessers) einen positiven Einfluss auf die Biegezugfestigkeit, im Gegensatz zu Textilien mit größeren Schussfadenabständen (> 50 % des Druckdüsendurchmessers).

Da bei allen Biegezugversuchen die textile Decklage mit dem aufgedruckten Betonkörper auf die Schussfadenseite durch die vorhandenen Noppen im 3D-Textil über den Auflagern der Prüfmaschine liegt – im Gegensatz zum Betonprüfkörper ohne Textil – lassen sich die Ergebnisse nicht vergleichen. Es müssen die Ergebnisse aus den Versuchen mit 2D-Textilien herangezogen werden (Kapitel 5.1.10).

Im Vergleich 3D-Betondruck auf die Steh- oder Schussfadenseite von Textilien ähnlicher Porengrößen wie Serien 6 (LiS = 3,5 mm) und Serie 0 (LiS = 3,2) zeigt sich beim Druck auf die Stehfadenseite ein unterschiedliches Verformungsverhalten sowie geringere Mittelwerte bei den Beigezugwerten. Begründen lässt sich dies mit dem größeren lichten Abstand der Stehfäden von ca. 6,5 mm, welcherin einer insgesamt geringeren Bewehrung des Betonprobekörpers in Lastrichtung resultiert.

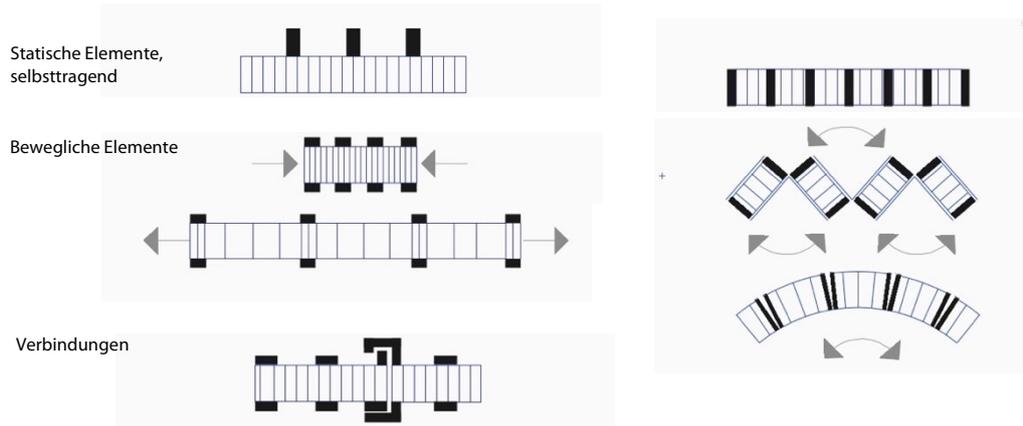
5.2 Material- und Gestaltungsvarianten

5.2.1 Überblick Gestaltungsmatrix 3D-Druck auf bzw. in 3D-Textil

5.2.1.1 Einleitung

Ziel von 6dTEX ist die Entwicklung textiler Leichtbauelemente aus kreislauffähigen, strukturdifferenzierten Monomaterialien für die Gebäudehülle. Im Antrag wurden dazu erste Ideen in zwei Alternativen skizziert. Abbildung 114 zeigt links Optionen zum Druck auf das Textil, rechts Optionen zum Druck in das Textil.

Abbildung 114, erste Skizzen zu Druckoptionen: links: 3D-Druck auf das 3D-Textil, rechts: 3D-Druck in das 3D-Textil



© Frankfurt UAS

Das Drucken auf das 3D-Textil funktioniert nach den Untersuchungen und Erkenntnissen aus dem Kapitel 5.1 sehr gut, sowohl mit PETG-Rezyklat wie mit Beton. Im Gegensatz dazu zeigen die Versuche zum Drucken in das Textil, d.h. auf eine der inneren Decklagen, dass hier wesentlich größere Herausforderungen entstehen. Zum einen muss in der Textilproduktion der zu bedruckende Bereich von Polfäden freigehalten werden. Das ist technisch machbar. Als problematisch aber stellt sich zum einen das im Anschluss notwendige Herausscheiden einer Decklage heraus – insbesondere bei den kettengewirkten Gelegen. Sie sind nicht schiebefest und die fragile textile Struktur löst sich ohne vorherige Beschichtung auf. Zum anderen sind druckerabhängig nicht nur die Größe der jeweiligen Druckdüsen, sondern der gesamte Druckkopf des verwendeten Druckers zu beachten. Wie Abbildung 90, rechts, zeigt, ist es insbesondere im FDM-Druck geometrisch unmöglich, den gesamten Bereich im Textil zwischen den Polfäden zu befahren bzw. zu bedrucken. Es verbleibt immer ein technisch bedingter Abstand zu den Polfäden, der sinnvolle Anwendungen nach derzeitigem Kenntnisstand ausschließt. Denkbar unter Verwendung zusätzlicher Schalungen wäre eventuell noch das Befüllen offener, „aufgefalteter“ Bereiche, wie sie sich beim Falten ergeben (Abbildung 114, rechts, Mitte). Dies konnte im zeitlichen Rahmen von 6dTEX allerdings nicht mehr untersucht werden. Hier müssten die Druckereinstellungen komplett neu justiert werden um das Bedrucken der dann offenliegenden Polfäden zu ermöglichen.

Abbildung 114 zeigt auch, dass für das Drucken auf wie in das Textil über diese generelle Unterscheidung hinaus bereits strukturelle Varianten angedacht sind. Sie variieren von oben nach unten von statischen über bewegliche Elemente bis hin zur Verbindung von Elementen untereinander. Ausgehend von diesen strukturellen Ansätzen wurden für die Gebäudehülle konkret zwei Anwendungsmöglichkeiten weiter untersucht:

- Selbsttragende Wand-/ oder Deckenelemente
- Sonnenschutzelemente mit regulierbaren Transparenzen

In Bezug auf die Materialität wurde entschieden, aus nicht brennbarem, mineralischem Material (Glasfasern und Betondruckmaterial) selbsttragende Wand- oder Deckenelemente zu konzipieren. Das Rezyklat aus

Polyester (Polyesterfasern und rPETG Druckmaterial) bietet sich aufgrund geringerer Brandschutzklassifizierungen zur Entwicklung von beweglichen Sonnenschutzelementen an.

5.2.1.1 Bewegliche Elemente

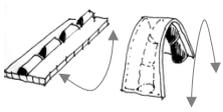
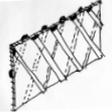
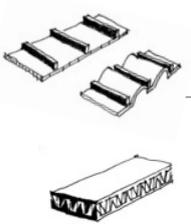
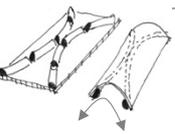
Abbildung 114 und eigene Forschungen (Schumacher et al., 2019) zeigen grundlegende Möglichkeiten, wie Bewegungen ausgelöst werden können. Dazu gehören Komprimieren, Dehnen, Falten und Biegen, aber auch Verschieben oder Verdrehen und Multibewegungsmuster wie das Biegedrillknicken (Knippers und Körner, 2019). Sie alle können die Anzahl störanfälliger mechanischer Bauteile reduzieren. Für 6dTEX wurde entschieden zum einen einseitig vorkomprimierte Decklagen marktüblicher Gewirke zu bedrucken um Biegungen hervorzurufen. Die projektspezifisch produzierten kettengewirkten Gelege bieten sich zum anderen an, um Verschiebungen der Decklagen zueinander und zur Transparenzsteuerung zu untersuchen.

5.2.1.2 Selbsttragende Wand-/ oder Deckenelemente

Als Grundlage für die Entwicklung der selbsttragenden Wand-/ oder Deckenelementen wurden Tragwerktypologien nach Engel (Engel und Rapson, 2007) gewählt. Es wurde die folgende Fragestellung betrachtet: Welche der dort genannten Tragwerkstypologien könnte übertragbar sein auf einen Verbund aus Textil- und Druckmaterial - dies unter der Zielsetzung, das 3D-Textil und den 3D-Druck bei Bedarf synergetisch für die Lastabtragung von Zug- und Druckkräften genutzt wird. Für jeweils eine der Unterkategorie der von Engel definierten Haupttypen (s. Tabelle 15) „formaktiv“, „vektoraktiv“, „schnittaktiv“ und „flächenaktiv“, konnten mögliche Anwendungen identifiziert werden:

- **formaktiv, Bogen bzw. Gewölbe:** Der einseitige Druck von aneinandergereihten Gewölbesteinen auf ein 3D-Textil ermöglicht bei entsprechender Geometrie (Kettenlinie) die Verwendung von unbewehrtem Beton (Tabelle 15, 1.4). Das Textil dient dabei als verlorenen Schalung mit Dämmoptionen, wie im Projekt ge3TEX nachgewiesen (Lüling et al., 2021). Einsatzbereich sind lastflussgerecht konzipierte selbsttragende, gedämmte Dachkonstruktionen.
- **vektoraktiv, Raumfachwerke:** Das lineare Bedrucken beider Deckflächen des Abstandtextils ergibt ein räumliches Fachwerk, mit möglichen punktuellen Verbindungen an den Kreuzungspunkten der beidseitig aufgedruckten Druckstäbe. Das gedruckte Fachwerk wird über das bedruckte Textil ausgesteift und ist gleichzeitig thermisch getrennt. Das 3D-Textil wirkt bei Lage der Steh- und Schussfäden in Richtung der Druckstäbe als einseitige Bewehrung des Druckmaterials. Bei diagonaler Lage der textilen Struktur zu den gedruckten Tragstäben dient das Textil zur Aussteifung (Tabelle 15, 2.4).
- **schnittaktiv, Balken:** Bei einseitigem, direktem Druck in Richtung der Schussfäden auf das 3D-Textil kann die Durchbiegung reduziert und die Biegezugfähigkeit des gedruckten Elements in dieser Richtung verbessert werden. Im einfachsten Fall entstehen Halbfertigteile, die für Decken-/Dachausfachungen verwendet werden können (Tabelle 15, 3.1).
- **schnittaktiv, Platte:** Beim Bedrucken des Textils mit negativem Z_d -Wert gelangt Druckmaterial zunächst in die textile Struktur hinein, bis sich im weiteren Verlauf auch außen Strukturen abbilden lassen. Im Zusammenspiel mit im 3D-Textil lastflussgerecht angeordneten Fasern in X-, Y- und Z-Richtung können im Element Zugkräfte aufgenommen werden, während das gedruckte Material die Druckkräfte aufnimmt; Es entsteht eine mesogradierte Platte, die für Decken-/Dachanwendungen wie Fassaden-/Wandanwendungen geeignet wäre (Tabelle 15, 3.3).
- **flächenaktiv, Schale:** Durch lastflussgerechtes, einseitiges Bedrucken des 3D-Textils entlang der Drucklinien sind einfach gekrümmte und – je nach Textilgeometrie – zweifach gekrümmte Schalen denkbar. Bei Druck auf die spätere Innenseite der Schale entsprechend der Kettenlinie (s. oben unter „formaktiv“) kann dies schalungsfrei erfolgen. Verstärkungsfasern zur Aufnahme der Zugkräfte müssen vor dem Druckvorgang in bzw. auf das 3D-Textil additiv aufgebracht werden; weder die nicht zugbelastbaren 3D-Gewirke noch die orthogonale Struktur der kettengewirkten Gelege kann dazu genutzt werden.

Tabelle 15, Übersichtsmatrix zur Identifikation von selbsttragenden Bauteilen, die durch die Kombination von 3D-Druck und 3D-Textil hergestellt werden können

Tragwerktypologien		Eignung für 6dTEX	
in Anlehnung an Heino Engel, "Tragsysteme"			
		3D-kettengew. Gelege	3D-Gewirke
1 FORMaktiv > Form zeigt Kraftfluss der Normalkräfte			
	1.1 SEIL lineares Element	1.1.1: Für 6dTEX nicht geeignet - es wird mit einem flächigen Textil und nicht mit Seilen gearbeitet	
	1.2 ZELT zugbeanspruchte, gekrümmte Flächen mit separaten Druckstäben	1.2.1: Für 6dTEX kaum geeignet - das 3D-Textil bietet die Möglichkeit Druckstäbe zu integrieren, um die Montage zu erleichtern, das geht aber ohne 3D-Druck	
	1.3 PNEU zweifach gekrümmte Membran mit Innendruck	1.3.1: Für 6dTEX nicht geeignet, da sich die kettengewirkten Gelege kaum drapieren lassen	1.3.2: Für 6dTEX geeignet, wenn eine textile Decklage luftdicht ausgebildet werden kann entsteht ein gedämmtes Pneu *
	1.4 Bogen bzw. Gewölbe einfach oder zweifach gekrümmte Struktur	1.4.1: Für 6dTEX und flache Biegeradien geeignet durch Bedrucken des Textils; dabei wird das Textil entweder auf einer Schalung bedruckt oder der gedruckte Beton formt sich samt Textil zu einem echten Gewölbe*	1.4.2: Für 6dTEX bis hin zu engen Biegeradien geeignet, s. 1.4.1 *
2 VEKTORaktiv > Kraftzerlegung in Zug- und Druckvektoren (Achtung: Nicht berücksichtigt von H. Engel wurden Tensegrity Systeme)			
	2.1 Fachwerkbinder eben	2.1.1: für 6dTEX nicht geeignet - 6dTEX arbeitet mit Flächen, nicht mit Vektoren im Raum	
	2.2 Fachwerkbinder übertragen	2.2.1: für 6dTEX nicht geeignet -s.o.	
	2.3 Fachwerkträger gekrümmt	2.3.1: für 6dTEX nicht geeignet - s.o.	
	2.4 Raumfachwerk	2.4.1 /2: Für 6dTEX geeignet, lineares Bedrucken beider Deckflächen des Abstandtextils, plus punktuellen Verbindungen an den Kreuzungspunkten der beidseitig aufgedruckten Druckstäbe ergibt ein räumliches Fachwerk; Kettengew. Gelege können das Textil bewehren und aussteifen, bei Gewirken ist das Textil nur verlorene Schalung	
	2.5 Tensegrity	2.5.1: Für 6dTEX geeignet, durch einseitiges, versetzt lineares Bedrucken und nachträglichem Biegen wird das Textil räumlich und ausgesteift *	
3 SCHNITTaktiv > Balken, Platte oder Rost - Form wirkt wie eine Fläche und nimmt gleichermaßen Zug-, Druck- und Biegekräfte auf			
	3.1 Balken	3.1.1/2: Für 6dTEX (Kettengew. Gelege) geeignet für 3D-Druck Betonbalken auf textiler Bewehrung in Kombination mit formaktiver, textiler Kappenschalung	
	3.2 Rahmen	3.3.2: für 6dTEX nicht geeignet	
	3.2 Balkenrost	3.2.1/ 3.3.: Für 6dTEX geeignet in der Mesostrukturebene, d.h., die Fasern des 3D-Textils werden in x-, y- und Z-Richtung geometrisch so angeordnet, dass sie Zugkräfte aufnehmen - während das gedruckte Material auf und in der Struktur die Druckkräfte aufnimmt; Ergebnis: Es entsteht eine mesogradierte Scheibe; geeignet für kettengew. Gelege, bei Verwendung von Gewirken keine Aufnahme von Zugkräften.	
	3.3 Platte		
4 FLÄCHENaktiv > die Fläche absorbiert Zug- und Druckkräfte gleichermaßen			
	4.1 Scheibe	4.1.1, s. auch unter 3.3, Platte	
	4.2 Faltenwerke	4.2.1 zur Ausbildung von Faltenwerken müsste in weiteren FuE Projekten zur Ausbildung der Kanten, der Druck IN das Textil untersucht werden (s. auch Texthinweise in Kapitel 5.2.2.1)	
	4.3 Schalen	4.3.1/2: Für 6dTEX und Gewirke geeignet, als Schale mit aufgedruckten Druckstäben und textilintegrierten Zugseilen, weniger geeignet für kettengewirkte Gelege aufgrund ihrer geringen Drapierbarkeit*	

*Alternativ auch mit 2D-Textilien herstellbar.

© Frankfurt UAS

5.2.2 Skalierung, Bewegliche Elemente, 3D rPETG-Druck auf 3D PES-Textil

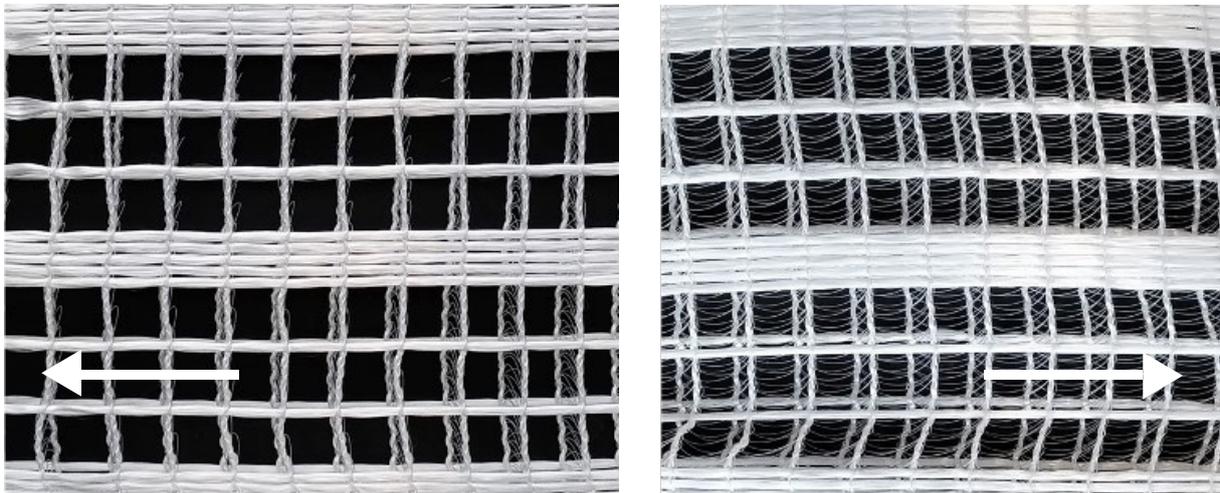
5.2.2.1 Gewebe

Gemäß den in Kapitel 5.2.1.3 identifizierten Prinzipien wurde entschieden, mit Geweben, die nicht drapierbar sind, das Thema Verschieben (SHIFT) zu untersuchen. Um dabei eine gestreifte Oberfläche in zwei Dichten von opak bis transluzent zu erhalten wurde ein spezielles 3D-Textil mit folgenden Parametern aus Polyester gefertigt:

- Textilnummer PET.3D.19: Stehfäden 1.100 tex, Einzug 1v-3l; Schussfäden 1.100 tex, Stichtlänge 3 mm und einem abwechselnden Rapport von 5 voll / 5 leer, 1 voll / 5 leer

Abbildung 115 zeigt wie in den offenen Bereichen beim Verschieben der Decklagen zueinander die Polfäden sichtbar werden. Stehen sie vor dem Verschieben senkrecht zur Deckfläche liegen sie danach schräg zu den Decklagen. Es wird erwartet, dass so eine Transparenzänderung und eine gezielte Minderung der Blendung erreicht werden kann. Die geschlosseneren Bereiche dienen als Vorhaltezonen zum Bedrucken mit aussteifenden, wie für die Bedienung notwendigen (Griff-) Elementen. Die ersten Drucktests sind in Kapitel 5.3.2 beschrieben.

Abbildung 115, Textil PET.3D.19, offene Streifenstruktur: Beim Verschieben der Decklagen zueinander ändern die Polfäden ihre Lage von senkrecht zu parallel zu den Decklagen und mindern Lichteinfall und Blendung



© Frankfurt UAS

5.2.2.2 Gewirke

a) Bewegliche Elemente: 3D-Gewirke sind als Maschenware nicht nur drapierbarer, sondern auch deutlich schiebefester als kettengewirkte Gelege und zudem dehn- und komprimierbar. Entsprechend wurde aus den in Kapitel 5.2.1.3 identifizierten Prinzipien das Thema Komprimieren in Kombination mit Biegen untersucht. In Vorstudien sind dazu drei Testmodelle entstanden.

Abbildung 116, Konzept Druckstrukturen zu den Themen Biegen und Klappen © Frankfurt UAS

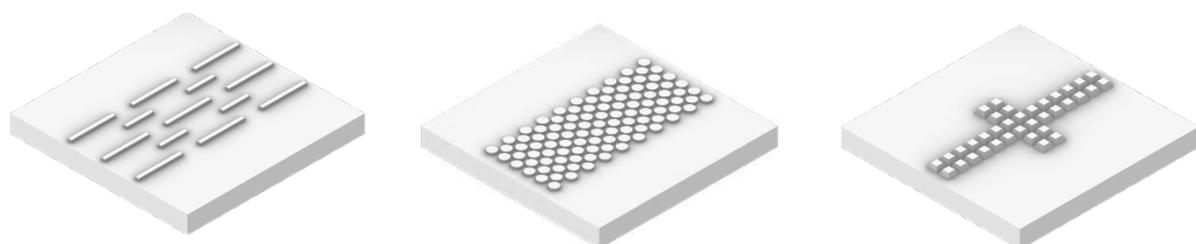
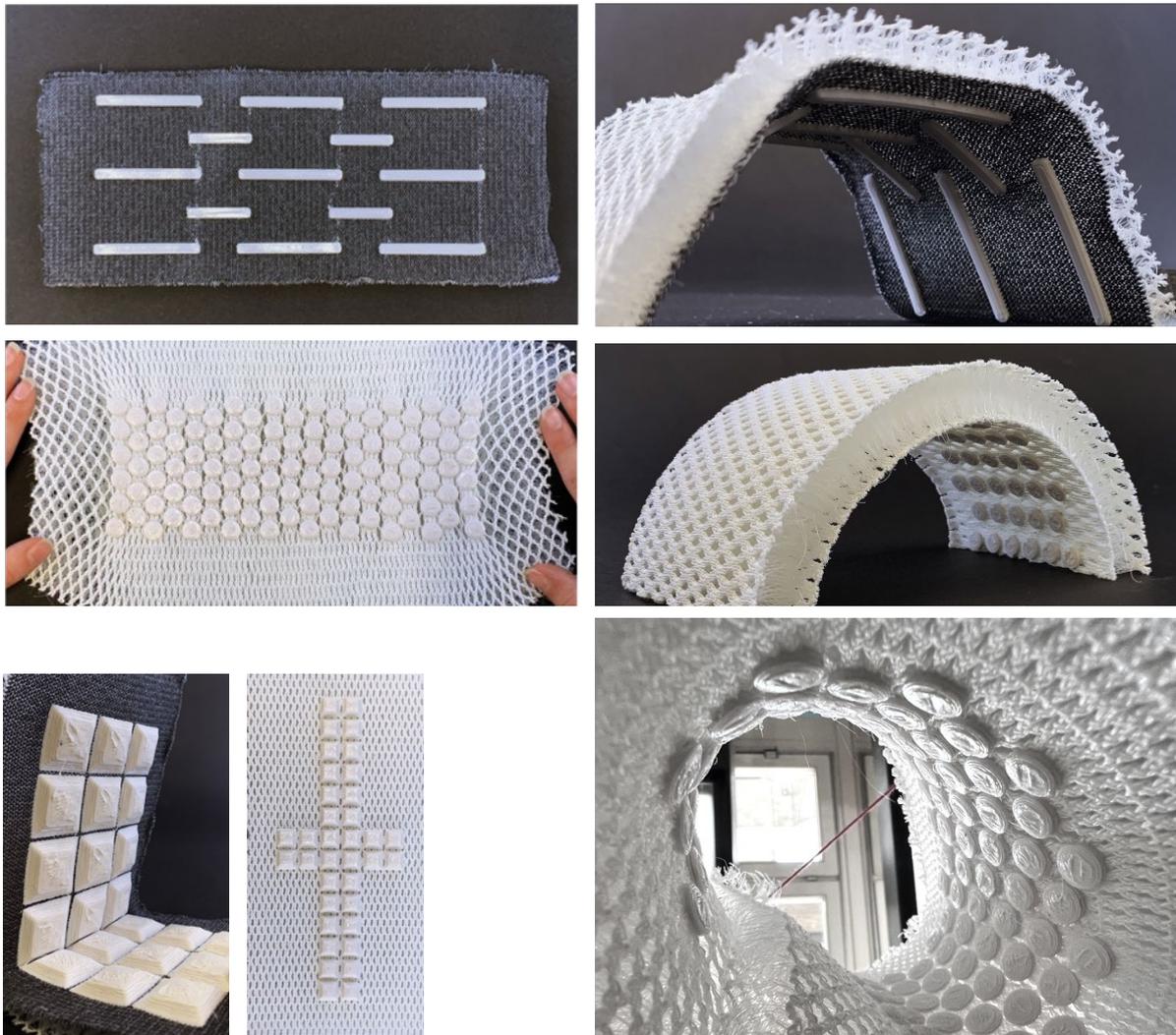


Abbildung 117, Druckversuche zum Thema Biegen und Klappen



© Frankfurt UAS

Alle drei Konzepte wurden ausgeführt, s. Abbildung 117. Oben in der Bilderreihe zu sehen ist eine Tensegrity Struktur. Die Druckstäbe berühren sich nicht, das Textil übernimmt die Zugkräfte, das gesamte System steift sich gegenseitig aus. In der Mitte und rechts unten zu sehen eine Biegung, die durch einseitiges, punktuell bedrucktes Komprimieren einer Deckfläche entsteht. Links unten zu sehen ein Klappmechanismus mit Klappbegrenzung, der Klappungen in X- und Y-Richtung erlaubt.

b) Verbindungen: Zuletzt wurde Verbindungsoptionen untersucht, die die Montage einzelner Bauteile untereinander sowie die gleichzeitige Herstellung potentieller Tragwerkselemente erlauben (Abbildung 118).

Abbildung 118, links potentielle Tragstrukturen; rechts: 3D-gedruckte Fügung, zusammengesetzt ergibt sich ein Träger



© Frankfurt UAS

5.2.3 Skalierung: Statische Elemente, 3D-Betondruck auf 3D-Glasgewebe

5.2.3.1 3D-Kettengewirkte Gewebe: Ausbildung einer mesogradierten Plattenstruktur

a) Orientierende Versuche: Nach den Testversuchen mit einem Delta WASP 40100 Drucker konnte zur Herstellung größerer Demonstratoren die Firma Heidelberg Materials als Partner gewonnen werden. Die Lieferung / Montage des Großdruckers an der Frankfurt UAS hatte sich verzögert. Heidelberg Materials druckt mit einer patentierten Betonrezeptur. Entsprechend musste erneut die Haftung zwischen dem in der Konsistenz andersartigen Beton und den für 6dTEX produzierten Gelegen geprüft werden (Tabelle 16).

Tabelle 16, Kettengewirkte 3D-Gewebe mit Angabe der Penetration durch das Beton Druckmaterial

Textil- nummer	Stehfaden				Schussfaden					Orient. Versuch	
	Planung		Aufmaß		Planung			Aufmaß		Penetration	
	Faser (tex)	Einzug	Fadenbreite (mm)	Abstand, lichte (mm)	Faser (tex)	Einzug	Stichlänge (mm)	Fadenbreite (mm)	Abstand, lichte (mm)	Schuss-Ri. (mm)	Stehf.-Ri. (mm)
GLAS.2D.1.2	2.400	voll	2,0	4,0	2.400			4,0	4,0		0 - 5
GLAS.2D.2.2	2.400	1v-1l	2,0	6,0	2.400			4,0	4,0		5 - 10
GLAS.2D.2.3	2.400	1v-1l	2,0	7,0	2.400			4,0	13,0		> 20
GLAS.3D.01	1.200	1v-1l	1,5	6,5	1.200	1v-1l	2,2	2,0	3,5		0 - 5
GLAS.3D.02	1.200	1v-1l	1,5	6,5	1.200	1v-2l	2,2	1,5	5,5		0 - 5
GLAS.3D.M03	1.200	1v-3l	1,5	15,0	1.200	1v-1l	2,2	2,0	3,0		5 - 10 5 - 15
GLAS.3D.M04	1.200	1v-3l	1,5	15,0	1.200	1v-3l	2,2	2,0	7,0		5 - 20 5 - 10

© Frankfurt UAS

In den Versuchen wurde zunächst die Durchdringung von 2D-Textilien mit unterschiedlichen Fadendurchmessern und Öffnungsgrößen geprüft. Anschließend wurden die Versuche mit 3D-Textilien wiederholt. Dabei wurde der 3D-Druck über eine „Spritztüle“ simuliert. Die Ausgangsbetonrezeptur ermöglicht den Aufbau mehrerer Druckschichten, die Textilpenetration war entsprechend zunächst nicht ausreichend. Erst mit einer geringfügig fließfähigeren Konsistenz konnte das Ziel erreicht werden. Als Zwischenfazit lässt sich feststellen:

- geringe Fadendurchmesser (1.200 tex) begünstigen den Verbund des Betons innerhalb des Textils,
- quadratische Öffnungen lassen den richtungsunabhängigen Druck zu
- bei Öffnungen < 6 mm bleibt der Beton an der Oberfläche und durchdringt das Textil nicht, es gibt keine gute Haftung
- bei Öffnungen > 15 mm fließt der Beton unkontrolliert in das Textil, bildet keine gute Oberfläche und der Beton-Strang wird unterbrochen
- die schräg stehenden Polfäden lenken den Beton und begünstigen den Verbund innerhalb des Textils, was den Haftverbund insgesamt stärkt

Abbildung 119, Orientierende Versuche mit neuer Betonrezeptur für robotergesteuerten 3D-Druck: links: 2D-Textil, rechts: 3D-Textil



© Heidelberg Materials AG

Auf Basis der Auswertung der o.g. Versuche wurde entschieden, Elemente in der Größe von ca. 160 cm mal 80 cm im Maßstab 1:1 zu drucken mit dem Ziel, ein Raumfachwerk gemäß Tabelle 15, 2.4 herzustellen. Der finale Demonstrator wird in Kapitel 5.3 beschrieben.

b) Zum Ende des Projekts wurde zudem versucht, beispielhaft gemäß Tabelle 15, 3.3 eine mesogradierte Platte herzustellen, s.

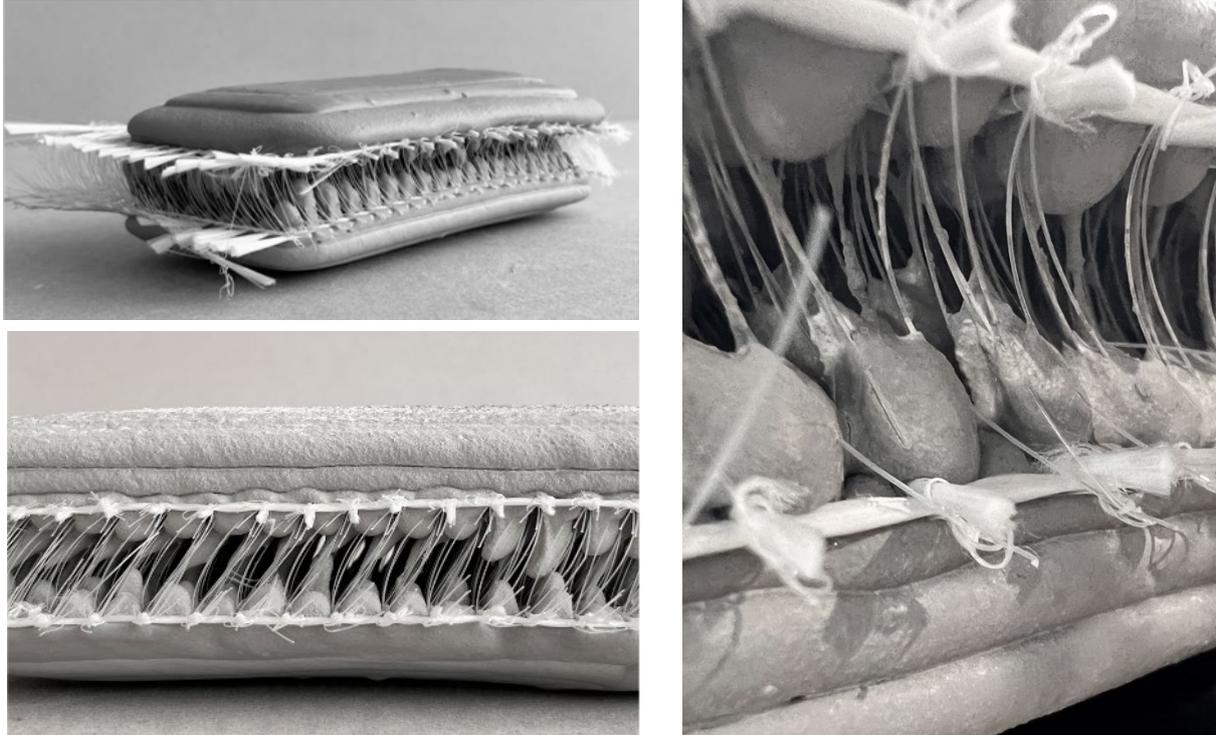
Abbildung 120. Die Decklagen von drei kettengewirkten Abstandsgelegen mit einer Stärke von 20 mm wurden dazu beidseitig ohne Beschichtung mit der für den WASP Drucker entwickelten Betonrezeptur bedruckt. Ziel ist, beide Ebenen über das durch das Textil penetrierte Betonmaterial zu verbinden. Die Hypothese ist, dass sich die ausbildenden Stalaktiten und Stalagmiten mit der jeweils gegenüberliegenden Seite verbinden und wie in einem Fachwerk als Druckstäbe wirken. Die Polfäden nehmen die Zugkräfte auf. Es entsteht eine in der Mitte durch Hohlräume charakterisierte, nicht brennbare Leichtbauplatte. Die geplante Prüfkörpergeometrie (Beton: $B \times H \times L = 80 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$) wird so gewählt, dass im Nachgang auch Biegezugtests möglich sind. Die finalen Betondruckergebnisse sind in Höhe und Breite alle etwa 10% größer. Der Spannrahmen ist so konstruiert, dass das Textil beim Wechsel der Druckseite nicht ausgespannt werden muss. Nach dem Bedrucken und Aushärten der ersten Betondruckschicht kann er gedreht und erneut bedruckt werden.

Die Prüfkörpergeometrie und die Durchdringung des Textils mit Beton sind noch nicht replizierbar. Gründe können u.a. im derzeit nicht klimatisierten Drucklabor der Frankfurt UAS liegen. Dennoch wird aus Interesse an einem Prüfkörper eine 3-Punkt-Biegezugprüfung nach DIN EN 13892-2 durchgeführt mit dem Ziel, zumindest Erkenntnisse zur Art des Bruchverhaltens der Gradientenplatte zu erhalten. Dabei wurde nach 28 Tagen eine Biegezugfestigkeit von 8,4 MPa festgestellt. Zum Vergleich wurden zwei weitere Prüfreihen mit derselben Betonrezeptur aber ohne Textil durchgeführt. Eine Vergleichsreihe besteht aus gedruckten Prüfkörpern. Ihre Geometrien ähneln Norm-Prismen, sie unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Druckergebnisse aber voneinander. Die Breite liegt im Durchschnitt bei 42 mm, die Höhen variieren zwischen 53 mm und 57 mm. Sie wurden nach dem Druck abgeschliffen, sodass eine ebene Auflagerfläche für die Kraftaufnehmer der Biegezugprüfmaschine entsteht. Nach sieben Tagen wurden Biegezugkräfte mit einem Mittelwert von 15,8 MPa gemessen. Die zweite Vergleichsreihe wurde nicht gedruckt, sondern nach DIN gegossen. Die Biegezugkräfte erreichen einem Mittelwert von 6,95 MPa (Probenalter = 28 Tage).

Da die Prüfkörpergeometrien der drei Versuchsreihen in sich nicht identisch und auch untereinander unterschiedlich sind, insbesondere das Gradientensandwich kein ebenes Auflager für die Kraftaufnehmer bietet und das Probenalter variiert, ist der Vergleich der Biegezugwerte nicht valide quantifizierbar. Qualifizierbar ist das Bruchverhalten. Die Hypothese, dass die einwirkende Kraft bei der mesogradierten Platte über die in der Platte ausgebildeten Stalaktiten und Stalagmiten auf die gegenüberliegenden Betondruckelemente übertragen wird bestätigt sich. Das Gradientensandwich bricht dabei an beiden Decklagen zwischen den Noppen, am kleinsten Querschnitt des Betons. Dieser findet sich vor allem an den

Kreuzungen der Steh- und Schussfäden und entlang der Stehfäden, die in 90° Richtung zum Prüfkörper liegen und so Sollbruchstellen ausbilden, an denen die Bruchlinie entlangführt.

Abbildung 120, Mesogradierte Platte (Gradientensandwich)



© Frankfurt UAS

5.2.3.2 3D-Gewirke

Vergleichbare Tests wie in Tabelle 16 wurden auch mit 3D-Gewirken unternommen. In diesem Fall mit dem Ziel, gemäß Tabelle 15, 1.4, einen Bogen aus unbewehrtem Beton analog zur Konstruktion eines echten Gewölbes herzustellen.

Das Textil wurde dazu biaxial eingespannt und mit einem VERTICO-Drucksystem, dem Accelerator Printhead und dem ABB IRB 4600 Knickarmroboter bedruckt. Es wird eine Druckmörtelmischung ohne Beschleuniger verwendet (Hersteller: VERTICO, Materialbezeichnung: 3d printing Mortar, maximale Korngröße: 2 mm). Der Zd-Wert beträgt -2 mm bei einem Druckdüsendurchmesser von 20 mm, einer Schichthöhe von 10 mm und einer Schichtbreite von ca. 40 mm. Die Bauteilgeometrie besteht aus einem langen über die Textillänge laufenden Betonstrang.

Nach ca. 30 Minuten Wartezeit ist die Betonmischung fest genug, um mittels eines gespannten Drahts und einer Holzschablone (Abbildung 121) mehrfach quer zur Druckrichtung in unterschiedlichen Winkeln geteilt werden zu können. Die Winkel wurden ausgehend von einer Kettenlinie ermittelt, die einen segmentierten Bogen ergibt. Die Einschnitte bilden entsprechend vom Rand und nach innen größer werdenden Dreiecken, die jeweils aus dem halbfesten Beton herausgeschnitten und entfernt werden. Zurück bleibt eine Struktur, die aus einzelnen, passgenauen Gewölbesteinen für ein echtes Gewölbe besteht. Aufgestellt ergibt sie den geplanten unbewehrten Bogen, der mit dem Textil eine verlorene Schalung für die finale Fertigstellung beispielsweise einer Decke mitbringt.

Abbildung 121, links oben: Betondruck auf 3D-Gewirke mit sichtbaren Drahteinschnitten innerhalb der Schneieschalung noch vor der Entfernung des überflüssigen Betonmaterials; Mitte oben: Entfernen der Schneideschalung, sichtbar Betondruck mit von links nach rechts größer werdenden Einschnitten; rechts oben: liegender Bogen; unten: aufgestellter Bogen



© Frankfurt UAS

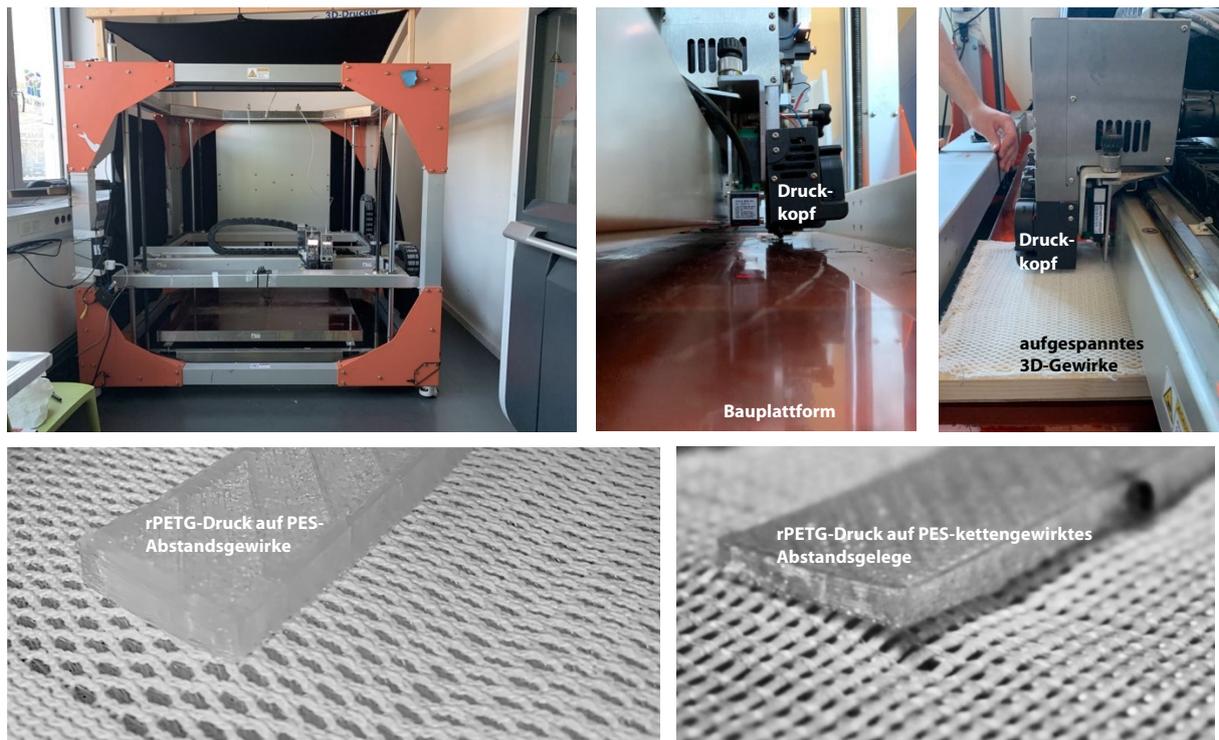
5.3 Demonstratoren

5.3.1 Herstellung Sonnenschutz Demonstrator SHIFT aus rPETG-Druckmaterial auf 3D-kettengewirkten Abstandsgelege aus PES

5.3.1.1 Skalierung 3D-Drucker

In Kapitel 5.2.1 wurden erste Gestaltungskonzepte zu Gelegen und Gewirken vorgestellt. Drei davon wurden realisiert und mit Unterstützung des VINN:Lab an der TH Wildau auf einem Drucker der Firma BigRep gedruckt.

Abbildung 122, oben: BigRep One Drucker am VINN:Lab der TH Wildau; links Drucker gesamt; Mitte: Druckkopf, rechts Drucker und eingelegetes 3D-Gewirke; unten Warpingeffekte, links 3D-Gewirke, rechts kettengewirktes Abstandsgelege Nr. PET.3D.07



© Frankfurt UAS

Der Drucker hat einen Bauraum von $L * B * H = 1000 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} * 1000 \text{ mm}$. Der Druckkopf wird über einen Rahmen in Z-Richtung und innerhalb des Rahmens in X- und Y- Richtung bewegt (

Abbildung 122, oben links). Die speziellen Fahrwege des Druckers sowie der große Umfang des Druckkopfs inklusive der Druckdüse (

Abbildung 122, oben Mitte) machen neben der Justierung des Z_d -Werts Umbauten am Spannrahmen der Textilien nötig. Dieser darf maximal 5 mm über die zu bedruckende textile Oberfläche hinausstehen. Es wurden u.a. Möglichkeiten mit magnetischer Befestigung und schmalen Metallleisten untersucht. Zuletzt wurde aufgrund der geringen möglichen Stückzahl an Drucken entschieden, simple Rahmen herzustellen, auf die das Textil aufgetackert wird (

Abbildung 122, rechts).

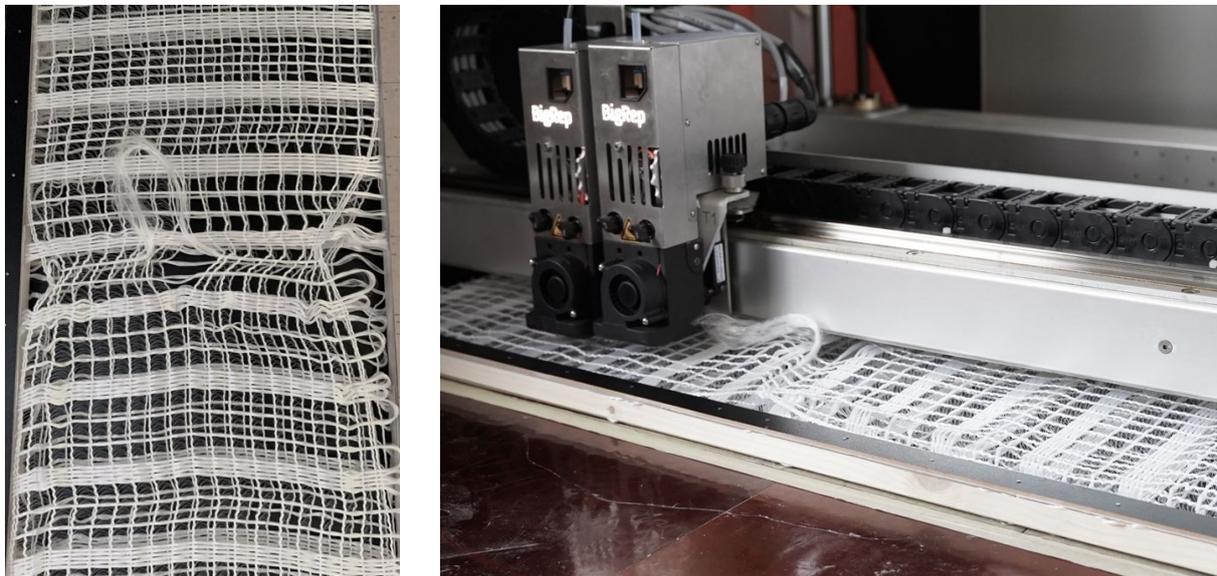
Erste Versuche auf 3D-Gewirke und auf kettengewirkte Abstandsgelege (Textil PET.3D.07 und 05) zeigen deutliche Warpingeffekte mit dem rPETG-Druckmaterial. Insbesondere beim nicht schiebefesten Abstandsgelege führt dies zusammen mit Störungen in der Ebene der textilen Oberfläche zu Ablösungen (

Abbildung 122, unten rechts). Tests mit dem dichteren PET.3D. 05 verlaufen besser. Zum Druck mit größeren Textilien, die den Bauraum überschreiten, kann das Textil seitlich ausgeführt werden. Der Drucker hat keine Einhausung.

5.3.1.2 SHIFT, vertikaler Sonnenschutz: Verschiebbares, kettengewirktes Abstandsgewebe, linear bedruckt

Nach ersten orientierenden Versuchen wird das für den SHIFT vorgesehene Textil PET.3D.19 vorbereitet und bedruckt. Aufgrund der Länge des Demonstrators wird zunächst nur eine Hälfte des Textils eingespannt, der restliche Textilteil wird seitlich aus dem Bauraum des Druckers herausgeführt. Als Spannrahmen wird der Rahmen aus den Vorversuchen so modifiziert, dass die obere Klemmleiste weniger als 5 mm Aufbau hat. Der erste Druckversuch zum SHIFT endet mit einem Programmfehler des Druckers. Abbildung 123 zeigt den abgebrochenen Versuch und das zerstörte Gelege in der Mitte. Das fragile kettengewirkte Abstandsgewebe ist besonders sensibel für solche Zwischenfälle. Im ersten Druckversuch wird der Druckkopf an definierte Punkte oberhalb des Textils gefahren und somit das Textil ausgerichtet. Das Verfahren des Druckkopfs erfolgt manuell über das Bedienpanel des Druckers. Es wird vermutet, dass diese manuelle Steuerung die Fehlfunktion hervorgerufen hat.

Abbildung 123, Druckversuch SHIFT, Fehlfunktion des Druckers, Druckkopf zerstört das Textil



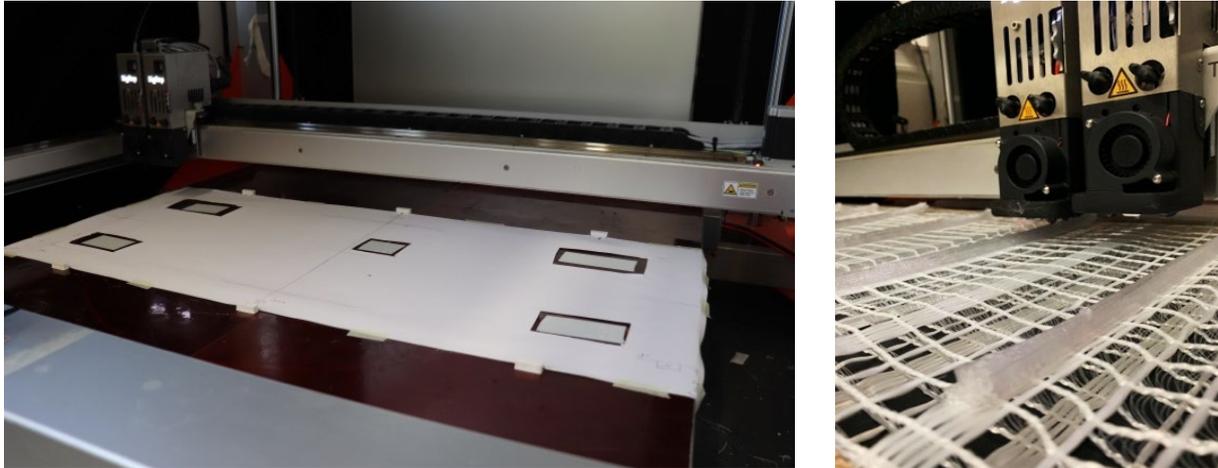
© Frankfurt UAS

Im zweiten Versuch wird das Vorgehen für die Platzierung des Textils geändert. Das Textil wird aufgemessen und digitalisiert. Im nächsten Schritt wird ein Objekt im Punkt $X,Y,Z = 0$ und Anschlagpunkte für den Spannrahmen auf die Bauplatzform gedruckt. Mit Hilfe einer Schablone und der Anschlagpunkte wird das Koordinatensystem des Druckers mit dem Textil zur Deckung gebracht und das Textil platziert. Auf diese Weise kann direkt nach der Kalibrierung mit dem 3D-Druck begonnen werden. Die Demonstratoren erfordern den 3D-Druck von größeren Objekten als bisher im Projekt umgesetzt. Die Druckparameter werden angepasst um zum einen anfänglich auftretendes Warping zu reduzieren und zum anderen eine bessere Oberflächenqualität zu erzielen. Die Druckparameter der ersten 1-4 Schichten orientieren sich an den durchgeführten Haft- und Biegezugversuchen und sind für eine gute Haftung zwischen Textil und 3D-Druck optimiert. Die Parameter für die darauffolgenden Schichten werden an die Erfordernisse der Geometrie angepasst und reduzieren das Warping. Zusätzliche Maßnahmen gegen Warping, die nicht umgesetzt werden konnten, sind das sequentielle Drucken sowie ein beheizter Bauraum.

Der finale Demonstrator besteht aus dem in Streifen gefertigten Polyestergewebe PET.3D.19, welches in den geschlosseneren Textilzonen mit rPETG-Verstärkungen bedruckt wird. Beim Verschieben der oberen Decklage zur unteren Decklage bewirkt das gedruckte Bauteil die Übertragung der Schiebkraft auf alle Stehfäden. Um

das gesamte Element in Bewegung zu versetzen müssen die gedruckten Verstärkungen zudem am Rand über einen umlaufenden Deckrahmen auf der verschiebbaren Textiloberfläche eingefasst werden. Dies ist Grundlage dafür, dass die Polfäden in Bewegung gesetzt werden und sich in Richtung der verschobenen Decklage umlegen. Dies reduziert wahlweise die Transparenz in den offeneren Bereichen der gestreiften Textiloberfläche. Abbildung 124 zeigt die Druckvorbereitung (Kalibrierung mit Schablone) und den 3D-Druck.

Abbildung 124, SHIFT, links Kalibrierung des Druckers über Druckschablone; rechts Drucksituation



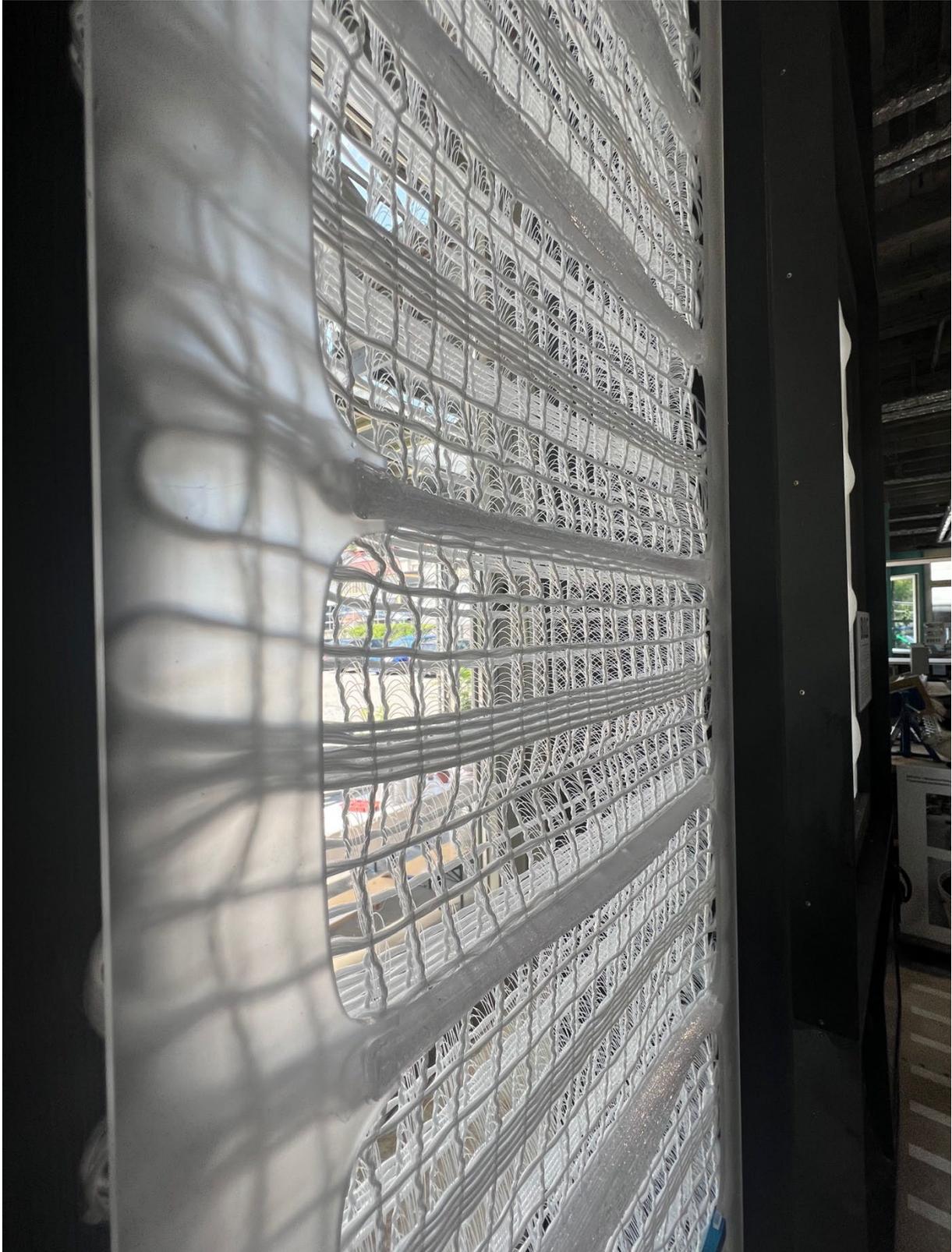
© Frankfurt UAS

Die Demonstratoren erfordern den 3D-Druck von größeren Objekten als bisher im Projekt umgesetzt. Die Druckparameter werden angepasst um zum einen anfänglich auftretendes Warping zu reduzieren und zum anderen eine bessere Oberflächenqualität zu erzielen. Die Druckparameter der ersten 1-4 Schichten orientieren sich an den durchgeführten Haft- und Biegezugversuchen und sind für eine gute Haftung zwischen Textil und 3D-Druck optimiert. Die 3D-Druckparameter für die ersten Schichten für das Druckmaterial formfutura HDglass, clear, 2,85 mm sind 240 °C Drucktemperatur; Druckgeschwindigkeit: 16 mm/s; Zd-Wert: 0,0 mm; Ventilator: 0 %. Das Infill-Muster sind Linien, die in Richtung der Schussfäden orientiert werden. Die Parameter für die darauffolgenden Schichten werden an die Erfordernisse der Geometrie angepasst und reduzieren das Warping. Zusätzliche Maßnahmen gegen Warping, die nicht umgesetzt werden konnten, sind das sequentielle Drucken. Auch ein beheizter Bauraum war noch nicht umsetzbar. Da das Textil für den Demonstrator länger als der Bauraum ist, wurde das Textil einseitig aus dem Drucker ausgeführt und in zwei Arbeitsgängen bedruckt.

Der finale Demonstrator besteht aus dem in Streifen gefertigten Polyestergewebe PET.3D.19, welches in den geschlosseneren Textilzonen mit rPETG-Verstärkungen bedruckt wird. Beim Verschieben der oberen Decklage zur unteren Decklage bewirkt das gedruckte Bauteil die Übertragung der Schiebkraft auf alle Stehfäden. Um das gesamte Element in Bewegung zu versetzen müssen die gedruckten Verstärkungen zudem am Rand über einen umlaufenden Deckrahmen auf der verschiebbaren Textiloberfläche eingefasst werden. Dies ist Grundlage dafür, dass die Polfäden in Bewegung gesetzt werden und sich in Richtung der verschobenen Decklage umlegen. Dies reduziert wahlweise die Transparenz in den offeneren Bereichen der gestreiften Textiloberfläche.

Der Demonstrator (Abbildung 125) wurde auf dem Festival der Internationale Bauausstellung Stuttgart (IBA Stuttgart) ausgestellt, siehe Abbildung 126.

Abbildung 125, SHIFT auf dem Festival der Internationale Bauausstellung (IBA) Stuttgart, Sonnenschutzelement aus kettengewirkten Abstandsgelegen aus PES und aufgedruckten Verstärkungselementen aus rPETG auf 50 % der geschlosseneren Textilflächen sowie Rahmen zur Übertragung der Schiebekräfte



© Frankfurt UAS

Abbildung 126, Ausstellung Internationale Bauausstellung Stuttgart (IBA Stuttgart), 6dTEX Demonstratoren SHIFT und BULG

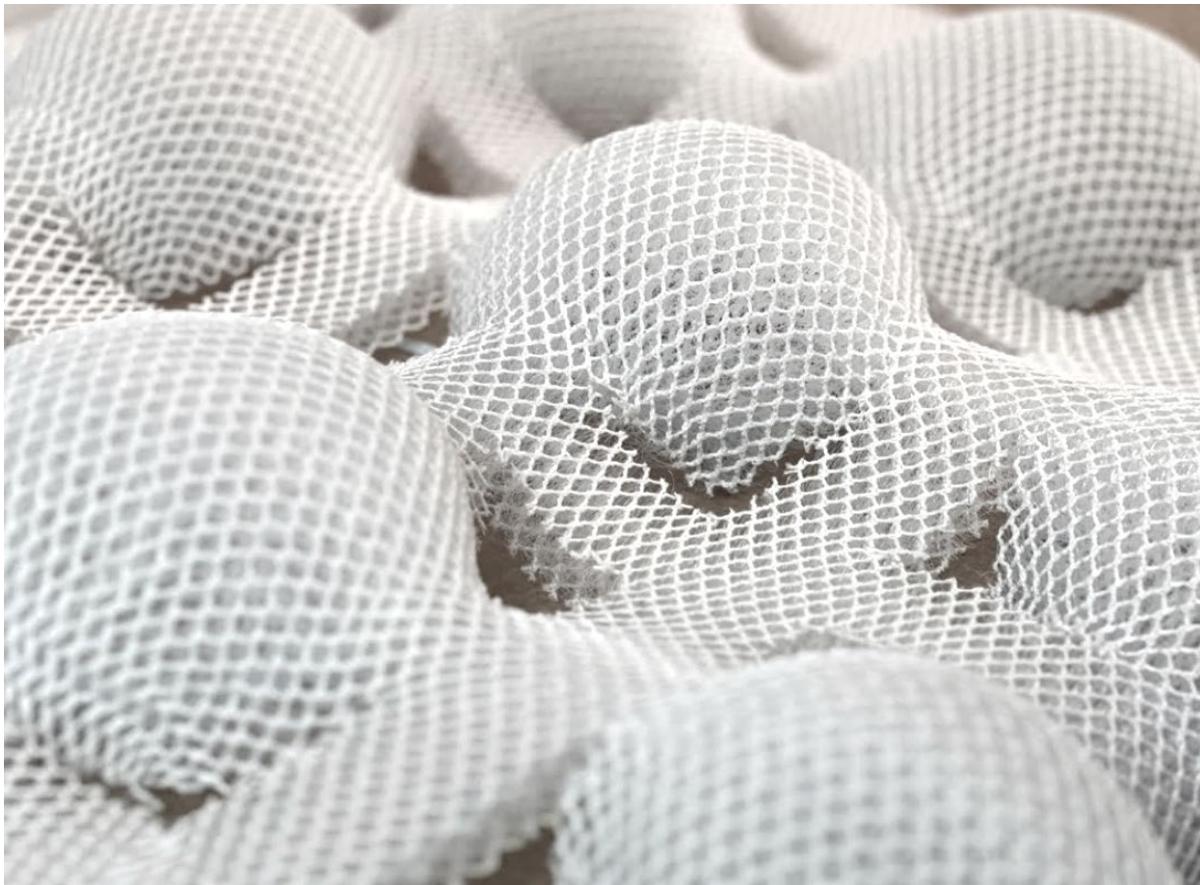


© Frankfurt UAS

5.3.1.3 BULG, vertikaler Sonnenschutz: Aufgespanntes Abstandsgewirke, das sich in bedruckten Teilbereichen aufwölbt, verdichtet und Sonnenschutz wie Teiltransparenzen /Blendschutz bietet

Wie in Kapitel 5.2.2.2 in Abbildung 117 gezeigt, lassen sich insbesondere Abstandsgewirke durch einseitiges Bedrucken einer vorkomprimierten Deckflächen verformen und biegen. Das studentische Projekt BULG, das als Design Build Projekt im Rahmen von 6dTEX veranstaltet wurde, orientiert sich an dieser Option. Bei BULG wölben sich textile Teilbereiche nach oben, während daneben gleichzeitig Öffnungen in vorgeschchnittene Zonen entstehen, siehe Abbildung 127. Erreicht werden unterschiedliche Transparenzen: In der Fläche transluzent, dunkler im Bereich der gewölbten bzw. gerafften Elemente und mit Sichtbezug nach außen in den vorgeschrittenen Zonen. Die Bewegung kann mechanisch durch elastisches Material oder alternativ adaptiv durch Formgedächtnislegierungen funktionieren. Im nächsten Schritt sollen die Bewegungsmechanismen mit reflektierendem Material oder organischen Photovoltaik Modulen in den der Sonne zugewandten Bereichen kombiniert werden.

Abbildung 127, BULG, Studentisches DesignBuild Projekt, StudentInnen des Master of Advanced Architecture (Frankfurt University), M. Amini, A. S. Aviles Orellana, F. Biabani, Y. Cho, W. R. Costa, S. A. Iriarte Dorado, A. E. F. Khalifa, P. Loungoon, A. Movahedi Rad, O. Oreskovic, F. Rezende Muniz, H.-Y. Yeh, L. D. Franco Afonso



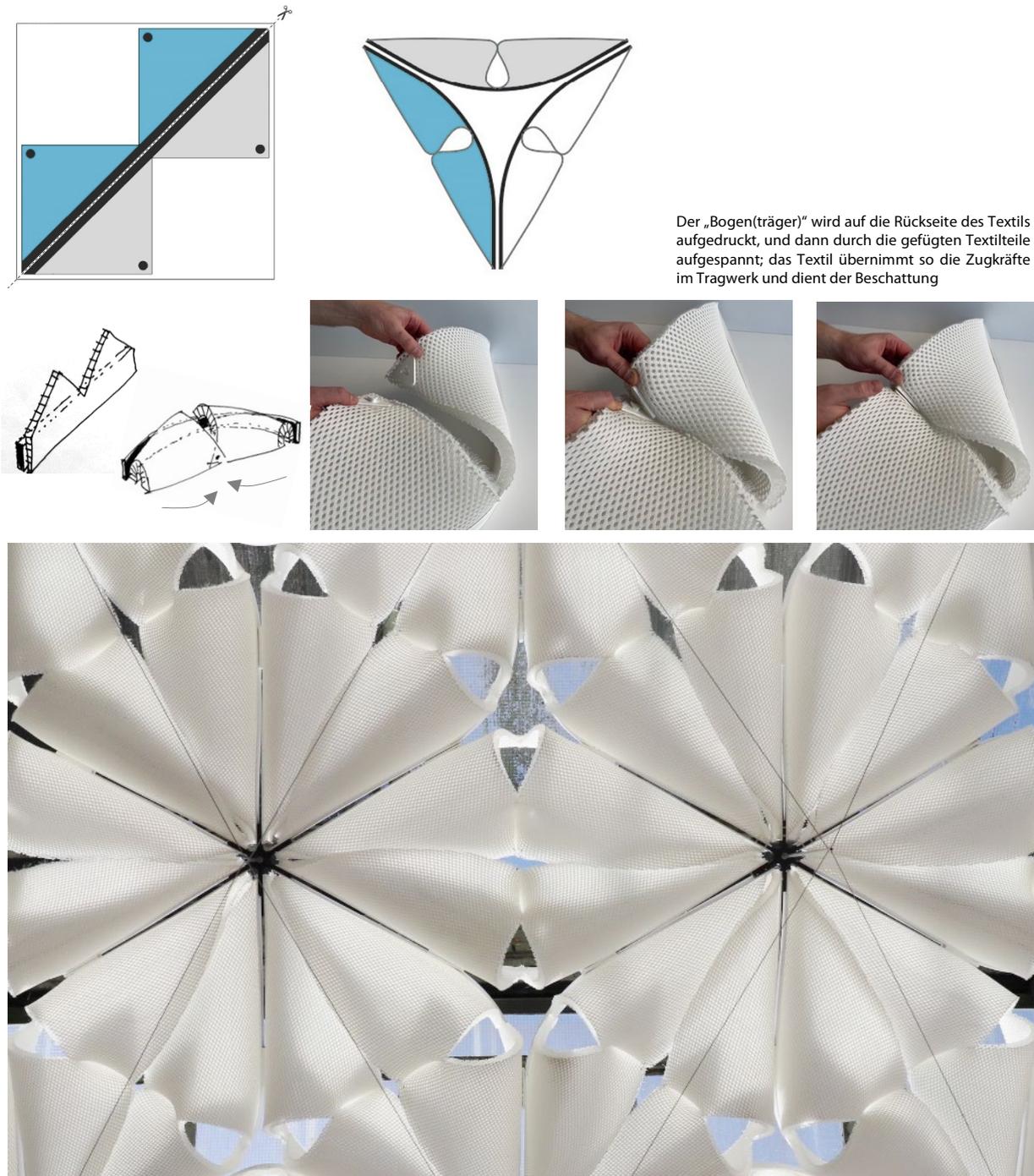
© Frankfurt UAS

5.3.1.4 BOW, horizontaler Sonnenschutz: Aufgespannte Gewirke, die zur Verschattung und konstruktiv zur Aufnahme von Zugkräften dienen, im Zusammenspiel mit aufgedruckten linearen Strukturen, zur Aufnahme von Druckkräften.

Das studentische Projekt BOW interpretiert eine Tensegrity Struktur gemäß Tabelle 15, Zeile 2.5. Dazu wurden lineare Stabelemente auf vorkonfektionierte, dreiecksförmige Abstandsgewirke aufgedruckt. Die Stabelemente bieten zudem Verbindungsstrukturen die es ermöglichen, jeweils zwei Tragprofile zu verbinden (siehe Abbildung 118, Prinzipdarstellung). Abbildung 128 zeigt oben links, wie das Layout für den Druck aussieht und rechts oben, wie das in diesem Fall elastische 3D-Druckmaterial gebogen wird, indem die beiden

dreieckigen Textilien an der Spitze an den mit einem schwarzen Punkt markierten Stellen zusammengesetzt werden und damit der „Bogen“ gespannt wird. Drei Elemente ergeben ein Modul mit einer Kantenlänge von 135 cm.

Abbildung 128, BOW, links oben: Drucklayout für zwei Elemente und für den Druck im BigRep; rechts oben: drei aufgespannte Elemente ergeben ein Sonnenschutzmodul; unten: Sonnenschutz auf dem IBA Festival in Stuttgart Backnang, Studentisches DesignBuild Projekt, Studenten des Master of Advanced Architecture (Frankfurt University), T. Breznik, I.M. Caroli, S.H.A. Daffa Allah, A. Escalante Lopezvilla, A. Habib, G. Himci, O.A.M.A. Ibrahim, O. Mazahery Dehkordi, P. Richers, M. Santillan Astaizaran, R. Taljbini, A. Vaysert; Leitung: LA Sascha Biehl



© Frankfurt UAS

BOW ist ein Studierendenprojekt, das parallel zum Forschungsprojekt 6dTEX entwickelt wurde. Es zeigt eine leichte, selbsttragende, kreislauffähige Verschattung im Außenraum. Sie vermeidet Hitzeinseln im öffentlichen

Raum durch Verschattung und durch den Abzug heißer Luft nach oben. Dazu werden 3D-Textilien aus PES-Recyclat mit 3D-Druckmaterial gleicher Herkunft bedruckt (rPETG). Das Textil wölbt sich dabei durch einseitiges Bedrucken komprimierter Bereiche zu voluminösen Sonnenschutzelementen auf. Gleichzeitig spannt das 3D-Textil das aufgedruckte Tragprofil wie einen Bogen. Die Verbindungselemente innerhalb des Textils sowie zur Befestigung der Tragprofile sind ebenfalls 3D gedruckt. Das System ist modular und anpassbar für unterschiedliche Situationen.

5.3.2 Herstellung Wand Demonstrator YURTE und Demonstrator (KAPPEN)DECKE aus Betondruck auf kettengewirkte Abstandsegele aus AR Glas im Steh- und Schussfadenbereich

Zur Vorbereitung des geplanten Wand- und Deckenelements müssen die Spannrahmen skaliert und diese wiederum zum Druck auf dem Boden liegend justiert bzw. nivelliert werden (Abbildung 129). Gedruckt wurde mit einer patentierten Betonrezeptur von Heidelberg Materials. Von dieser wurden erst Proben ohne Textil, dann Proben auf dem Textil gedruckt, bis die die richtige Konsistenz erreicht wird, s. Abbildung 129 rechts.

5.3.2.1 YURTE, Halbfertigteil aus kettengewirktem AR-Glas Gelege, beidseitig mit linearen, unbewehrten Betonstrukturen bedruckt (Abbildung 131)

Fazit: Um die Druckkonsistenz vor dem Druckstart final festzulegen wird im Vorfeld sehr viel Betonmaterial benötigt, das anschließend entsorgt werden muss. Insgesamt nimmt die Vor- und Nachbereitungszeit die meiste Zeit in Anspruch, wohingegen die Druckzeit vergleichsweise kurz ist. Dabei ist die Druckgeschwindigkeit deutlich schneller als bei Versuchen an der Frankfurt UAS mit dem WASP-Drucker. Eine geringe Schichtbreite (Ziel: 40 mm; Soll: 53-67 mm) wie geplant, lässt sich nur durch eine schnelle Druckgeschwindigkeit realisieren. Der Zd-Wert wird auf 0 mm gewählt. Die Druckdüse ist rund, Durchmesser 20 mm, die Schichthöhe liegt bei ca. 10 mm. Der G-Code wird so eingestellt, dass der Verfahrensweg erlaubt beide Demonstratoren nacheinander zu drucken. Das Material dringt ca. 5 mm in das 3D-Textil ein (Abbildung 130). Die im Vergleich zu den Druckversuchen an der Frankfurt UAS hohe Eindringtiefe liegt vermutlich an der zusätzlichen Extrusionkraft, die über die Pumpe der Materialförderung auf das Material wirkt, das Gewicht des Materials, welches den Beton der untersten Druckschicht in das Textil drückt und der vergleichsweise offenen Textilstruktur, die ein Eindringen ermöglicht Abbildung 130. Das Material braucht mindestens 24 h zum Aushärten, bis der Rahmen gedreht werden kann, um die zweite Seite zu bedrucken. Durch das relativ hohe Gewicht der gedruckten Träger biegt sich das Textil trotz Einspannung durch und muss zumindest unter dem Rahmen abgepolstert werden.

Abbildung 129, Drucken von Bauteilen der Größe 160 cm x ca 60 cmm (YURTE) und 240 cm x ca. 60 cm (KAPPEN)DECKE, © Frankfurt UAS

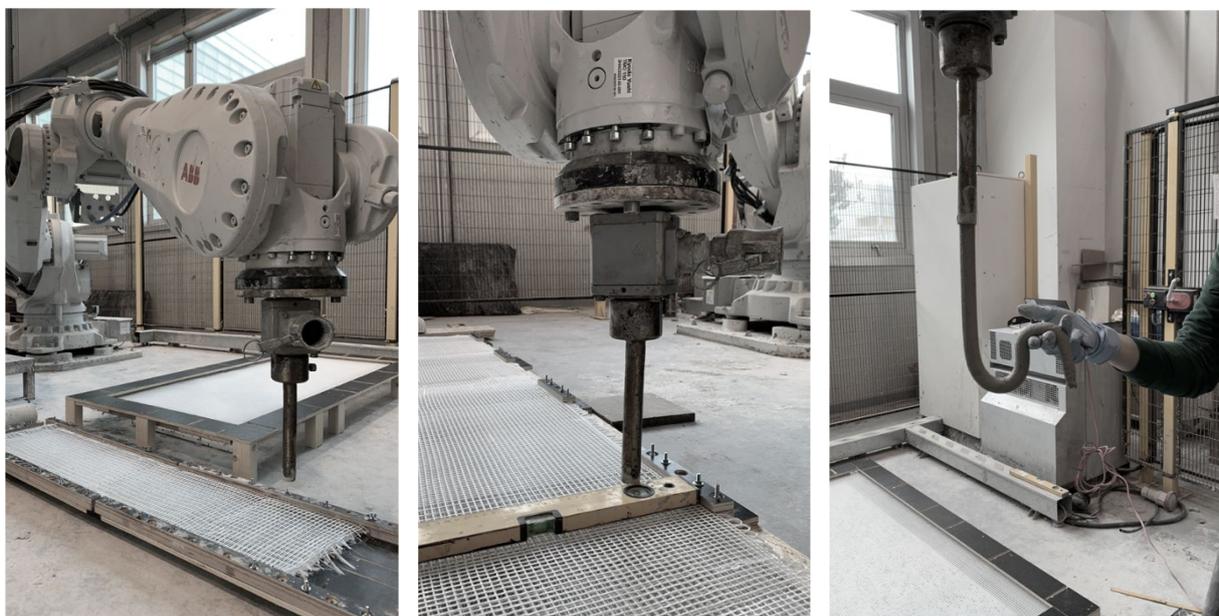
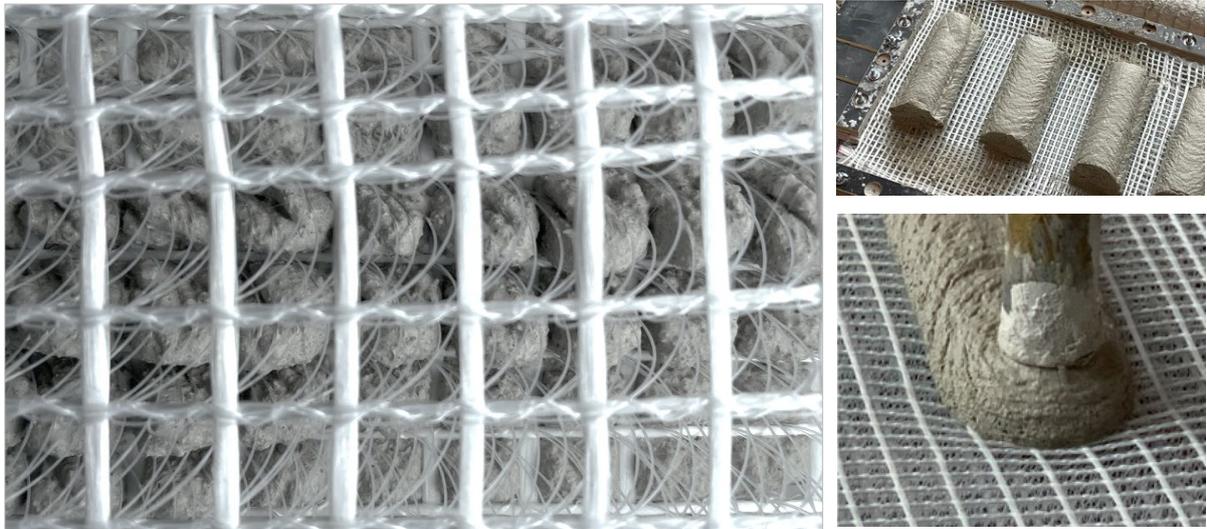


Abbildung 130, links: Ansicht Rückseite, sichtbar ist der in das Textil eingedrungene Beton; rechts oben: Test zum Versäubern der Enden mit Drahtschnitt; unten rechts: Einwirkung des Gewichts des Betons auf das gespannte Textil



© Frankfurt UAS

Abbildung 131, beidseitig bedrucktes, kettengewirktes AR-Glas Gelege; Enden der Druckkörper noch ungeschnitten

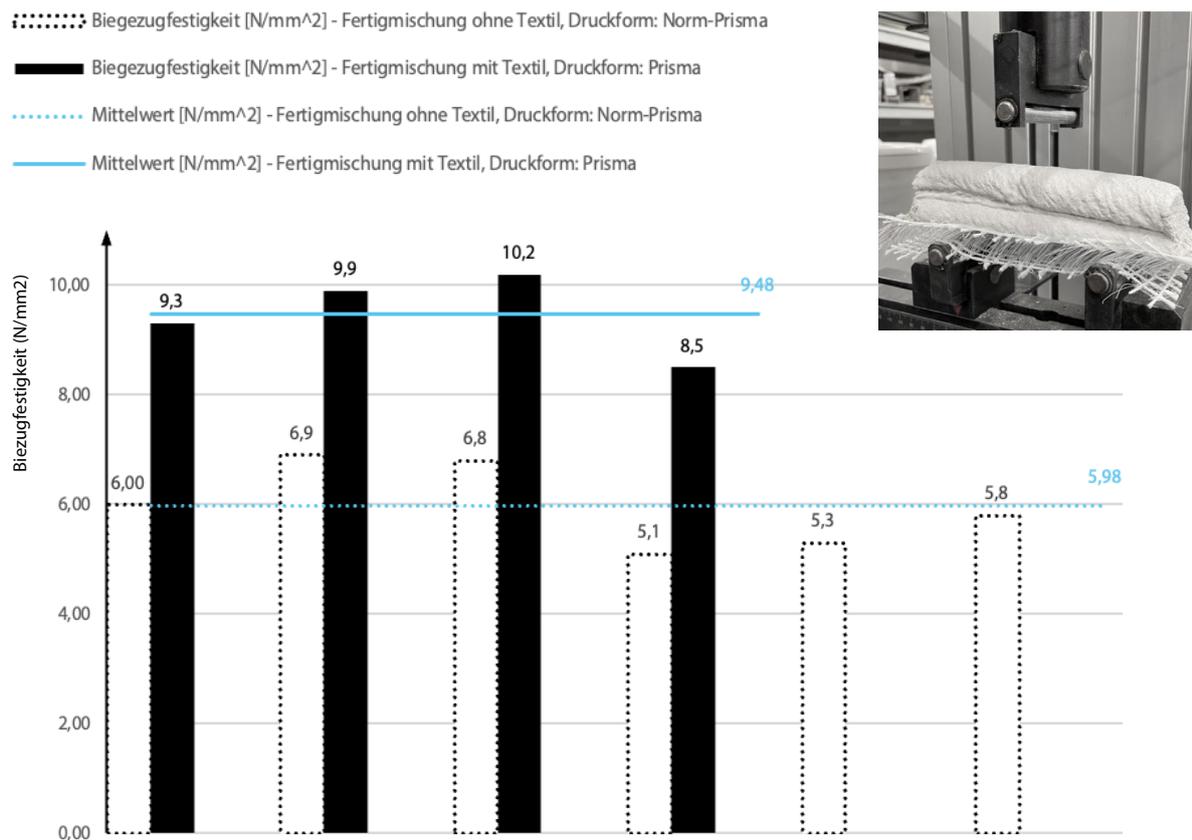


© Frankfurt UAS

5.3.2.2 (KAPPEN)DECKE, Halbfertigteil aus kettengewirktem AR-Glas Gelege, einseitig mit linearen Betonstrukturen bedruckt

Zum Nachweis der Aktivierung des Textils zur Aufnahme von Zugkräften und Erhöhung der Biegesteifigkeit des 6dTEX-Elements wurden parallel Prüfkörper des Heidelberg Materials-Betons ohne Textil mit Prüfkörpern mit Textil in Bezug auf Ihre Biegezugfestigkeiten verglichen. Hierzu werden 3-Punkt-Biegezugversuche nach DIN EN 13892-2 (Prüfmaschine: ZwickRoell DPM/BPM, Baureihe: MEGA 100 – 300 – 20 – DMI) durchgeführt. Die Biegezugfestigkeiten erhöhen sich im Verbund von Textil und 3D-Druck um fast 50 % (Abbildung 132).

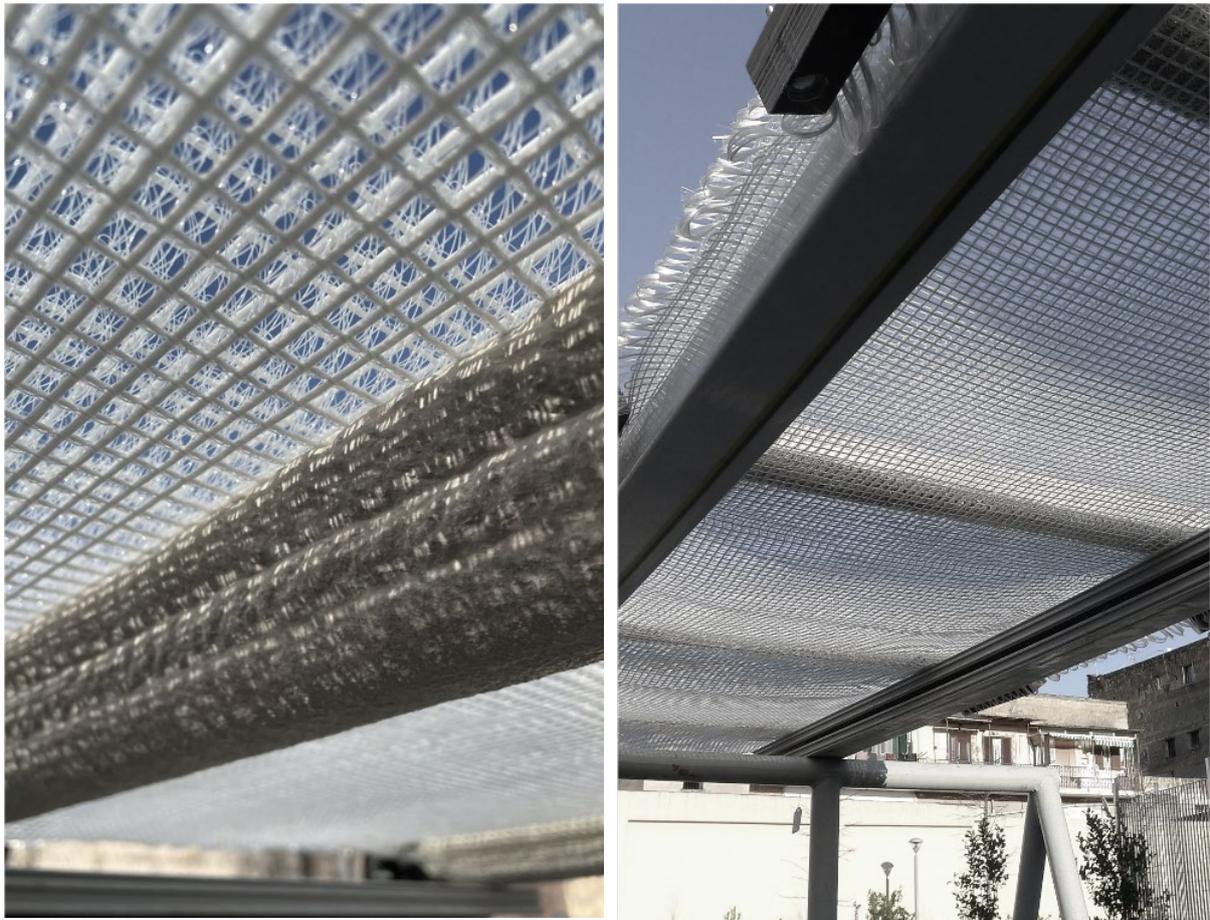
Abbildung 132, Vergleich der Biegezugfestigkeiten, Prüfkörper 3D-Betondruck (Fertigmischung) ohne Textil im Vergleich mit Verbundelement (3D-bedrucktes kettengewirktes Abstandsgelege)



© Frankfurt UAS

Abbildung 133 zeigt den dazu entwickelten Demonstrator. Das Textil wurde einseitig und in Schussrichtung bedruckt. Die textile Oberfläche dient als Bewehrung und zwischen den Elementen zudem als verlorene Schalung. Es entsteht ein Halbfertigteil, das industriell vorgefertigt vor Ort final zu einer Decke ausgebildet werden kann. Dies entweder, indem das zwischen den Balken hängende 3D-Textil oberseitig als verlorene Schalung für einen Deckenaufbau genutzt wird und unterseitig akustisch wirksam wird. Oder indem das Element zwischen den Tragelemente mit einem befüllt und dann umgedreht wird. Es bilden sich in den befüllten Bereichen zwischen den Trägern Strukturen aus, angelehnt an die jeweilige Kettenlinie, die vergleichbar sind mit einer Kappendecke.

Abbildung 133, links: einseitig bedrucktes, kettengewirktes AR-Glas-Gelege, Druckstruktur unten; rechts: Druckstruktur oben



© Frankfurt UAS

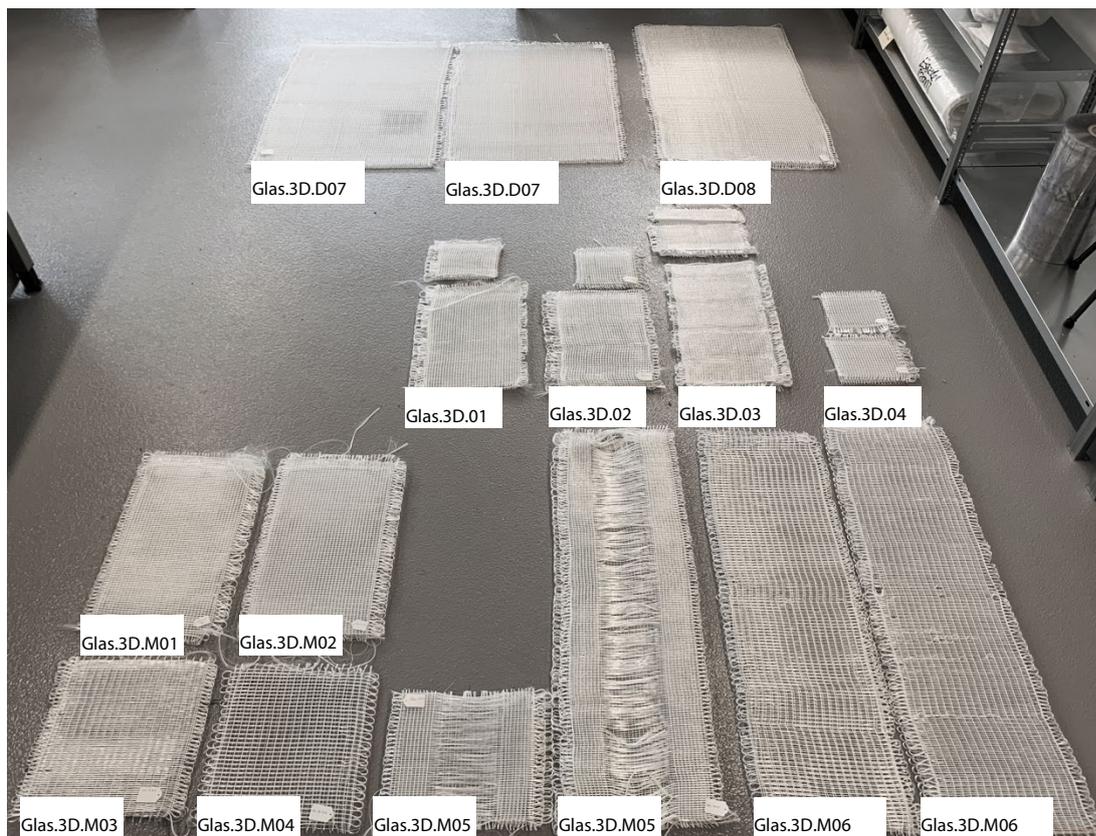
5.3.3 Brandschutz- und lichttechnische Prüfungen

5.3.3.2 Brandschutztests der Beton-/ Glaselemente

Für orientierende Brandschutzprüfungen nach DIN 4102-1 / EN11925-2 wurden am Prüfinstitut Hoch Kleinbrennertest durchgeführt mit dem Ziel des Nachweises der Brandschutzklasse B1 in Kombination mit Brandschachttests. Dazu wurden Betondrucke der Größe 55 mm auf 150 mm auf kettengewirkte Abstandsgelege der Größe 300 mm x 300 mm vorbereitet, aus denen final Prüfkörper der Größe 225 mm auf 200 mm herausgeschnitten wurden. Verwendet wurde das Textil Glas.3D.07, von dem noch ausreichend Material für Demonstratoren und die Tests vorhanden war (Abbildung 134).

Die Proben wurden 15 Sekunden lang einer kleinen Flamme ausgesetzt. Bei mehrschichtigen Bauprodukten, bei denen im Anwendungsfall offene Kanten vorkommen können, werden alle Schichten beflammt und bewertet. Im Ergebnis wird die Brennkastenprüfung nicht bestanden. Das Gelege entzündet sich sofort und erreicht ab der 9. Sekunde die Messmarke von 15 cm. Bestanden ist der Test erst, wenn die Flamme innerhalb von 20 Sekunden nicht bei der Messmarke 150 mm über dem Flammenangriffspunkt angekommen ist. Kurz danach schlagen die Flammen beim Kanten- und beim Flächentest über den Probekörper hinaus. Aufgrund der negativen Prüfungen ist eine Einstufung nach DIN 4102- B2 nicht möglich. Zitat aus dem Prüfbericht: „Die Glasfasern selbst brennen nur schwer. Werden jedoch die PES-Fasern erreicht, steigen die Flammen schnell hoch. Bei den verbrannten Proben ist zu beobachten, dass die Glasfasern noch komplett stehen, während die PES-Fäden weggeschmolzen/verbrannt sind“.

Abbildung 134, Übersicht Bestand kettengewirkte Abstandstextilen für Prüfungen und Demonstratoren



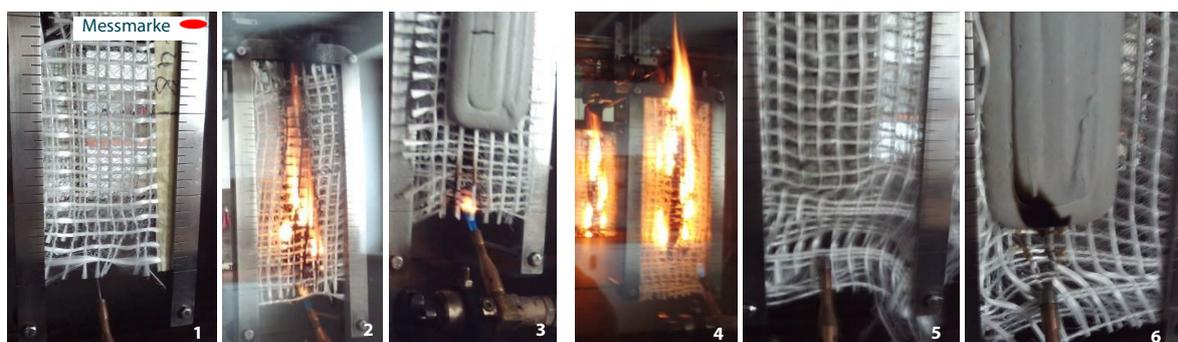
© Frankfurt UAS

Folgende Gründe führen u.a. zu dem Ergebnis.

- Die Wirk- und Polfäden sind aus Polyester ohne B1 Qualität. Das ist perspektivisch änderbar, war logistisch innerhalb von 6dTEX aber nicht abbildbar.
- Die Glasfasern, die nicht brennbar sind, werden erst mit Schichten verarbeitbar. Die Schichten werden von den Firmen geheim gehalten. Auch diese könnten zum Brandverhalten beitragen.

Perspektivisch wird das freiliegende Textil, das zu dem schlechten Brandverhalten führt, als verlorene Schalung für mineralische Werkstoffe dienen, s. auch Vorprojekt ge3TEX; es entstehen entsprechend Beschichtungen oder Ummantelungen der Rovings, die das Brandverhalten verbessern werden. Das deckt sich auch mit den Beobachtungen des Prüfinstituts: „Der Beton selbst entzündete sich nicht. Wird der Probekörper so zugeschnitten, dass der Betonklotz ca. 3 cm über dem Beflammungspunkt liegt, tritt hier eine flammhemmende Wirkung ein.“ (Abbildung 135).

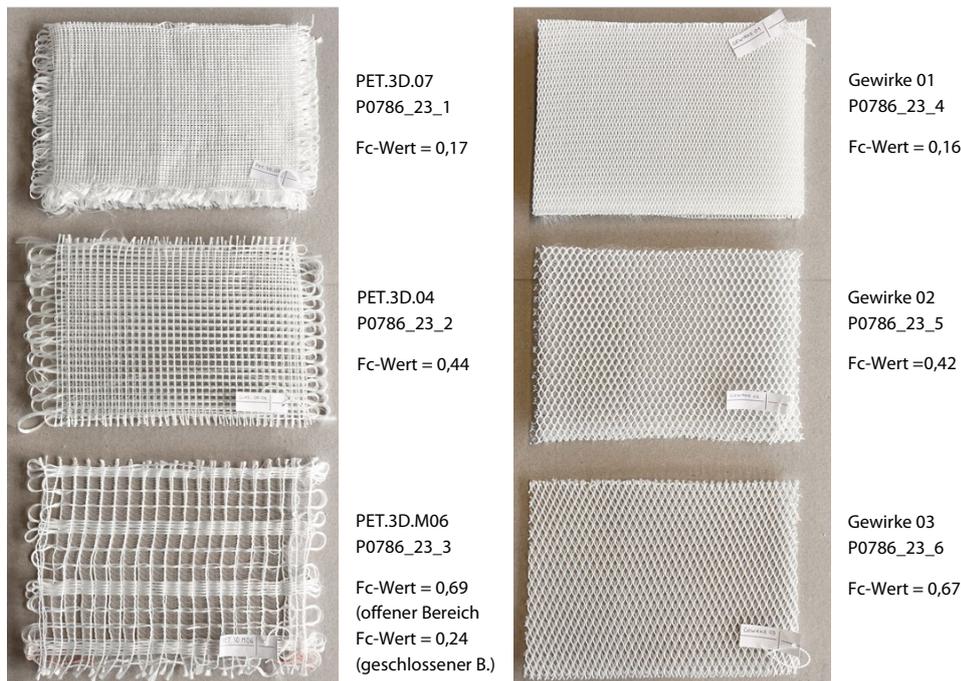
Abbildung 135, links: Kantentests Nr 1-4 : Beflammungspunkt Gelege; in der 12. Sekunde; mit Beton; rechts: Flächentests nr. 4-6: 22. Sekunde Gelege brennt; Rückseite Beton; Vorderseite Beton und verbrannte Probe, © Prüfinstitut Hoch



5.3.3.1 Lichttransmissionstests der rPETG- / PES-Elemente

Lichttechnische Prüfungen des kettengewirkten Abstandsgewebes wurden durch das stfi (Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V) durchgeführt. Insgesamt wurden drei kettengewirkte Abstandsgewebe und drei Abstandsgewirke geprüft. Ziel war insbesondere die Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades g_{tot} und des Gesamt-Transmissionsgrades der direkten Solarstrahlung $\tau_{e,tot}$ des Fenstersystems mit Sonnenschutz nach DIN EN ISO 52022-1: 2018-01, des sekundären Wärmeabgabegrades nach innen $q_{i,tot}$ nach DIN EN 14501: 2021-09 und vor allem des Abschattungsfaktors F_c der Sonnenschutzmaterialien. Das Prüfgerät ist ein UV-VIS-NIR Zweistrahl-Spektrometer der Fa. PERKIN - ELMER Corp., USA mit 150 mm Integrationskugel, Einstrahlung senkrecht zur Kugelöffnung und 8° Neigung der Probenebene zur Lichteinfallachse bei Reflexionsmessung.

Abbildung 136, f_c -Werte für einen außenliegenden Sonnenschutz bei einfacher Doppelverglasung mit Luftfüllung



© Frankfurt UAS

Die ermittelten f_c -Werte wurden geprüft für Einfachverglasung, Doppelverglasung mit Luftfüllung, Doppelverglasung mit Ar-Füllung und Low-E Beschichtung, solargeregelte Doppelverglasung mit Ar-Füllung und Low-E Beschichtung, Dreifachverglasung mit Ar-Füllung und Low-E Beschichtung. Abbildung 136 zeigt die f_c -Werte für einen außenliegenden Sonnenschutz bei einfacher Doppelverglasung mit Luftfüllung im Vergleich. Die Messung des direkten und diffusen visuellen Transmissionsgrades bei Probe 3 erfolgte für die beiden unterschiedlichen Strukturen der Deckschicht (offen und dicht) separat voneinander. Die angegebenen optischen Parameter und die zugehörigen Klassifikationen der visuellen Komfortkriterien spiegeln daher nicht die Leistung der Probe 3 im Gesamten wieder, sondern gelten ausschließlich für die jeweils gemessenen Teilbereiche der Probe 3.

Probe 3 wurde als Sonnenschutz Demonstrator i.M. 1:1 realisiert, s. unter 5.4.1. Die horizontale Bewegung der Deckflächen zueinander erlaubt durch die Schrägstellung der Polfäden zur Fensterfläche eine verbesserte Verschattung in den offenen Bereichen. Vom stfi wurden getrennt voneinander die geschlossenen und offenen Bereiche des Textils mit F_c -Werten von 0,24 und 0,69 erfasst. Die geschlossenen Bereiche sind damit vergleichbar mit hinterlüfteten Stoffen geringer Transparenz, deren f_c -Werte bei ca. 0,25 liegt. Durch das Verschieben werden sich die f_c -Werte der offenen Bereiche auf Werte unter 0,69 reduzieren. Perspektivisch lassen sich so durch eine präzisierte Textilherstellung Varianzen im Blendschutz und in Bezug auf sommerlichen Wärmeschutz herstellen. Die Werte marktüblicher Textilien von z.B. Serge Ferrari variieren im

Vergleich zwischen 0,28 und 0,15 bei 10% und 5% Öffnungsanteil. Letzteres entspricht dem dichtesten PET Textil PET.3D.07.

Zusammenfassend ist die erreichbare Varianz an Fc-Werten bei der Herstellung von kettengewirkten Abstandgelegen und Abstandsgewirken sehr groß (Abbildung 136). Sie lassen sich durch den 3D-Druck zusätzlich stabilisieren und funktionalisieren, s. auch unter 5.2.3.

5.4 Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Es gab keine inhaltlichen Abweichungen. Abweichend von der Planung mussten Themen letztendlich aber anders geclustert und in zeitlich anderer Reihenfolge durchgeführt werden. Zudem war der Zeitaufwand in Teilbereichen größer als erwartet.

Dies betrifft zum einen die ursprünglich vorgesehene Aufteilung in Arbeitspakete zum Drucken in das Textil und auf das Textil. Konkret wurden die mechanischen Testreihen immer mit Probekörpern durchgeführt, bei denen von Anfang an sowohl in wie auf das Textil gedruckt wurde - dies in der ersten Phase auf Flächentextilien wie in der zweiten Phase auf Abstandstextilien. Die Erkenntnisse daraus wiederum zeigen, dass das Drucken in das Textil bis zu den inneren Rändern des Textils insbesondere beim Kunststoffdruck technisch nur sehr aufwendig machbar ist. Zudem entstehen so wie es machbar keine sinnvollen Anwendungen. Hier wurden im Gegensatz zum Drucken auf das Textil später keine weiteren Designvarianten entwickelt und keine Skalierung vorgenommen.

Es betrifft zum anderen auch den Zeitaufwand der mit den geplanten Haft- und Biegezugprüfungen zusammenhängt. Insgesamt waren die Testreihen zur Verbundoptimierung zweier Werkstoffgruppen mit zwei unterschiedlichen Drucktechnologien an sich zeitaufwendiger als erwartet. Die Prozesse mussten zunächst reproduzierbar gestaltet werden und dann mussten aufgrund fehlender etablierter mechanischer Prüfstandards für das neue Verbundmaterial bestehende Prüfprozesse adaptiert werden.

6 Ergebnisse

6.1 Bewertung/Diskussion/Zielerreichung

6.1.1 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

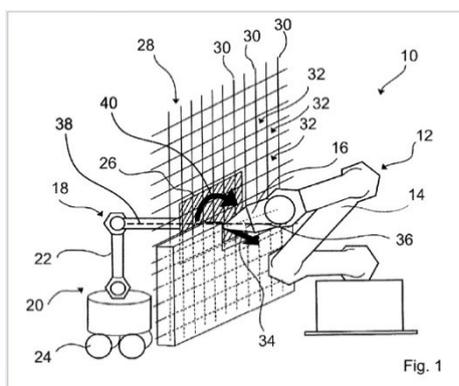
Es sind im Bearbeitungszeitraum von 6dTEX nach derzeitigem Kenntnisstand keine weiteren Projekte bearbeitet bzw. Ergebnisse zum Thema 3D-Druck auf 3D-Textil veröffentlicht worden. Neuere Publikationen betrachten, wenn dann den 3D-Druck auf 2D-Textil. Dafür bietet auch die Industrie inzwischen technische Lösungen an. In der Zeitschrift *Technical Textiles*, Ausgabe 3/2023, stellt die Karl Mayer Group aus Oberthausen eine neue Maschinenkombination vor, die im Rolle-zu-Rolle-Prinzip zweidimensionale Textilien direkt nach der Herstellung bedruckt. So wird die Produktivität von Wirkmaschinen mit der Flexibilität der additiven Fertigung verbunden und Produktionsschritte eingespart. Neben der Bekleidung sieht Karl Mayer weitere Absatzmärkte in der Automobilbranche. Das 3D-Drucksystem kann genutzt werden um Verstärkungen in Türverkleidungen, Dachhimmel und Sitze zu integrieren. Vergleichbare und denkbare Leichtbauanwendungen mit Blick auf das Bauwesen wie Außenwandverkleidungen oder leichte Dachstrukturen werden nicht angesprochen.

6.1.1.1 Verbund

a) Nicht-mineralischer Verbund: Die Haftung zwischen dem 3D- Druck- und dem 3D-Textilmaterial ist für neue Verbundmaterialien essentiell. Dazu wurde im Laufe des Projekts 6dTEX eine neue Literaturstudie veröffentlicht (Popescu und Amza, 2022). Sie vergleicht relevante Faktoren wie Material- und Druckparameter 3D-gedruckter Polymere im Zusammenhang mit flächigen, zweidimensionalen textilen Strukturen. Ziel ist die Herstellung robuster Produkte im Konsumgüterbereich wie Sportbekleidung mit 3D-gedruckten Branding- und Funktionselementen die waschbar, tragbar und bügelbar sind. Die Ergebnisse decken sich mit den in 6dTEX zuvor ausgewerteten Forschungsstudien. In Bezug auf den 3D-Druck kommen alle Studien im Wesentlichen zum Ergebnis, dass neben der Druckgeschwindigkeit der Abstand des Druckkopfs zur Oberfläche des Textils (Z-Wert) entscheidend ist. In Bezug auf das Textil sind Porosität und Rauigkeit neben einer möglichen Vorbehandlung der Oberfläche der zweite wichtige Faktor siehe Abbildung 9 (Popescu und Amza, 2022).

b) Mineralischer Verbund: Keine der Studien thematisiert den Verbund von textilen Oberflächen mit gedrucktem mineralischem Material. Ein Patent zum Thema hat das ITA inzwischen veröffentlicht, (DE102021117171A1 / WO2023275182A1). Es wurde 29.6.2022 angemeldet und am 5.1.2023 veröffentlicht (Abbildung 137). Hier wird 3D-gedruckter Beton durch eine flächige, zweidimensionale, textile Bewehrung gedruckt (Dittel et al., 2023) (Dittel et al. 2022).

Abbildung 137, 3D-Druck durch 2D-Textilien



© Auszug Patent DE102021117171A1 / WO2023275182A1

Alternativ wurde das mit dem 3D-Betondruck auf Textilien verwandte Thema Textilbeton im Projekt 6dTEX wissenschaftlich recherchiert und vergleichend betrachtet, s. Kapitel 2.1.2.2. Verglichen wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Haftung zwischen Textil und Zementmatrix, zur Optimierung der Tragwirkung von Flächentextilien in Textilbetonkonstruktionen und vor allem der Einsatz von 3D-Textilien für Textilbetonkonstruktionen. Bisher überwiegt die Verwendung von 2D-Textilien in Form von Drehergeweben und kettengewirkten Biaxialgelegen. Letztere kommen auch als kettengewirkte 3D-Biaxialgelege zum Einsatz. Aspekte aus alten Studien (Kulas 2013 S 22), die für 6dTEX relevant sind, betreffen u.a. die Beschichtung des Textils. Es erhöht den inneren Verbund zwischen den Filamenten und die Tragwirkung. Neuere Untersuchungen zum Thema „Vom Stahlbeton zum Textilbeton – nur wie?“, aus der Zeitschrift Betonwerk Fertigteil-Technik 08/ 2021 zeigen, wie in Abhängigkeit von der Anwendung, die üblicherweise verwendete, steife Epoxidbeschichtung bei gekrümmten, formaktiven Bauteilgeometrien zugunsten formflexibler Styrol-Butadien-Tränkungen ersetzt wird. Zum Einsatz von 2D-Textilien im Unterschied zu 3D-Textilien kann festgestellt werden (Sasi und Peled, 2015), Zitat: „... dass 3D-Gewebe im Vergleich zu 2D-Geweben sehr vorteilhafte Verstärkungen für zementbasierte Verbundwerkstoffe sind“. Insbesondere die Polfäden beeinflussen die Verbundstoffleistung: Je höher der relative Anteil an Hochleistungsgarnen in Z-Richtung, desto besser die Verbundwerkstoffleistung. Generell überwiegen Textilbetonkonstruktionen, die als Massivelemente ausgeführt werden. Im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion wird hier der verringerte Materialeinsatz durch die Reduktion der Überdeckung angeführt, ebenso wie die geringere Korrosionsanfälligkeit. Weitere Materialreduktionen müssen perspektivisch in der Abwendung von Massivbau hin zum filigranen Skelettbau mit Beton (Schätzke, 2015) und zu lastflussgerechter Formgebung gehen.

6.1.1.2 Kreislauffähigkeit

Stand der Technik und Stand der Forschung ist, es werden beim 3D-Druck auf 2D-Textil Multimaterialien hergestellt. Das Recycling wird weder wissenschaftlich noch vom o.g. Maschinenhersteller thematisiert. Karl Mayer verarbeitet Polyurethan und Silikon ohne Hitze, das Textilmaterial wird nicht konkretisiert. Auch in den vergleichend betrachteten, älteren Studien zu 3D-Druck auf 2D-Textil, s. Kapitel 2.1.3, werden hauptsächlich Drucke mit Polymeren (erdölbasierten Materialien) auf ebensolche Textilien untersucht, sowie vereinzelt alternativ biobasiertes PLA auf Naturtextilien aus Baumwolle. Studien zum Druck mit nachhaltigem, mineralischem Material wie Lehm auf Textil sind nur in ersten Studienarbeiten zu finden (Naldoni, 2016). Durch die Verwendung eines recyclinggerechten Designs kann ein kreislauffähiges Endprodukt als textilbewehrter Beton realisiert werden. Das Bewehrungstextil wird stark geschädigt und kann daher nicht noch einmal als Textilbeton eingesetzt werden. Bei der Beachtung von „Design for Recycling“ können Schäden beim Recycling geringgehalten werden. Eine erneute Anwendung der recycelten Textilien in z.B. Kurzfaserbeton wäre dadurch möglich. Dadurch können alle Bestandteile des Textilbetons wiederverwendet werden (Kimm 2021).

6.1.2 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der 6dTEX Grundlagenforschung werden gemäß den nachfolgend aufgelisteten Punkten diskutiert und bewertet:

- Verbund 3D-Druck auf 3D-Textilien: Druck- und Prüffreihenvorbereitung, Zwischen- und Endergebnisse
- Prototypischer Anwendungsoptionen: Entwicklung von Demonstratoren für das Bauwesen in zwei Varianten - mineralisch und nicht mineralisch
- Kreislauffähigkeit: Herstellung eines strukturdifferenzierten Monomaterialverbunds aus Textil- und Druckmaterial in zwei Varianten - mineralisch und nicht mineralisch

6.1.2.1 Verbund Herstellung: Druck- und Textilparameter

a) Druckvorbereitung Rahmen: Der Druck, egal mit welchem Material, erfordert Rahmen zu Ein- und Ausspannen des Textils. Ein Aufkleben auf die Druckplattform wie bei 2D-Textilien funktioniert nicht - dann ist nur die untere, nicht zu bedruckende Textillage fixiert. Für 6dTEX wurden wiederverwendbare Spannrahmen entwickelt (Abbildung 18). Bei den verwendeten LDM-Druckern (WASP/VERTICO) für Betondruck kann dabei das Erreichen der Startposition direkt über dem Textil problemlos und ohne Kollision mit dem Rahmen erreicht werden. Der WASP fährt von oben an, das VERTICO-System ist ein innerhalb des Bauraums frei agierender ABB-

Roboter mit angehängter Betonpumpe. Bei den verwendeten Prusa-Druckern zur Herstellung der kleinen Proben aus Polyester ist das Erreichen der Startposition über Eingriffe in den G-code möglich. Bei dem zuletzt für die Skalierung verwendeten BigRep One Drucker für Polyesterdruck gestaltete sich dies komplexer, zumal bei Eingriffen in den Code der Verlust der Gewährleistung droht. Am Ende konnte das Problem beim BigRep One mit flacheren Rahmen gelöst werden, über die der Druckkopf noch hinwegfahren kann. Zum Einspannen selbst müssen derzeit noch die Decklagen verbindenden Polfäden händisch in den Randbereichen entfernt werden. Perspektivisch können die Textilien mit Polfaden freien Bereichen gefertigt werden, um mit genügend freier Deckfläche das Textil dann auch um die Kante eines Spannrahmens ziehen zu können. Schlussendlich ergibt sich in Zukunft eine kantenfreie Oberfläche und eine gleichmäßigere Textilspannung.

b) Druckvorbereitung Zd-Wert: Für 6dTEX wurde die Einstellung des Z-Werts (Abstand Druckkopf zur Druckfläche) differenzierter betrachtet als in vorangegangenen Studien. Dort wurden 3D-Druckverfahren auf 2D-Textilien betrachtet, der Z-Wert ist definiert als die Distanz zwischen Druckkopf oder „printing head“, s. S. 4 (Gorlachova und Mahltig, 2021) bzw. „nozzle“, s. S. 2 (Čuk et al., 2020) und der Bauplattform. Die Höhe des Textils wird dabei nicht explizit herausgerechnet bzw. nicht genannt. Für den Druck auf Abstandstextilien, im Fall von 6dTEX mit Materialstärken bis zu 20 mm, muss diese Höhe aber eingerechnet werden. Der Druckkopf muss deutlich über der Bauplattform starten. Für 6dTEX wurde deshalb ein neuer Wert definiert, der Zd-Wert (Z-distance), der die Distanz zwischen der zu bedruckenden Decklage des 3D-Textils zur Unterkante des Druckmaterials benennt. Letzteres wurde der Einfachheit halber festgelegt, indem die Distanz zur Textiloberfläche ermittelt wurde als der Abstand zwischen Textil und Unterkante Düse plus Materialdurchmesser. In der Konsequenz heißt dies, je geringer der Zd-Wert ist umso mehr drückt der Druckkopf das Material durch die Poren des Textils. Es ergeben sich so auch negative Zd-Werte, die die geplante Durchdringung des Druckmaterials durch die textile Oberfläche anzeigen (Abbildung 21). Die differenzierte Betrachtung dieses Parameters erlaubt im Ergebnis die mechanische Haftung im Verbund zu optimieren.

c) Prüfung des Haftverbunds: Zur Auswertung standen und stehen bis jetzt keine standardisierten Tests zur Verfügung. In den Studien zum Druck auf 2D-Textilien wurden Haftzug-, Schäl- und Scherversuche vorgestellt. In Anlehnung daran wurde für Prüfreihe zum Haftzug entschieden und entsprechende Prüfaufbauten konzipiert und getestet. Dabei kann beim rPETG Druck der in die Prüfmaschine einzuklemmende Prüfkörper direkt an die Haftfläche mit angedrückt werden. Beim 3D-Betondruck mussten an den eigentlichen Prüfkörper eigens zusätzlich gedruckte Prüfstempel aufgeklebt werden. Hier sind vermehrt Fehlerquellen durch Ablösen und Außerwinkligkeit aufgetreten, s. Kapitel 5.1.6.3. Das Fazit ist, dass die Prüfverfahren im Prinzip aussagekräftig sind, allerdings für weitere Forschungen im Ablauf deutlich präzisiert werden müssen.

d) Prüfung der Biegezugfestigkeiten: Hier wurden 3-Punkt bzw. 4-Punkt Biegezugtests durchgeführt. Da das 3D-Textil zur Bewehrung herangezogen werden soll, muss die textile Fläche in der Prüfmaschine auf der Unterseite liegen. Das führte je nach Durchdringung des Druckmaterials durch die textile Oberfläche insbesondere beim Betondruck auf 3D-Textil zu unterschiedlichen und teils unkontrollierbaren Auflagerbedingungen die die Auswertung erschweren. Die Prüfreihe wurden dennoch durchgeführt und zumindest qualifizierend im Vergleich betrachtet. Da das Textil im Polyesterverbund keine tragwerksrelevante Auswirkung hatte, ist für Anschlussforschungen vor allem das Thema mineralischer Verbund aus Glasfasern und Beton relevant. Hier muss das Verfahren präzisiert insbesondere mit Blick auf die Auflagersituation verbessert werden.

e) Planung und Dokumentation der Druck- und Textilparameter: Dokumentiert und geplant wurden beim Druck die Zd-Werte sowie je nach Druckart Flow, Temperatur oder Materialrezepturen. Schwieriger gestaltet sich die Planung und Dokumentation von Porosität und Rauigkeit der finalen textilen Oberflächen. Einfach planen lässt sich die Feinheit der Fasern in tex bzw. dtex. Sie zeigen als textile Einheit das Gewicht von 10.000 m bzw. 1.000 m Faser oder Faden in Gramm an. Im Textil wird der Abstand der Stehfäden dabei durch die Art der Belegung der Bleie mit je sechs Nadeln definiert, der Abstand der Schussfäden über die Stichlänge der Wirkfäden. Zusammen mit der Tex-Zahl und einem theoretisch kalkulierbaren Durchmesser der verwendeten Rovings ergibt sich daraus die Porigkeit der Oberfläche. In der Realität aber verformen sich die einzelnen

Rovings zu elliptischen bis flachen Querschnitten – bedingt durch die Abbindungsart (Beispiel „offene Franse“) und durch die Maschenweite. In einem iterativen Verfahren wurde dies zunächst über händische Aufmaße dokumentiert. Zuletzt wurden Laserscanverfahren und photographische Verfahren getestet (Narula et al., 2018). Letztere funktionieren bei Flächentextilien sehr gut. Bei Abstandstextilien kommt es zu teils nicht nachvollziehbaren Abweichungen aufgrund der Tiefe der Poren und den schrägstehenden Polfäden in den Poren, die das Ergebnis verfälschen. Festzuhalten ist, dass erst mit einer projektspezifischen Software zusammen mit einer Laserscan-Aufnahmetechnik die digitalen Daten präzise erfasst werden können. Die in anderen Studien dafür eingesetzten 3D-Laserscanner Mikroskope von Keyence (Gorlachova and Mahltig, 2021), waren für 6dTEX nicht verfügbar. In Zukunft muss diese Erfassung der Verformungen die Datenbasis liefern, um die in 6dTEX noch zeitaufwändige Forschungsarbeit zu reduzieren. Die Stellung der Polfäden (senkrecht oder geneigt zu den Deckflächen) wurde im Projekt zunächst nur ausnahmsweise variiert, um die Produktionskapazität im Rahmen zu halten und die Vielzahl der zusätzlichen Parameter den Projektrahmen gesprengt hatte. Insbesondere für die prototypisch entwickelte Gradientenplatte) verbleiben hier offene Fragen für Anschlussforschungen.

6.1.2.2 Verbund, Prüfergebnisse: Haft- und Biegezugprüfungen nach Materialgruppen

Für jede ausgewählte Materialgruppe wurden im ersten Schritt Vorversuche zum 3D-Druck auf 2D-Textil unternommen. Im zweiten Schritt wurden die Erkenntnisse auf den 3D-Druck auf 3D-Textil übertragen

a) rPETG auf PES-Textil, Prüfergebnisse Haft- und Biegezug (Kap. 5.1.7/8 und Kap. 5.1.11/12): Im Polyesterverbund und bei kettengewirkten Biaxialgelegen verbessert sich die Haftung je dichter die Oberfläche ist. Dies gilt auch für die kettengewirkten 3D-Abstandsgelege, die noch bessere Werte im Vergleich aufweisen. Ein Grund wird ihre rauere Oberfläche sein, die sich durch die zusätzlich eingebundenen Pol- und Wirkfäden ergibt. Die Biegezugfestigkeit verbessert sich im Vergleich zum reinen Druckmaterial weder bei kettengewirkten Biaxialgelegen noch bei kettengewirkten 3D-Abstandsgelege. Offensichtlich bewirken die Schussfäden Mikro-Sollbruchstellen im Bereich der Kontaktstelle zwischen Druck und Textilmaterial die den Bruch des Prüfkörpers beschleunigen.

b) Beton (Eigenrezeptur und Fertigmischung) auf AR-Glas, Prüfergebnisse Haft- und Biegezug (Kap. 5.1.9/10 und Kap. 5.1.13/14): Die Haftung wird umso besser, je offener die Oberfläche ist. Dies unter der Voraussetzung, dass eine Porigkeit von ca. 30-40 % bei den kettengewirkten Biaxialgelegen gegeben ist. Da der Porenanteil im 3D-Textil nicht korrekt ermittelt werden konnte, wurde hier der LiS (lichte Schussfadenabstand) als Parameter herangezogen. Er liegt beim 2D-Textil bei ca. 4 mm und beim 3D-Textil bei 3,2 mm. Die Haftzugergebnisse bei letzterem sind entsprechend geringfügig schlechter. Die Biegezugfestigkeiten erhöhen sich bei der Kombination von Betondruck und Glastextil im Gegensatz zum Kunststoffdruck sowohl bei Flächen wie bei 3D-Textilien deutlich. Bei den kettengewirkten 3D-Abstandsgelegen werden zum 2D-Textil vergleichbare sehr gute Biegezugwerte bei identischem Schussfadenmaterial (2.400 tex) bei einem lichten Schussfadenabstand erreicht, der ca. 40% des Düsendurchmessers des Druckers entspricht.

6.1.2.3 Druckversuche auf und in das Textil

Die Druckversuche in das Textil haben sich als nicht zielführend herausgestellt. Zwei Faktoren erschweren den Prozess. Das Textil muss in dem betreffenden Bereich ohne Polfäden hergestellt werden, was herausfordernd aber immerhin machbar wäre. Zudem aber müssen auf der der Druckseite gegenüberliegenden Fläche die Schussfäden herausgeschnitten werden. Damit verliert das Textil an Stabilität. Hinzu kommt, dass die Druckköpfe der Drucker im FDM-Druck derzeit zu voluminös sind. Man kann nicht an die Kanten heranfahren und wenn, dann nur mit Abstand zu den Polfäden drucken. Dadurch ergeben sich keine sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten. Im LDM-Druck hingegen scheint es sinnvoller stattdessen Bereiche von oben und durch größere Öffnungen zu bedrucken. Durch eine entsprechende Betonkonsistenz und mit einem negativen Z_d-Wert lässt sich ein definiertes Befüllen des Textils in ausgewählten Zonen erreichen, s. Versuche zur Gradientenplatte.

6.1.2.4 Prototypischer Anwendungsoptionen

Zuletzt wurden prototypisch Bauteile im Maßstab 1:1 konzipiert und produziert (Kapitel 5.3): ein Wand- und ein Deckenelement aus 3D-Betondruck auf 3D-Glastextil sowie ein Sonnenschutzelement gefertigt mit rPETG 3D-Druck auf 3D PES-Textil. Die Elemente haben eine durchschnittliche Größe von 170 cm * 70 cm. Die Skalierung der Druckverfahren ist herausfordernd. Während die Textilproduktion in der Länge unkritisch und nur in der Breite skaliert werden musste, führten andere Druckergeometrien beim rPETG-Druck und bei 3D-Betondruck insbesondere der Wechsel auf eine andere Betonrezeptur zu modifizierten Prozessabläufen. Am Ende stellen alle Prototypen das gestalterische wie technische Potential von 6dTEX unter Beweis.

Mit dem SHIFT konnte ein scharnierfreies Sonnenschutzelement gestaltet werden, das über den 3D-Druck Horizontalkräfte verteilt, die die Polfäden in Bewegung setzten und so die f_c -Werte zwischen 0,69 und 0,24 variieren. Das Wandelement YURTE, das sich konstruktiv am gleichnamigen Archtyp orientiert, bietet ein außenliegendes, dünnes Betonskelett. Es wird das über das 3D-Textil thermisch getrennt und kann vor Ort durch Befüllen isoliert werden kann. Das KAPPEN Deckenelement lässt sich als Halbfertigteil vorfabrizieren. Das Textil wird zur textilen Bewehrung und vor Ort gleichzeitig zur verlorenen Schalung.

6.1.2.5 Kreislauffähigkeit

Die in Kapitel 5.1.2 - 5.1.4 tabellarisch dargestellten Textil- und Druckmaterialien zeigen eine Vielzahl theoretischer Möglichkeiten auf, wie im Gegensatz zum derzeitigen Stand der Technik und Forschung Monomaterialverbünde mit Kreislaufpotential aus Druckmaterial und Textil in Zukunft aussehen könnten. Für die Untersuchungen für 6dTEX wurden im Ende zunächst nur Textil- oder Fasermaterialien mit hohem Technologie-Reifegrad verwendet, Material(weiter-)entwicklungen sind nicht Thema von 6dTEX.

Tabelle 17 zeigt, was im Rahmen von 6dTEX technisch machbar war und was zukünftig denkbar wäre.

a) Nicht-mineralische Werkstoffe: Auf dem Markt sind eine wachsende Anzahl an biobasierten Druckwerkstoffe aus z.B. PLA- oder Lignin erhältlich. Damit kombinierbare, biobasierte und biologisch kompostierbare Fasermaterialien mit hoher Zugfestigkeit wie z.B. Flachs wurden aber noch nie für 3D-Textilien verarbeitet. Die Option wurde deshalb in 6dTEX ausgeschlossen, ebenso die Verwendung von PLA-Fasern, die im Vergleich zu Flachs geringere Zugfestigkeiten und tendenziell höhere Wasseraufnahmefähigkeiten haben. Potentiell stellen PLA-Fasern dennoch eine Alternative zu erdölbasierten Synthefasern dar, da intensiv zu weiteren Funktionalisierungen geforscht wird ("FuPLATex – Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West," n.d.).

Ergebnis: Letztendlich wurde für ein 3D-Textil aus Polyester entschieden, u.a. auch weil es bislang keinen biologisch basierten Ersatzstoff für die Polfäden aus Polyester gibt. Diese Monofilamente sind wesentlich für und garantieren das Aufstellen des 3D-Textils. Das Polyestermaterial ist kreislauffähig und kann aus entsprechendem Rezyklat gefertigt werden - ebenso wie das rezyklathaltige rPETG-Druckmaterial, das ebenfalls der Gruppe der Polyester zugehört. Es entsteht ein voll kreislauffähiges Monoverbundbauteil.

b) Mineralische Werkstoffe: In Erwägung gezogen wurden Verfahren, die nachträglich keinen weiteren Brennprozess wie z.B. Keramik benötigen. Betrachtet wurden weiter und aufgrund der sehr guten Recycelbarkeit Glasdruck auf Glastextilien, aufgrund der Nachhaltigkeit Lehmdruck auf beispielsweise Basalttextilien und Betondruck auf Cabon-, Basalt- oder Glastextilien. Erste orientierende Versuche mit Glasdruck, unterstützt durch das Laserzentrum Hannover e.V., zeigen, wie Textilfasern und Glasscheiben verbunden werden könnten (Kapitel 5.1.9.1). Der Druck aufschmelzenden Glasmaterials auf einen textilen Untergrund ist ein völlig neues FuE Thema und konnte im Rahmen von 6dTEX aber nicht weiterverfolgt werden. Auch Ergebnisse aus dem Centre for Information Technology and Architecture (CITA) wo ausgehend von einem „Paté de Verre“ Prozess (Glaspaste-Prozess) ein Glasdruckverfahren aus Glaspulver entwickelt wird, sind noch nicht reproduzierbar. Für den Lehmdruck gibt es interessante Untersuchungen u.a. vom MIT, (Curth et al., 2020), die aber auf die Komplexität der Rezeptur hinweisen. Ein höherer Tongehalt ermöglicht ein plastischeres, leicht extrudierbares Material, führt aber auch zu höheren Schwindungs- und Rissraten. Das Drucken mit einer möglichst trockenen Mischung reduziert sowohl die Schrumpfung als auch die Rissbildung. Diese Vorteile müssen gleichzeitig gegen den erhöhten Verschleiß der Verbrauchselemente des jeweiligen

Pumpensystems abgewogen werde. Die absehbar notwendige eigene Versuchsreihe war innerhalb von 6dTEX nicht abbildbar.

Ergebnis: Abschließend wurden für 6dTEX bereits auf dem Markt erhältliche Trockenmörtel bzw. Betonmischungen verwendet. Dazu gehören u.a. das Produkt i.tech 3D des Herstellers Heidelberg Materials, mit dem das erste gedruckte Wohnhaus in Beckum/Deutschland 2020 gedruckt wurde. Der Kauf des patentierten Materials von Heidelberg Materials musste an eine Geheimhalteerklärung seitens der Frankfurt UAS gekoppelt werden. Dies stellte sich als zeitlich herausfordernd aber machbar heraus. Die eigentlichen Prototypen konnten letztendlich durch die freundliche Unterstützung von Heidelberg Materials an der Uni Neapel hergestellt werden. In der Konsequenz wurde zunächst eine Eigenmischung für den an der Frankfurt UAS vorhandenen WASP-Drucker entwickelt. Basis waren Angaben von WASP. Mit dieser Rezeptur wurden alle Proben für Haft- und Biegezugtests durchgeführt.

Tabelle 17, 6dTEX, verwendete Druck- und Textilmaterialien, © Frankfurt UAS

Druckmaterial: 3D-Druck (Druckverfahren)		Fasermaterial: 3D-Textil (Textiltechnologie)
Nicht-mineralisch, erdölbasiert: technisch recycelbar		
Polyamide		
PA (Nylon)		PA6 (Polyamid 6) > 3D-Textil als KWA bislang keine Herstellung n.u.K.*
Polyester		
rPETG (recyceltes Polyethylenterephthalat) PC (Polycarbonat)		PES (Polyestergarne unterschiedlicher Herkunft, Z.B. aus rPET) * > 3D-Textil, herstellbar (KWA + AGWE + AGWI)*
Polyolefine		
PP (Polypropylen)		PP (Polypropylen): 3D-Textil (KWA) bislang keine Herstellung n.u.K.*
Nicht-mineralisch, biobasiert: biologisch kompostierbar		
PLA Lignin Cellulose Pilzmyzel		PLA > 3D-Textil als KWA wurde noch nicht hergestellt * Flachs > 3D-Textil als KWA) wurde noch nicht hergestellt* Hanf > 3D-Textil als KWA wurde noch nicht hergestellt*
Mineralisch		
Glas (Borosilicat) : Glasdruck Beton (unterschiedliche Rezepturen) : Betondruck Ton / Keramik : Tondruck Lehm (unterschiedliche Rezepturen) : Lehmdruck (LDM)		E- Glasfaser > 3D-Textil, herstellbar als AGWE und KWA* AR Glasfaser > 3D-Textil, herstellbar als AGWE und KWA* Carbonfaser > 3D-Textil herstellbar als KWA* Basaltfaser > 3D-Textil herstellbar AGWE, KWA bislang nicht* Metallische Fasern > 3D-Textil herstellbar AGWI

* die Polfäden verbleiben aus PES, erdölbasierte Monofilamente

blau = gewählte Kombination

unterstrichen = marktgängig bzw. mit Marktpotential

invers = FuE-Projekte

Kettengewirktes Abstandsgewebe (KWA), Abstandsgewebe (AGWE), Abstandsgewirke (AGWI)

n.u.K = nach unserer Kenntnis

Zuletzt wurden die mechanischen Kennwerte der beiden Betonmischungen sowie Biegezugtests von 3D-Drucken beider Betonmischungen auf das gleiche 3D-Textil ermittelt zur Vergleichbarkeit. In den dafür entwickelten AR-Glastextilien kommen AR-Glas Rovings als Steh- und Schussfadenrichtung zum Einsatz. Im Gegensatz zu Basaltfasern haben sie auch ohne Beschichtung eine gewisse Alkalibeständigkeit. Dies bot die Möglichkeit, versuchsweise den Prozessschritt Beschichtung zu vermeiden unter der Annahme, dass der absehbar größere Faseranteil im 3D-Textil dies kompensiert. Für die Verbindung von Glasfasern mit Beton gibt es aus dem Bereich Textilbeton zudem entsprechende Recyclingmöglichkeiten. Die Möglichkeit Carbonfasern

zu nutzen wurde ebenfalls erwogen aber ausgeschlossen. Sie besitzen im Vergleich zu Glas- und Aramidfasern eine höhere Festigkeit und eine bedeutend höhere Steifigkeit, sind aber spröder und aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit auf der vorgesehenen Textilmaschine nicht verarbeitbar, s. Kap. 5.1.4.1. Die Kreislauffähigkeit des finalen mineralischen Verbundmaterials entspricht der von Textilbetonen.

6.1.2.6 Fazit

Es konnte in grundlegenden Untersuchungen nachgewiesen werden, dass mit Hilfe von 3D-Druckern dreidimensionale, polymere oder mineralische Materialstrukturen auf und in Abstandsgewirke oder kettengewirkte Abstandsgewebe eingebracht werden können und dies Möglichkeiten für unterschiedliche Anwendungen in der Architektur bieten.

Nachgewiesen werden konnte auch, dass sich die neuen Verbundwerkstoffe aus der Kombination von 3D-Textilien mit Verfahrenstechniken des 3D-Drucks zur Herstellung kreislauffähiger Leichtbauteile eignen. Ebenso konnte die Funktionalität und die Gestaltungsfreiheit von Bauelementen mit unterschiedlichen Funktionalitäten nachgewiesen werden, bedingt durch die in beiden Verfahren mögliche, funktionsbezogene Definition von Material und Geometrie der Mesostruktur des jeweiligen Bauteils.

Im Fokus standen vor allem steh- und schussfadenverstärkte kettengewirkte Abstandsgewebe aber auch Abstandsgewirke, die in den Decklagen und zwischen den Decklagen je nach Anforderung porös oder deckend, weicher oder härter bzw. elastisch oder starr gefertigt werden können. Durch additive Materialeinträge auf und in das Textil konnten verschiedene mechanische Werte zur Verbundwirkung ermittelt und gezielt geprüft werden. Textilien aus PES-Fasern wurden mit rPETG-Druckmaterial kombiniert und Textilien aus AR-Glasfasern mit Beton 3D-Druck. Die Haftfestigkeiten zwischen den 3D-Textilien und den 3D-gedruckten Materialien sowie die Biegezugfestigkeit des Verbundwerkstoffes wurden geprüft und die Verbundeigenschaften wurden, mit Hilfe von optimiertem Textildesign und unterschiedlichen Druckrezepturen (Beton) sowie teils durch zusätzliche Prozessschritte wie z.B. das Coaten des Glastextils, verbessert. Auch ohne Coaten konnten zuletzt sehr gute Ergebnisse erreicht werden.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Haftung des rPETG-Druckmaterials auf dem 3D-Textil umso besser wird, je eher diese eine dichte und topographisch fein ausdifferenzierte Oberfläche ist. Die besten Werte wurden bei ca. 40 - 60 % des Durchmessers des Druckmaterials im Verhältnis zur lichten Weite der Schussfäden erreicht und bei einem Öffnungsverhältnis zwischen Lichte Schussfäden zu Breite Schussfäden von ca. 20-30 %. Eine Verbesserung des Biegezugverhaltens konnte im Polyesterverbund im Vergleich zum reinen Druckmaterial kaum festgestellt werden. Offensichtlich führt die mechanische Verzahnung von Druck- und Textilmaterial im Bereich der Kontaktfläche beim Druckmaterial zu minimalen Sollbruchstellen, die das Biegezugverhalten im Vergleich zum reinen Druckmaterial verschlechtern. Die besten Ergebnisse konnten hier bei ca. 60 % des Durchmessers des Druckmaterials im Verhältnis zur lichten Weite der Schussfäden und bei einem Öffnungsverhältnis zwischen Lichte Schussfäden zu Breite Schussfäden von ca. 30-40 % erreicht werden. Beim Betondruck stellt sich das Ergebnis anders dar. Die zur Verbesserung des Biegezugverhaltens notwendige Beschichtung muss beim Haftzug mit bedacht werden. Versuche zeigen bei gleichem Textil deutlich bessere Haftzugwerte beim unbeschichteten im Vergleich zum beschichteten Textil. Die Poren des Textils setzen sich zu, die Haftung wird eingeschränkt. Die Porigkeit der noch unbeschichteten textilen Oberfläche liegt hier beim besten Ergebnis bei ca. max. 50 %. Gleichzeitig verbessern sich die Biegezugwerte des Betons im Verbund mit dem Textil durch die Beschichtung. Die höchsten Spannungen werden bei einem lichten Schussfadenabstand zwischen 3 und 3,5 mm erreicht, das entspricht ca. 40 % des Düsendurchmessers (8 mm) des Betondruckers. Das Öffnungsverhältnis zwischen Lichte Schussfäden zu Breite Schussfäden liegt bei den besten Serien zwischen 110 -180 %. Bei größeren Öffnungsweiten reduziert sich die Biegezugfestigkeit wieder. Generell sind alle genannten Werte erste Annäherungen. Die Prüfverfahren sind zu optimieren, da Auflagerflächen und Angriffsflächen der auf das Textil gedruckten Prüfkörper gerade beim Beton bislang suboptimal für die genormten Prüfverfahren sind.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass eine kreislauffähige Kombination aus der Materialgruppe rezyklierbarer Polyester nachgewiesen werden konnte: Textilien aus PES im Verbund mit rPETG-Druck. Daraus konnten drei Sonnenschutzelemente im Maßstab 1:1 als Demonstratoren realisiert werden. Außerdem konnte

ein Verbund aus Beton und AR-Glas / PES-Mischtextil entwickelt werden der im Verbund wirksam ist. Daraus wurden ein Deckenelement in zwei Ausführungsvarianten und ein Wandelement hergestellt, unter Einbezug der Textilien als Bewehrung und/oder als verlorene Schalung.

6.2 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit betrifft insbesondere den textilen Herstellprozess und die Einbindung neuer Materialentwicklungen in Bezug auf Textil- wie Druckmaterial.

Textiltechnisch muss generell die geringe Verschiebefestigkeit der kettengewirkten Abstandsgelege verbessert werden. Das textile Gefüge ist, so wie für 6dTEX gefertigt, für einen robusten Bauprozess zu fragil. In Bezug auf die Materialität ist zudem die Produktion einer nachhaltigen 3D-Textilstruktur mit einem Höchstmaß an mineralischen Fasern zu erforschen. So sind 100 % glasbasierte, kettengewirkte Abstandsgelege z.B. nicht herstellbar. Die Glasfasern sind als Wirkfäden nicht geeignet. Durch hohe Reibung, die während des Wirkverfahrens zustande kommt, und durch starke Richtungsänderung der Wirkfäden sind die Glasfasern als Wirkfäden zerbrechlich. Sie sind auch als Polfäden nicht geeignet. Die Biegesteifigkeit wie bei den polymerbasierten Monofilamenten ist nicht gegeben. Hier müssen die Polyestermaterialien mittelfristig durch biobasierte Alternativen ersetzt werden. Gleichzeitig muss ihr Brandschutz verbessert werden, s. Kapitel 5.4.3.1. Für kreislaufgerechte Verbundelemente (Glasfaser / Glasdruck) und ausgehend von den orientierenden Versuchen mit Glasdruck (Kapitel 5.1.9) ist auch hier eine wissenschaftliche Anschlussfähigkeit gegeben und plant die Frankfurt UAS zusammen mit dem Laserzentrum Hannover Forschungen voranzutreiben.

Weiter müssen konkret die Erfahrungen aus der 3D-Textilproduktion und hier insbesondere die Verformungen der Rovings digital erfasst und parametrisiert werden, um zuletzt für digitalisierte 3D-Planungsprozesse für Planer und Textilhersteller bereit zu stehen. Parallel muss die digitale Erfassung der Porositäten der 3D-Textiloberflächen so rationalisiert werden, dass aus ergänzenden und umfassenden Prüfreiheiten klare Angaben extrahiert werden können. Dies mit dem Ziel, insbesondere beim 3D-Betondruck den optimalen Verbund zwischen unterschiedlichen, marktüblichen Betonrezepturen und passender Textiloberfläche zügig definieren und herstellen zu können – dies auch vor dem Hintergrund der Frage der Reduktion prozessintensiver Beschichtungsverfahren, die im Zweifel zuletzt die Verformbarkeit des Textils einschränken. Zuletzt konnte in 6dTEX der Einfluss der Polfäden in Bezug auf die Stabilität insbesondere der mesogradierten Platte aus kettengewirkten 3D-Abstandsgelegen noch nicht weiterverfolgt werden. Die Frankfurt UAS plant dazu Anschlussforschungen, wie auch zur Verwendung von Abstandsgewirken für Gewölbetechniken und generell zum filigranen Skelettbau mit Beton. Das ITA verfolgt insbesondere das patentierte Thema 3D-Druck auf 2D-Textilien als Massivbauelemente und plant dies um 3D-Textilen zu erweitern.

Aus diesen Gründen haben beide Projektpartner mit der Industrie Kontakt aufgenommen und diskutieren zurzeit auch mögliche Ideen, um eventuell gemeinsame Nachfolgeprojekte zu generieren. Das Ziel ist den Technologiereifegrad des Projekts „6dTEX“ zu erhöhen und ein marktfähiges Produkt zu realisieren.

6.3 (Bau-)praktische Anschlussfähigkeit

Die Ergebnisse der Grundlagenforschung 6dTEX bieten perspektivisch praktische Verwertungsoptionen im Bauwesen. Der Verbund von starrem, festen, gedrucktem Material und weichem, biegbarem, faserbasiertem Material ermöglicht lastflussgerechtes Konstruieren und eine Materialreduktion. Im Bereich der mineralischen Werkstoffe zeigen dies beispielhaft für Primärelemente im Bauwesen die angedachte Gradientenplatte (GRAPLA) oder das Wandelement (YURTE) aus thermisch getrennten Tragstrukturen. Weiter erlaubt die Verbindung der beiden Herstellprozesse die industrielle Realisierung komplexer Halbfertigteile, die vor Ort mit einfachen Mitteln fertiggestellt werden können, s. Beispiel (KAPPEN) Deckenelemente. Im Bereich der nichtmineralischen Werkstoffe und für Sekundärelemente bieten sich beispielhaft Sonnenschutzelemente an, die durch scharnierlose Bewegungsmechanismen einen robusten Beitrag zum Überhitzungsschutz leisten können, bei gleichzeitig kontrollierbarem Eintrag von Tageslicht in den Innenraum.

7 Danksagung

Diese Arbeit und die ihr zugrundeliegende Forschung wäre ohne die außerordentliche Unterstützung der "Zukunft Bau Forschungsförderung" des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) nicht möglich gewesen. Sie wäre auch nicht möglich gewesen ohne die sehr gute Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Hochschulen, dem ITA (RWTH Aachen) und der Frankfurt UAS, dem unermüdlichen Engagement aller beteiligten wissenschaftlichen MitarbeiterInnen, TechnikerInnen, LaborantInnen sowie dem/der StudentInnen, die als Tutoren geholfen haben und die als Studierende mit viel Enthusiasmus an den Design-Build Projekten mitgearbeitet haben. Darüber hinaus wäre die Arbeit nicht möglich gewesen ohne die außergewöhnliche Unterstützung der Stiftung Herr, dem Laserzentrum Hannover, dem ViNN Lab der TH Wildau und der Firmen Heidelberg Materials und Essedea und das Labor für Baustoffe, Bauphysik und Bauwerkserhaltung der Frankfurt UAS.

8 Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

M.A. Biehl, Sascha (Frankfurt University of Applied Sciences)

M.Sc. Dittel, Gözdem (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University)

Univ.-Prof. Prof. h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Gries, Thomas (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University)

M.Sc. Kremer, Marina (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University)

Prof. Dipl.-Ing. Lüling, Claudia (Frankfurt University of Applied Sciences)

B.Eng. Tennert, Roxana (Frankfurt University of Applied Sciences)

Weitere Mitwirkende

Groß, Sabine (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University)

Wolf, Hans-Josef (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University)

Labor für Baustoffe, Bauphysik und Bauwerkserhaltung (Frankfurt University of Applied Sciences)

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Essedea GmbH & Co. KG Lothforster Str. 50, 41849 Wassenberg

Heidelberg Materials, Oberklamweg 6, 69181 Leimen

Stiftung Herr, Lerchesbergring 100, 60598 Frankfurt am Main

Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH), Hollerithallee 8, 30419 Hannover

viNN:lab Technische Hochschule Wildau, Hochschulring 1, 15745 Wildau

Kurzbiographien



Sascha Biehl M.A.

Sascha Biehl ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Frankfurt UAS, Bereich Textiler Leichtbau. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung von Leichtbauteilen im architektonischen Kontext mittels 3D-Druck und technischer 3D-Textilien. Nach Abschluss des Master of Arts war er als Architekt tätig. In der Lehre überführt und erprobt er Forschungsergebnisse in Design Build Projekte mit Studierenden.



Gözdem Dittel M.Sc.

Gözdem Dittel ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University im Bereich „Construction Composites“. Ihre Forschung verbindet Textil- und Bauindustrie mit den Schwerpunkten Integration von Sensorfasern in textilbewehrte Betonstrukturen, Verformbarkeit von Textilbeton und textilbewehrter 3D-Betondruck.



Univ.-Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries

Thomas Gries studierte Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften an der RWTH Aachen. Seit 2001 ist er Direktor des Instituts für Textiltechnik der RWTH. Prof. Gries ist u.a. Mitglied der acatech, der Akademie der Wissenschaften NRW und im Beirat der "ZiTex". Er ist Fachgutachter, Reviewer von Fachzeitschriften, sitzt in Aufsichts- und Beiräten von Wirtschaftsunternehmen und Forschungsinstituten.



Marina Kremer M.Sc.

Marina Kremer ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University im Bereich „Construction Composites“. Ihr Forschungsgebiet verbindet Architektur mit der Textil- und Bauindustrie, wobei der Schwerpunkt auf der Funktionalisierung von Textilfassaden liegt. Sie hat einen M.Sc. in Architektur von der RWTH Aachen University.



Prof. Dipl.-Ing. Claudia Lüling

Claudia Lüling ist Gründungsmitglied des ReSULT (Research Lab for Sustainable Lightweight Building Technology), Mitglied des Expertenrats des Bauministeriums und forscht und lehrt zum Thema Textiler Leichtbau mit Fokus auf 3D-Textilien an der Frankfurt UAS. Ihre Forschungsarbeiten wurden mehrfach ausgezeichnet, zuletzt das FuE Projekt „ge3TEX“ als Finalist der DGNB in der Kategorie Forschung.



Roxana Tennert B.Eng.

Roxana Tennert ist wissenschaftliche Mitarbeiterin des ReSULT (Research Lab for Sustainable Lightweight Building Technology) und Masterstudentin des Allgemeinen Maschinenbaus (M.Eng.), mit dem Schwerpunkt der Produktion an der Frankfurt UAS. Ihr besonderes Interesse und Forschungsgebiet liegt in der interdisziplinären Projektarbeit und Prozessentwicklung im Bereich der additiven Fertigung.

9 Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- Breseghello, L., Naboni, R., 2022. Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural structures. *Additive Manufacturing* 56, 102872. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102872>
- Brameshuber, Wolfgang (Hrsg.), 2006: State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee TC 201-TRC 'Textile Reinforced Concrete'. RILEM report, Bd. 36. Bagnaux.
- Butler, Marko; Mechtcherine, Viktor; Hempel, Simone, 2009: Experimental investigations on the durability of fibre–matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31. Jg. (4), S. 221–231.
- Büttner, Till; Raupach, Michael, 2013: Dauerhaftigkeit polymergetränkter AR-Glas-Bewehrungen in Beton - Materialauswahl und Lebensdauerprognose. *Beton- und Stahlbetonbau*, 108. Jg. (1), S. 22–33.
- Carozzi, Francesca Giulia; Poggi, Carlo, 2015: Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening. *Composites Part B: Engineering*, 70. Jg., S. 215–230.
- Curbach, Manfred; Jesse, Frank, 2009: Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau*, 104. Jg. (1), S. 9–16.
- Concrete Canvas - Concrete Canvas® DE, n.d. URL <https://www.concretcanvas.com/de/concrete-canvas/> (accessed 5.30.23).
- Čuk, M., Bizjak, M., Nuša Kočevar, T., 2020. 3D printing and functionalization of textiles, in: *Proceedings - The Tenth International Symposium GRID 2020*, pp. 499–506. <https://doi.org/10.24867/GRID-2020-p56>
- Curth, A., Darweesh, B., Arja, L., Rael, R., 2020. Advances in 3D printed earth architecture: Onsite prototyping with local materials.
- Deutsche BauZeitschrift, 2019: Shotcrete 3D Printing (SC3DP) – 3D-Drucken von großformatigen Betonbauteilen. *Deutsche BauZeitschrift*, 29. Januar. Zugriff: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Shotcrete_3D_Printing_SC3DP_3D-Drucken_von_grossformatigen-3303061.html [abgerufen am 25. 05. 2023].
- Dielemans, G., Briels, D., Jaugstetter, F., Henke, K., Dörfler, K., 2021. Additive Manufacturing of Thermally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Closed Cellular Structures. *Journal of Facade Design and Engineering* 9, 59–72. <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5418>
- DITF (2015) „Eisbärpavillon“ <https://www.ditf.de/index.php/de/aktuelles/pressemitteilungen/detail/energieeffizientes-textiles-bauen-nach-dem-vorbild-des-eisbaerfells.html>
- Dittel, G., Dringenberg, S., Gries, T. 2023. Through Textile to Reinforced 3D Concrete Printing. In: Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S. (eds) *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient*. fib Symposium 2023. *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 349. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32519-9_110
- Dittel, G., Scheurer, M. Dringenberg, S., Jetton, J.V., Gries, T. (2022) Digital Concrete Production With Vertical Textile Reinforcement. <https://doi.org/10.52825/ocp.v1i.77>
- Eckers, Vera, 2011: Multiskalenanalyse gitterartiger Textilstrukturen für textildbewehrten Beton. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010. *Textiltechnik/ Textile Technology*. Aachen.

- El Kadi, M.; Tysmans, T.; Verbruggen, S.; Vervloet, J.; Munck, M. de; Wastiels, J.; van Hemelrijck, D., 2019: Experimental study and benchmarking of 3D textile reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 104. Jg., S. 103352. Zugriff: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946518306589>.
- El Kadi, M., Tysmans, T., Verbruggen, S., Vervloet, J., De Munck, M., Wastiels, J., Van Hemelrijck, D., 2019. Experimental study and benchmarking of 3D textile reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites* 104, 103352. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103352>
- El Kadi, M., Van Hemelrijck, D., Tysmans, T., 2022. Improving the Anchorage in Textile Reinforced Cement Composites by 3D Spacer Connections: Experimental Study of Flexural and Cracking Behaviors. *J. Compos. Sci.* 6, 357. <https://doi.org/10.3390/jcs6120357>
- Engel, H., Rapson, R., 2007. *Tragsysteme*, 3. Aufl. ed. Hatje Cantz, Ostfildern.
- FuPLATex – Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West [WWW Document], n.d. URL <https://www.dtnw.de/projekt/fuplatex/> (accessed 5.29.23).
- Gleuwitz, F.R., Sivasankarapillai, G., Siqueira, G., Friedrich, C., Laborie, M.-P.G., 2020. Lignin in Bio-Based Liquid Crystalline Network Material with Potential for Direct Ink Writing. *ACS Appl. Bio Mater.* 3, 6049–6058. <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00661>
- Giglio, Andrea; Paoletti, Ingrid; Conti, Giovanni Maria, 2022: Three-Dimensional (3D) Textiles in Architecture and Fashion Design: a Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice. *Applied Composite Materials*, 29. Jg. (1), S. 187–204. Zugriff: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10443-021-09932-9>.
- Glowania, M.; Weichold, O.; Hojczyk, M.; Seide, G.; Gries, T., 2009: Neue Beschichtungsverfahren für PVA-Zement-Composite in textilbewehrtem Beton.
- Gorlachova, M., Mahltig, B., 2021. 3D-printing on textiles – an investigation on adhesion properties of the produced composite materials. *J Polym Res* 28, 207. <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02567-1>
- Gries, T.; Bettermann, I.; Blaurock, C. Bündgens, A.s; Dittel, G.; Emonts, C.; Gesché, V.; Glimpel, N.; Kolloch, M.; Grigat, N.; Löcken, H.; Löwen, A.; Jacobsen, J.-L.; Kimm, M.; Kelbel, H.; Kröger, H.; Kuo, K-C.; Peiner, C.; Sackmann, J.; Schwab, M., 2022: Aachen Technology Overview of 3D Textile Materials and Recent Innovation and Applications. *Applied Composite Materials*, 29. Jg. (1), S. 43–64. Zugriff: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10443-022-10011-w>.
- Grolms, Martin, 2021: Forscher der RWTH Aachen entwickeln 3D Betondruck weiter. *Aachener Zeitung*, 26. Juli. Zugriff: https://www.aachener-zeitung.de/wirtschaft/forscher-der-rwth-aachen-entwickeln-3d-betondruck-weiter_aid-61743595 [abgerufen am 25. 05. 2023].
- Janetzko, Steffen, 2013: *Methodik zur Gestaltung von Bewehrungssystemen für textilbewehrten Beton*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2013. *Textiltechnik / Textile Technology*. Aachen.
- Jesse, Frank; Curbach, Manfred, 2010: Verstärken mit Textilbeton. In: Bergmeister, Konrad; Fingerloos, Frank; Wörner, Johann-Dietrich (Hrsg.): 2010 Beton-Kalender. *Brücken - Betonbau im Wasser*. Beton-Kalender, Bd. 99.2010. Berlin, S. 457–565.
- Kimm, Magdalena Kerstin, 2021: *Ressourceneffizientes und recyclinggerechtes Design von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen*. Dissertation. *Textiltechnik/ Textile Technology*. Düren.
- Kimm, Magdalena Kerstin; Gries, Thomas, 2021: Vom Stahlbeton zum Textilbeton – nur wie? *Betonwerk Fertigteil-Technik*, 24. Juli. Zugriff: https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Vom_Stahlbeton_zum_Textilbeton_nur_wie_-3670472.html [abgerufen am 6. 06. 2023].

Kloft, H., Hack, N.; Mainka, J., Brohmann, L., Herrmann, E., Ledderose, L., Lowke, D.: Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete-3-D- Printing-Verfahren in Bautechnik. 96(12), S. 929-938 (2019)

Knippers, J., Körner, A., 2019. 1.4 Bio-inspired elasticity, in: New MOVE. De Gruyter, pp. 28–29.
<https://doi.org/10.1515/9783035613629-008>

Kovaleva, D., Nistler, M., Blandini, L., Sobek, W., Verl, A., 2022. Rezyklierbare Sandschalungen – Auf dem Weg zur Kreislaufproduktion leichter Betonbauteile. Beton und Stahlbetonbau 117, 333–342.
<https://doi.org/10.1002/best.202200009>

Kulas, Christian; Hegger, Josef, 2013: Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. Lehrstuhl und Institut für Massivbau.

Lee, Jung Jin; Song, Jiyeon; Kim, Hodong, 2014: Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution. *Fibers and Polymers*, 15. Jg. (11), S. 2329–2334. Zugriff:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12221-014-2329-7>.

Leone, Marianovella; Aiello, Maria Antonietta; Balsamo, Alberto; Carozzi, Francesca Giulia; Ceroni, Francesca; Corradi, Marco; Gams, Matija; Garbin, Enrico; Gattesco, Natalino; Krajewski, Piotr; Mazzotti, Claudio; Oliveira, Daniel; Papanicolaou, Catherine; Ranocchiai, Giovanna; Roscini, Francesca; Saenger, Dorothea, 2017: Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate. *Composites Part B: Engineering*, 127. Jg., S. 196–214. Zugriff:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816330724>.

Lüling, C., Bauder, H.-J., Beuscher, J., Maier, A., Nagel, D., Rucker-Gramm, P., Schneider, J., Weilandt, A., Weimer, T., 2021. Textiler Leichtbau. Textiler Leichtbau – Gewebt, gewirkt, geschäumt: 3D Textilien für die Gebäudehülle (ge3TEX), BBSR-Online-Publikation 18/2021.

Lüling, C., Rucker-Gramm, P., Weilandt, A., Beuscher, J., Nagel, D., Schneider, J., Maier, A., Bauder, H.-J., Weimer, T., 2022. Advanced 3D Textile Applications for the Building Envelope. *Appl Compos Mater* 29, 343–356. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09941-8>

Mader, Edith; Plonka, Rosemarie; Schiek, Michael; Hempel, Rainer, 2004: Coatings on Alkali-Resistant Glass Fibres for the Improvement of Concrete. *Journal of Industrial Textiles*, 33. Jg. (3), S. 191–207.

Mai, I., Brohmann, L., Freund, N., Gantner, S., Kloft, H., Lowke, D., Hack, N., 2021. Large Particle 3D Concrete Printing—A Green and Viable Solution. *Materials* 14, 6125. <https://doi.org/10.3390/ma14206125>

Malengier, B., Hertleer, C., Cardon, L., Van Langenhove, L., 2018. 3D Printing on Textiles: Testing of Adhesion. *J Fashion Technol Textile Eng* 4. <https://doi.org/10.4172/2329-9568.S4-013>

Mechtcherine, V., Otto, J., Will, F., Markin, V., Schröfl, C., Nerella, V.N., Krause, M., Dorn, C., Näther, M., 2020. CONPrint3D-Ultralight - Herstellung monolithischer, tragender Wandkonstruktionen mit sehr hoher Wärmedämmung durch schalungsfreie Formung von Schaumbeton, Forschungsinitiative Zukunft Bau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

N.N., 2011: Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften, (14125), 05.2011.

Nadiv, Roey; Peled, Alva; Mechtcherine, Viktor; Hempel, Simone; Schroefl, Christof, 2017: Micro- and nanoparticle mineral coating for enhanced properties of carbon multifilament yarn cement-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 111. Jg., S. 179–189. Zugriff:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816315499>.

Naldoni, L., 2016. Volatile ground. Master Thesis, Uni Mailand

-
- Narula, A., Pastore, C.M., Schmelzeisen, D., El Basri, S., Schenk, J., Shajoo, S., 2018. Effect of knit and print parameters on peel strength of hybrid 3-D printed textiles. *Journal of Textiles and Fibrous Materials* 1, 251522111774925. <https://doi.org/10.1177/2515221117749251>
- Orlowsky, J., 2005: Durability modelling of glass fibre reinforcement in cementitious environment. *Materials and Structures*, 38. Jg. (276), S. 155–162.
- Pei, E., Shen, J., Watling, J., 2015. Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications. *Rapid Prototyping Journal* 21, 556–571. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0126>
- Peled, Alva; Bentur, Arnon; Mobasher, Barzin, 2017: *Textile reinforced concrete*. Boca Raton.
- Popescu, D., Amza, C.G., 2022. 3D Printing onto Textiles: A Systematic Analysis of the Adhesion Studies. *3D Printing and Additive Manufacturing* 3dp.2022.0100. <https://doi.org/10.1089/3dp.2022.0100>
- Preinstorfer, Philipp, 2020: *Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton*. Wien.
- Ramsgaard Thomsen, M., Tamke, M., Sparre-Petersen, M., Fabritius Buchwald, E., Hnídková, S., 2020. Silica - A circular material paradigm by 3D printing recycled glass. Presented at the eCAADe 2020: Anthropologic : Architecture and Fabrication in the cognitive age, Berlin, Germany, pp. 613–622. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2020.2.613>
- Reichenbach, S., Preinstorfer, P., Hammerl, M., Kromoser, B., 2021. A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe. *Construction and Building Materials* 307, 124946. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124946>
- Roye, Andreas, 2007: *Hochleistungs-doppelraschelprozess für Textilbetonanwendungen*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2007. *Textiltechnik*. Aachen.
- Sasi, E.A., Peled, A., 2015. Three dimensional (3D) fabrics as reinforcements for cement-based composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 74, 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.008>
- Schätzke, C., 2015. *Stabnetze aus Textilbeton*. Dissertation RWTH Aachen
- Scheffler, Christina, 2010: *Zur Beurteilung von AR-Glasfasern in alkalischer Umgebung*.
- Scheurer, Martin, o.A.: DFG SFB/TRR 280, Teilprojekt B02: Untersuchung neuer Material- und Technologieansätze zur kontinuierlichen Inline-Umformung und -Konsolidierung textiler Bewehrungen. Zugriff: <https://www.sfbtrr280.de/media/>.
- Schumacher, M., Vogt, M.-M., Cordón Krumme, L.A., 2019. *New move: Architektur in Bewegung - Neue Dynamische Komponenten Und Bauteile*, 1st ed. Birkhauser, Boston.
- Talke, D., Henke, K., Weger, D., 2019. *Selective Cement Activation (SCA) – new possibilities for additive manufacturing in construction*.
- Turhan, G.D., Afsar, S., Ozel, B., Doyuran, A., Varinlioglu, G., Bengisu, M., 2022. 3D Printing with Bacterial Cellulose-Based Bioactive Composites for Design Applications. Presented at the eCAADe 2022: Co-creating the Future - Inclusion in and through Design, Ghent, Belgium, pp. 77–84. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.1.077>
- Verstärkungsfasern - Einführung und Überblick – R_G Wiki [WWW Document], n.d. URL https://www.r-g.de/wiki/Verst%C3%A4rkungsfasern_-_Einf%C3%BChrung_und_%C3%9Cberblick (accessed 6.17.23).
- Vieres, L., Kraye, J., Wack, R., 2022. FungiFacturing: Pilzwerkstoffe 3D-gedruckt. *Biospektrum* 28, 768–768. <https://doi.org/10.1007/s12268-022-1864-9>
- Von Witzendorff, P., Pohl, L., Suttman, O., Heinrich, P., Heinrich, A., Zander, J., Bragard, H., Kaieler, S., 2018. Additive manufacturing of glass: CO₂-Laser glass deposition printing. *Procedia CIRP* 74, 272–275. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.109>
-

WILHELM KNEITZ Solutions in Textile GmbH, o.A.: Herstellerangaben Solutions in Textile GmbH. Zugriff: <https://solutions-in-textile.com/>.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1, Übersicht 3D-Druckverfahren, gängige Verfahren gekennzeichnet mit stärkerem Rand : FDM (Fused Deposition Modeling), LDM (Liquid Deposition Modeling), DOD (Drop on Demand), MJM (Multi Jet Modeling / PJ = Poly Jet,) NPJ (Nano Particle Jetting) LENS (Laser Engineered Net Shaping) EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing), WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), SLA (Stereolithography), DLP (Digital Light Processing / Digital Light Projection), CDLP (Continous Digital Light Projection, BJ (Binder Jetting, MJF (Multi Jet Fusion) SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting) EMB (Electron Beam Melting) 10
- Abbildung 2, 3D-Textiltechniken im Produktbereich Zeile 3, Textilmaschinen: WS, Webstuhl; GWM, Greiferwebmaschine; SNW, Nadel-WS; SSW, Schmaler Shuttle-WS; 3D-FM, 3D-Flechtmaschine; RFM, Radialflechtmaschine; FSM, Flachstrickmaschine; RSM; Rundstrickmaschine; RM, Doppelraschelmaschine; TKWM, Trikot-Kettenwirkmaschine; EFWM, Einzelfilamentwickelmaschine; USSM; Ultraschallschweißmaschine Zeile 4, Materialgruppen: S, synthetisch; B, biologisch; M, mineralisch Zeile 5, Materialien: A, Aramid; BF, Basaltfasern; CF, Carbonfasern; CN, Chirurgicaler Nähgarn; CO, Baumwolle; GF, Glasfasern; PA, Polyamid; PES, Polyester; PP, Polypropylen; K, Keramik; SE, Seide; WO, Wolle 11
- Abbildung 3, verschiedene Produkte aus 3D-Textilien als Teil des Stands der Forschung: a/d Verzweigungsstent (3D-Geflechte); b synthetische Gefäßtransplantate / Orthesen (3D-Abstandsgewirke); c, Schuhoberteile(3D-Flachstricken);, f, Sport-BHs (3D-Großrundstricken, 3D-Abstandsgewirke); g, 6G-Antennen (3D-Wirk-/3D-Gitterstrukturen); h, Autositzbezug (3D-Großrundstricken); i, Verstärkung von aufblasbaren Produkten (3D-Gewebe) 13
- Abbildung 4, links: Julia Körner, Stratasys (PolyJet Druck: Poly-Jet Photopolymere; rechts: 3D-Druck auf 2D-Textilien (Technik KARL MAYER Holding GmbH & Co. KG):3D- Textilmaschine mit direkt angeschlossenem 3D-Druckverfahren 13
- Abbildung 5, Übersicht Textile Gebilde, Muster und Bauanwendungen 17
- Abbildung 6, links: Küchenplatte aus kettengewirkten 3D-Abstandsgelegen, rechts: Oberflächennahe Positionierung des 3D-Textils 17
- Abbildung 7, Möglichkeiten zur Verbesserung des Verbundes im Textilbetonbau (Kulas/Hegger 2013) 19
- Abbildung 8, Integration von Textiler Bewehrung im 3D-Betondruckprozess 19
- Abbildung 9, Faktoren, die die Haftung zwischen 3D gedruckten Polymeren und 2D-Textilien beeinflussen 22
- Abbildung 10, 6dTEX Methodik 24
- Abbildung 11, Alkalibeständigkeit Basaltfasern: links: Waage Ermittlung der Festigkeit nach DIN EN ISO 5079, Mitte gealterte/ungealterte Faser, rechts: Prüfmaschine mit Bereich Faserprüfung (orange) 30
- Abbildung 12, Prinzipdarstellung zum Druck auf und in 3D-Textilien, Prozessparameter 31
- Abbildung 13, Prinzip Herstellung kettengewirkter Biaxialgelege 33
- Abbildung 14, Oberflächenstrukturen kettengewirkter Biaxialgelege aus PES-Rovings, oben: Axonometrie, unten: jeweils Schnitte, links: dichte Variante, Schussfäden 2.200 tex, Stehfäden 2.200 tex; rechts: weiteste Variante Schussfäden 220 tex, Stehfäden 1.100 tex, Düsendurchmesser Druckmaterial = 0,4 mm; jeweils darunter ein Schnitt durch die Ebenen der Steh- und Schussfäden 33
- Abbildung 15, Oberflächenstrukturen kettengewirkter Biaxialgelege aus Glas-Rovings (Stehfasern PES), links: dichte Variante, Schussfäden 2.400 tex, Stehfäden 2.400 tex; rechts: weiteste Variante Schussfäden 320 tex,

Stehfäden 600 tex, Düsendurchmesser Druckmaterial = 8 mm; jeweils darunter ein Schnitt durch die Ebenen der Steh- und Schussfäden	34
Abbildung 16, Prinzip Herstellung kettengewirkter 3D Biaxialgelege	35
Abbildung 17, links: Optionen zur 3D-Textilbefestigung bei FDM-Druck, rechts: erste Versuche mit Klemmklammern	36
Abbildung 18, viergeteilter, offener Spannrahmen für 6dTEX zum Einspannen von Flächentextilien und 3D-Textilien	37
Abbildung 19, FDM-Druck, wesentliche 3D-Druck Prozessparameter zur Verbesserung der Haftung zwischen Textil und Druckmaterial, von links nach rechts: Infill, Druckgeschwindigkeit, Z-Offset und Drucktemperatur	37
Abbildung 20, LDM-Druck, wesentliche 3D-Druck Prozessparameter zur Verbesserung der Haftung zwischen Textil und Druckmaterial, von links nach rechts: Infill, Druckgeschwindigkeit, Z-Offset und Rezeptur Druckmaterial	38
Abbildung 21, links: Definition des Zd-Werts; rechts: Extruder Bewegung: Start-G-Code, 1) Leveln auf der Bauplattform, 2) Standard Start-G-Code: Purge Line vorne, links, außerhalb des Bauraums 3), Neue G-Code Zeilen: s. blaue Linien in der Grafik	38
Abbildung 22, links: elektrooptische Erfassung der textilen Oberfläche; rechts: Vorbereitung der Auswertung mit Photoshop und ImageJ	39
Abbildung 23, Versuchsaufbau Haftzugtests 3D-Druck auf 2D-Textil, links: Kraftmessaufnehmer von 1kN; rechts: Kraftmessaufnehmer von 20 kN	40
Abbildung 24, Haftzugtests, links: Prüfkörpergeometrie Druckstempel mit einem Durchmesser von 50 mm, Klemmfläche des linken Stempels beträgt 1575 mm ² , Basehöhe 5 mm (rechter Stempel 1687 mm ² / 2,5 mm); rechts: Druckstempel mit einem Durchmesser von 25 mm, die Klemmfläche des linken Stempels beträgt 300 mm ² / Base 5mm (rechter Stempel 350 mm ² / 2,5 mm)	40
Abbildung 25, Herausforderungen während der Versuchsdurchführung, links: Riss um Schraubenloch, Mitte: herausgezogener Prüfkörper nach dem Versuch, rechts: Aufnahme während der Versuchsdurchführung	41
Abbildung 26, links: Versuchsaufbau mit angepasster Klemmplatte, rechts: Stempelgeometrie ohne und mit Verstärkungsrippen	42
Abbildung 27, Versuchsaufbau Haftzugversuche Betondruck	42
Abbildung 28, links: Stirnfläche des Stempels mit Klebefläche, rechts: Betonoberfläche mit Kleberückständen sowie eine geschliffene Oberfläche	43
Abbildung 29 Haftzug Probekörper mit überstehendem Beton	43
Abbildung 30, links: 3-Punkt-Biegeversuch mit eingespanntem Kunststoff auf 2D-Textil Probekörper, rechts: Kunststoff auf 3D-Textil, Probe ohne Zusammendrücken des Textils rutscht von Auflagern	44
Abbildung 31, links: Vliesunterlage zum Ausgleich von Unebenheiten; rechts: Einfluss der Betonoberfläche auf die Versuchsdurchführung	45
Abbildung 32, oben: Prüfnummer 221006_4BZ_1.1, Beton fließt nicht durch das Textil hindurch; Mitte: Beton fließt durch das Textil, Betonrippen wurden an den Auflagerstellen entfernt; unten: Das Textil wird vom Beton eingeschlossen und kann auf den Auflagerstellen nicht entfernt werden	45
Abbildung 33, Aufbau des Biegezugversuchs 3D-Textil	46
Abbildung 34, Position der Mikroskopie am Kunststoffstempel, schematisch	46
Abbildung 35, links: 3D-Druck mit PA 6.6 Nylon Material auf Nylongewebe, rechts: Beispiel Waringeffekt	48

Abbildung 36, links: 3D-Druck mit PETG Flammenschutzmaterial auf PES Textil; rechts: 3D-Druck mit PETG Rezyklat auf PES-Textil	49
Abbildung 37, links: 3D-Druck mit PP-Druckmaterial auf PP-Textil, rechts: Unterseite des bedruckten Textils mit sichtbarem Druckmaterial	49
Abbildung 38, Auswertung orientierende Vorversuche mit PA-, PETG- und PP-Druckmaterialien auf Flächentextilien aus derselben Werkstoffgruppe	50
Abbildung 39, Versuchskörper (Prüfreihe), links: PETG Flammenschutz auf PET-Textil (220105_HZ_1.1-3); Mitte: rPETG auf PET-Textil (220120_HZ_1.1-3), rechts: PP auf PP-Textil (220421_HZ_1.1-3)	51
Abbildung 40, Proben nach der Haftzugprüfung, links: PETG Flammenschutz auf PET-Textil (220105_HZ_1.1);Mitte: rPETG auf PET-Textil (220120_HZ_1.1), rechts: PP auf PP-Textil (220421_HZ_1.2)	52
Abbildung 41, Haftzugversuch, Kraft-Dehnungsdiagramm zu den 3D-Druck Prüfkörpern aus PETG Flammenschutz (Textil PET), rPETG Recyclat (Textil PET) sowie PP (Textil PP)	53
Abbildung 42, Planung und Aufmaß eines kettengewirkten Abstandsgewirkes, Stehfäden: AR Glas, Schussfäden: PES	54
Abbildung 43, links und Mitte: rPETG-Druck, Düse = 0,4 mm auf Textil PET.2D.1.1, Druckversuch DP220210_DP_1.3; rechts: rPETG-Druck, Düse = 0,8 mm auf Textil PET.2D.1.1.	55
Abbildung 44, links: Aufsicht und rechts Untersicht des finalen T-Körpers auf dem Textil PET.2D.1.3	55
Abbildung 45, Versuchskörper (Prüfreihe) links: finaler Prüfkörper; Mitte: Textil PET.2D.1.1 (Prüfreihe 220617_HZ_1.1-3) und rechts: Textil: PET.2D.1.3 (Prüfreihe 220630_HZ_1.1-3), beide Ansicht von der Stehfadenseite, bedruckt von der Schussfadenseite	56
Abbildung 46, Textil PET.2D.1.1 (Prüfreihe 220617_HZ_1.1-3) (oben) Sicht der Proben 1-3 von der Stehfadenseite (unten) Proben 1-3 nach dem Versuch	57
Abbildung 47, Textil PET.2D.1.3 (Prüfreihe 220630_HZ_1.1-3) (Oben) Sicht der Proben 1-3 von der Stehfadenseite (Unten) Proben 1-3 nach dem Versuch	57
Abbildung 48, Haftzugversuche, Kraft-Dehnungsdiagramm zu den 3D-Druck Prüfkörpern aus rPETG-Recyclat auf projektspezifische, kettengewirkte PES-Textilien (Stehfäden Glas)	58
Abbildung 49, links: 3D-Druckprozess Biegezugprüfkörper auf PET.2D.1.1, rechts: Nahaufnahme der Probe 220604_3BZ_1.2 mit Rissen auf der Unterseite im Biegestempelbereich	59
Abbildung 50, seitliche Ansicht der Kunststoff-Biegezugprüfkörper nach den Biegezugversuchen	59
Abbildung 51, Biegezugversuche, 3D-Druck Prüfkörper aus rPETG-Recyclat auf projektspezifische, kettengewirkte PES-Textilien (Stehfäden Glas), Mittelwerte aller Prüfreihe	60
Abbildung 52, Glasdruck (Direct Energy Deposition) auf Glastextilien, Versuchsreihe in Kooperation mit dem Laserzentrum Hannover	61
Abbildung 53, oben: Versuch Beton"druck" auf Basalt-Drehergewebe (ge3TEX); rechts: Unterseite Basalttextil; unten: dichtes, kettengewirktes Biaxialgelege aus Glas und Beton"druck"körper	62
Abbildung 54, Planung kettengewirkter Biaxialgelege aus Glas in unterschiedlichen Dichten (LiS = Lichte zwischen den Schussfäden, LiST = Lichte zwischen den Stehfäden; manuelles Aufmaß)	63
Abbildung 55, Kettengewirkte Biaxialgelege aus 2.400 tex Glasrovings, neun Oberflächen, Aufsicht Schussfadenseite; Untersicht nach Beton"druck", blau gekennzeichnet Favoriten der Schältestauswertung (Scht = Schältest)	64
Abbildung 56, links: Delta WASP 40100 Betondruck auf eingespanntem 2D-Textil; Mitte und rechts: Beschichtung	65

Abbildung 57, Haftzugversuche Prüfnummer 220708_HZ_3.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor und rechts nach dem Versuch	69
Abbildung 58, Haftzugversuche Prüfnummer 220714_HZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor und rechts nach dem Versuch	69
Abbildung 59, Haftzugversuche Prüfnummer 220719_HZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	70
Abbildung 60, Haftzugversuche Prüfnummer 220802_HZ_4.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	70
Abbildung 61, Haftzugversuche Prüfnummer 220708_HZ_2.1: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite (entspricht dem späteren Druck auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	70
Abbildung 62, Vergleich Haftzugversuche Betondruck auf 2D-Textil, links AR-Glas.2D.1.2 Porigkeit Textil = 18 %, rechts AR-Glas.2D.2.2, Porigkeit = 44%	71
Abbildung 63, Haftzugversuche Prüfnummer 220802_HZ_2.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	71
Abbildung 64, Haftzugversuche Prüfnummer 220802_HZ_3.1: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	71
Abbildung 65, Haftzugversuche Prüfnummer 220809_HZ_2.1: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	72
Abbildung 66, Haftzugversuche 220804_HZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	72
Abbildung 67, Haftzugversuche Prüfnummer 220811_HZ_2.3: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	72
Abbildung 68, Haftzugversuche Prüfnummer 220805_HZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite (entspricht dem späteren Druck von innen auf die Deckflächen), links vor rechts nach dem Versuch	73
Abbildung 69, Vergleich Textil AR-Glas.2D.2.2: Kraft-Dehnungsdiagramm links: Prüfnummern 220714_HZ_1.1-3 (Druck auf das Textil / Schussfadenseite); rechts: Prüfnummern 220802_HZ 3.1-3 (Druck in das Textil / Stehfadenseite)	73
Abbildung 70, links, Mitte: Biegezugprüfkörper 221013_4BZ_2.1,; rechts 230201_4BZ_1.1-1.3 mit ebenen Auflagerflächen	76
Abbildung 71, Serie 2 Biegezugversuche Prüfnummer 220930_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite	76
Abbildung 72, Serie 8 Biegezugversuche Prüfnummer 221005_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite	76
Abbildung 73, Serie 3 Biegezugversuche Prüfnummer 221122_4BZ_2.1: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite	76
Abbildung 74, Serie 4 Textil Prüfnummer 221018_4BZ_2.1: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite	77
Abbildung 75, Serie 5 Textil Prüfnummer 221011_4BZ_1.2	77
Abbildung 76, Serie 6 Biegezugversuche Prüfnummer 220819_4BZ_1.1: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite	77
Abbildung 77, Serie 7 Biegezugversuche Prüfnummer 221020_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Schussfadenseite	78

Abbildung 78, Biegezugprüfungen, Mittelwerte der Prüfnummern, Druck auf die Schussfadenseite, Bestwerte Serie 2 und 3	78
Abbildung 79, Serie 9, Biegezugversuche Prüfnummer 221013_4BZ_2.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite © ITA / Frankfurt UAS	79
Abbildung 80, Serie 10, Biegezugversuche Prüfnummer 221006_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite	79
Abbildung 81, Serie 11 Biegezugversuche Prüfnummer 221012_4BZ_1.1: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite	79
Abbildung 82, Serie 12 Biegezugversuche Prüfnummer 221018_4BZ_1.1: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite	80
Serie 12, (Textil 2D.3.2, Porigkeit 48 %, Betonrippen nicht entfernt): Bei den Prüfnummern 221013_4BZ_1.1, 221018_4BZ_1.1-2 liegen die Maximalspannungen zwischen 6,16 und 7,25 MPa mit einer Standardabweichung von 0,45 MPa. Die Proben brechen zwischen 0,99 und 3,07 mm Verformung (Abbildung 82). Abbildung 83, Serie 13 Biegezugversuche Prüfnummer 230201_4BZ_1.2: 3D-Betondruck auf die Stehfadenseite	80
Abbildung 84, Biegezugprüfungen, Mittelwerte der Prüfnummern, Druck auf Stehfäden, in das Textil, Bestwerte Serie 10 (die Linie ohne Textil verläuft nur bis zu einer Verformung von 1 mm und ist in der Grafik ebenfalls enthalten aber kaum sichtbar)	81
Abbildung 85, marktübliche Abstandsgewirke, links: Oberfläche A, rechts: Oberfläche B	82
Abbildung 86, links: PET 3D-Textil mit oberflächenrelevanten Parametern; rechts: PET 3D-Textil, Teilbereich mit nur einseitiger Decklage	82
Abbildung 87, links: Textil PET.3D. 11 zum Drucken in das Textil; rechts: Textil PET.3D.13 zum Drucken in das Textil	83
Abbildung 88, Analyse des Porenanteils der Oberflächen der kettengewirkten Abstandsgewebe, fotografisch-digitales Verfahren im Vergleich zu manueller Auswertung	84
Abbildung 89, Schnitt durch 3D-Druck PET auf 3D-Textil PES, Verzahnung zwischen Textil- und Druckmaterial	85
Abbildung 90, links: Druck auf eine Deckfläche von außen, Einspannung biaxial; rechts: Druck auf die Deckfläche von innen, Einspannung monoaxial	87
Abbildung 91, Versuchsablauf Haftzugprüfung PES/PET 3D-Druck auf 3D-Textil: (A) vor dem ersten Maximum, (B) erstes Maximum, (C) zweites Maximum	87
Abbildung 92, Haftzugprüfung PES/PET 3D-Druck auf 3D-Textilien Übersicht der Prüfnummern (links) vor und (rechts) nach der Prüfung	88
Abbildung 93, Haftzugprüfung 3D-Druck rPETG auf 3D-PES-Textil, Kraft-Weg-Diagramm; von links nach rechts Serie 1 bis 4	89
Abbildung 94, Haftzugprüfung PES/PET 3D-Druck in 3D-Textilien, Prüfnummer 221004_HZ_1.1, (links) vor und (rechts) nach der Prüfung	90
Abbildung 95, Haftzugprüfung PES/PET 3D-Textil (Stehfaden 1.100 tex, Schuss 1.100 tex, LiS = 0,6 mm, LiSteh = 2,4 mm) Kraft-Weg-Diagramm; links: Druck auf Stehfadenseite (IN das Textil); rechts: Druck auf Schussfadenseite (AUF das Textil)	90
Abbildung 96, Schematische Darstellung Druck in das Textil (links) und Druck auf das Textil (rechts)	91

Abbildung 97, PET 3D-Textil Biegezugprüfungen der Prüfnummern mit den höchsten Biegezugspannungen	92
Abbildung 98, Spannungs-Dehnungsdiagramm 3D-Textil Mittelwerte der Serien 1-4	92
Abbildung 99, Mikroskopieaufnahme mit sichtbaren StF (Stehfäden), ScF (Schussfäden) und Polfäden der Prüfnummer 220824_3BZ_2.1	93
Abbildung 100, Endstadium eines Haftzugversuchs, nur noch die Polfäden befinden sich am Stempel	94
Abbildung 101, Mikroskopieaufnahme, links: Vergrößerung des Ausschnitts, rechts: sichtbare Verbindung der Filamente mit Stempel	94
Abbildung 102, Resttextilien ITA, kettengewirkte Abstandsgelege, links: von oben nach unten Textil 0.05, Textil 0.08 und Textil 0.11; rechts: begrenzendende Wirkung der Polfäden im Zwischenraum des Abstandstextils, © Frankfurt UAS	95
Abbildung 103, kettengewirkte Abstandsgelege aus AR-Glas (Steh- und Schussfäden) und PES (Wirk- und Polfäden)	96
Abbildung 104, Analyse des Porenanteils der Oberflächen der kettengewirkten Abstandsgelege aus AR-Glas, alle Stehfäden 1.200 tex	97
Abbildung 105, Beschichtung der 3D-AR-Glas-Textilien, © Frankfurt UAS	98
Abbildung 106, Seitenansicht des in das Textil eingedrungenen Betons	98
Abbildung 107, Ansicht eines Haftzugkörpers	98
Abbildung 108, Prüfkörper (oben) während und (unten) nach der Versuchsdurchführung, Serie 1. Textil Beschichtung Epoxid/Sand	100
Abbildung 109, Prüfkörper (oben) während und (unten) nach der Versuchsdurchführung, Serie 2, Textil ohne Beschichtung, © ITA	101
Abbildung 110, Haftzugversuche Beton auf Textil GLAS.3D.03, Spannungs-Verformungsdiagramm, links: Serie 1 mit Epoxid und Sand-Beschichtung, rechts: Serie 2 ohne Beschichtung	101
Abbildung 111, Biegezugversuch Druck auf Schussfäden, links: auf das Textil, Ansicht von oben, Mitte: Ansicht von unten, rechts: Ansicht von der Seite, © ITA	102
Abbildung 112, Biegezugversuch Druck auf Stehfäden, in das Textil (links), Serie 6, Ansicht von Oben, (Mitte) Ansicht von unten, (rechts) Ansicht von der Seite (die Restflächen des 3D-Textils seitlich wurden für den Versuch abgeschnitten)	103
Abbildung 113, Biegezug Spannungs-/ Verformungsdiagramm der Mittelwerte der Prüfserien GLAS.3D.01-05	103
Abbildung 114, erste Skizzen zu Druckoptionen: links: 3D-Druck auf das 3D-Textil, rechts: 3D-Druck in das 3D-Textil	105
Abbildung 115, Textil PET.3D.19, offene Streifenstruktur: Beim Verschieben der Decklagen zueinander ändern die Polfäden ihre Lage von senkrecht zu parallel zu den Decklagen und mindern Lichteinfall und Blendung	108
Abbildung 116, Konzept Druckstrukturen zu den Themen Biegen und Klappen © Frankfurt UAS	108
Abbildung 117, Druckversuche zum Thema Biegen und Klappen	109
Abbildung 118, links potentielle Tragstrukturen; rechts: 3D-gedruckte Fügung, zusammengesetzt ergibt sich ein Träger	110

Abbildung 119, Orientierende Versuche mit neuer Betonrezeptur für robotergesteuerten 3D-Druck: links: 2D-Textil, rechts: 3D-Textil	111
Abbildung 120, Mesogradierte Platte (Gradientensandwich)	112
Abbildung 121, links oben: Betondruck auf 3D-Gewirke mit sichtbaren Drahteinschnitten innerhalb der Schneieschalung noch vor der Entfernung des überflüssigen Betonmaterials; Mitte oben: Entfernen der Schneideschalung, sichtbar Betondruck mit von links nach rechts größer werdenden Einschnitten; rechts oben: liegender Bogen; unten: aufgestellter Bogen	113
Abbildung 122, oben: BigRep One Drucker am VINN:Lab der TH Wildau; links Drucker gesamt; Mitte: Druckkopf, rechts Drucker und eingelegtes 3D-Gewirke; unten Warpingeffekte, links 3D-Gewirke, rechts kettengewirktes Abstandsgelege Nr. PET.3D.07	114
Abbildung 123, Druckversuch SHIFT, Fehlfunktion des Druckers, Druckkopf zerstört das Textil	115
Abbildung 124, SHIFT, links Kalibrierung des Druckers über Druckschablone; rechts Drucksituation	116
Abbildung 125, SHIFT auf dem Festival der Internationale Bauausstellung (IBA) Stuttgart, Sonnenschutzelement aus kettengewirkten Abstandsgelegen aus PES und aufgedruckten Verstärkungselementen aus rPETG auf 50 % der geschlosseneren Textilflächen sowie Rahmen zur Übertragung der Schiebkräfte	117
Abbildung 126, Ausstellung Internationale Bauausstellung Stuttgart (IBA Stuttgart), 6dTEX Demonstratoren SHIFT und BULG	118
Abbildung 127, BULG, Studentisches DesignBuild Projekt, StudentInnen des Master of Advanced Architecture (Frankfurt University), M. Amini, A. S. Aviles Orellana, F. Biabani, Y. Cho, W. R. Costa, S. A. Iriarte Dorado, A. E. F. Khalifa, P. Loungoon, A. Movahedi Rad, O. Oreskovic, F. Rezende Muniz, H.-Y. Yeh, L. D. Franco Afonso	119
Abbildung 128, BOW, links oben: Drucklayout für zwei Elemente und für den Druck im BigRep; rechts oben: drei aufgespannte Elemente ergeben ein Sonnenschutzmodul; unten Sonnenschutz auf dem IBA Festival in Stuttgart Backnang, Studentisches DesignBuild Projekt, Studenten des Master of Advanced Architecture (Frankfurt University), T. Breznik, I.M. Caroli, S.H.A. Daffa Allah, A. Escalante Lopezvilla, A. Habib, G. Himci, O.A.M.A. Ibrahim, O. Mazahery Dehkordi, P. Richers, M. Santillan Astaizaran, R. Taljbini, A. Vaysert; Leitung: LA Sascha Biehl	120
Abbildung 129, Drucken von Bauteilen der Größe 160 cm x ca 60 cmm (YURTE) und 240 cm x ca. 60 cm (KAPPEN)DECKE, © Frankfurt UAS	121
Abbildung 130, links: Ansicht Rückseite, sichtbar ist der in das Textil eingedrungene Beton; rechts oben: Test zum Versäubern der Enden mit Drahtschnitt; unten rechts: Einwirkung des Gewichts des Betons auf das gespannte Textil	122
Abbildung 131, beidseitig bedrucktes, kettengewirktes AR-Glas Gelege; Enden der Druckkörper noch ungeschnitten	122
Abbildung 132, Vergleich der Biegezugfestigkeiten, Prüfkörper 3D-Betondruck (Fertigmischung) ohne Textil im Vergleich mit Verbundelement (3D-bedrucktes kettengewirktes Abstandsgelege)	123
Abbildung 133, links: einseitig bedrucktes, kettengewirktes AR-Glas-Gelege, Druckstruktur unten; rechts: Druckstruktur oben	124
Abbildung 134, Übersicht Bestand kettengewirkte Abstandstextilen für Prüfungen und Demonstratoren	125
Abbildung 135, links: Kantentests Nr 1-4 : Beflammungspunkt Gelege; in der 12. Sekunde; mit Beton; rechts: Flächentests nr. 4-6: 22. Sekunde Gelege brennt; Rückseite Beton; Vorderseite Beton und verbrannte Probe, © Prüfinstitut Hoch	125

Abbildung 136, f_c -Werte für einen außenliegenden Sonnenschutz bei einfacher Doppelverglasung mit Luftfüllung	126
Abbildung 137, 3D-Druck durch 2D-Textilien	128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1, Auswahl derzeit erhältlicher Drucker für verschiedene Materialien	15
Tabelle 2, Auswertung der Materialkombinationen von Forschungsstudien zu 3D-Druck auf 2D-Textil	21
Tabelle 3, Maschinenparameter kettengewirkte 2D Biaxialgelege	32
Tabelle 4, Maschinenparameter kettengewirkter 3D-Abstandsgelege	35
Tabelle 5, Druckparameter rPETG-Druckmaterial	53
Tabelle 6, Messung des Porenanteils in der Oberfläche 2D-kettengewirkter Glasgelege: Photographische Erfassung und digitale Auswertung	64
Tabelle 7, Prüfreihe Haftzugversuche Beton auf die Schussfadenseite des 2D-Glastextils	68
Tabelle 8, Prüfreihe Haftzugversuche Beton auf die Stehfadenseite des 2D-Glastextils	68
Tabelle 9, Prüfreihe Biegezugversuche Beton auf die Schussfadenseite des 2D-Glastextils	74
Tabelle 10, Prüfreihe Biegezugversuche Beton auf die Stehfadenseite des 2D-Glastextils	75
Tabelle 11, Haftzugversuche Prüfreihe rPETG Druck auf und in 3D-PES Textilien:	86
Tabelle 12, Biegezugversuche Prüfreihe rPETG-Druck auf 3D-PES-Textilien in Schussfadenrichtung einer Deckfläche	86
Tabelle 13, Biegezugversuche Prüfreihe Betondruck auf 3D-Glastextil in Schussfadenrichtung einer Deckfläche	99
Tabelle 14, Haftzugversuche Prüfreihe Betondruck auf 3D-Glastextil in Schussfadenrichtung einer Deckfläche	100
Tabelle 15, Übersichtsmatrix zur Identifikation von selbsttragenden Bauteilen, die durch die Kombination von 3D-Druck und 3D-Textil hergestellt werden können	107
Tabelle 16, Kettengewirkte 3D-Gewebe mit Angabe der Penetration durch das Beton Druckmaterial	110
Tabelle 17, 6dTEX, verwendete Druck- und Textilmaterialien	133

Publikations- und Veranstaltungsliste

Das ITA der RWTH Aachen University wird die gewonnenen Erkenntnisse sowohl zur Unterstützung des Projektpartners als auch zur Öffentlichkeitsarbeit, zur Verbreitung der Ergebnisse und für die Beantragung von Nachfolgeprojekten nutzen. Des Weiteren wurde der Inhalt der Vorlesungen „Textiltechnik“ und „Ausgewählte Themen aus der Textiltechnik“ an der RWTH Aachen durch die neuen Entwicklungen im Bereich der Textilbewehrungsintegration in 3D-gedruckten Betonbauteilen erweitert. Am ITA wurden drei studentische Arbeiten im Rahmen des 6dTEX-Projektes betreut. Ziel ist auch, Nachwuchsfachkräfte für diesen Forschungsbereich zu gewinnen und für die Industrie auszubilden. Die in dieser Forschungsarbeit erzielten Ergebnisse, werden teilweise unter anderem für die Promotionsvorhaben von den ProjektbearbeiterInnen genutzt.

Veranstaltungen:

30.10.2023 ABS, Advanced Building Skins Conference & Expo, 30-31 October 2023, Bern - Switzerland
"Lightweight building components made of 3D textiles in combination with 3D printing"

Konferenzbeitrag Prof. Claudia Lüling

7.7.23 Eröffnung IBA Stuttgart, Festival Aussenstandort Backnang

Forschungsgruppe ReSULT

Teilbeitrag Prof. Claudia Lüling / 6dTEX

13.06.2023 LIGHTCON Conference 2023

Architecture Fully Fashioned – 3D Print on 3D Textiles

Vortrag C Prof. Claudia Lüling

07.06.2023 TENSINANTES 2023

Architecture Fully Fashioned - 3D Print on 3DTextiles

Vortrag Prof. Claudia Lüling

08.12.2022 Powerskin Conference

„ 6dTEX - Lightweight building components made of 3D textiles in combination with 3D printing"

Konferenzbeitrag Prof. Claudia Lüling

02.12.2022 ADDITC International Textile Conference 2022

"6dTEX: 3D-Druck auf 3D-Textilien"

Konferenzbeitrag Prof. Claudia Lüling

24.11.2022 Hessen schafft Wissen

Meet The Makers Episode 06 | Forschungsgruppe ReSULT - Nachhaltiger Leichtbau

Teilbeitrag Prof. Claudia Lüling / 6dTEX; <https://www.hessen-schafft-wissen.de/artikel/meet-the-makers-ep06-forschungsgruppe-result-nachhaltiger-leichtbau>

03.11.2022 Klimafestival für die Bauwende

"Textiler Leichtbau: Nachhaltigkeit im Zusammenspiel von Material, Herstellung und Gestaltung"

Vortrag Prof. Claudia Lüling

23.9.2022 Contess, Textile Constructions and Innovative Materials, Brixen

"Architecture Fully Fashioned – 3D-Textiles for the Building Envelope"

Publikationen:

Gries, T., Bettermann, I., Blaurock, C. et al. Technology Overview of 3D Textile Materials and Recent Innovation and Applications. Proceedings of the 9th World Conference on 3D Fabrics and Their Applications, Online, Zhengzhou, China, 8-9 April 2021. - Manchester: TexEng Software Ltd, 2021, URL: <https://texeng.net/3dfabrics-9th/wp-content/uploads/sites/11/2021/04/39-Thomas-Gries.pdf>

Gries, T., Bettermann, I., Blaurock, C. et al. Aachen Technology Overview of 3D Textile Materials and Recent Innovation and Applications. Appl Compos Mater 29, 43–64 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10443-022-10011-w>

Lüling, C., Biehl, S., Tennert, R., Chernychova, M., Dittel, G., Gries, T., 2023. 6dTEX – Sustainable Composite Structures from 3D Print on 3D Textile. Proceedings of the Tensinet Symposium 2023, TENSINANTES2023 | 7-9 June 2023, Nantes Université, Nantes, France

Lüling, C., Biehl, S., Tennert, R., Dittel, G., Gries, T., n.d. 6dTEX – Lightweight Building Components made of 3D Textiles in Combination with 3D Printing. December 8th 2022, Aachen: Powerskin Conference / Proceedings.

Lüling, C., Rucker-Gramm, P., Weilandt, A., Beuscher, J., Nagel, D., Schneider, J., Maier, A., Bauder, H.-J., Weimer, T., 2022. Advanced 3D Textile Applications for the Building Envelope. Appl Compos Mater 29, 343–356. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09941-8>

Lüling, C., Carl, T., 2022. Fuzzy 3D Fabrics & Precise 3D Printing - Combining research with design-build investigations. Presented at the eCAADe 2022: Co-creating the Future - Inclusion in and through Design, Ghent, Belgium, pp. 67–76. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.1.067>

Anlagen

1 Synthetische Materialien: 3D-Druckmaterialien/-verfahren

Material Hersteller - Materialbezeichnung	Drucktemperatur	Wasser-aufnahme und -beständigkeit	Form-stabilität / Temperatur-beständigkeit	Brand-schutz-klasse	UV-Beständig-keit	chemische Beständig-keit	E-Modul* / Biegezug-festigkeit	Kreislauf-fähigkeit
Polyamide								
PA 6.6 (Nylon) Fillamentum - Nylon	235 - 260 °C	≤ 0,5 %	-40 - 140 °C	k.A.	UV-beständig	resistent	o 1400 MPa / k.A.	k.A.
PA 6 GF (Polyamid glasfaserverstärkt) Fraunhofer UMSICHT <i>noch nicht marktreif</i>	k.A.	k.A.	k.A.	nicht brennend abtropfend, wenig rauchend	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Polyester								
PC (Polycarbonat) Polymaker - PolyLite PC	250 - 270 °C	≤ 0.1 %	110 °C	k.A.	k.A.	k.A.	o 2307 MPa ± 60 / 2477 MPa ± 159	Ja, 100 % recycelbar
TPC-ET (Thermoplastisches Block-Co-Polymer) DuPont™ - Hytrel 3D4000/4100	205 - 250 °C	k.A.	130 °C	k.A.	k.A.	k.A.	\ 130 MPa – 130 MPa / k.A.	k.A.
PETG (Polyethylenterephthalat mit Glycol) Das Filament - PETG Flammschutz	210 - 240 °C	k.A.	80 °C	UL94 HB UL94 V0	k.A.	k.A.	o 2980 MPa / k.A.	Ja
rPETG (recyceltes Polyethylenterephthalat mit Glycol) <i>Formfutura - ReForm rPET</i>	195 - 225 °C	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	gute chemische Beständig-keit	o 1940 MPa / 2147,6 MPa	hergestellt aus recyceltem post-industrielle m PETG
PETG (Polyethylenterephthalat mit Glycol) Fillamentum - CPE HG100	255 - 275 °C	< 1,0 % (ASTM D1003)	80 °C	k.A.	k.A.	gute chemische Beständig-keit	k.A. / 1860 MPa	30 % biobasiert / Recycling-fähig, ungiftig, BPA free
Polyolefine								
PP (Polypropylen) Formfutura Centaur – PP Filament	220 - 240 °C	wasserfest und wasserdicht	103 °C	k.A.	k.A.	gute chemische Resistenz	k.A. / 402 MPa	k.A.
HDPE (High-Density Polyethylen) Filaments.ca - HDPE	k.A.	wasserfest	120 °C (für kurze Zeit)	k.A.	Wetterbeständig	gute chemische Resistenz	k.A.	recycling-fähig
Sonstige								
PVDF (Polyvinylidene difluoride) 3DXTech - FlourX	245 - 265 °C	k.A.	150 °C	UV 94 V-0 1,5 mm	sehr UV-beständig	hohe Resistenz gegenüber Chemikalien	o 2450 MPa / 1800 MPa	k.A.
PMMA (Polymethylmethacrylat) Material4Print - PMMA	230 - 250 °C	witterungsbeständig (auch gegen UV-Licht)	88 °C	UL 94-HB	hält auch langer UV-Belastung stand	k.A.	k.A. / 1800 MPa	k.A.

© Frankfurt UAS

2a Synthetische Materialien: Fasermaterialien/ - verfahren

Fasermaterial Hersteller - Produktbezeichnung	Wasserauf- nahme (+23 °C, 50% rel. Luftfeuchte)	Schmelz- temperatur	Form- stabilität 0,45 MPa 1,8 MPa	Brand- schutz- klasse	UV- Beständig- keit	Chemische Beständigkeit	Zug-E- Modul	Titer	Kreislauf- fähigkeit
Polyamide									
PA 6.6 (Nylon) allgemeine Angaben Quelle Skript Technische Textilien	3,5 - 4,5 %	255 - 260 °C	+220 - 236 °C	V-2	bedingt beständig	beständig gegen Laugen, bedingt beständig gegen Säuren	600 - 900 cN/tex	-	nein
PA 6.6 (Nylon)	0,028	260 °C	+220 °C +75 °C	V-2	bedingt beständig	unbeständig	3,1 GPa	k.A.	nein
PA 6.6 Enka® Nylon 433 HRST PHP Fibers GmbH	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	bedingt beständig	unbeständig	k.A.	470	nein
PA 6.6 Perlon	8 - 9 %	250 - 265 °C	k.A.	k.A.	k.A.	gute Alkalibeständigkeit, nicht beständig ggü. starken Säuren	k.A.	151 - 7252 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns PA 6.6 (Polyamide 6.6)	1 - 7 %	215 °C	170 °C	k.A.	unbeständig	k.A.	8,2 cN/dtex	940, 1440, 1880 cN/dtex	k.A.
PA 6 allgemeine Angaben Quelle Skript "Technische Textilien"	3,5 - 4,5 %	215 - 220 °C	+170 - 210 °C	V-2	bedingt beständig	beständig gegen Laugen, bedingt beständig gegen Säuren	400 - 800 cN/tex	-	nein
PA 6 (Match zu Fraunhofer PA6GF)	2,6 - 3,4 %	215 °C	+160 °C +65 °C	V-2	unbeständig	unbeständig	3 GPa	k.A.	nein
PA 6 Enkalon® 540T PHP Fibers GmbH	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	unbeständig	unbeständig	k.A.	1880	nein
PA 6 Perlon	9 - 10 %	215 °C	k.A.	k.A.	k.A.	gute Alkalibeständigkeit, nicht beständig ggü. starken Säuren	k.A.	73 - 322.327 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 552 PA 6 (Polyamide 6)	1 - 7 %	215 °C	170 °C	k.A.	beständig	k.A.	8,1 cN/dtex	940, 1440, 1870 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 793 PA 6 (Polyamide 6)	1 - 7 %	215 °C	170 °C	k.A.	beständig	k.A.	7,4 cN/dtex	940, 1440, 1880 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 797PA 6 (Polyamide 6)	1 - 7 %	215 °C	170 °C	k.A.	beständig	k.A.	6,7 cN/dtex	940, 1440, 1880 dtex	k.A.
Polyester									
PC (Polycarbonat)	0,0012	Erweichung bei 148 °C	140 °C 128 °C	B-1	bedingt beständig	bedingt beständig	2,2 - 2,4 GPa	k.A.	nein
PES allgemeine Angaben Quelle Skript "Technische Textilien"	0,002	255 - 260 °C	k.A.	k.A.	unbeständig ohne Stabilisatoren	unbeständig gegen Laugen	800- 1200 cN/dtex	-	nein
PES-Multifilamentgarn 121031AS3D Walter Textil GmbH	k.A.	255 - 260 °C	k.A. bis 100 °C	k.A. allgemein für PES HB oder B1	bedingt beständig	bedingt beständig	k.A. ca. 2,8 GPa	167 dtex	nein
PES-Multifilamentgarn Diolen 174S PHP Fibers GmbH	k.A.	256 °C	95 - 99 °C	k.A.	bedingt beständig	bedingt beständig	k.A. ca. 2,8 GPa	2200 dtex	nein
PES Texora	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1100, 2200, 3300, 4400 dtex	k.A.

© ITA

2b Synthetische Materialien: Fasermaterialien/ - verfahren

Fasermaterial Hersteller - Produktbezeichnung	Wasserauf- nahme (+23 °C, 50% rel. Luftfeuchte)	Schmelz- temperatur	Form- stabilität 0,45 MPa 1,8 MPa	Brand- schutz- klasse	UV- Beständig- keit	Chemische Beständigkeit	Zug-E- Modul	Titer	Kreislauffähigkeit
Polyester									
TP Industrial Yarns 784 PET (Polyester)	0,5 - 2 %	260 °C	225 °C	k.A.	beständig	k.A.	8,0 - 8,1 cN/dtex	1100, 1670, 2200 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 785 PET (Polyester)	0,5 - 2 %	260 °C	225 °C	k.A.	beständig	k.A.	7,3 cN/dtex; 8,0 - 8,2 cN/dtex	150 - 6600 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 785-RS PET (Polyester)	0,5-2 %	260 °C	225 °C	k.A.	beständig	k.A.	7,3 cN/dtex	66.000, 88.000, 132.000 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 785-GEO PET (Polyester)	0,5-2 %	260 °C	225 °C	k.A.	beständig	k.A.	8,2 cN/dtex	1100, 1670, 2200, 3300, 4400 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 786 PET (Polyester)	0,5-2 %	260 °C	225 °C	k.A.	beständig	k.A.	8,1 - 8,2 cN/dtex	1100, 1400, 1670, 2200, 3300 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 788PET (Polyester)	0,5-2 %	260 °C	225 °C	k.A.	beständig	k.A.	7,1 cN	150 - 470 dtex;550 - 2200 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 766 PET (Polyester)	0,5-2 %	260 °C	225 °C	k.A.	beständig	k.A.	6,0 - 6,7 cN/dtex	280, 550, 930, 1100, 1670 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 766-LS PET (Polyester)	0,5-2 %	260 °C	225 °C	k.A.	beständig	k.A.	6,6 cN/dtex	280, 550, 930, 1100, 1670 dtex	k.A.
PET 900S 250 Perlon	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	38,0 cN/dtex	k.A.	k.A.
PET HT Serge Ferrari Tersuisse SA	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	UV- Beständigkeit optional	k.A.	63 - 84 cN/tex	150-340 dtex	k.A.

© ITA

2c Synthetische Materialien: Fasermaterialien/ - verfahren

Fasermaterial Hersteller - Produktbezeichnung	Wasserauf- nahme (+23 °C, 50% rel. Luftfeuchte)	Schmelz- temperatur	Form- stabilität 0,45 MPa 1,8 MPa	Brand- schutz- klasse	UV- Beständig- keit	Chemische Beständigkeit	Zug-E- Modul	Titer	Kreislauffähigkeit
Polyolefine									
PE (Polyethylen)	<0,01 %	135 °C	120 °C	B-2	unbeständig	beständig	0,2 GPa	k.A.	nein (mit Bioethanol- einsatz?)
PE allgemeine Angaben Quelle Skript "Technische Textilien"	k.A.	144 - 152 °C	80 - 100 °C	k.A.	beständig	beständig	300 cN/tex	k.A.	nein
PP allgemeine Angaben Quelle Skript "Technische Textilien"	k.A.	165 - 170 °C	149 - 154 °C	k.A.	unbeständig	beständig	k.A.	k.A.	nein
PP (Polypropylen)	<0,1 %	160 - 165 °C	85 °C 55 °C	V-2	unbeständig	beständig	1,3-1,8 GPa		nein
PP Multifilament CORDEX	<0,1 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	beständig		333	nein
PP (Polypropylen) Perlon	0,0001	160 - 170 °C	k.A.	k.A.	unbeständig	Beständig gegenüber schwachen und starken Säuren. Nicht beständig gegenüber oxidierenden Säuren. Beständig gegenüber schwachen und starken Basen.	k.A.	159- 22.902 dtex	k.A.
TP Industrial Yarns 752 PP (Polypropylene)	0	170 °C	140 °C	k.A.	beständig	k.A.	6,2 cN/dtex	1100, 2200, 3300 dtex	k.A.
Polyvinyl Alcohol									
PVA Filament Kuralon	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	beständig	alkaliresistent		k.A.	k.A.

© ITA

3 Natürliche Materialien: 3D-Druckmaterialien/ -verfahren

Material Hersteller - Materialbezeichnung	Druck- temperatur	Wasser- aufnahme und - beständig- keit	Form- stabilität / Temperatur- beständig- keit	Brand- schutz- klasse	UV- Beständig- keit	chemische Beständig- keit	E-Modul* / Biegezug- festigkeit	Kreislauf- fähigkeit
Biobasierte Werkstoffe								
Lignin Extrudr - Green-TEC Pro Filament	210 - 230 °C	k.A.	160 °C (bei Wanddicke > 4 mm)	k.A.	k.A.	k.A.	4.300 Mpa	100 % biobasiert, biologisch abbaubar (DIN EN ISO
PLA (Polylactid) Extrudr - PLA NX2	210 - 230 °C	k.A.	55 °C (80 °C)	k.A.	Nein	k.A.	k.A.	Ja / recycling- und kreislauf- fähig
PLA (Polylactid) BigRep - PRO HAT	109 - 205 °C	wetterfest	115 °C	k.A. / hitzebeständ ig	UV- beständig	k.A.	o 3300 MPa / 18 MPa	k.A.
PLA (Polylactid) (Compound aus PLA und PHB) Fillamentum - NonOilen	175 - 195 °C	k.A.	119 °C	k.A. / hitzebeständ ig	k.A.	k.A.	1900 Mpa	Ja / mehrmals recyclebar / kompostiert 3x schneller als PLA (zu Biomasse, Wasser, Kohlendioxid) bei niedriger Temperatur und ohne Rückstände von Mikroplastik
PLA (Polylactid) basiertes Filament mit Anteilen von Algen, Flachs, Hanf, Holz, etc.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Mineralisches Filament (PLA, PBAT, PHA + Additive) Extrudr - FLAX	200-240 °C	k.A.	48 °C	k.A.	k.A.	k.A.	3400 MPa	Biologisch abbaubar (DIN EN ISO 14855)
Biologische Werkstoffe								
Pilzmyzel Forschungsmaterial (Nährboden: Sägemehl, Stroh, Treber aus Bierproduktion oder Biopolymere: (Hemi-) Zellulose und Chitin, Lignin)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Cellulose Forschungsmaterial	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

© Frankfurt UAS

4 Natürliche Materialien: Fasermaterialien/ -verfahren

Fasermaterial Hersteller - Materialbezeichnung	Wasser- aufnahme	Schmelz- temperatur	Form- stabilität 0,45 MPa 1,8 MPa	Brand- schutz- klasse	UV- Beständig- keit	Chemische Beständig- keit	Zug-E- Modul	Titer	Kreislauffähigkeit
Biobasierte und biologische Fasermaterialien									
Bio-PLA	0,5 - 50 %	150-160 °C	45-65 °C	B-1	beständig	nicht beständig	3,5 GPa	k.A.	ja
Flachs	7%	k.A.	k.A.	B-2	k.A.	k.A.	27,6 GPa	k.A.	ja
Flachs Flax Technic groupe DEHONDT Mattex Roving	k.A.	230 °C	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	45 GPa	k.A.	ja
Flachs Depestele Lincore Flax Rovings & Reinforcements	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	38 GPa	300, 500, 1000, 1400 tex	ja
Flachs Depestele FR 500	15%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	500 tex	ja
Flachs Safilin	9%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	12 GPa	200 tex	ja
Flachs Safilin	9%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	12 GPa	400 tex	ja
Flachs Safilin	9%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	12 GPa	1000 tex	ja
Flachs Safilin	9%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	12 GPa	2000 tex	ja
Hanf	8%	k.A.	k.A.	B-2	k.A.	beständig gegen Laugen unbeständig gegen Säuren	69 GPa	k.A.	ja
Cellulose	k.A.	k.A.	k.A.	B-1/B-2	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	ja
Seegras	k.A.	k.A.	k.A.	B-2	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	ja

© ITA

5a Mineralische Materialien: 3D-Druckmaterialien/ -verfahren

Material Hersteller - Materialbezeichnung	Druck- verfahren	Nachbe- arbeitung	Druck- temperatur	Maximale Korngröße	Wasser- aufnahme	Brand- schutz- klasse	chemische Beständig- keit	Kreislauf- fähigkeit	Besonder- heiten
Beton									
3D-Druckmörtel HeidelbergCement - i.tech 3D	LDM	keine Nachbe- arbeitung notwendig	k.A.	2 mm	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
3D-Druckmörtel (Weber Saint-Gobain Weber 160-1)	LDM	keine Nachbe- arbeitung notwendig	-	1 mm	-	k.A.	Druckfestig- keit: C50/60 Expositions- klasse: X0, XC4, XD3,	k.A.	pumpbar
3D-Druckmörtel (Weber Saint-Gobain Weber 145-2)	LDM	keine Nachbe- arbeitung notwendig	-	1 mm	-	k.A.	Druckfestigk- eit: C35/45 Expositionskl- asse: X0, XC3, XD1, XF1, XA1	k.A.	pumpbar

© Frankfurt UAS

5b Mineralische Materialien: 3D-Druckmaterialien/-verfahren

Material Hersteller - Materialbezeichnung	Druckverfahren	Nachbearbeitung	Drucktemperatur	Maximale Korngröße	Wasseraufnahme	Brand Schutzklasse	chemische Beständigkeit	Kreislauf-fähigkeit	Besonderheiten
Beton									
3D-Druckmörtel Laticrete - 2-K-Material	LDM	keine Nachbearbeitung notwendig	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	2-K-Mörtel, Aushärtung mittels Primer zwischen einzelnen Druckschichten
3D-Druckmörtel Sikacrete - 752 3D - Mikro-Beton	LDM	keine Nachbearbeitung notwendig	Lufttemperatur = +5 °C bis +45 °C	2 mm	für Innen und Außenbauteile	Gebrauchstemperatur =	k.A.	k.A.	in verschiedenen Farben erhältlich
3D-Druckmörtel Betonrezeptur für Delta WASP 40100	LDM	keine Nachbearbeitung notwendig	20 - 30 °C	1 mm	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
3D-Druckmörtel (Fertigmischung für Delta WASP 40100 Clay) MAPEI - Mapegrout Thisotropic	LDM	k.A.	Nicht unter +5 °C anwenden	2,5 mm	wasserdicht	k.A.	k.A.	k.A.	Anwendbar sowohl vertikal als auch horizontal, minimale Dicke der Anwendung = 2 cm
3D-Druckmörtel (Fertigmischung für Delta WASP 40100 Clay) MasterEmaco - T 1100 TIX	LDM		Verarbeitungstemperatur = -10 °C bis +30 °C	3,15 mm	kapillare Wasseraufnahme ≤ 0,5 kg/m ² √h	A1	geringe Wasserabsorption, gute Karbonatisierungsbeständigkeit, hohe Hydrocarbonresistenz	k.A.	komplexe, horizontale Reparaturanwendungsbereiche
Glas									
Glas (Forschungsmaterial) MIT - G3DP2 PLATFORM Neri Oxman GLASS I GLASS II	FDM	keine Nachbearbeitung notwendig	1040 °C, beheizter und geschlossener Bauraum	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Glas (Forschungsmaterial) Glassomer - L50-SL, L35-μSL	SLA und micro	1. Sintern: 600 °C (Verbrennen des Polymergerüsts) 2. Sintern: 1000 °C (verdichtet die keramische Struktur)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	hohe Detailgenauigkeit

© Frankfurt UAS

5c Mineralische Materialien: 3D-Druckmaterialien/-verfahren

Material Hersteller - Materialbezeichnung	Druckverfahren	Nachbearbeitung	Drucktemperatur	Maximale Korngröße	Wasseraufnahme	Brandschutzklasse	chemische Beständigkeit	Kreislauf-fähigkeit	Besonderheiten
Keramik									
Keramik Sio-2 - PF 3D red earthenware / PRAI 3D white stoneware	LDM	Sinter-tempe- raturen: PF 3D: 970/1230- 1055/1270°C	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	für Drucker- modelle unterschied- licher Größe und Systeme geeignet
Keramik Formlabs - Ceramic Resin	SLA	Waschen im Isopropo- nolbad, trocknen der Bauteile und anschlie- bendes Sintern bei min. 1271 °C	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Wand- stärke bei gebran- nten Teilen = 2 mm ≤ 10 mm
Keramik Kwambio - G3	BJP	Ausformen aus dem Pulverbett und anschlie- bendes Sintern bei 1040 °C	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	wasser- dicht und recyclebar
Porzellan Sio.2 - ANETO 3D	LDM	PRAI 3D: 1240- 1300°C Biscuit tempe- rature: 1000°C	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	für Drucker- modelle unter- schied-licher Größe und Systeme geeignet
Lehm									
Lehm (WASP- red earthenware	LDM	keine Nachbear- beitung notwendig	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Minimaler Düsen- durchmes- ser = 1,2 mm
Sand									
Sand (Sand mit Binder) ExOne - Furan Binder/ CHP Binder / HHP Binder / Inorganic Binders mit unterschiedlichen Sandarten	SBJ / BJP	Ausformen aus dem Pulverbett und anschlie- bendes Trocknen	k.A.	k.A.	k.A.	hitze- beständi- g	k.A.	k.A.	Bauraum: 4000 x 2000 x 1000 mm, zur Herstellung von Metallguß- formen

6 Mineralische Materialien: Fasermaterialien/- verfahren

Fasermaterial Hersteller - Produktbezeichnung	Schmelz- temperatur	Form- stabilität 0,45 MPa 1,8 MPa	Brand- schutz- klasse	UV-Bestän- digkeit	chemische Beständig- keit	E-Modul / Zugfestigkeit	Titer	Vorbehandlung / Schlichte	Kreislauf- fähigkeit
Glas									
Glas-Roving							34 tex		
AR-Glas-Roving CemFil 5325 OwensCorning	1350 °C	860 °C	A1	beständig	alkalibestä- ndig	72 Gpa / 1000 - 1700 MPa	320, 640, 1200, 2400 tex	0,8 % Schlichtbasis: wasserba- siertes Epoxid- und Polyester- polymere Haftvermit- tler: Aminosilan	anwendungs- abhängig
AR-Glas-Roving Cem-FIL 5325 OwensCorning	k.A.	860 °C	k.A.	k.A.	alkalibestä- ndig	72 Gpa / 1000 - 1700 MPa	2500 tex	k.A.	k.A.
Basalt									
Basalt-Roving Bsp.: BCF17-600-KV42 Kamenny Vek	1250 °C	1060 °C	A1	k.A.	bedingt beständig	87±2 Gpa / 3000 - 3200 MPa	270, 300, 600 tex	≥ 0,4 % Silanschlichte	anwendungs- abhängig
Basalt-Roving Bsp.: BCF19-1200-KV42 Kamenny Vek	1250 °C	1060 °C	A1	k.A.	bedingt beständig	87±2 Gpa / 2900 - 3100 MPa	1200, 2400, 4800 tex	≥ 0,4 % Silanschlichte	anwendungs- abhängig
Basalt-Roving TDB CBG Composites	k.A.	k.A.	A1	k.A.	k.A.	k.A. / 3100 MPa	600, 900, 1200, 2400, 4800 tex	0,4	anwendungs- abhängig

© ITA

7a Matrix der Betondruckrezepturentwicklung

Matrix Betondruckrezeptur																
	Zement [g]	Quarzsand (0,1 - 0,4 mm) [g]	Wasser [g]	Mischzeit [min]	Fließmittel [g]	Beschleuniger [g]					AM nach Schängen [cm]					Beobachtungen
					MC-Power-Flow evo 301	MC-Centra Rapid 601	MC-Fast-Kick 105	MC-Fast-Kick 111	MC-Additiv 4DS	Nach Mischung	5 Min	10 Min	15 Min	30 Min		
					FM	B1	B2	B3	B4							
CEMI 42,5 N	Z1	750	750	250	9	6	/	/	/	/	20 / 20	/	/	/	/	gute Konsistenz / druckbar
		750	750	250	6	6	/	/	/	/	21 / 21,5	/	/	/	/	gute Konsistenz / druckbar / langsam härtend
		750	750	250	7	7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	6,5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz
		750	750	250	5	6	/	/	/	/	13 / 14	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	6,5	/	/	/	/	17 / 17,5	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	6,75	/	/	/	/	18 / 17,5	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	7	/	/	/	/	/	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	7,5	/	/	/	/	19,5 / 19	/	/	/	/	gute Konsistenz / druckbar
		750	750	250	4	7,5	18,8	/	/	/	/	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	/	/	/	15	/	/	15,5 / 13,5	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	/	/	/	30	/	/	18 / 17,5	/	/	/	/	gute Konsistenz/schwierig druckbar
		750	750	250	4	3,75	/	7,5	/	/	15,5 / 15,5	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	4,5	/	7,5	/	/	20,5 / 20,5	/	/	/	/	gute Konsistenz / druckbar
		750	750	250	4	4,5	/	11	/	/	/	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz
		750	750	250	4	3,5	/	38	/	/	/	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz
		750	750	250	/	/	/	38	/	/	/	/	/	/	/	gute Konsistenz / druckbar
		750	750	250	/	/	/	/	/	10	/	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	3	/	/	/	7,5	/	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	6	/	/	/	7,5	/	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
CEMI 42,5 R	Z2	750	750	250	5	6,5	/	/	/	/	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz	
		750	750	250	5	4,5	/	/	/	/	21 / 20,5	/	/	/	zu flüssige Konsistenz	
		750	750	250	5	3,5	/	/	/	/	19 / 18,5	/	/	/	zu flüssige Konsistenz	

© Frankfurt UAS

7b Matrix der Betondruckrezepturenentwicklung

Matrix Betondruckrezeptur																
	Zement [g]	Quarzsand (0,1 - 0,4 mm) [g]	Wasser [g]	Mischzeit [min]	Fließmittel [g]	Beschleuniger [g]					AM nach Schängen [cm]					Beobachtungen
					MC-Power-Flow evo 301	MC-Centra Rapid 601	MC-Fast-Kick 105	MC-Fast-Kick 111	MC-Additiv 4DS	Nach Mischung	5 Min	10 Min	15 Min	30 Min		
					FM	B1	B2	B3	B4							
CEM I 52,5 R (sb)	Z3	750	750	250	5	5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	5	8	/	/	/	/	14 / 14,5	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	5	10	/	/	/	/	17 / 17	/	/	/	/	relativ flüssige Konsistenz / nach warten ok
		750	750	250	5	9	/	/	/	/	13,5 / 13,5	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	5	9,5	/	/	/	/	14,5 / 15	/	/	/	/	feste Konsistenz / gut zum Drucken
		750	750	250	5	8	/	7,5	/	/	14,5 / 14,5	14,5 / 15,5	15 / 15,5	16 / 15	16,5 / 16	zu feste Konsistenz
		750	750	250	5	8	/	/	7,5	/	14,5 / 14	13,5 / 13,5	13 / 13	13,5 / 13	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	3	11	/	/	/	/	17,5 / 17,5	/	14 / 14	/	/	gute Konsistenz, schnell aushärtend
		750	750	250	3	11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	feste Konsistenz, schnell aushärtend
		750	750	250	3	12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	flüssige Konsistenz / schnell aushärtend
CEM I 52,5 N	Z4	750	750	250	4	10	/	/	/	/	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz	
		750	750	250	4	6	/	/	/	/	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz	
		750	750	250	4	3	/	/	/	/	14,5 / 15	15,5 / 15	14 / 13,5	13 / 13,5	14 / 13,5	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	4,5	/	/	/	/	18 / 18	17 / 17	17,5 / 17	17 / 17	17 / 17	gute Konsistenz / druckbar
		750	750	250	4	4	/	/	5	/	20 / 20	20,5 / 21	20,5 / 21	21 / 21	21 / 21	gute Konsistenz / nicht schnell härtet
CEM II (A-LL) 42,5 R	Z5	750	750	250	15	3,25	15	/	/	/	17 / 18	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz
		750	750	250	2	3	7,5	/	/	/	19 / 19	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz
		750	750	250	7	3,5	/	/	/	/	21 / 20,5	/	/	/	/	gute Konsistenz
		1125	1125	375	2	5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	zu feste Konsistenz
		750	750	250	4	4	/	/	/	/	21 / 20	/	/	/	/	gute Konsistenz / druckbar
		750	750	250	3	5,5	/	/	/	/	20,5 / 20	/	/	/	/	zu flüssige Konsistenz

Erkenntnisse
Nach den ersten Vorversuchen der Entwicklung einer Betondruckmischung wird sich **gegen die Verwendung von Beschleuniger im Rahmen des 6dTEX-Projekts** entschieden.
Da mit dem **CEM I 52,5 R (sb)** eine thixotrope Druckkonsistenz erzielt werden kann, welche sich aufgrund höherer Fließfähigkeit unter Krafteinwirkung und einer guten Grünstandfestigkeit auszeichnet, wird sich im weiteren Entwicklungs- und Fertigungsprozess auf diesen konzentriert.
Für die im Projekt benötigten Anforderungen an die Mischung, zum Beispiel im Bezug auf Druckvolumen und -geometrien, versprechen die Mischungen mit dem CEM I 52,5 R (sb) die besten Ergebnisse.
In der weiteren Entwicklung werden die Menge des Fließmittels, Mischzeiten und die Sieblinie des Sandes optimiert, um eine replizierbare Rezeptur zu erzielen.

8a Mastertabelle: Übersicht 3D-Druck auf kettengewirkten Biaxialgelegen aus Glas (2D-Textil)

2D-Textil		3D-Druck									Prüfungen	
Karl Mayer BIASTRONIC: Kettengewirkte Biaxialgelege		Delta WASP 40100 Drucker: G-Code Leveling wird vor dem Start des Drucks manuell durchgeführt. Der Druck startet innerhalb des Rahmens; End-G-Code: Extruder fährt nach dem Druck soweit nach oben, dass der Rahmen mit Druck entfernt werden kann.									Haftzug	
Textil-Nummer	Bild/ Zeichnung	3D-Druck Nummer	Druckrezeptur	Düsendurch- messer	Flow	Schichthöhe/ -breite	T = Temperatur L = Luftfeuchtigk.	Druckge- schwindigkeit	Zd-wert Δ UK Druckmaterial zu OK Textil	Infill	Prüfnummer	Mittelwerte Haftzugtests
Einstellung der Prüfmaschine (Druck auf Schussfäden)												
AR- Glas.2D.1.2		220708_2	F = 10,5 g Epoxy/ Sand	8 mm	125 %	5 mm / 8 mm	T = 23,3 °C L = 40 %	20 mm/s	- 4 mm		220708_HZ_1.1-1.3	0,13 MPa
Drucken auf Schussfäden, AUF das Textil												
AR- Glas.2D.2.1		220708_3	F = 10,5 g Epoxy/ Sand	8 mm	125 %	5 mm / 8 mm	T = 19,8 °C L = 44,8 %	20 mm/s	- 4 mm		220708_HZ_3.1-3.3	0,05 MPa
AR- Glas.2D.2.2		220714_1	F = 10,5 g Epoxy/ Sand				T = 24,5 °C L = 60 %				220714_HZ_1.1-1.3	0,18 MPa
AR- Glas.2D.2.3		220719_1	F = 10,5 g Epoxy/ Sand				T = 25 °C L = 48 %				220719_HZ_1.1-1.3	0,23 MPa
AR- Glas.2D.3.2		220802_1 und 220802_4	F = 8,5 g F = 8,75 g Epoxy/ Sand				T = 25,5 °C L = 50 % T = 26 °C L = 44,8 %				220802_HZ_1.2 und 220802_HZ_4.1-4.2	0,17 MPa
AR- Glas.2D.1.2		220708_1	F = 11 g Epoxy/ Sand				T = 19,8 °C L = 44,8 %				220708_HZ_2.1 und 220811_1.1-1.2	0,09 MPa
Drucken auf Stehfäden, IN das Textil												
AR- Glas.2D.2.1		220802_2	F = 8,5 g Epoxy/ Sand	8 mm	125 %	5 mm / 8 mm	T = 26 °C L = 44 %	20 mm/s	- 4 mm		220802_HZ_2.1-2.2 und 220802_HZ_4.3	0,08 MPa
AR- Glas.2D.2.2		220802_3	F = 9 g Epoxy/ Sand				T = 26 °C L = 44 %				220802_HZ_3.1-3.3	0,14 MPa
AR- Glas.2D.2.2		220809_2	F = 10,5 g Epoxy/ Sand				T = 26,5 °C L = 36 %				220809_HZ_2.1-2.3	0,15 MPa
AR- Glas.2D.2.3		220804_1	F = 8,75 g Epoxy/ Sand				T = 26 °C L = 52%				220804_HZ_1.1-1.3	0,09 MPa
AR- Glas.2D.2.3		2208011_2	F = 9 g Epoxy/ Sand				T = 26 °C L = 52%				2208011_HZ_2.1-2.3	0,20 MPa
AR- Glas.2D.3.2		220805_1	F = 8,75 g Epoxy/ Sand				T = 26 °C L = 60 %				220805_HZ_1.1-1.3	0,11 MPa

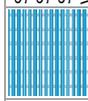
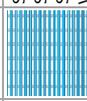
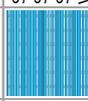
8b Mastertabelle: Übersicht 3D-Druck auf kettengewirkten Biaxialgelegen aus Glas (2D-Textil)

2D-Textil		3D-Druck										Prüfungen	
Karl Mayer BIASTRONIC: Kettengewirkte Biaxialgelege		Delta WASP 40100 Drucker: G-Code Leveling wird vor dem Start des Drucks manuell durchgeführt. Der Druck startet innerhalb des Rahmens.; End-G-Code: Extruder fährt nach dem Druck soweit nach oben, dass der Rahmen mit Druck entfernt werden kann.										Biegezug	
Textil-Nummer	Bild/ Zeichnung	3D-Druck Nummer	Druckrezeptur oder Coating	Düsendurch- messer	Flow	Schichthöhe/ breite	T = Temperatur L = Luftfeuchtigk.	Druckge- schwindigkeit	Zd-wert Δ UK Druckmaterial zu OK Textil	Infill / Bemerkungen	Prüfnummer	Mittelwerte Biegezugtests	
Einstellung der Prüfmaschine (Druck auf Schussfäden)													
AR- Glas.2D.1.2		220715_1	F = - Epoxy / Sand	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	T = - L = -	20 mm/s	- 4 mm	Rectilinear mit einer Wand	220715_4BZ_1.1- 1.2	16,2 MPa	
Druck ohne Textil													
ohne Textil (Tests ITA)	/	220818_2 221117_1 221122_1 221122_2	F = 10 g F = 8 g F = 8 g F = 8,5 g				T = 24,5 °C L = 70 % T = 23 °C L = 33 %		3 mm		220818_4BZ_2.1 221117_4BZ_1.1 221122_4BZ_1.1 221122_4BZ_1.2	5,11 MPa	
ohne Textil (Tests FRAUAS)	/	220705_1 220705_1 220705_2 220705_2 220705_3 220705_3	F = 11 g F = 11 g F = 10,5 g F = 10,5 g F = 10 g F = 10 g	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	- - - T = 26,5 °C L = 36,1 % T = 26,5 °C L = 36,1 %	20 mm/s	0 mm 4 mm 2 mm 3 mm 3 mm 3 mm	Rectilinear mit einer Wand	220705_1.1 220705_1.2 220705_2.1 220705_2.2 220705_3.1 220705_3.2	14,53 MPa	
Drucken auf Schussfäden, AUF das Textil													
AR- Glas.2D.2.1		220930_2 220930_3 220930_4	F = 8 g F = 7,85 g F = 7,85 g Epoxy / Sand				T = 24 °C L = 37 % T = 24 °C L = 37 % T = 24 °C L = 36 %				220930_4BZ_1.1 220930_4BZ_1.2 220930_4BZ_1.3	40,55 MPa	
AR- Glas.2D.2.2		221005_3 221122_3 221122_4	F = 8 g F = 8,5 g F = 8,5 g Epoxy / Sand				T = 23 °C L = 46 % T = 24 °C L = 32 % T = 24 °C L = 32 %				221005_4BZ_1.2 221122_4BZ_2.1 221122_4BZ_2.2	22,5 MPa	
AR- Glas.2D.1.2		220819_5 220819_6 221006_6 221018_2	F = 8,5 g F = 8,5 g F = 7 g F = 7 g Epoxy / Sand				T = 25 °C L = 54 % T = 25 °C L = 54 % T = 20 °C L = 41 % T = 25 °C L = 62 %		- 4 mm	Rectilinear mit einer Wand	220819_4BZ_2.1 220819_4BZ_3.1 221006_4BZ_2.3 221018_4BZ_2.1	19,84 MPa	
AR- Glas.2D.2.3		221005_7 221011_1 221011_2	F = 8 g F = 7,5 g F = 7,5 g Epoxy / Sand				T = 23 °C L = 46 % - -				221005_4BZ_2.1 221011_4BZ_1.1 221011_4BZ_1.2	3,96 MPa	
AR- Glas.2D.3.2		220818_6 220819_4 221006_5	F = 10 g F = 8,5 g F = 7,5 g Epoxy / Sand	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	T = 25 °C L = 58 % T = 25 °C L = 58 % T = 20 °C L = 41 %	20 mm/s			220818_4BZ_5.1 220819_4BZ_4.1 221006_4BZ_2.2	9,3 MPa	

8c Mastertabelle: Übersicht 3D-Druck auf kettengewirkten Biaxialgelegen aus Glas (2D-Textil)

2D-Textil		3D-Druck									Prüfungen	
Karl Mayer BIASTRONIC: Kettengewirkte Biaxialgelege		Delta WASP 40100 Drucker: G-Code Leveling wird vor dem Start des Drucks manuell durchgeführt. Der Druck startet innerhalb des Rahmens.; End-G-Code: Extruder fährt nach dem Druck soweit nach oben, dass der Rahmen mit Druck entfernt werden kann.									Biegezug	
Textil-Nummer	Bild/Zeichnung	3D-Druck Nummer	Druckrezeptur oder Coating	Düsendurch- messer	Flow	Schichthöhe/- breite	T = Temperatur L = Luftfeuchtigk.	Druckge- schwindigkeit	Zd-wert Δ UK Druckmaterial zu OK Textil	Infill / Bemerkungen	Prüfnummer	Mittelwerte Biegezugtests
AR- Glas.2D.3.2		230201_1									230201_4BZ_1.1	10 MPa
AR- Glas.2D.3.2		230201_2	F = 9,5 g Epoxy/Sand	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	T = 19,5 °C L = 37 %	20 mm/s	- 4 mm (5 mm Textil- abstand zwischen den Auflager- flächen / 0 mm Textil- abstand an den Auflager- flächen des Prüfgeräts)	Rectilinear mit einer Wand / 50 % der unteren Fläche geschlossen	230201_4BZ_1.2	11 MPa
AR- Glas.2D.3.2		230201_3								Rectilinear mit einer Wand / 5 % der unteren Fläche geschlossen	230201_4BZ_1.3	9,8 MPa
Drucken auf Stehfäden, IN das Textil												
AR- Glas.2D.2.2		221011_4 221013_2 221013_2	F = 7,5 g Epoxy / Sand				- T = 23 °C L = 45 % T = 23 °C L = 45 %			Rectilinear mit einer Wand	221011_4BZ_2.1 221013_4BZ_2.1 221013_4BZ_2.2	10 MPa
AR- Glas.2D.2.1		221006_1 221006_2 221006_3	F = 8 g F = 7,75 g F = 7,5 g Epoxy / Sand	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	T = 22 °C L = 45 %	20 mm/s	- 4 mm Δ zu Druck- unterlage ca. 5 mm	Rectilinear mit einer Wand / 221006_4B Z_1.3 (B = 103 mm)	221006_4BZ_1.1 221006_4BZ_1.2 221006_4BZ_1.3	15 MPa
AR- Glas.2D.2.3		221012_1 221012_2 221012_3	F = 7,5 g Epoxy / Sand				T = 19 °C L = 45 % T = 18 °C L = 50 % T = 17 °C L = 56 % T = 23 °C			Rectilinear mit einer Wand	221012_4BZ_1.1 221012_4BZ_1.2 221012_4BZ_1.3	13,5 MPa
AR- Glas.2D.3.2		221013_1 221018_1 221018_2	F = 7,5 g F = 8 g F = 8 g Epoxy / Sand				L = 45 % T = 25 °C L = 62 % T = 25 °C L = 62 %				221013_4BZ_1.1 221018_4BZ_1.1 221018_4BZ_1.2	6,7 MPa
Untersuchung der Haftung mit unterschiedlichen Coatings auf Schussfäden, AUF das Textil												
AR- Glas.2D.2.2		221020_1 221020_2 221020_3	F = 8 g F = 8 g F = 8,5 g Zement- schlämme (CEMI 52,5 R (sb), WZ = 0,8)	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	T = 21 °C L = 49 % T = 21 °C L = 49 % T = 24 °C L = 32 %	20 mm/s	- 4 mm	Rectilinear mit einer Wand	221020_4BZ_1.1 221020_4BZ_1.2 221020_4BZ_1.3	3,6 MPa

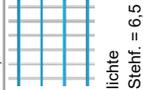
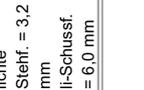
9 Mastertabelle: Übersicht 3D-Druck auf kettengewirkten Abstandsgelegen aus PES (3D-Textil)

3D-Textil	3D-Druck										Prüfungen				Biegezug	Bemerkungen	Mittelwerte Biegezug	
	Bild/Zeichnung	Beschreibung Textil	3D-Druck Nummer	Düsendurchmesser	Flow	Schichthöhe / -breite	Ventilator	Bauraumtemperatur	Drucktemperatur	Druckgeschwindigkeit	Zd-Wert	Druckmaterial	Infill	Prüfnummer				Drucktemperatur
Einstellung der Prüfmaschine (Druck auf Schussfäden)																		
PET.3D.05		Strehf. 1,100 tex Schussf. 1.100 tex, Stichl.: 2,5 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	0,8 mm	100 %	0,6 mm / 0,8 mm	20 %	Raumtemperatur	240 °C	12,5 mm/s	0 mm	100 % Linien 45°/135°	220818_HZ_2.1-2	630 N	220825_3BZ_1.1-3	Druck auf Textil in Schussfaden- richtung	4,7 MPa	
Drucken in Schussfadenrichtung, AUF das Textil																		
PET.3D.01		Strehf. 1,100 tex Schussf. 1.100 tex, Stichl.: 3,0 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	0,8 mm	100 %	0,6 mm bzw. 0,8 mm	20 %	Raumtemperatur	240 °C	12,5 mm/s	0 mm	100 % Linien 45°/135°	220812_HZ_1.1-3	623 N	220824_3BZ_1.1-3	Druck auf Textil in Schussfaden- richtung	36,13 MPa	
PET.3D.05		Strehf. 1,100 tex Schussf. 1.100 tex, Stichl.: 2,5 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	0,8 mm	100 %	0,6 mm bzw. 0,8 mm	20 %	Raumtemperatur	240 °C	12,5 mm/s	0 mm	100 % Linien 45°/135°	220816_HZ_1.1-3	1200 N	220824_3BZ_2.1-3		31,6 MPa	
PET.3D.07		Strehf. 1,100 tex Schussf. 660 tex, Stichl.: 3,0 mm, Vollschuss	2.14_rPETG	0,8 mm	100 %	0,6 mm bzw. 0,8 mm	20 %	Raumtemperatur	240 °C	12,5 mm/s	0 mm	100 % Linien 45°/135°	220817_HZ_1.1-3	733 N	220824_3BZ_3.1-3		29,56 MPa	
PET.3D.11		Strehf. 1,100 tex Schussf. 660 tex, Stichl.: 2,5 mm Vollschuss	2.14_rPETG	0,8 mm	100 %	0,6 mm bzw. 0,8 mm	20 %	Raumtemperatur	240 °C	12,5 mm/s	0 mm	100 % Linien 45°/135°	220818_HZ_1.1-3	650 N	220824_3BZ_4.1-3		35,01 MPa	
kein Textil	/	/	2.14_rPETG	0,8 mm	100 %	0,6 mm bzw. 0,8 mm	20 %	Raumtemperatur	240 °C	12,5 mm/s	0 mm	100 % Linien 45°/135°	/	/	220824_3BZ_5.1-3		Druck von Probekörpern ohne Textil	48,5 MPa
Drucken in Stehfadenrichtung, IN das Textil																		
PET.3D.13		wie PET.3D.01 und Kanal in der oberen Decklage	2.14_rPETG	0,8 mm	100 %	0,6 mm bzw. 0,8 mm	20 %	Raumtemperatur	240 °C	12,5 mm/s	0,5 mm (HZ) 0 mm (BZ)	100 % Linien 45°/135°	221004_HZ_1.1-3	770 N	aufgrund der Druckergößenrich- t herstellbar	/	/	

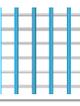
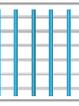
10a Mastertabelle: Übersicht 3D-Druck auf kettengewirkten Abstandsgelegen aus Glas (3D-Textil)

3D-Textil		3D-Druck										Prüfungen			
Karl Mayer / 3D-Abstandswirkmaschine		WASP 40100 Drucker: G-Code Leveling wird vor dem Start des Drucks manuell durchgeführt. Der Druck startet innerhalb des Rahmens; End-G-Code: Extruder fährt nach dem Druck soweit nach oben, dass der Rahmen mit Druck entfernt werden kann.										Haftzug		Biegezug	
Textil-Nummer	Bild/ Zeichnung/ Aufmaß	Beschreibung Textil ('...' Bindung)	3D-Druck Nummer	Druckrezeptur oder Coating	Düsendurch- messer	Flow	Schichthöhe/ -breite	T = Temperatur L = Luftfeuchtigkeit	Druckge- schwindigkeit	Zd-wert Δ UK Druckmaterial zu OK Textil	Infill	Prüfnummer	Mittelwerte haftzugtests	Prüfnummer	Mittelwerte Biegezugtests
Drucken ohne Textil															
-	-	-	221214_6 221214_7 221214_8	F = 7,5 g Epoxy/ Sand	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	T = 22,5 °C L = 22 %	20 mm/s	3 mm	Recti- linear mit einer Wand	221214_4BZ_1.1 221214_4BZ_1.2 221220_4BZ_1.1	7,9 MPa		
Drucken in Schussfadenrichtung, AUF das Textil															
Glas.3D.03		Stehf. 1.200 tex, Einzug 1V/1L Schussf. 2.400 tex, Stichl.: 2,5 mm, Einzug 1V/1L	221215_1 221215_2 221220_3	F = 7,75 g F = 7,75 g F = 8 g Epoxy/ Sand			5 mm / 9 mm	T = 22,5 °C L = 22 % T = 22,5 °C L = 22 % T = 24 °C L = 36 %	20 mm/s	- 4 mm	Recti- linear mit einer Wand	221214_4BZ_3.1 221214_4BZ_3.2 221214_4BZ_3.3	10,3 MPa		
Glas.3D.03		Stehf. 1.200 tex, Einzug 1V/1L Schussf. 2.400 tex, Stichl.: 2,5 mm, Einzug 1V/1L	230202_1	F = 9,5 g Epoxy / Sand	8 mm	1,25	5 mm / 8 mm	T = 19 °C L = 36 %	20 mm/s	- 4 mm	⊙	230202_HZ_1.1 230202_HZ_1.2 230202_HZ_1.3	0,8 MPa		
Glas.3D.03		Stehf. 1.200 tex, Einzug 1V/1L Schussf. 2.400 tex, Stichl.: 2,5 mm, Einzug 1V/1L	230207_1	F = 9,5 g				T = 19 °C L = 36 %	20 mm/s	- 4 mm	⊙	230207_HZ_1.1 230207_HZ_1.2 230207_HZ_1.3	0,15 MPa		

10b Mastertabelle: Übersicht 3D-Druck auf kettengewirkten Abstandsgelegen aus Glas (3D-Textil)

3D-Textil		3D-Druck										Prüfungen			
Karl Mayer / 3D-Abstandswirkmaschine		WASP 40100 Drucker; G-Code Leveling wird vor dem Start des Drucks manuell durchgeführt. Der Druck startet innerhalb des Rahmens; End-G-Code: Extruder fährt nach dem Druck soweit nach oben, dass der Rahmen mit Druck entfernt werden kann.										Haftzug		Biegezug	
Textil-Nummer	Bild/ Zeichnung/ Ausmaß	Beschreibung Textil ("1" Bindung)	3D-Druck Nummer	Druckrezeptur oder Coating	Düsendurch- messer	Flow	Schichthöhe/ -breite	T = Temperatur L = Luftfeuchtigk.	Druckge- schwindigkeit	Zd-wert Δ UK Druckmaterial zu OK Textil	Infill	Prüfnummer	Mittelwerte haftzugstests	Prüfnummer	Mittelwerte Biegezugstests
Glas.3D.01		Stehf. 1.200 tex Einzug 1V/1L Schussf. 1.200 tex, Stichl.: 2,2 mm, Einzug 1V/1L	221214_2 221215_3 221215_4	F = 8 g Epoxy/ Sand				T = 22,5 °C L = 22 %						221214_4BZ_1.1 221215_4BZ_2.1 221214_4BZ_2.2	5,33 MPa
Glas.3D.02		Stehf. 1.200 tex Einzug 1V/1L Schussf. 1.200 tex, Stichl.: 2,2 mm, Einzug 1V/2L	221214_3 221214_4 221214_5	F = 8 g F = 7,5 g F = 7,5 g Epoxy/ Sand	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm		20 mm/s		Recti- linear mit einer Wand			221214_4BZ_2.1 221214_4BZ_2.2 221214_4BZ_2.3	3,07 MPa
Glas.3D.04		Stehf. 1.200 tex Einzug 1V/1L Schussf. 2.400 tex, Stichl.: 2,5 mm, Einzug 1V/2L	221213_2 221213_3 221213_4	F = 7 g F = 6,75 g F = 6,75 g Epoxy/ Sand				T = 23,5 °C L = 23 %						221213_4BZ_1.1 221213_4BZ_1.2 221213_4BZ_1.3	3,26 MPa

10c Mastertabelle: Übersicht 3D-Druck auf kettengewirkten Abstandsgelegen aus Glas (3D-Textil)

3D-Textil		3D-Druck										Prüfungen				
Textil-Nummer	Bild/ Zeichnung/ Aufmaß	Beschreibung Textil ("I" Bindung)	3D-Druck Nummer	Druckrezeptur oder Coating	Düsendurch- messer	Flow	Schichthöhe/ -breite	T = Temperatur L = Luftfeuchtigk.	Druckge- schwindigkeit	Zd-wert Δ UK Druckmaterial zu OK Textil	Infill	Haftzug		Biegezug		
												Prüfnummer	Mittelwerte haftzugstests	Prüfnummer	Mittelwerte Biegezugstests	
Drucken in Schussfadenrichtung, AUF das Textil: Vergleich geocoated / ungeocoated																
Glas.3D.03			230207_2 230209_2 230209_3 (unge- coated)		8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	-	20 mm/s	- 4 mm	Recti- linear mit einer Wand			230207_4BZ_1.1 230209_4BZ_1.2 230209_4BZ_1.3	2,2 MPa	
Drucken in Stehfadenrichtung, IN das Textil																
Glas.3D.05	 lichte Stehf. = 6,5 mm II-Schussf. = 3,5 mm		221220_4 221220_5 221220_6	F = 7,25 g Epoxy/ Sand	8 mm	125 %	5 mm / 9 mm	T = 24 °C L = 36 %	20 mm/s	- 4 mm	Recti- linear mit einer Wand			221220_4BZ_2.1 221220_4BZ_2.2 221220_4BZ_2.3	7,27 MPa	