

F 3178

Oliver Fischer, Dirk Volkmer, Philipp Lauff Manuel Hambach, Matthias Rutzen

Zementgebundener kohlenstofffaserverstärkter Hochleistungswerkstoff (Carbonkurzfaserbeton)



Fraunhofer IRB Verlag

F 3178

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0422-5

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

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN INGENIEURFAKULTÄT BAU GEO UMWELT LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU



UNIVERSITÄT AUGSBURG MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT LEHRSTUHL FÜR FESTKÖRPERCHEMIE

Zementgebundener kohlenstofffaserverstärkter Hochleistungswerkstoff (Carbonkurzfaserbeton)

Endbericht

München und Augsburg, den 19. Juli 2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer Philipp Lauff, M.Eng. Prof. Dr. Dirk Volkmer Dr.-Ing. Manuel Hambach Matthias Rutzen, M.Eng.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-16.33)

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

Projektpartner

Geldgeber:



Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR)

Deichmanns Aue 31 - 37

53179 Bonn

Fachl. Betreuer: Dr.-Ing. Michael Brüggemann (i.A. BBSR)

Forschende Stellen:



Technische Universität München (TUM) Lehrstuhl für Massivbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer Theresienstr. 90 80333 München

Universität Augsburg (Uni-A) Lehrstuhl für Festkörperchemie Prof. Dr. Dirk Volkmer Universitätsstr. 1 86159 Augsburg

Industriepartner:



SCHWENK Zement KG Hindenburgring 15 89077 Ulm

Büchting + Streit AG Gunzenlehstr. 22 - 24 80689 München

ISP Scholz Beratende Ingenieure AG Anton-Böck-Str. 27 81249 München

Inhaltsverzeichnis

Projekt	partner	11
Inhaltsv	erzeichnis	. 111
Abkürzı	ungsverzeichnis	V
1	Einleitung	1
1.1 Portland	Themenrelevanz und Motivation der Entwicklung von zementmörteln mit gerichteten Carbonfasern	1
1.2	Grundlagen der Technik	1
1.3	Zielsetzung und Forschungsfragen	3
2	Stand der Forschung	4
2.1	Hochfeste faserverstärkte Portlandzementmörtel	4
2.2	Faserverstärkte Portlandzementmörtel mit gerichteten Carbonkurzfasern	6
2.3	Potential für den 3D-Druck von Baustoffen	8
3	Bedeutung und Einsatzmöglichkeiten von Carbonkurzfaserbeton	10
3.1	Ökonomische Auswirkungen	.11
3.2	Ökologische Auswirkungen	13
4	Materialtechnische Untersuchungen (Uni-A)	18
4.1	Probenpräparation	.18
4.1.1	Carbonfasern	18
4.1.2	Oxidation der Faseroberfläche	18
4.1.3	Weitere Fasertypen	19
4.1.4	Zementmischungen	19
4.1.5	Prüfkörperpräparation	20
4.1.6	Probenlagerung bis zur Prüfung	21
4.1.7	Statisch-mechanische Analysen	21
4.2	Analyse der Mischtechnik	24
4.3	Untersuchung der Parameter der Carbonfasern	25
4.3.1	Untersuchungen zur Faserdicke	25
4.3.2	Untersuchungen zur Faserlänge	27
4.3.3	Verwendung von rezyklierten Fasern	28
4.3.4	Untersuchungen zu weiteren Armierungsfasern	29
4.4	Einfluss des Faserlastwinkels	30
4.4.1	Einfluss des Faserwinkels auf die Biegezugfestigkeit	30

4.4.2	Einfluss des Faserwinkels auf die Druckfestigkeit	
4.5	Festigkeitsentwicklung über die Hydratationszeit	34
4.6	Rezeptierbarkeit mit anderen Zementarten	
4.7	Verhalten im zyklischen 3-Punkt Biegeversuch	
4.8	Implementierung von Füllstoffen	42
4.8.1	Erstellen einer Mörtelrezeptur mit angepasstem w/z-Wert	42
5	Upscaling (TUM)	46
5.1	Verifizierung	46
5.1.1	Biegezugversuche	47
5.1.2	Zugversuche	48
5.2	Manuelles Upscaling	49
5.3	Entwicklung des maschinellen Extrusionsverfahrens	51
5.4	Maschinelles Upscaling	55
5.4.1	Erste Probekörper	55
5.4.2	Düsenentwicklung	56
5.4.3	Untersuchung zur Verwendung von Nachbehandlungsmitteln	60
5.5	Bauteilprüfung, Materialgesetze	61
5.5.1	Einaxiale Druckversuche	61
5.5.2	Einaxiale Zugversuche	63
5.5.3	Biegezugversuche	64
5.5.4	Entwicklung eines Bemessungsmodells	68
5.5.5	Brandverhalten	72
5.5.6	Ermüdungsverhalten	75
5.5.7	Zeitabhängiges Verhalten	78
5.5.8	Weitere durchgeführte Untersuchungen	82
6	Zusammenfassung und Ausblick	87
6.1	Zusammenfassung	87
6.1.1	Materialentwicklung (Uni Augsburg)	87
6.1.2	Upscaling (TUM)	
6.2	Ausblick	
6.2.1	Materialentwicklung (Uni Augsburg)	
6.2.2	Upscaling (TUM)	89
Abbildu	ungsverzeichnis	93
Tabelle	nverzeichnis	97
Queller	verzeichnis	99

Abkürzungsverzeichnis

CF	Carbonfaser (engl. carbon fibre)
Demin. H ₂ O	Demineralisiertes Wasser
f _{ck}	einaxiale Druckfestigkeit
f _{ct}	Biegezugfestigkeit
Gew%	Gewichts- bzw. Massenprozent
KG	Korngröße
MS	Mikrosilika
NBM	Nachbehandlungsmittel
RPM	Umdrehungen pro Minute (engl. revolutions per minute)
SMA	Statisch-mechanische Analyse
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UHPC	ultrahochfester Beton (engl. ultra high performance concrete)
Vol%	Volumenprozent

1 Einleitung

1.1 Themenrelevanz und Motivation der Entwicklung von Portlandzementmörteln mit gerichteten Carbonfasern

Für die Weiterentwicklung des Werkstoffs Beton steht neben einer Material- und Energieeinsparung auch die Verbesserung der Materialeigenschaften im Vordergrund. In diesem Projekt sollen Kennwerte und Materialgesetze für die Bemessung und Konstruktion von Bauteilen aus carbonkurzfaserbewehrtem Beton entwickelt werden, der nach einem neuen Verfahren hergestellt werden soll und verbesserte Zugeigenschaften aufweist. Die Grundlage resultiert aus einem an der Universität Augsburg entwickelten Verfahren, bei dem Carbonfasern durch ein spezielles Injektionsverfahren innerhalb vom Zementstein parallel ausgerichtet werden. In diesem vorangegangenen Forschungsvorhaben konnten hierbei an Kleinstproben erhebliche Zugfestigkeitssteigerungen erzielt werden. Mit der Erhöhung der Zugfestigkeit könnte ggfs. auf herkömmliche Bewehrungselemente verzichtet werden, allerdings ist hierfür das Verfahren auf reale Bauteilgrößen zu übertragen.

1.2 Grundlagen der Technik

Mit dem an der Universität Augsburg entwickeltem Herstellungsverfahren für bewehrten Zementstein kann die Ausrichtung beigemischter, relativ kurzer, thermisch vorbehandelter Carbonfasern, die bevorzugt in Recyclingprozessen aus faserverstärkten Kunststoffen aufbereitet werden sollen, durch eine Düse gezielt eingestellt werden.

Maßgebend bei der Herstellung des carbonkurzfaserverstärkten Zementsteins ist die räumliche Orientierung der Carbonfasern. Mittels eines Düsenverfahrens wird eine möglichst homogene Ausrichtung der Fasern erzielt. Herstellungsbedingt müssen dabei die Carbonfasern länger sein als der Durchmesser der Düse (es wurden beispielsweise 3 mm lange Carbonfasern mit einem Düsendurchmesser von 2 mm verwendet).

Durch die Ergänzung des Zementleims mit bis zu 3 Vol.-% Carbonkurzfasern kann eine außerordentlich effiziente Bewehrung des Zementsteins auf der Mesoebene erreicht werden und eine signifikante Erhöhung des Verhältniswertes von Zug- und Druckfestigkeit bei erhärteten Zementsteinproben erzielt werden. Entsprechend dem Lastverformungsdiagramm (Abbildung 1-1) ergeben sich an kleinformatigen Proben Biegezugfestigkeiten, die dem 13,4-fachen von unbehandeltem Zementstein entsprechen. Auch die zentrische Zugfestigkeit des Zementsteins konnte durch die Modifikation mit gerichteten Carbonfasern signifikant erhöht werden.



Abbildung 1-1: Spannungs-Dehnungs-Linie (aus Biegezugversuch) für Proben mit unterschiedlicher Carbonfasermenge und –orientierung [1].

Die Eignung der Carbonfasern als vielversprechendere Lösung im Vergleich zu anderen hochfesten Stoffen im Hinblick auf das Ersetzen von Stahl zeigt Tabelle 1-1. Die hohe Zugfestigkeit ermöglicht einen effizienten Einsatz von geringen Carbonfasermengen, zusätzlich führt ein hoher Elastizitätsmodul zwischen 200 und 600 GPa zu kleineren Bauteildurchbiegungen.

Material	Druckfestigkeit [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Biegezugfestigkeit [MPa]
Normalbeton	45 ^[2]	3 ^[3-5]	5 ^[3, 4]
Ultra-hochfester Beton	250 ^[6]	8 [6]	10 ^[6]
Baustahl	700 [7]	500 [7]	-
Stahlfasern	-	1.000 ^[5, 8]	-
Glasfasern	-	3.000 ^[5]	-
Aramid-Fasern	-	3.000 ^[5]	-
Carbonfasern	-	4.000 ^[9]	-

Tabelle 1-1: Vergleich der Festigkeit von Baustoffen und Hochleistungsfasern

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll das Potential dieses neuen, modifizierten Hochleistungswerkstoffs durch experimentelle Untersuchungen und theoretische Studien für Anwendungen im Bauwesen mit dem Ziel erschlossen werden, bislang erforderliche Bewehrungsmengen deutlich zu reduzieren bzw. ganz auf konventionelle Bewehrung zu verzichten. Die damit verbundenen Nachteile wie hohe Herstellungskosten, eingeschränkte Dauerhaftigkeit und Standsicherheit durch Korrosionsschäden und Ermüdungsbrüche sowie ein ungünstiges Brandverhalten werden abgemindert. Ein weiterer Vorteil ist das für Bauzwecke wünschenswerte duktile Verhalten durch die Zugabe von Carbonfasern.

Es werden auch rezyklierte Carbonfasern verwendet und auf deren Dauerhaftigkeit und Lebenszyklus hin betrachtet. Durch den Einsatz rezyklierter Carbonfasern werden Ressourcen geschont und Wertstoffe über die Verwendung in langlebigen Bauteilen im Stoffkreislauf gehalten.

Für das Projekt ist zunächst eine Weiterentwicklung des Herstellungsverfahrens geplant, indem das Verfahren auf größere Bauteile angewendet werden soll (Upscaling). Im Hinblick auf die aus üblichen Bauteilgeometrien resultierenden Volumina soll dann in einem interaktiven, experimentell gestützten Verfahren untersucht werden, wie sich die erreichbaren Festigkeiten durch die zusätzliche Einbringung von Füllstoffen verändern. Durch die Zugabe von Füllstoffen können Materialeinsparungen erzielt werden.

Unter anderem soll auch die Betonzusammensetzung für die Probekörper festgelegt werden. Gleichzeitig sollen die Baustoffe mit Hilfe eines softwaregestützten bildgebenden Verfahrens analysiert werden, um somit den Baustoff laufend optimieren zu können.

Mit den anschließenden experimentellen Untersuchungen werden sowohl statische als auch dynamische Prüfungen durchgeführt. Dazu gehören die einaxiale Zug- und Druckfestigkeit und das Lastabhängige Verformungsverhalten im Kurzzeit- und im Zeitstandversuch in Abhängigkeit von der Neigung der gerichteten Fasern gegen die Beanspruchungsrichtung. Ferner ist auch eine Mindestrobustheit gegenüber zyklischer Beanspruchung für Anwendungen im Hochbau mit vorwiegend ruhender Beanspruchung zu fordern und experimentell nachzuweisen.

Im Hinblick auf die thermische Beanspruchung des Werkstoffs im Brandfall ist darüber hinaus das temperaturabhängige Verhalten im Brandversuch zu untersuchen.

Abschließend werden die gewonnenen Daten ausgewertet und in ein praxistaugliches Bemessungsmodell überführt.

2 Stand der Forschung

2.1 Hochfeste faserverstärkte Portlandzementmörtel

Seit Ende der 1970er Jahre ist "Ultra High Performance Concrete" (kurz: UHPC, deutsch: "ultrahochfester Beton") bekannt und nach umfangreichen Forschungsanstrengungen auch im kommerziellen Maßstab verfügbar. So findet dieser Hochleistungsbeton auch mit wachsendem Interesse den Weg in die praktische Anwendung des modernen Bauwesens. Dabei wurden durch feinvermahlene Zemente, einer bis ins Detail abgestimmten Zusammensetzung der Korngrößen von Zugschlägen und durch neu entwickelte Hochleistungsverflüssiger Betone mit extrem hoher Druckfestigkeit von über 250 MPa, (entsprechend einer mehr als 5-fachen Festigkeit von Normalbeton), entwickelt [6, 10]. Einen Schwachpunkt stellt jedoch nach wie vor die Zug- bzw. Biegezugfestigkeit unbewehrter Hochleistungsbetone dar, die nicht im selben Maße wie die Druckfestigkeit gesteigert werden konnte, wodurch es auch bei UHPC in Regelfall stets notwendig ist, tragende Bauteile zu armieren. Neben Betonstahl als Bewehrungsmaterial wurde beginnend in den 1960er Jahren Untersuchungen bzgl. des Zumischens von reißfesten Kurzfasern in die Zementmischung durchgeführt [11, 12]. Von hohem Interesse sind dabei vor allem synthetische Hochleistungsfasern, wie etwa Stahl-, Glasoder Carbonfasern, die hohe Zugfestigkeiten (bis zu 6000 MPa) und hohe Elastizitätsmodule (bis zu 600 GPa) aufweisen, wodurch eine effektive Verstärkung der Zementmatrix ermöglicht wird [12, 13]. Derart hergestellte zementbasierte Verbundwerkstoffe beinhalten bis zu 10 Volumenprozent Bewehrungsfasern [9] und weisen im Zug- bzw. Biegezugverhalten völlig neue Eigenschaften im Vergleich zu "klassischen" Baustoffen auf Portlandzementbasis auf [14-18].

Unbewehrte Portlandzementsysteme zeigen Sprödbruchverhalten im Zug- bzw. Biegezugversuch, d. h. Kraft und Verformung des Werkstoffs nehmen proportional zu, bis die maximale Tragfähigkeit erreicht ist und der Werkstoff schlagartig versagt [19], wie Abbildung 2-1 zeigt. Dabei bildet sich beim Erreichen der maximalen Tragfähigkeit ein Initialriss aus, der sich in das Bauteil immer weiter vergrößert. Da keine Mechanismen vorhanden sind, die die Vergrößerung des Initialrisses effektiv verhindern würden, versagt das Material schlagartig. Hingegen kann durch Faserzusatz die maximale (Biege-) Zugfestigkeit erhöht werden. Durch die zugfesten Fasern im Werkstoff können dabei Spannungen vom Beton in die Carbonfasern umgelagert werden, wodurch der Initialriss "überspannt" wird und sich zahlreiche Sekundärrisse ausbilden. Durch diese Mehrfachrissbildung werden folglich Spannungen aus der Rissprozesszone abgleitet und damit der Initialriss selbst stabilisiert [14-17, 20]. Hervorgerufen wird die Mehrfachrissbildung dadurch, dass es weniger Energie erfordert einen Sekundärriss zu erzeugen als den schon vorhandenen Initialriss weiter zu öffnen. Während des mechanischen Tests zeigt das faserverstärkte Material dabei zunächst linear-elastische Deformation, die in plastische Deformation übergeht. Plastische Deformation der Probe im Biegezugversuch ist dabei typisch für die Ausbildung eines Rissnetzwerks hervorgerufen durch Mehrfachrissbildung. Weiterhin geht eine plastische Deformation des Werkstoffs ebenso mit der Absorption von Verformungsenergie einher, wodurch das Material in der Regel höhere Festigkeit und Bruchzähigkeit als faserfreier Beton aufweist [21].

Die Effektivität einer Faserbewehrung kann nach Wille et al. [14] in 5 Kategorien nach Art des Bruchverhaltens eingeteilt werden, wodurch gleichzeitig eine Klassifizierung von Normalbeton bis hin zu faserverstärkten Hochleistungsbetonen vorgenommen werden kann. Entscheidend dabei ist das sog. Nachbruchverhalten des Materials, also die Geometrie der Kraft-Verformungs-Kurve nachdem sich ein erster Riss (Initialriss) ausgebildet hat, erkennbar im Zug- bzw. Biegezugversuch. Unbewehrter Normalbeton zeigt aufgrund des Sprödbruchverhaltens keinerlei Nachrissfestigkeit und wird nach Wille et al. der niedrigsten Kategorie 0 zugeordnet. Faserverstärkte Betone zeigen in der Regel eine Nachrissfestigkeit und können anhand der Geometrie der Kraft-Verformungs-Kurve in die Kategorien 1 bis 4 eingeteilt werden, je nachdem wie wirksam die Faserbewehrung ist. Bei faserverstärkten Betonen mit nur geringfügig wirksamer Faserbewehrung sinkt die Nachrissfestigkeit bei weiterer Belastung deutlich ab und der Werkstoff vermag nur mehr geringem Lasteintrag Stand zu halten (vgl. Abbildung 2-1). Dieses Verhalten wird im Zugversuch als "strain softening" und im Biegezugversuch als "deflection softening" bezeichnet. Nach Wille et al. weisen faserverstärkte Betone mit derartigem Bruchverhalten eine leicht erhöhte (Biege-)Zugfestigkeit und eine erhöhte Bruchzähigkeit auf und können der Klasse 1 und 2 zugerechnet werden. Weist das Material hingegen eine deutlich ansteigende Nachrissfestigkeit auf, wie ebenfalls in wie Abbildung 2-1 dargestellt ist, so wird im Zugversuch von "strain hardening" und im Biegezugversuch von "deflection hardening" gesprochen [17, 22]. Betone mit derartigem (Nach-)Bruchverhalten weisen eine (stark) erhöhte (Biege-)Zugfestigkeit und eine stark erhöhte Bruchzähigkeit auf und werden nach Wille et. al. in die höchsten Klassen 3 und 4 eingeteilt. Damit können faserverstärkte Baustoffe, die "strain bzw. deflection hardening" zeigen, als zugfeste Hochleistungsbetone bezeichnet werden. Weiterhin ist in der Fachliteratur gut dokumentiert, dass "strain bzw. deflection hardening" mit einer erheblichen Erhöhung der (Biege-)Zugfestigkeit des Materials einhergeht, wobei experimentell bis zu 500 % Steigerung im Vergleich zu einer unbewehrten Referenz erreicht wurde. Absolute Biegezugfestigkeiten von bis zu 50 MPa sind von verschiedenen Autoren nachgewiesen worden [9, 23-30].



Abbildung 2-1: Vergleich der Kraft-Verformungskurven von Normalbeton, Beton mit nur geringfügig wirksamer Faserbewehrung ("strain bzw. deflection softening") und faserverstärktem Hochleistungsbeton ("strain bzw. deflection hardening") im (Biege-)Zugversuch.

2.2 Faserverstärkte Portlandzementmörtel mit gerichteten Carbonkurzfasern

Neben dem Einrühren der Fasern in eine Zementmörtelmischung wurden Ende der 1990er Jahre Untersuchungen durchgeführt, die Faser-Zementmasse mittels eines Extruders zu verarbeiten [31]. Ziel war es die Dichte des Mörtels bzw. Betons zu erhöhen, da durch die Kompression des Materials beim Extrudieren die Porosität signifikant reduziert werden kann. In diesem Zuge konnte man nachweisen, dass es beim Extrudieren zu einer Ausrichtung der Verstärkungsfasern parallel zur Extrusionsrichtung kommt [32-34]. Für extrudierte Zementleimmischungen, mit einem Anteil von bis zu 5 Vol.-% an teilweise ausgerichteten Glasfasern konnten dabei bis zu 35 MPa Biegezugfestigkeit nachgewiesen werden [35, 36].

An der Universität Augsburg wurde aufbauend auf den Erkenntnissen der extrudierten Faserbetone ein neuer Ansatz zum Ausrichten von Kurzfasern in einer Zementmischung entwickelt [1]. Dieser Ansatz ist die Abkehr vom Gießen der Faser-Zementmischung hin zu einem Spritzverfahren, wobei die Zementmasse durch eine Düse gedrückt wird. Durch eine Reduzierung des Düsendurchmessers auf Abmessungen kleiner oder gleich der mittleren Faserlänge der zugemischten Verstärkungsfasern ist es hierbei möglich, den Fasern eine Vorzugsorientierung beim Durchtritt durch den Düsenauslass aufzuzwingen, wie in Abbildung 2-2 dargestellt ist. Bei den typischerweise an der Universität Augsburg verwendeten 3 mm langen Carbonfasern (kurz: CF)

ist ein Düsendurchmesser von etwa 2 mm ausreichend, um eine Orientierung der CF zu erreichen, wie an der ESEM-Aufnahme einer Bruchkante ersichtlich wird (Abbildung 2-2 Innenbild). Die Orientierung der CF ist dabei parallel zur Durchströmungsrichtung der Zementmasse durch die Düse.



Abbildung 2-2: Skizze der Düsentechnik; Innenbild: Ausgerichtete CF an einer Bruchkante im Elektronenmikroskop (nach [1]).

Es wurde eine quantitative Analyse der Vorzugsorientierung der CF mit der *ImageJ/Fiji* Software und dem *Directionality* Plugin durchgeführt und dabei festgestellt, dass ein hoher Anteil an CF in die gewünschte Vorzugorientierung gezwungen werden kann. In Abbildung 2-3 ist die Anhängigkeit der Orientierung (-80° bis 80°) der CF von einer gegossenen und 2 gespritzten Proben (1 und 3 Vol.-% CF) dargestellt. Die schwarzen Säulen entsprechen der gegossenen Probe, die roten Säulen der Probe mit 1 Vol.-% gerichteten CF und die blauen Säulen der Probe mit 3 Vol.-% gerichteten CF. Summiert man den prozentualen Faseranteil, der mit Versätzen von ± 20 ° um die 0 ° Hauptorientierung ausgerichtet ist, werden bei 1 Vol.-% etwa 62 % der CF und bei 3 Vol.-% etwa 71 % der Fasern in der gewünschten Vorzugsrichtung orientiert. Dies zeigt, dass durch die in Augsburg entwickelte Düsentechnik ein hoher Anteil der Fasern in eine Vorzugsorientierung gezwungen werden kann.



Abbildung 2-3: Statistische Analyse der Faserorientierung (mittels Dünnschliffaufnahmen und dem ImageJ Directionality Plugin) von Proben mit homogen dispergierten CF und 1 bzw. 3 Vol.-% ausgerichteten CF (nach Lit. [1]).

2.3 Potential für den 3D-Druck von Baustoffen

Der nächste technologische Schritt wäre nun das vorgestellte händische Verfahren hin zu einem automatisierten Herstellungsprozess zu entwickeln, der es ermöglicht Strukturen aus faserverstärktem Zementleim automatisiert zu fertigen. Ein solcher automatisierter Herstellungsprozess ist der 3D-Druck, eine Technologie, die in den späten 1980er Jahren entwickelt wurde, und derzeit immer mehr praktische Einsatzmöglichkeiten erschließt [37], da die Herstellung komplexer, multi-skaliger Strukturen mittels Computer-unterstützter Konstruktion (engl. "computer-aided design", kurz "CAD") möglich wird [38, 39]. Unter den verschiedenen 3D-Druck Konzepten, die bereits entwickelt wurden, stellt das sog. FDM-Verfahren (engl. "fused deposition modelling") eines der ersten und simpelsten dar. Beim FDM-Verfahren werden dreidimensionale Strukturen durch einen computergesteuerten beweglichen Dispenser schichtweise aufgebaut [40]. Übertragen auf Zement-basierte Bindemittelsysteme würde der fertig gemischte Zementleim in einem Vorratsbehälter vorgehalten und durch den beweglichen Dispenser Schicht für Schicht auf die gewünschte Struktur aufgebracht werden. Erste Machbarkeitsstudien hierfür sind in der Literatur bereits dokumentiert [41, 42]. Ähnliche Entwicklungen, hin zu einem automatisierten Herstellungsverfahren, sind auch in anderen Bereichen der Materialwissenschaften zu beobachten wie z.B. bei Werkstoffen für medizinische Anwendungen [43, 44], Knochenersatzmaterialien [45-49] oder faserverstärkte Kunststoffe [50, 51].

Darauf aufbauend ist in Augsburg auf ein FDM 3D-Druck Verfahren zurückgegriffen worden, bei dem schichtweise Strukturen aus Portlandzementleim und zugemischten CF hergestellt und im Computer generierte Prüfkörper gedruckt werden können (siehe

Abbildung 2-4) [52]. Wiederum kommt eine 2 mm breite Extruderdüse in Verbindung mit 3 mm langen CF zum Einsatz. Dabei kann zum einen gezeigt werden, dass auch beim 3D-Druck die CF zu 46 % in einer Vorzugsorientierung ausgerichtet werden können, und zum anderen, dass die Porosität des Materials, im Vergleich zu gegossenen Proben, durch den 3D-Druck nicht wesentlich steigt. Weiterhin kann auch beim 3D-Druck durch die Faserausrichtung eine deutliche Erhöhung der Biegezugfestigkeit auf bis zu 30 MPa der hergestellten Prüfkörper erreicht werden. Da der Druckpfad, also der Verfahrweg des Extruders beim Druck, in der 3D-Druck Software festgelegt werden kann, kann die Biegezugfestigkeit von Prüfkörpern schon am Computer gesteuert werden. Werden Strukturen nur in einer Richtung belastet (z.B. Balkenstruktur), so können alle CF in Hauptspannungsrichtung orientiert werden, um mit einem möglichst geringen Fasergehalt maximale Festigkeit zu erreichen.



Abbildung 2-4: (a) 3D-Druck von Prüfkörpern; (b) Skizze der Ausrichtung von CF beim 3D-Druck; (c) mikroskopische Aufnahmen von Proben mit gerichteten CF (nach [52]).

3 Bedeutung und Einsatzmöglichkeiten von Carbonkurzfaserbeton

3D-gedruckter Carbonkurzfaserbeton lässt sich durch das Herstellverfahren fast nur im Fertigteilwerk produzieren, da die Umgebungseinflüsse auf der Baustelle zu stark variieren und sich somit keine gleichbleibende Qualität herstellen lässt. Außerdem ist der Zeitaufwand für den Herstell- und Aushärteprozess nicht für die Nutzung auf der Baustelle geeignet.

Als Fertigteile lassen sich zum Beispiel Balken herstellen, auf die eine Betonplatte oder Trapezbleche aufgelegt werden. Aber auch Platten, wandartige Träger oder Schalenelemente wie ein Silo lassen sich für die Elementbauweise produzieren.



Abbildung 3-1: Mögliche Einsatzgebiete für Carbonkurzfaserbeton: a) Fertigteilbalken zum Auflegen von Betonplatten oder Trapezprofilen, b) Fertigteilplatte, c) Wandartige Träger, d) Silosegmente

Im Bereich von Teilfertigbauteilen lassen sich Unterzüge mit unterschiedlichen Formen herstellen, sodass die auf Zug beanspruchten Bereiche verstärkt ausgeführt werden. Außerdem können Filigranplatten hergestellt werden, wobei dabei auf die derzeit üblicherweise verwendeten Gitterträger verzichtet werden kann. Darüber hinaus lassen sich Balken herstellen, die aus verschiedenen Bereichen bestehen, sodass Carbonkurzfaserbeton auf der Zugseite vorhanden ist und auf der Druckseite ein kostengünstigerer Ortbeton oder ultrahochfester Beton.



Abbildung 3-2: Mögliche Unterzugformen mit verstärktem Zugbereich für Teilfertigteile



Abbildung 3-3: Filigranplatten aus Carbonkurzfaserbeton mit Ortbetonergänzung

Durch die äußerst effektive Nutzung eines Großteils der Carbonfasern ist der hier beschriebene Beton sehr ökonomisch einsetzbar. Gerade im Hinblick auf ressourcenschonende Anwendungen von Baumaterialien hat er deutliche Vorteile im Vergleich zum konventionellen Stahlbetonbau. Ähnlich wie es bei UHPC-Bauteilen der Fall ist, können sehr filigrane Bauteile hergestellt werden. Carbonkurzfaserbeton hat zudem den Vorteil, dass keine Betondeckung zum Korrosionsschutz der Bewehrung erforderlich ist. Damit werden einerseits Ressourcen geschont und andererseits kann das Eigengewicht der Bauteil extrem verringert werden, was ebenfalls ressourcenschonende Vorteile mit sich bringt.

Zurzeit werden Carbonfasern nur zu einem verschwindend geringen Anteil im Bauwesen eingesetzt. Sollten sich Carbonfasern in dieser Branche durchsetzen, werden sehr viel größere Carbonmengen benötigt, wodurch der Kilopreis (derzeit bei ca. 16€/kg) weiter sinken dürfte und der Einsatz dieses Materials noch wirtschaftlicher würde. Durch die größere Nachfrage können die Herstellprozesse mithilfe weiterer Forschung optimiert werden und größere Anlagen führen zu einer wirtschaftlicheren Produktion.

3.1 Ökonomische Auswirkungen

Um die Wirtschaftlichkeit des Carbonkurzfaserbetons darzustellen, wird ein direkter Vergleich eines Tragelements aus Stahlbeton und Carbonkurzfaserbeton hergestellt. Da sich die Herstellungsweise hauptsächlich für Fertigteile eignet, soll auch in Stahlbetonbauweise ein Fertigteil betrachtet werden. In folgender Abbildung ist die Bewehrungsführung dargestellt:





Der in Abbildung 3-4 dargestellte Stahlbetonträger aus dem Beton C25/30 wurde so bemessen, dass ein Bemessungsmoment von 400 kNm aufgenommen werden kann. Dies entspricht einer gleichmäßigen Bemessungslast von 32 kN/m. Der Vergleichsträger aus Carbonkurzfaserbeton wurde mit einem Fasergehalt von 2,0 Vol.-% bemessen (vgl. Kapitel 5.5.4) und die Querschnittsbreite wurde entsprechend angepasst, sodass die Tragfähigkeit wirtschaftlich ausgenutzt wurde. Es hat sich ergeben, dass nur eine Querschnittsbreite von 13 cm erforderlich ist.

Die Grundlagen der Preisermittlung basieren auf einem Angebot einer Baufirma, welche nicht genannt werden möchte, sowie auf tatsächlichen Materialkosten, die während dieses Projekts für Carbonkurzfaserbeton gezahlt wurden.

Es wurde ein wirtschaftlicher Direktvergleich der beiden Ausführungsvarianten durchgeführt. Dabei wurde aufgrund der schwierigen Abschätzbarkeit lediglich der direkte Aufwand (handwerkliches Personal und Material) berücksichtigt, ohne etwaige Vorplanungs-, Projektsteuerungs- und Vertriebskosten zu berücksichtigen.

Material	Stahlbeton	Carbonkurzfaserbeton
Schalung	15,3 m², 411 €	-
Beton	C25/30, 1,3 m³, 156 €	UHPC, 0,85m ³ , 537 €
Bewehrungsstahl	258 kg, 232 €	-
Carbonfasern	-	30 kg, 487 €

Tabelle 3-1: Vergleich der Materialkosten

Personal & Maschinen	Stahlbeton	Carbonkurzfaserbeton
Schalungsarbeit	823€	-
Bewehrungsarbeit	844 €	-
Betonagearbeit	243€	1830 €

Entsprechend der Auflistung in Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 ergibt sich für den Stahlbetonträger eine Gesamtsumme von ca. 2709€, für den carbonkurzfaserverstärkten Träger ca. 2854 €. Zu beachten ist dabei allerdings, dass die Personal- und Maschinenkosten für den Carbonkurzfaserbetonträger nur eine grobe Schätzung sein können, da erst die Zukunft zeigen wird, welche maschinellen Möglichkeiten sich zur Herstellung eines solchen Trägers ergeben. In dieser Berechnung wurden die Kosten eines großformatigen 3D-Druckers mit 300.000 € angenommen und über 10 Jahre abgeschrieben. Dieser Drucker kann mithilfe von einer dreifachen Multidüse (vgl. Kapitel 5.4.2.2) und drei parallel und unabhängig voneinander agierenden Druckköpfen ca. 22,5 I/h verarbeiten.

Dieser Vergleich zeigt, dass der Träger aus Carbonkurzfaserbeton grundsätzlich wirtschaftlich hergestellt werden kann. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass gerade bei Außenbauteilen eine längere Nutzbarkeit des Tragwerks durch die Verwendung von UHPC (extrem widerstandsfähig in allen Expositionsklassen) und Carbonfasern entsteht und damit eine Lebensdauer von über 100 Jahren durchaus erreicht werden kann, wohingegen für eine Stahlbetonstruktur im Allgemeinen nur eine Nutzungsdauer von 50 Jahre angesetzt ist. Damit ist der Carbonkurzfaserbeton grundsätzlich ökonomischer als Stahlbeton.

3.2 Ökologische Auswirkungen

Primärenergiebedarf und Globales Erwärmungspotential der in Tabelle 3-1 dargestellten Rohstoffe wurden durch Recherche in der wissenschaftlichen Literatur und durch einsehen von Herstellerangaben herausgearbeitet. Die entsprechenden Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen pro Mengen- bzw. Volumeneinheit können in Tabelle 3-3 eingesehen werden.

Pobatoff	Primäronorgiohodorf	Globales	
Ronston	Filliarenergiebeuari	Erwärmungspotential	
C25/30	1209,8 MJ/m ^{3 (a)}	191,7 kg CO ₂ -Äq./m ^{3 (a)}	
UHPC	3440 MJ/m ^{3 (b)}	580,0 kg CO ₂ -Äq./m ^{3 (c)}	
Rohstahl	15,9 MJ/kg ^(d)	1356 kg CO ₂ -Äq./t ^(d)	
Carbonfasern,	412 M 1/kg ^(e)	29450 kg CO ₂ -Äq./t ^(f)	
neuwertig	4 IZ MJ/Kg		
Carbonfasern,	27 4 M I//ca ^(e)	4652 kg CO Äg († ^(g)	
pyrolytisch rezykliert	57,4 IVIJ/KY	4000 Ky UU2-Ay./(^(*)	

Tabelle 3-3: Primärenergiebedarf und Erwärmungspotential der im Projekt verwendeten Materialien

(a) Datenbank Ökobaudat, Summe der regenerierbaren und nicht-regenerierbaren Primärenergie [53], (b) siehe Link et al [54], (c) siehe Kwon u. Wang, Quelle beschreibt CO₂-Bilanz mehrerer UHPC-Mischungen, für diese Kalkulation wurde der auf die nächste Zehnerstelle aufgerundete Median dieser Werte verwendet

[55], (d) siehe Ketelaer u. Vögele [56], Werte für das Jahr 2012, (e) aufgrund der großen Spannweite an Daten, die für den Primärenergiebedarf der CF-Herstellung dokumentiert sind, wurde der Median der aus mehreren Veröffentlichungen berechnet [57], [58], [59], [60], (f) nach Angaben des Wiederaufbereiters ELG Carbon Fiber Ltd. [61], (g) siehe Meng et al. [62]

Mit der in Tabelle 3-1 dargestellten Stoffmengenkalkulation für einen Träger kann nun das genaue Erwärmungspotential und der Primärenergiebedarf der eingesetzten Rezeptur berechnet werden.

Tabelle 3-4 zeigt den Primärenergiebedarf in MJ für die Rezepturen. Für Carbonkurzfaserbeton wird für die Kalkulation zwischen fabrikneuen und rezyklierten Fasern unterschieden.

Tabelle 3-4: Kalkulation des Primärenergiebedarfs (in MJ) der in Tabelle 3-1 dargestellten Rezepturen

Rohstoff	Stahlbeton	Carbonkurzfaserbeton (neuwertige Fasern)	Carbonkurzfaserbeton (rezyklierte Fasern)
C25/30	1572,7	-	-
UHPC	-	2924,0	2924,0
Bewehrungsstahl	4102,2	-	-
Carbonfasern, neuwertig	-	12360,0	-
Carbonfasern, rezykliert	-	-	1120,8
Summe	5674,9	15284,0	4044,8

Tabelle 3-5 zeigt die entsprechende Kalkulation für das Erwärmungspotential der Rezepturen. Die Posten sind in kg CO_2 -Äq. angegeben.

Tabelle 3-5: Kalkulation des Erwärmungspotentials (in kg CO₂-Äquivalent) der in Tabelle 3-1 dargestellten Rezepturen

Rohstoff	Stahlbeton	Carbonkurzfaserbeton (neuwertige Fasern)	Carbonkurzfaserbeton (rezyklierte Fasern)
C25/30	249,2	-	-
UHPC	-	493,0	493,0
Bewehrungsstahl	349,8	-	-
Carbonfasern, neuwertig	-	883,5	-
Carbonfasern, rezykliert	-	-	139,6
Summe	599,1	1376,5	632,6

Auf den ersten Blick erscheint es so, als dass Carbonfaserbeton durch die Energiebeiträge von UHPC und Carbonfaser deutliche ökologische Nachteile aufzeigen würde. Geringfügig wird dies bereits durch die wesentlich höhere Tragfähigkeit des Materials ausgeglichen, die einen geringeren Materialeinsatz erlaubt. Bewertet man jedoch die Ökobilanz für Carbonkurzfaserbeton mit rezyklierten Fasern (pyrolytisches Recycling von CFK), kann der Werkstoff mit Stahlbeton auf Augenhöhe mithalten (im Falle des Erwärmungspotentials) oder ist sogar besser als der Stahlbeton (im Falle der Primärenergie). Der Einsatz von fabrikneuen Fasern zeigt sich allerdings als sehr energieund emissionsintensiv. Der momentane Forschungsstand auf dem Gebiet von carbonfaserverstärktem Beton legt jedoch nahe, dass durch das inerte Verhalten der Carbonfasern und das extrem dichte Gefüge von UHPC Bauteile wesentlich längere Lebensdauern überstehen. Für Stahlbeton werden typischerweise Lebensdauern von 40-80 Jahren angegeben, für carbonfaserverstärkte Baustoffe wird von Lebensdauern bis zu 200 Jahren ausgegangen. [63]. Um die Bauteile mit diesem Hintergrund zu vergleichen, wird die aufgebrachte Primärenergie und das Erwärmungspotential auf eine vorgesehene Lebensdauer normiert. Hierbei wird der Carbonkurzfaserbeton sowohl für Lebensdauern von 50 als auch 200 Jahren, der Stahlbeton lediglich für eine Lebensdauer von 50 Jahren betrachtet.

Für die Primärenergie ist dies in Abbildung 3-5, für das Erwärmungspotential in Abbildung 3-6 dargestellt.



Abbildung 3-5: Einfluss der Lebensdauer des Stahlträgers auf die aufgebrachte Primärenergie. Kann das Bauteil aufgrund der positiven Dauerhaftigkeitseigenschaften der CF und des UHPC länger eingesetzt werden, so relativiert sich der hohe Energieeintrag der Rohstoffe wieder.

Auffällig beim Primärenergieverbrauch ist, dass die pyrolyitische Rezyklierung den Energiebedarf der Carbonfasern sehr weit senken kann. Bei gleicher Lebensdauer ist der Faserbeton effizienter als Stahlbeton.



Abbildung 3-6: Einfluss der Lebensdauer des Stahlträgers auf das Erwärmungspotential. Kann das Bauteil aufgrund der positiven Dauerhaftigkeitseigenschaften der CF und des UHPC länger eingesetzt werden, so relativiert sich die hohe CO₂-Emission der Rohstoffe wieder.

In beiden Fällen zeigt sich, dass wenn mit Carbonkurzfaserbeton entsprechend der Literaturannahmen Bauteile mit extremer Dauerhaftigkeit und Lebenszeit hergestellt werden können, so ist sogar der Einsatz fabrikneuer Carbonkurzfasern nachhaltiger als ein Stahlbetonbauteil mit durch Korrosion begrenzter Lebensdauer. Als ungefährer ,ökologischer Break-Even-Point' kann durchaus bereits eine Lebensdauer von 100 Jahren angesetzt werden. Beim Einsatz rezyklierter Fasern erhält man ein energetisch effizientes und emissionsarmes Bauteil.

Jüngste Forschungsergebnisse am Werner Siemens-Lehrstuhl für Synthetische Biotechnologie der TUM haben ein neues System aufgezeigt, das eine klimaneutrale Herstellung von Carbonfasern beschreibt. Dabei wird Kohlenstoff aus der Atmosphäre mithilfe von Algen gebunden und zu Ölen weiterverarbeitet. Aus diesen lässt sich das für die Carbonfaserherstellung benötigte Präkursormaterial Polyacrylnitril (PAN) produzieren und mithilfe von Parabolspiegeln zu Carbonfasern weiterverarbeiten. [64, 65]. Damit ist die Carbonfaserherstellung als klimaneutral zu bewerten. Der Primärenergieverbrauch sinkt dadurch beträchtlich im Vergleich zum Stahlbetonbau.

Am Ende der Nutzungsdauer eines Bauteils sollte dies möglichst recycelt werden, um möglichst viel Material im Kreislauf zu erhalten und ressourcenschonend zu arbeiten. Im Carbonkurzfaserbeton liegen die Fasern vereinzelt mit direkter Anbindung an die Betonmatrix vor. Die für das Tragverhalten wichtigen Verbundkräfte stellen allerdings eine Hürde in der Wiedergewinnung der Fasern dar. Bei einer mechanischen Zerkleinerung der Strukturen sind die CF immer noch an Betonbrocken gebunden, es sei denn, diese werden zermahlen. In diesem Fall werden allerdings auch die Carbonfasern in Mitleidenschaft gezogen und lassen sich höchstens noch als Pulver weiterverarbeiten. Die Verwendung von Säuren zur Lösung des Zementsteins ist grundsätzlich möglich, wird aber vermutlich durch das dichte Gefüge und den chemischen Wider-

stand des hochfesten Betons erschwert. Da sich die Carbonfasern allerdings nicht in der Säure lösen, sollten diese wiederverwertbar sein.

4 Materialtechnische Untersuchungen (Uni-A)

4.1 Probenpräparation

4.1.1 Carbonfasern

Für die Versuche im Rahmen dieses Forschungsprojektes kamen CF zum Einsatz, deren Eigenschaften und jeweilige Bezugsquellen in Tabelle 4-1 aufgelistet sind.

Faser	Durchmesser [µm]	Dichte [g/cm ³]	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]	Schnittlänge [mm]
CF-1	7	1,76	3950	230	3
CF-2	7	1,76	3950	230	6
CF-3	18	1,63	670	30	6
CF-4	7	1,7-2,0	3500	230	1,5
CF-5	7	1,7-2,0	3500	230	2,0
CF-6	7	1,7-2,0	3500	230	4 - 6

Tabelle 4-1: Eigenschaften der Carbonschnittfasern

4.1.2 Oxidation der Faseroberfläche

Um die Anbindung der Faseroberfläche an die zementöse Matrix zu verbessern, wurde bei beschichteten Fasern eine thermische Behandlung der CF in einem Nabertherm Muffelofen mit einer Heizrate von 200 °C/h auf 425 °C durchgeführt (vgl. Abbildung 4-1b). Der Ofen wurde bei der gewünschten Endtemperatur 2 Stunden gehalten und anschließend ausgeschaltet. Wie dem TGA-Graphen in Abbildung 4-1a zu entnehmen ist, wird bei dieser Endtemperatur die Schlichte von der Faseroberfläche vollständig entfernt und es findet eine leichte Oxidation (einhergehend mit einem geringen Masseverlust) statt.



Abbildung 4-1: (a) TGA-Kurve von CF in Inertgas- und Sauerstoffatmosphäre; (b) CF im Muffelofen zur thermischen Behandlung.

4.1.3 Weitere Fasertypen

Neben CF wären auch weitere Hochleistungsfasern als Bewehrung für Portlandzementsysteme denkbar, da diese Fasern ähnliche Eigenschaften wie CF aufweisen. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über Fasern und deren Eigenschaften, die im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls als Verstärkungsfasern für Portlandzementmörtel untersucht wurden.

Faserprobe	Durch- messer [µm]	Dichte [g/cm ³]	Zugfestig- keit [MPa]	E-Modul [GPa]	Schnitt- länge [mm]
Glasfaser	20	2,68	3.500	72	6
Basaltfaser	13	2,67	4.200	93	6
Dyneema-Fasern	17	0,98	3.600	120	6
Aramid-Fasern	12	1,44	2.900	127	6

Tabelle 4-2: Eigenschaften der verwendeten Hochleistungsfasern

4.1.4 Zementmischungen

Für die Zementproben wurde Portland CEM I 52,5 R Zement (Schwenk Zement KG), Mikrosilika und ein Hochleistungsverflüssiger verwendet. Die Proben mit gerichteten CF wurden mit einer Mischung aus 75 % Zement und 25 % Mikrosilika bei einem w/z-Wert von 0,3 (inkl. Fließmittel) durchgeführt. Die genaue Zusammensetzung der angefertigten Zementmörtelmischung ist Tabelle 4-3 zu entnehmen. Die CF wurden abgewogen und der fertig angerührten Zementmischung anschließend zugemischt.

Material	Zementmörtelmischung [Gew%]
CEM I 52,5 R	61,6
Mikrosilika	20,7
Demin. H ₂ O	15,2
Fließmittel	2,6

Tabelle 4-3: Zusammensetzung der verwendeten Faserzementmischung

4.1.5 Prüfkörperpräparation

Für die Proben mit gerichteten CF wurden alle Feststoffe, bis auf die Carbonfasern, trocken vermischt und anschließend ein Gemisch aus Anmachwasser und Fließmittel zugegeben. Das Verrühren erfolgte, wenn nicht anders beschrieben, mit einem Heidolph RZR 2102 Laborrührer (Propellerrührer, Durchmesser Rührgefäß: 9 cm) bis sich eine homogene Zementmischung einstellte. Anschließend wurden die CF zugefügt und weiter gerührt bis die CF in der Zementmischung homogen vereinzelt waren. Nach dem Anmischen wurde die CFRC-Mischung in eine 20 ml Einwegspritze (B. Braun Melsungen AG) gefüllt und für 3-Punkt-Biegezugversuche in Teflonformen mit den Maßen 60 \times 13 \times 3 mm (\pm 0,3 mm) gespritzt. Das Anfertigen der Prüflinge ist in Abbildung 4-2 dargestellt.



Abbildung 4-2: Anfertigung der Prüflinge für den 3-Punkt-Biegezugversuch: (a) Spritze gefüllt mit Zementmischung, (b) Einbringen der Zementmischung in parallelen Raupen in die Teflonformen (60 × 13 × 3 mm) und (c) Prüfkörper nach 28 d für die mechanische Prüfung.

Für die Versuche zur Analyse der Mischtechnik wurden neben dem Heidolph RZR 2102 Laborrührer auch andere Mischer verwendet. Zum einen kam ein Speedmixer DAC 800.1 FVZ der Firma Hauschild zum Einsatz. Außerdem wurden Rührversuche mit einem Ecovac der Firma Bredent und einem EL1 Mischer der Firma Eirich durchgeführt. Eine weitere Probe wurde ohne jeglichen mechanischen Mischer nur mit der Hand und einem Spatel angerührt und anschließend die CF ebenfalls händisch darin dispergiert.

Während des Projektverlaufs wurde der Labormischer EL1 von Eirich angeschafft. Der Mischer wird mit dem Eirich-Sternwirbler als Mischwerkzeug eingesetzt. Die mit dem

EL1-Mischer anzumischenden Massen wurden mit dem folgenden Misch- u. Dipsergierprotokoll erstellt:

- Feststoffe (ausgenommen Fasern) 10 Sekunden bei 1000 U/min trocken vormischen
- Innerhalb der nächsten 60 Sekunden Wasser und Fließmittel über einen Tropftrichter zugeben
- Bis zu einer Zeitanzeige von 400 Sekunden bei 1000 U/min weitermischen
- Mischer öffnen, an Mischwerkzeug und Behälterwänden anhaftender Zementkorn in den Ansatz geben
- 60 Sekunden bei 1000 U/min mischen
- 300 Sekunden bei 3000 U/min mischen
- Mischer öffnen und Fasern zugeben
- Fasern bei 300 U/min für 60 Sekunden einrühren

Sollten die 400 Sekunden nicht ausreichen, um das Fließmittel wirksam in den Zementansatz einzudispergieren, wird so lange weitergemischt, bis der Verflüssigungseffekt sichtbar eingetreten ist.

4.1.6 Probenlagerung bis zur Prüfung

Die Lagerung aller angefertigten Proben wurde an die Vorgaben nach DIN EN 12390-2 angelehnt. Nach der Anfertigung wurden die Proben in einen Exsikkator mit 100 %-iger Luftfeuchtigkeit überführt und dort für 24 h belassen. Nach 24 h wurden die Prüfkörper ausgeschalt und für 6 Tage in ein Wasserbad (demin. H₂O) gegeben. Dabei wurden für 6 Prüfkörper etwa 300 ml demin. Wasser verwendet. Anschließend wurden die Proben weitere 21 Tage in einem Exsikkator bei 60 %iger Luftfeuchte über einer gesättigten Natriumbromid-Lösung gelagert und am 28. Tag nach Anfertigung mechanisch getestet.

4.1.7 Statisch-mechanische Analysen

4.1.7.1 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit wurde mittels 3-Punkt-Biegezugversuch bestimmt. Prüfmaschine war eine Zwick/Roell Zwicki-Line Z0.5 mit einer 5 kN Kraftmessdose. Bei allen Messungen betrug die Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min und es wurde eine Vorkraft von 0,5 N auf den Prüfkörper aufgebracht. Die Kraftabschaltschwelle betrug 15 % der Maximalkraft. Der Versuchsaufbau und die Messparameter sind in Abbildung 4-3 dargestellt. Aus der bei der Prüfung ermittelten Maximalkraft *F* kann die Biegezugfestigkeit *f* errechnet werden:

$$f_{CT} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \tag{1}$$

I ist die Auflagerlänge, *b* die Probenbreite und *h* die Probenhöhe. Die Probenmaße wurden vor der Messung mittels Schieblehre auf 0,1 mm genau bestimmt.



Abbildung 4-3: (a) Skizze des Versuchsaufbaus und (b) Fotografie der mechanischen Prüfung mit einem 60 × 13 × 6 mm Biegezugprüfling bei 50 mm Auflagerabstand.

Während der Bestimmung der Biegezugfestigkeit wird automatisch der E-Modul der Probe mitbestimmt. Die Bestimmung der Verformung ε geschieht hierbei über den Traversenweg und berechnet sich aus der maximalen Durchbiegung D der Probe:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot D \cdot h}{_{l^2}} \tag{2}$$

Wie bei der Bestimmung der Biegezugfestigkeit steht h für die Probenhöhe und I für die Auflagerlänge.

Die Ermittlung des E-Moduls geschieht im linear-elastischen Bereich zwischen einer Verformung von 0,02 % und 0,04 %. Der E-Modul kann folgendermaßen berechnet werden:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{0,04} - \sigma_{0,02}}{0,04\% - 0,02\%}$$
(3)

4.1.7.2 Einaxiale Druckfestigkeit

Für die Messung der einaxialen Druckfestigkeit wurde eine Zwick/Roell BZ1-MM14640.ZW03 Prüfmaschine verwendet, die mit einer 50 kN Kraftmessdose ausgestattet war. Bei Prüfungsbeginn 50 N Vorkraft aufgebracht und mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,5 mm/min geprüft. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-4 skizziert. Die Kraftabschaltschwelle wurde wieder auf 15 % der Maximalkraft eingestellt. Durch Ermittlung der Maximalkraft *F* ist die Druckfestigkeit nach folgender Gleichung zu errechnen:

$$f_{CK} = F/_{S_0} \tag{4}$$

 s_0 ist die Querschnittsfläche (Länge × Breite) der Probe. Die Abmessungen der Prüfkörper wurden vor der mechanischen Prüfung mit einer Genauigkeit von 0,1 mm gemessen.



Abbildung 4-4: (a) Skizze des einaxialen Druckversuchs und (b) Fotografie eines Druckversuchs mit einem $15 \times 15 \times 15$ mm Prüfling.

4.2 Analyse der Mischtechnik

Da das händische Eindispergieren der CF nur bei kleinen Ansatzgrößen sinnvoll durchführbar ist, maschinelles Eindispergieren bei hoher Drehzahl jedoch im Hinblick auf Zermahlen der Faser beim Mischvorgang ebenfalls kritisch sein kann, wurde die Machbarkeit der maschinellen Dispergierung an mehreren Mischsystemen geprüft. Die Charakterisierung der Proben erfolgt anhand ihrer Biegezugfestigkeit. Die Mischer und Messergebnisse sind in Tabelle 4-4 aufgelistet.

Tabelle 4-4: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, deren Armierungsfasern mit unterschiedlichen Mischgeräten eindispergiert wurden

Mischer	Faser	Fasergehalt [Vol%]	Biegezugfestigkeit [MPa]
Fasern händisch eingerührt		1 Vol%	46,5 ± 4,3
Fasern händisch eingerührt		3 Vol%	119,6 ± 7,6
Heidolph RZR 2102		1 Vol%	49,6 ± 4,9
Heidolph RZR 2102		3 Vol%	101,1 ± 10,5
SpeedMixer DAC 800.1 FVZ	CF-1	1 Vol%	48,2 ± 3,7
SpeedMixer DAC 800.1 FVZ		3 Vol%	98,6 ± 16,4
Bredent Ecovac		1 Vol%	$56,2 \pm 4,4$
Bredent Ecovac		3 Vol%	87,7 ± 7,4
Erich EL1		1 Vol%	52,0 ± 6,4
Erich EL1		3 Vol%	96,0 ± 7,5

Die Ergebnisse zeigen, dass mittels händischer Einarbeitung in kleinen Ansätzen bereits eine gute Faserdispersion erreicht werden kann. Während bei einem Fasergehalt von 1 Vol.-% mit dem Bredent Ecovac und dem Eirich EL1-Mischer geringfügig höhere Festigkeiten erreicht werden können, liefern fast alle Mischer bei 3 Vol.-% Fasergehalt geringere Festigkeiten als die händisch hergestellte Referenz. Dies kann damit erklärt werden, dass die CF in den sehr leistungsfähigen Mischsystemen teilweise auf Größen unterhalb der kritischen Faserlänge heruntergemahlen werden, wie Abbildung 4-5 zeigt.



Abbildung 4-5: (a) CF vor dem Einrühren, (b) CF nach dem Rühren per Hand, (c) CF nach dem Rühren im Eirich EL1 und (d) CF nach dem Rühren im Bredent Ecovac.

Insbesondere das EL1 Mischsystem der Firma Eirich ist als Gerät für größere Ansatzmengen interessant, es wurde im weiteren Projektverlauf für die Probenpräparation angeschafft.

4.3 Untersuchung der Parameter der Carbonfasern

4.3.1 Untersuchungen zur Faserdicke

Zunächst wurde der Einfluss der Faserdicke auf die Biegezugfestigkeit von Zementmörtelproben untersucht. Zum Einsatz kam einerseits CF-1 Faser mit 7 µm Dicke und zum anderen CF-3 und 18 µm Dicke. Da die Faserdicke bei der Herstellung der CF mit den mechanischen Eigenschaften korreliert, weisen die 18 µm dicken CF eine geringere mechanische Festigkeit und einen geringeren E-Modul als die 7 µm dicken CF auf.

Faser	Fasergehalt [Vol%]	Biegezugfestigkeit [MPa]
Referenz ohne CF	-	12,6 ± 2,3
CF-1	1 Vol%	49,6 ± 4,9
CF-1	3 Vol%	101,1 ± 10,5
CF-3	1 Vol%	18,0 ± 2,2
CF-3	3 Vol%	28,0 ± 1,0

Tabelle 4-5: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, verstärkt mit C-Fasern von unterschiedlichem Durchmesser

CF-1 mit 7 µm Faserdicke zeigt eine Biegezugfestigkeit von ca. 50 MPa bei 1 Vol.-% Fasergehalt und ca. 100 MPa bei 3% Vol.-% Fasergehalt. Die 18 µm dicken CF-3 liegen hingegen bei respektive ca. 20 und ca. 30 MPa. Die Spannungs-Verformungs-Kurven legen nahe, dass bei den Proben mit 7 µm dicken Fasern sogenanntes "deflection hardening" Verhalten ausweisen. Wie im Theorieteil beschrieben, ist deflection hardening typisch für extrem bruchzähe Faserverbundwerkstoffe und damit Beweis dafür, dass die 7 µm dicken CF die Zementmörtelproben sehr effektiv zu verstärken vermögen. Grund hierfür ist zum einen die hohe Zugfestigkeit von ca. 4000 MPa als auch der hohe E-Modul von ca. 230 GPa. Durch den hohen E-Modul können die Fasern praktisch voll belastet werden, bevor die Zementmatrix auf Druck versagt, wodurch Spannungs-Verformung-Kurven im Biegezugzugversuch mit enormen Verformungsvermögen von über 0,8 % bei konstant ansteigender Kraft ermöglicht werden. Dieser weite Verformungsbereich geht mit einer ausgeprägten Mikrorissbildung einher.

Die Kurvenform der Proben mit 18 µm dicken Fasern unterscheidet sich hingegen signifikant von der Form der 7 µm dicken CF. Hier versagt die Matrix schon bei etwa 0,1 % Verformung und der weitere Kurvenverlauf ist für das Auftreten von Faserauszug charakteristisch. Der Grund für die wesentlich schlechtere Wirksamkeit der 18 µm dicken Faser liegt vorwiegend im geringeren E-Modul von 30 GPa und der geringeren Zugfestigkeit von nur 670 MPa. Die Fasern befinden sich bei Deformationen, die einen Bruch der Zementmatrix herbeiführen, nur unter geringer Spannung und eigenen sich daher nicht zur Begrenzung der Rissbreite, und versagt daher mit einem einzelnen Makroriss, statt durch Mikrorissbildung. Entsprechend versagt die Probe bei niedrigen Spannungen und ohne wesentliches "deflection-hardening", wie Abbildung 4-6 zeigt.

Aufgrund der Ergebnisse können CF mit geringer Zugfestigkeit und geringem E-Modul als nicht geeignet für hochfeste Zementmörtel mit gerichteten Fasern angesehen werden.



Abbildung 4-6: Spannungs-Verformungs-Kurven für eine faserfreie Probe, eine Probe mit 3 Vol.-% CF-1 (7 µm Durchmesser, 3 mm Länge) und CF-3 (18 µm Durchmesser, 6 mm Länge)

4.3.2 Untersuchungen zur Faserlänge

Da eine kürzere Faserlänge die Verarbeitbarkeit der Zementmörtelmischung besonders bei hohen Fasergehalten (über 2 Vol.-%) deutlich verbessert, wurden neben 3 mm langen Fasern auch kürzere und längere Fasern untersucht. CF mit einer Länge über 3 mm haben eventuell das Potential für einen besseren Kraftabtrag und können damit zu höheren Festigkeiten führen. Die genauen Materialeigenschaften der Fasern sind in Tabelle 4-1 zu sehen.

Tabelle 4-6 zeigt die Biegezugfestigkeit der hergestellten Probekörper.

Faser	Fasergehalt [Vol%]	Biegezugfestigkeit [MPa]
Referenz ohne CF	-	12,6 ± 2,3
CF-4	1 Vol%	49,0 ± 4,2
CF-4	3 Vol%	102,2 ± 7,8
CF-5	1 Vol%	43,2 ± 2,9
CF-5	3 Vol%	101,8 ± 7,2
CF-1	1 Vol%	49,6 ± 4,9
CF-1	3 Vol%	101,1 ± 10,5
CF-2	1 Vol%	56,2 ± 6,5
CF-2	3 Vol%	115,9 ± 8,1

Tabelle 4-6: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, verstärkt mit C-Fasern unterschiedlicher Schnittlänge

Im Vergleich zur faserfreien Referenz steigt die Biegezugfestigkeit aller verstärkten Proben von ca. 8 MPa auf ca. 45-50 MPa für 1 Vol.-% und ca. 100-115 MPa für 3 Vol.-% Fasergehalt an. Die Festigkeit bleibt dabei für die jeweiligen Fasergehalte im Rahmen der Standardabweichung konstant. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass auch bei einer Faserlänge von 1,5 mm eine überkritische Faserbewehrung vorliegt und demnach auch für eine effektive Verstärkung eingesetzt werden kann. Eine Erhöhung der Faserlänge über 6 mm erscheint weiterhin als wenig sinnvoll, da Verarbeitung und "Spritzbarkeit" des Zementmörtels drastisch abnehmen. Daher sollte die verwendete Faserlänge prinzipiell so gering wie möglich gewählt werden, was nach den vorliegenden Ergebnissen bei 1,5 mm Faserlänge gegeben wäre. Da die Versuche zu den Mischtechniken und Mischersystemen (vgl. Kapitel 4.2) nahelegen, dass bei der Verwendung mechanischer Mischersysteme Fasern unweigerlich gekürzt werden, kann es - je nach verwendeter Mischtechnik - dennoch sinnvoll sein, längere Fasern als 1,5 mm einzusetzen. Es kann außerdem in Aussicht gestellt werden, dass der Einsatz längerer Fasern für weiteres Prozessupscaling sinnvoll sein könnte, da bei Verwendung größerer Düsendurchmesser mit einem Verlust des Ausrichtungseffekts gerechnet werden muss.

4.3.3 Verwendung von rezyklierten Fasern

Aufgrund des hohen Preises von CF (ca. 16 €/kg) und in Hinblick auf die Entwicklung eines nachhaltigen Recycling-Konzeptes für CFK-Bauteile wurden auch rezyklierte CF in die Untersuchungen mit einbezogen. CF-6 wurde entsprechend von einem kommerziellen Wiederaufbereiter bezogen. Die von den Wiederaufbereitern diskutierten Preise bewegen sich zwischen 5 und 7 US-Dollar pro Pfund Carbonkurzfaser (entspricht ungefähr 9,8 €/kg bis 13,8 €/kg). Momentan werden in Pyrolyseverfahren ungefähr 1200 Tonnen Carbonfasern pro Jahr rezykliert. Das Potential für solche Prozesse ist jedoch noch sehr hoch. Im Jahr 2016 fielen 24000 Tonnen Carbonfasermüll an, von dem weniger als 10% rezykliert werden. Dies ist vor allem auch im Hinblick auf die CO₂-Bilanz der Carbonfasern interessant – für neuwertige Fasern werden knapp 30000 kg CO₂äquvivalent pro Tonne Faser freigesetzt, bei Einsatz rezyklierten Fasern reduziert sich dieser Wert auf unter 5000 kg CO₂-äquivalent pro Tonne Faser [66, 67]. Die mechanischen Eigenschaften dieser Fasern entsprechen weitgehend denen der regulären fabrikneuen Faser CF-1. Die Faserlänge liegt zwischen 4 und 6 mm. Untersucht wurden Proben mit 1, 2 und 3 Vol.-% Carbonfasern. Die Ergebnisse sind Tabelle 4-7 zu entnehmen.

Faser	Fasergehalt [Vol%]	Biegezugfestigkeit [MPa]
Referenz ohne CF	-	12,6 ± 2,3
CF-1 (neuwertig)	1 Vol%	49,6 ± 4,9
CF-1 (neuwertig)	2 Vol%	89,7 ± 4,9
CF-1 (neuwertig)	3 Vol%	101,1 ± 10,5
CF-6 (rezykliert)	1 Vol%	44,4 ± 4,0
CF-6 (rezykliert)	2 Vol%	78,2 ± 5,8
CF-6 (rezykliert)	3 Vol%	102,0 ± 7,6

Tabelle 4-7: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, verstärkt mit neuwertigen und rezyklierten C-Schnittfasern

Die Auswertung der Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben zeigt, dass sich bei allen untersuchten Fasergehalten die Festigkeiten der neuen und rezyklierten CF nicht signifikant unterschieden. So weisen neue CF bei 1 Vol.-% etwa 50 MPa, bei 2 Vol.-% etwa 90 MPa und bei 3 Vol.-% etwa 100 MPa auf. Werden rezyklierte CF verwendet, so liegt die Biegezugfestigkeit der Mörtelproben bei etwa 45 MPa, 80 MPa und 100 MPa. Somit können rezyklierte CF als potentielle Armierungsfaser für hochfeste Baustoffe mit gerichteten Fasern bestätigt werden.

4.3.4 Untersuchungen zu weiteren Armierungsfasern

Neben CF sind auch weitere Hochleistungsfasern als Bewehrung für Portlandzementmörtel mit gerichteten Kurzfasern denkbar, da diese Fasern ähnliche Eigenschaften wie CF aufweisen. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über Fasern und deren Eigenschaften, die im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls als Verstärkungsfasern für Portlandzementmörtel untersucht wurden. In Tabelle 4-8 sind die Biegezugfestigkeiten der Zementmörtelproben dargestellt, die mit diesen Bewehrungsfasern hergestellt wurden.
Faser	Fasergehalt [Vol%]	Biegezugfestigkeit [MPa]
Referenz ohne Fasern	-	12,6 ± 2,3
Carbonfaser (CF-1)	1 Vol%	49,6 ± 4,9
Carbonfaser (CF-1)	3 Vol%	101,1 ± 10,5
Aramid-Faser (CF-1)	1 Vol%	22,4 ± 1,5
Dyneema-Faser	3 Vol%	16,2 ± 0,9
Glasfaser	1 Vol%	11,6 ± 1,3
Glasfaser	3 Vol%	28,4 ± 1,8
Basaltfaser	1 Vol%	12,2 ± 0,9
Basaltfaser	3 Vol%	26,4 ± 2,0

Tabelle 4-8: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, verstärkt mit Armierungsfasern aus unterschiedlichen Materialien

Während alle faserverstärkten Proben im Vergleich zur faserfreien Referenz deutlich an Festigkeit gewinnen, kann mit keinem Fasertyp, ausgenommen der Carbonfaser, eine Biegezugfestigkeit von über 30 MPa erreicht werden. Alle verwendeten Fasern wurden so ausgesucht, dass sie in Zugfestigkeit und Länge-zu-Querschnitt-Verhältnis ungefähr mit der Carbonfaser übereinstimmen, die schlechten Festigkeitswerte der Proben müssen daher andere Ursachen haben. Der hauptsächliche Unterschied in den mechanischen Eigenschaften der Aramid-, Basalt-, Dyneema- und Glasfasern im Vergleich zu den CF zeigt sich im E-Modul. Während die verwendeten CF einen E-Modul von 230 GPa aufweisen, liegen die E-Moduln der anderen Faserarten lediglich zwischen 70 und 120 GPa. Die Fasern sind damit wesentlich weniger steif und stehen daher bei dem Versagen der Zementmatrix nicht unter ausreichender Spannung, um Risse in ihrer Breite begrenzen zu können. Folglich kommt es zur Ausbildung eines einzelnen Makrorisses ohne entsprechendes "deflection-hardening". Insbesondere bei den Kunststofffasern aus Dyneema und Aramid könnte zusätzlich die grundsätzlich andere Oberflächenchemie zu einer schlechten Anbindung an die Zementmatrix führen und damit die Kompositeigenschaften negativ beeinflussen. Dies reduziert die Wirksamkeit der Faserbewehrung drastisch. Ein ähnliches Verhalten wurde auch für 18 µm dicke CF-3 (ebenfalls eine Faser mit vergleichsweise geringem E-Modul) festgestellt (vgl. 4.3.1).

4.4 Einfluss des Faserlastwinkels

4.4.1 Einfluss des Faserwinkels auf die Biegezugfestigkeit

Um den Einfluss des Faserlastwinkels herauszuarbeiten, wurde entlang einer mit Plastikfolie überdeckten Papiervorlage mit spezifisch gewinkelten Linien eine Platte von ca. 100 mm x 100 mm x 3 mm hergestellt. Nach 7 Tagen Hydratationszeit wird die Platte in mehrere Kleinprüfkörper von ca. 13 mm x 60 mm x 3 mm gesägt. Das Prinzip ist in Abbildung 4-7 grafisch dargestellt.



Abbildung 4-7: Prinzipielles Vorgehen zur Herstellung von Probekörpern mit spezifischem Faserlastwinkel. a) Anhand einer Vorlage mit spezifisch gewinkelten Linien wird eine Platte angefertigt. Nach dem Erhärten wird die Platte in Kleinprüfkörper gesägt und nach 28 Tagen Lagerungszeit geprüft. b) Schematische Darstellung der Faserausrichtung im 3-Punkt-Biegeversuch. Als Ausrichtung von 0° werden Proben bezeichnet, deren Fasern exakt in Richtung der auftretenden Zugspannungen liegen.

Pro Platte konnten typischerweise 7 – 8 Prüfkörper präpariert werden. Es wurden Proben nach Tabelle 4-3 mit 1 Vol.-% und 3 Vol.-% Fasergehalt (CF-1) mit dem Eirich EL1-Mischer hergestellt, wie in 4.1.7 beschrieben gelagert und nach 28 Tagen geprüft. Die 28 d-Biegezugfestigkeit für die jeweilige Ausrichtung ist in Abbildung 4-8 dargestellt.



Abbildung 4-8: 28d-Biegezugfestigkeit bei 1 Vol.-% und 3 Vol.% ausgerichteten Carbonfasern in Abhängigkeit der Faserausrichtung. 0° entsprechen einer Faserausrichtung längs zur Biegebelastung. Die gepunktete blaue Linie entspricht der Festigkeit eines faserfreien Prüfkörpers (12,6 MPa)

Während die Probekörper mit 1 Vol.-% Faservolumengehalt etwas robuster gegen kleinere Abweichungen in der Faserausrichtung sind, zeigt sich bei den hochfesten Proben mit 3 Vol.-%, dass bereits Abweichungen von 10° in der Ausrichtung zu Festig-keitsverlusten von 20-30% führen können. Für beide Fasergehalte fällt die Biegezug-festigkeit ab 40° Abweichung von der Lastrichtung auf Werte ab, die in etwa der unbewehrten Matrix entsprechen. Abbildung 4-9 zeigt das Verformungsverhalten der Proben während des Biegeversuches.



Abbildung 4-9: Spannungs-Dehnungs-Diagramme für Proben mit 1 Vol.-% (links) und 3 Vol.-% (rechts) Faservolumengehalt bei unterschiedlicher Faserausrichtung.

Es zeigt sich, dass mit stärker abweichendem Faserwinkel vor allem die "deflectionhardening" Phase stark verkürzt wird. In diesem Bereich begrenzt die Faser durch Aufnahme der Zugspannungen die Rissbreite in der Zementmatrix. Erwartungsgemäß können diese Zugspannungen bei falscher Ausrichtung nicht mehr aufgenommen werden und die Bildung eines großen katastrophalen Risses wird begünstigt. Ab einem Winkel von ca. 40° kommt es zu keinem "deflection-hardening" mehr und die Probe reagiert nahezu ideal-elastisch oder nur mit leichten Faserauszugserscheinungen im Nachrissbereich.

4.4.2 Einfluss des Faserwinkels auf die Druckfestigkeit

Würfelförmige Probekörper für den Druckversuch wurden nach dem gleichen Vorgehen hergestellt, wie es in Abbildung 4-7 dargestellt ist. Statt einer dünnen und langen Platte wurde eine kleine Platte mit einer Wandstärke von 13 cm nach der gewinkelten Vorlage gespritzt. Nach 7 Tagen Hydratationszeit wurde die Platte in 6 Würfel von 13 mm Kantenlänge gesägt, die Würfel wurden für weitere 21 Tage bei 60 % relativer Feuchte gelagert und anschließend geprüft. Die Ausrichtung der Fasern während des Versuchs kann Abbildung 4-10 entnommen werden.



Abbildung 4-10: Schematische Darstellung der Faserausrichtung im Druckversuch. Als 0° werden solche Proben bezeichnet, deren Fasern in Richtung des aufgebrachten Druckes liegen.

Entsprechend dem Biegezugversuch wurden für den Druckversuch Proben von 0° bis 60° Ausrichtung hergestellt, die Festigkeiten der Probekörper sind in Abbildung 4-11 zu sehen.



Abbildung 4-11: 28 d Druckfestigkeit der Probekörper in Abhängigkeit des Faserwinkels. Die gepunktete blaue Linie entspricht dem Festigkeitswert eines unverstärkten Prüfkörpers (92,88 MPa).

Die Druckfestigkeit der Probekörper zeigt keine klare Abhängigkeit von der Faserausrichtung. Dies korreliert mit vorhergehenden Untersuchungen, in denen die Unterschiede zwischen Druckprüfkörpern mit ungerichtet eindispergierten und speziell ausgerichteten Fasern nur sehr gering waren [1]. Im Vergleich zu unverstärkten Proben (schwarz-gepunktete Linie in Abbildung 4-11) zeigt sich ein geringfügig positiver Einfluss der Faserbewehrung auf die Druckfestigkeit. Die Fasern können einen Teil der beim Druckversuch entstehenden Querzugkräfte aufnehmen, was sich in der erhöhten Druckfestigkeit wiederspiegelt.

4.5 Festigkeitsentwicklung über die Hydratationszeit

4.5.1.1 Entwicklung der Biegezugfestigkeit

Zur Messung der Festigkeitsentwicklung wurden Probekörper nach dem Rezept in Tabelle 4-3 mit 1 Vol.-% gerichteten CF-1 hergestellt. Die Lagerung erfolgt wie in Kapitel 4.1.7 beschrieben. Proben mit einer Hydratationszeit von einem Tag wurden nicht in ein Wasserbad gelegt und stattdessen direkt ausgeschalt und präpariert. Proben mit einer Hydratationszeit zwischen 2 und 7 Tagen wurden aus dem Wasserbad entnommen, geschliffen und für 4 Stunden an Raumluft getrocknet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-12 dargestellt.



Abbildung 4-12: Entwicklung der Biegezugfestigkeit und des E-Moduls einer mit CEM I 52,5 R (Schwenk) rezeptierten Zementleimmischung

Die Probekörper zeigen einen stetigen Anstieg der Festigkeit in den ersten Tagen der Hydratation und laufen zunehmend auf ein Plateau zu. Probekörper mit einem Fasergehalt von 1 Vol.-% zeigen dabei bereits nach 2 Tagen ihre volle Biegezugfestigkeit, Probekörper mit 3 Vol.-% Fasergehalt benötigen eine etwas längere Zeitspanne, jedoch können hier nach spätestens 7 Tagen die charakteristischen Festigkeiten von über 100 MPa Biegezugfestigkeit nachgewiesen werden. Die Biegezugfestigkeiten der faserbewehrten Proben nach einem Tag (28,9 MPa für 1 Vol.-% und 59,8 MPa für 3 Vol.-% Fasergehalt) liegt in jedem Fall deutlich höher als die 28 d Festigkeit eines unverstärkten Probekörpers (12.6 MPa, siehe Tabelle 4-5). Da in einer solch frühen Phase der Hydratation die Festigkeit der Zementmatrix noch nicht vollständig ausgebildet sein kann und da ein deutlicher Zusammenhang zwischen Frühfestigkeit im 3-Punkt-Biege-Versuch und Faservolumengehalt besteht, kann davon ausgegangen werden, dass die reine Festigkeit der Zementmatrix nur von sekundärer Wichtigkeit gegenüber der Zugfestigkeit der Fasern ist. Vielmehr scheint wichtig, dass während des Erhärtungsprozesses eine steife, kraftschlüssige Kopplung zwischen Matrix und Faser ausgebildet wird.

4.5.1.2 Entwicklung der Druckfestigkeit

Die Entwicklung der Druckfestigkeit wurde mit dem Rezept nach Tabelle 4-3 mit der CF-1 durchgeführt. Da in Kapitel 4.4.2 kein direkter Zusammenhang zwischen Faserwinkel und Druckfestigkeit gefunden werden konnte, werden Probekörper mit nicht ausgerichteten Fasern untersucht. Die Festigkeitsentwicklung ist in Abbildung 4-13 zu sehen.



Abbildung 4-13: Entwicklung der Druckfestigkeit von unbewehrten und mit 1 Vol.-% C-Fasern bewehrten Probekörpern aus einer mit CEM I 52,5 R (Schwenk) rezeptierten Zementleimmischung

Wie auch in Kapitel 4.5.1.1 zeigt sich hier die Entwicklung der Festigkeit vor allem in den ersten 2 bis 3 Tagen und läuft dann auf ein Plateau zu. Während in dieser Messreihe kein signifikanter Unterschied zwischen Endfestigkeit der unverstärkten und bewehrten Proben erkennbar ist, scheinen im frühen Probenalter die Fasern doch etwas Querzug aufnehmen zu können. Während nach 24 Stunden die unverstärkten Proben nur eine Festigkeit von ca. 25 MPa aufweisen erreichen mit 1 Vol.-% verstärkte Proben bereits 56 MPa.

4.6 Rezeptierbarkeit mit anderen Zementarten

4.6.1.1 Rezepturentwicklung und Festigkeit nach 28 Tagen

Um den Einfluss der verwendeten Zementart auf die faserverstärkten Proben herauszuarbeiten, wurden mehrere Zementarten und Zemente verschiedener Hersteller miteinander verglichen. Die eingesetzten Rohstoffe und die erhaltenen Festigkeiten sind Tabelle 4-9 zu entnehmen.

Zementart	Herstel- Ier	Faser- gehalt	Zement [Gew%]	Mikro- silika [Gew%]	Wasser [Gew%]	Fließmit- tel [Gew%]	Biegezug- festigkeit [MPa]
CEM I 42,5 R	Schwenk	1 Vol%	61,0	21,0	15,0	3,0	45,2 ± 6,1
CEM I 32,5 R	Märker	1 Vol%	61,0	21,0	15,0	3,0	47,8 ± 9,9
CEM I 42,5 R	Märker	1 Vol%	61,0	21,0	15,0	3,0	44,8 ± 6,4
CEM III/A 32,5 N-LH	Schwenk	1 Vol%	61,0	21,0	15,0	3,0	47,3 ± 7,4
CEM III/A 52,5 N-SR	Schwenk	1 Vol%	61,0	21,0	15,0	3,0	43,4 ± 8,3
CEM I 42,5 R	Schwenk	3 Vol%	62,2	21,4	12,8	3,6	82,3 ± 9,1
CEM I 42,5 R	Märker	3 Vol%	62,2	21,4	12,8	3,6	90,0 ± 13,0
CEM III/A 52,5 N-SR	Schwenk	3 Vol%	62,2	21,4	12,8	3,6	95,7 ± 12,6

Tabelle 4-9: Rezepturen und Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, hergestellt aus unterschiedlichen Zementarten

Proben mit 1 Vol.-% Fasergehalt sind ohne weitere Modifikation des Rezeptes aus Tabelle 4-3 herstellbar und zeigen alle eine erwartungsgemäße Festigkeit um ca. 45 MPa. Je nach verwendetem Zement sind deutliche Unterschiede in der Viskosität des Leims ersichtlich. Insbesondere der CEM I 32,5 R der Firma Märker und der CEM III/A 32,5N-LH der Firma Schwenk sind deutlich niederviskoser als die Proben aus CEM I 52,5 R. Diese Eigenschaft findet sich auch in den Festigkeiten wieder – der fließfähigere Mörtel kann verlaufen und durch den Spritzprozess entstandene Porosität schließen.

Proben mit 3 Vol.-% Fasergehalt erfordern leichte Modifikationen des Rezeptes, um verarbeitbar zu sein. Entgegen der Erwartungen zeigen sich vor allem die Zemente als schwer verarbeitbar, die niederviskosen Zementleim liefern. Beim Versuch diese Rezepte mit gleichem Wasser- und Fließmittelgehalt zu spritzen, kam es bereits nach kurzer Zeit zu unvermeidbaren Faserblockaden in der Düse. Offensichtlich sind Aggregationserscheinungen bei höherer Faserdichte ein sehr kritischer Punkt. Das Problem konnte durch Herabsenken des Wassergehalts und eine ungefähre Einstellung auf die Leimviskosität des CEM I 52,5 R gelöst werden. Der Spritzprozess war daraufhin mit den meisten Zementen wesentlich reproduzierbarer und mit deutlich höherer Prozesssicherheit durchführbar. Augenscheinlich begünstigt eine niedere Viskosität des Ansatzes Entmischungserscheinungen beim Verspritzen. Lewicki et. al. beobachteten analoges Verhalten beim Verdüsen faserverstärkter Epoxidharze [68]. CEM I 32,5 R (Märker) und CEM III/A 32,5N-LH (Schwenk) konnten mit diesem Fasergehalt bisher nicht verarbeitet werden. Die Festigkeiten aller Proben mit 3 Vol.-% Fasergehalt fallen leicht

von den charakteristischen 100 MPa ab. Als Ausblick wären Untersuchungen dieser Entmischungs- und Aggregationserscheinungen, das Aufstellen eines relevanten Verarbeitungsfensters und weitere Rezeptentwicklung sicherlich sehr aufschlussreich. Insbesondere der Zusammenhang zwischen Rheologie, Prozesssicherheit und Faserverteilung in Frischmörtel und in gespritzter Probe sollten weiter erforscht werden. Während sich die unterschiedlichen Zementarten leicht unterschiedlich im Hinblick auf Faserdispergierung verhalten, scheinen beim Einhalten von physikalischmaterialtechnischen Parametern die meisten Zemente für die Verstärkung mit C-Fasern geeignet.

4.6.1.2 Entwicklung der Biegezugfestigkeit bei Verwendung anderer Zementarten

Insbesondere bei den Märker Zementen CEM I 32,5 R und CEM I 42,4 R war spürbar, dass die Proben ein deutlich langsameres Erhärten zeigen und vor allem innerhalb der ersten 24 Stunden nach dem Anmachen des Zementleims noch deutlich plastisch verbleiben. Um den Einfluss dieses sich etwas langsamer vollziehenden Erhärtungsverlaufs nachvollziehen zu können, wird die Festigkeitsentwicklung von Probekörpern mit 1 Vol.-% ausgerichteten CF-1 im 3-Punkt-Biegeversuch beobachtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-14 dargestellt.



Abbildung 4-14: Entwicklung der Biegezugfestigkeit vom mit CEM I 32,5 R (blau, links) und CEM 42,5 R (rot, rechts) hergestellten Zementsteinprobekörpern mit 1 Vol.-% ausgerichteten C-Fasern (CF-1).

Ähnlich wie Proben aus CEM I 52,5 R zeigen die Probekörper nach spätestens 3 Tagen Hydratationszeit vollständige Belastbarkeit. Wie erwartet ist allerdings die Frühfestigkeit, insbesondere nach einem Tag, noch sehr gering. Hier zeigen die Spannungs-Dehnungs-Kurven noch deutliches plastisches Verhalten, welches sich im Laufe der Hydratation in steiferes Verformungsverhalten mit ausgeprägtem "deflection-hardening" umwandelt. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme sind in Abbildung 4-15 zu sehen.



Abbildung 4-15: Typisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter 3-Punkt Biegebelastung einzelner Probekörper bei unterschiedlichem Probenalter. Links: Probekörper aus CEM I 32,5 R (Märker) mit 1 Vol.-% ausgerichteten CF. Rechts: Probekörper aus CEM I 42,5 R (Märker) mit 1 Vol.-% ausgerichteten CF-1.

Wie erwartet zeichnet sich auch hier ab, dass erst mit härterem Verhalten der Zementmatrix und Ausbildung einer kraftschlüssigen Grenzfläche Deformation auf das Fasermaterial gebracht werden kann und so schlussendlich Zugspannungen aufgenommen werden können. Die geringere Nenndruckfestigkeit von CEM I 32,5 R oder CEM I 42,5R führt, wie bereits in Kapitel 4.6.1.1 dargestellt, nicht zu einer Verringerung der Biegezugfestigkeit; vielmehr bilden diese Zemente bei gleichem w/z-Wert niederviskosere Leime aus, die zu einem Selbstverdichtungseffekt führen können.

4.7 Verhalten im zyklischen 3-Punkt Biegeversuch

Im Zuge der Bachelorarbeit von Frau Erika Croner wurde das Verhalten der Kleinprüfkörper unter zyklischer Last mit dem dynamisch-mechanischen Analysator DMA Q800 der Firma TA Instruments getestet. Aufgrund der Maximallast von 18 N, die das Gerät aufbringen kann, wurde die Probengröße verkleinert. Es wurden Proben nach Tabelle 4-3 hergestellt (Balken von 3 mm × 13 mm × 60 mm), aus deren Mitte dann Prüflinge mit einem Querschnitt von 3 mm × 3 mm herausgesägt wurden. Da bei dieser wesentlich kleineren Probekörpergröße sehr wahrscheinlich Größeneffekte auftreten und tendenziell eher porenhaltige Randbereiche entfernt wurden, wurde die statische Festigkeit anhand von 20 Proben für unverstärkte Proben und für Proben mit 1 Vol.-% Fasergehalt (CF-1) erneut bestimmt. Zur Bestimmung des Verhaltens unter zyklischer Last sollen die Proben zwischen 0% und 40%, 20% und 60% sowie 40% und 80% ihrer statischen Festigkeit geprüft werden. Die Festigkeiten der kleineren Probekörper, sowie die Spannungsgrenzen für den zyklischen Versuch sind in Tabelle 4-10 zu sehen.

Fasergehalt	Biegezug- festigkeit f _{ct} [MPa]	40 % f _{ct} [MPa]	60 % f _{ct} [MPa]	80 % f _{ct} [MPa]
0 Vol%	18,1	7,24	10,86	14,48
1 Vol%	61,8	24,72	37,08	49,44

Tabelle 4-10: 28 d Biegezugfestigkeit und Lastgrenzen des zyklischen Versuchs für verstärkte und unverstärkte Proben mit einem Querschnitt von 3 mm × 3 mm

Die Proben wurden auf einem 3-Punkt Prüfaufbau mit einem Auflagerabstand von 50 mm bei einer Frequenz von 10 Hz bis zum Bruch belastet. Aufgrund der hohen Zeitdauer solcher Ermüdungsversuche wird die Auswertung nur an einer Einzelmessung getätigt. Trägt man den Verformungsverlauf aller Proben in ein einzelnes Diagramm, so erhält man Abbildung 4-16.



Abbildung 4-16: Verformung von Probekörpern ohne Fasern und mit 1 Vol.-% ausgerichteten C-Fasern während zyklischer 3-Punkt-Biegung bei unterschiedlichen Lastniveaus [69]

In einer solchen Darstellung verbleiben die unbewehrten Proben (Größenordnung der Lastwechsel bis zum Bruch: ca. $2 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^4$) nahezu nicht sichtbar am Koordinatenursprung (s.a. Abbildung 4-17), während die faserverstärkten Proben sowohl ihre längere Lebensdauer im zyklischen Versuch (Größenordnung der Lastwechsel bis zum Bruch: ca. $1 \cdot 10^6 - 7 \cdot 10^6$) als auch ihre, durch die Mikrorissbildung ermöglichte, Deformationskapazität zur Schau stellen. Die Lastwechselzahl geht bei beiden Systemen erwartungsgemäß mit steigendem Spannungsniveau zurück. Das Deformationsverhalten der unverstärkten Proben allein ist in Abbildung 4-17 zu sehen.



Abbildung 4-17: Verformung von unverstärkten Probekörpern während zyklischer 3-Punkt-Biegung bei unterschiedlichen Lastniveaus [69]

Auch bei den unverstärkten Probekörpern zeigt sich ein erhöhtes Lastniveau in geringerer Zyklenzahl bis zum Bruch. Unerwartet ist hier die (auch zu Messbeginn) relativ geringe Deformation der Probe, die mit 80% Oberspannung geprüft wurde. Eventuell findet durch die hohe Oberspannung sehr plötzliches instabiles Risswachstum statt, welches zu sofortigem Versagen der Probe führt. In diesem kurzen Zeitfenster kann die Datenaufnahme bereits durch das Beenden des Messprogrammes unterbrochen werden. Überträgt man die Messpunkte der beiden Testreihen in eine Wöhlerauftragung ergibt sich Abbildung 4-18.



Abbildung 4-18: Messpunkte der zyklischen Biegeversuche in einer Wöhlerauftragung [69]

Die halblogarithmische Auftragung zeigt ebenfalls deutlich den enormen Zuwachs an Ermüdungswiderstand, der durch die Faserbewehrung erreicht wird. Insbesondere durch die in dieser Versuchsreihe noch sehr geringe Probenanzahl können die Werte nur als erster Anhaltspunkt des Ermüdungsverhaltens dieses Materials verstanden werden, daher erscheint weitere Grundlagenforschung im Bereich der Ermüdung sehr vielversprechend. Insgesamt ist das Verständnis über mikrostrukturelle Änderungen und Rissbildungsvorgänge der faserverstärkten Systeme integral wichtig, um Struktur-Eigenschafts-Beziehungen formulieren zu können und so schlussendlich zu korrekten Bemessungsmodellen zu kommen.

4.8 Implementierung von Füllstoffen

Da die bei den bisherigen Versuchen verwendete Zement-Mikrosilika-Mischung keinerlei weitere Füllstoffe enthält, ist sie als sehr hochpreisig im Vergleich zu einer Normalmörtelmischung zu bezeichnen. Aus diesem Grunde und im Hinblick auf eine spätere Anwendung des Düsenspritzverfahrens zur Faserausrichtung sollten Füllstoffe implementiert werden, die den Preis reduzieren können. Aufgrund des geringen Düsendurchmessers von nur 2 mm kommen als Füllstoffe nur feinkörnige Zuschläge, wie Feinsand oder Gesteinsmehle, in Frage. Bei den nachfolgenden Versuchen kamen daher ein Quarzsand (QS-1), ein Kalksteinmehl (KSM) und Flugasche (FA) zum Einsatz. Das Vorgehen bei der Probenpräparation entspricht dem der vorhergehenden Versuche und ist ebenfalls in Kapitel 4.1.4 beschrieben. Als Verstärkungsfaser kam für alle Proben 1 Vol.-% CF-1 zum Einsatz. Die Einwaagen der Zementmörtelmischungen sind Tabelle 4-11 zu entnehmen.

Zement 52,5 R [Gew%]	QS-1 [Gew%]	Mikro- silika [Gew%]	KSM [Gew%]	FA [Gew%]	Wasser [Gew%]	Fließmit- tel [Gew%]	Biegezug- festigkeit [MPa]
61,6	-	20,7	-	-	15,2	2,6	49,6 ± 4,9
35,1	-	14,6	32,6	-	15,4	2,3	42,5 ± 2,5
40,4	-	20,9	-	21,3	14,8	2,5	46,7 ± 5,1
41,2	21,3	21,3	-	-	13,6	2,6	43,2 ± 2,8
30,7	21,1	11,0	21,1	-	13,5	2,6	43,4 ± 4,3

Tabelle 4-11: Mischungsverhältnisse der Mörtelproben mit 1 Vol.-% gerichteten CF

Alle Füllstoffe beeinflussen die Festigkeit nur unwesentlich, d.h. im Rahmen der Standardabweichung wird keine signifikante Abweichung erreicht. Das Verfahren der Faserausrichtung zeigt sich als sehr robust gegenüber Änderungen der Mörtelrezeptur.

4.8.1 Erstellen einer Mörtelrezeptur mit angepasstem w/z-Wert

Die in Tabelle 4-11 dargestellten Ergebnisse zeigen vielversprechende Ansätze zur Einbringung von Füllstoffen in die bisher bestehende Zementleimrezeptur. Aufbauend

auf die Erkenntnis, das hauptsächlich sehr feinkörnige Gesteinsmehle verwendet werden sollten, wurden zusätzlich zu den bereits genannten Füllstoffen mit einem sehr feinen Quarzmehl (QM) und einem weiteren Quarzsand QS-2 Mörtelrezepte erstellt. Zusätzlich berücksichtigen die in Tabelle 4-11 erarbeiteten Rezepte noch nicht systematisch, dass bei Ersatz von (reaktiver) Zementkörnung durch (nicht reaktives) Gestein ein Anstieg des w/z-Wertes erfolgt. Während Tabelle 4-11 zwar deutlich aufzeigt, dass die Biegezugfestigkeit davon weitestgehend nicht betroffen ist, muss angenommen werden, dass durch die vom höheren w/z-Wert verursachte Kapillarporosität die Druckfestigkeit und die Dauerhaftigkeitseigenschaften negativ beeinflusst werden können.

Vor allem um Verstopfungsneigungen vorzubeugen wurde mit hohem Anteil an Quarzmehl und geringerem Anteil an Sand gearbeitet. Im Rahmen der Bachelorarbeit von Herrn Florian Lippert (Universität Augsburg) wurden einige Füllstoffkombinationen auf Tauglichkeit für den Einsatz in einer carbonfaserverstärkten Mörtelmasse ausgetestet [70]. Die Rezepturen wurden auf einen w/z-Wert von 0,43 und einen Faservolumenanteil von 2% eingestellt. Die getesteten Rezepturen sind Tabelle 4-12, die exakt eingesetzten Füllstoffe und Anmerkungen zu den Rezepturen Tabelle 4-13 zu entnehmen:

	CEM I 52,5 R	Quarz- sand	Mikro- silika	QM	Wasser	Fließmittel
	[Gew%]	[Gew%]	[Gew%]	[Gew%]	[Gew%]	[Gew%]
FS-1	39,6	6,2	17,8	18,3	15,0	3,0
FS-2	39,6	18,3	17,8	6,2	15,0	3,0
FS-3	34,4	7,3	20,9	21,4	12,5	3,5
FS-4	39,6	6,2	17,8	18,3	15,0	3,0

Tabelle 4-12: Mörtelrezepturen mit unterschiedlichen Füllstoffkombinationen, angepasst auf einen Faservolumengehalt von 2% [70]

Taballa 4 40. Datas usal		al a va NAN what was a star was a sa	аа т		
Tabelle 4-13: Daten und	Anmerkungen zu	den Morteimischungen	aus i	abelle 4-12	2 [70]

	FS-1	FS-2	FS-3	FS-4
Eingesetzter Quarzsand	QS-1	QS-1	QS-2	QS-2
Bewertung Verar- beitbarkeit	Mittelmäßig	Verstopfungs- neigung	Gut	Sehr gut
Zementanteil bezogen auf Tro- ckenmörtel	48%	48%	41%	48%
14 d Biegezugfes- tigkeit [MPa]	50 ± 10	36 ± 2	55 ± 5	48 ± 7

Die Rezepturen verhalten sich alle recht ähnlich, mit Ausnahme von Rezeptur FS-2, welche deutlich in der Festigkeit abfällt. Da sich die Mischung FS-4 als gut verarbeitbar erwiesen hat, wird mit dieser Rezeptur weitergearbeitet.

Zur weiteren Rezeptoptimierung wird der w/z-Wert der Mörtelmischung noch spezifisch auf den Faservolumengehalt angepasst. Mischungen mit weniger bzw. ohne Fasern können mit niedrigerem w/z-Wert rezeptiert werden, um die Verarbeitbarkeit auf einem einheitlichen Niveau zu halten.

Die erarbeiteten Rezepturen sind Tabelle 4-14 zu entnehmen:

Tabelle 4-14: Mörtelrezepturen mit angepasstem w/z, optimiert für verschiedene Faservolumengehalte von CF-1 [70].

	CEM I 52,5 R [Gew%]	QS-2 [Gew%]	Mikro- silika [Gew%]	QM [Gew%]	Wasser [Gew%]	Fließmit- tel [Gew%]
0 Vol. %	34,95	7,37	21,76	21,20	11,15	3,57
1 Vol. %	34,95	7,37	21,76	21,20	11,15	3,57
2 Vol. %	34,69	7,32	21,60	21,05	11,80	3,54
3 Vol.%	34,29	7,23	20,81	21,35	12,81	3,51

In Abbildung 4-19 sind die Festigkeiten im 3-Punkt-Versuch für den unverstärkten Mörtel, sowie für die Kompositwerkstoffe bei verschiedenen Fasergehalten dargestellt.



Abbildung 4-19: 28 d Biegezugfestigkeit der in Tabelle 4-14 gelisteten Rezepturen.

Die Mörtelrezepturen zeigen wie die bereits verwendeten Zementleimrezepte eine mit dem Fasergehalt steigende "deflection-hardening" Phase und damit zunehmende Bruchfestigkeit. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Proben ist in Abbildung 4-20 zu sehen.



Abbildung 4-20: Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Mörtelproben im 3-Punkt-Biegeversuch

Die Biegezugfestigkeiten des unverstärkten Mörtels und des Rezeptes mit 1 Vol.-% Fasern liegen dabei merklich oberhalb der vom Zementleimrezept bekannten Werte. Dies kann in diesem Faservolumengehalt als Effizienzsteigerung aufgefasst werden, da bei gleicher Einsatzmenge des Hochenergierohstoffes Carbonfaser höhere Festigkeiten erreicht werden.

Die Rezepte für 2 Vol.-% und 3 Vol.-% Fasergehalt fallen wiederum gegenüber der Zementleimrezeptur etwas ab. Verantwortlich hierfür ist sicherlich die schwierige Verarbeitbarkeit dieser beiden Rezepturen, trotz angepasstem w/z-Wert handelt es sich um sehr steife Massen. Geht man davon aus, dass die Benetzung und Einbindung der Faser vor allem durch den Zementleim geschieht, so führt der reduzierte Bindemittelgehalt logischerweise zu einer oberen Grenze der eindispergierbaren Faseroberfläche, zumal der Zementleim noch Quarzmehl und Sand einbinden muss. Die Folge daraus wäre, dass Faserbenetzung und Faservereinzelung bei hohen Fasergehalten für gesteinskornhaltige Rezepturen sehr kritische Größen werden. Als Ausblick könnte sich hier die weitere Untersuchung von zementreicheren Mörtelpasten für die höheren Fasergehalte empfehlen – da diese Rezepturen entsprechend weniger Gesteinskörnung und mehr Zement enthalten, wären Formulierungen mit verringertem w/z-Wert möglich, was mit einem Festigkeitsgewinn einher gehen könnte.

5 Upscaling (TUM)

5.1 Verifizierung

Die Verwendung von Carbonkurzfaserbeton wurde an der Universität Augsburg entwickelt. Um sich mit dieser Technik an der TUM vertraut zu machen, wurden zunächst kleinformatige Probekörper hergestellt. Diese wichen in den Abmessungen zu denen der Universität Augsburg nur geringfügig ab, um möglichst ähnliche Bedingungen herzustellen und die Ergebnisse vergleichen zu können.

Es wurden Platten mit den Abmessungen 400 x 100 x 7 mm³ hergestellt. Dazu kamen handelsübliche Leerkartuschen (wie sie zur Abfüllung von Silikon oder Acryl verwendet werden) zum Einsatz. Die Düsenöffnung wies einen Durchmesser von 3 mm auf. Die in [1] beschriebene Betonmischung ohne Zuschlagsstoffe wurde verwendet. Dabei wurden 2,0 Vol.-% Carbonfasern verwendet, da es bei höheren Gehalten zum Verstopfen der Extrusionsdüse kam.

Es wurde ein 5I-Mörtelmischer der Fa. TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH (entsprechend DIN EN 196) mit Planetengetriebe verwendet.

Die Oberflächen der Platten wurden durch Walzen geglättet. Wie in Abbildung 5-1 zu sehen, ist die verarbeitete Masse zähflüssig, sodass eine Nachbearbeitung des Probekörpers erforderlich ist. Es wurde eine Teflonfolie auf den vorher auf einem Rütteltisch verdichteten Carbonkurzfaserbeton gelegt. Durch das Überrollen mit einer leeren Kartusche ergab sich eine relativ ebene Oberfläche, die ein späteres millimetergenaues Vermessen der Probekörper ermöglichte.



Abbildung 5-1: Herstellung der Verifizierungsprobekörper mit herkömmlichen Leerkartuschen



Abbildung 5-2: Glätten der mit Teflonfolie abgedeckten Oberfläche durch Walzen mit einer Leerkartusche



Abbildung 5-3: Ausgehärtete Verifizierungsplatte mit geglätteter Oberfläche (400 x 100 x 7 mm³)

Die frisch betonierte Probe wurde im Feuchtraum bei 100% Luftfeuchtigkeit für 24h gelagert und anschließend ins Wasserbad gelegt. Nach der dortigen 6-tägigen Lagerung wurden die Platten in kleinformatige Probekörper für Biegezug- und für Zugversuche gesägt. Anschließend wurden die Proben bei 60% Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur gelagert. Die Prüfung erfolgte am 28. Tag nach der Herstellung.

Die Prüfungen wurden an einer 10 kN-Prüfmaschine Rel 2041 der Fa. Roell Amsler durchgeführt.

5.1.1 Biegezugversuche

Für die Biegezugversuche wurden aus den Platten Probekörper mit den Abmessungen 60 x 13 x 7 mm³ herausgesägt, welche im 3-Punkt-Biegezugversuch mit 50 mm Spannweite geprüft wurden.

Es ergab sich eine mittlere Biegezugfestigkeit von 73,9 MPa (± 9,4 MPa). Im Vergleich zu den Ergebnissen der Universität Augsburg [1] liegt diese etwas niedriger als der linear interpolierte Wert für 2,0 Vol.-% Carbonfasern (vgl. Abbildung 5-4).

Dies lässt sich durch makroskopische Luftporen und durch seitliche Abplatzungen, die während des Zusägens entstanden sind, erklären. Die makroskopischen Luftporen entstehen bei der Herstellung mit der handgeführten Kartusche durch das Übereinanderlegen der extrudierten Stränge. Diese liegen nicht parallel, sondern kreuzen sich an mehreren Stellen im Probekörper, wodurch es zu Lufteinschlüssen kommt. Diese können zwar durch das Rütteln und Walzen reduziert, jedoch nicht vollständig aufgelöst werden. Des Weiteren betrug der Düsendurchmesser ca. 3mm, also genauso groß wie die Faserlänge und etwas größer als der an der Uni Augsburg verwendete.





Abbildung 5-4: Einstufung der Biegezugfestigkeit (28 Tage) der Kleinstproben in die Ergebnisse der Uni Augsburg [1]

Abbildung 5-5: Probekörper für den 3-Punkt-Biegezugversuch mit den Abmessungen 60x13x7mm

5.1.2 Zugversuche

Die Form der Zugversuchsprobekörper wurde so gewählt, dass es an einer vordefinierten Stelle zum Bruch kam. Dazu wurden aus der Verifizierungsplatte rechteckige Körper mit den Maßen 60 x 23 mm² herausgesägt. Diese wurden anschließend mittig mit einem abgerundeten Schleifstein so verjüngt, dass sich eine Stegbreite von etwa 10 mm ergab.

Die Zugfestigkeit lag bei den getesteten Proben im Mittel bei 23,2 MPa (± 3,9 MPa). Dies ergibt ein Verhältnis von Biegezug- zu Zugfestigkeit von 3,2, was für höherfesten Beton normal ist. Im Bereich von ultrahochfestem Beton (UHPC) mit Stahlfasern ergeben sich sogar Verhältnisse über 4 [71], im Bereich von unbewehrtem Normalbeton sind es üblicherweise etwa 2 [72]. Dass sich kein Verhältnis von 1 einstellt, liegt am nichtlinearen Materialverhalten. Wie in Kapitel 5.5.4 dargestellt, lässt sich das einaxiale Tragverhalten auf Biegeversuche anwenden, wodurch sich eine höhere linear elastisch berechnete Spannung ergibt.



Abbildung 5-6: Aus der Verifizierungsplatte herausgesägte Zugprobe mit eingeschliffener Verjüngung, Markierung zeigt Makropore im Prüfquerschnitt

Verfälschungen der Ergebnisse sind auch hier auf makroskopische Luftporen zurückzuführen (siehe Abbildung 5-6 mit einer deutlich erkennbarer Pore in der Verjüngung).

Ein weiterer Faktor ist die Ausrichtung der Carbonkurzfasern, welche nicht dem Kraftfluss in der Probe entspricht. Eine Steigerung der Zugfestigkeit wäre durch eine optimierte Düsenführung möglich. Da die hier getesteten Proben aus der Platte herausgesägt wurden, sind die Carbonfasern vornehmlich in eine Richtung ausgerichtet. Im Bereich der Verjüngung wurden die Carbonfasern durch das Schleifen gekappt und sind nicht in Richtung der Hauptzugspannungen ausgerichtet. Würde die Düse entlang der Kontur des Zugknochens geführt werden, ergäben sich höhere Zugfestigkeiten. Diese Düsenführung ist jedoch bezogen auf die kleinen Probekörper aufwändig und nur schwer mit der händisch geführten Spritze auszuführen. Da im ersten Schritt der Verifizierung hauptsächlich die Biegezugfestigkeit des Carbonkurzfaserbetons untersucht werden sollte, wurde diese genauere Betrachtung nicht weiter untersucht. Im Zuge des weiteren Projektverlaufs sollen an großformatigeren Prüfkörpern die Zugfestigkeiten untersucht werden.



Abbildung 5-7: links: vorhandene Carbonfaserausrichtung mit gekürzten Fasern im Bereich der Verjüngung; rechts: optimierte Faserausrichtung durch entsprechende Düsenführung

5.2 Manuelles Upscaling

In den Ergebnissen der Verifizierung zeigt sich, dass sich die angewandte Technik zur Carbonfaserausrichtung reproduzieren ließ und ähnliche Festigkeiten im Vergleich zu

Versuchen an der Universität Augsburg erreicht werden konnten. Im Folgenden wurde das Verhalten an geometrisch größeren Probekörpern untersucht.

Als erster Schritt des Upscaling-Prozesses wurden Normprismen mit den Abmessungen 160 x 40 x 40 mm³ hergestellt. Das Herstellungsverfahren und das Mischungsverhältnis des Zementleims entsprachen dem unter Absatz 5.1 beschriebenen Verfahren, welches an der Verifizierungsplatte mit einer händisch geführten Kartusche angewendet wurde. Der Carbonkurzfaserbeton wird mithilfe einer Leerkartusche in die Normprismenschalung Strang für Strang extrudiert. Nach einigen Schichten wird die Matrix mithilfe eines Rütteltisches verdichtet, um so die makroskopischen Hohlräume, die durch die sich kreuzenden Stränge entstehen, zu minimieren. Die Festigkeitsprüfungen wurden im 3-Punkt-Biegezugversuch mit einer Spannweite von 100 mm und im einaxialen Druckversuch mit einer Druckfläche von 40 x 40 mm² durchgeführt.

Zunächst wurden die gleichen Fasergehalte wie bei der Verifizierung mit 2,0 Vol.-% untersucht. Es wurde die Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit kraftgeregelt mit 0,5 kN/s bzw. 4,0 kN/s und einer Vorlast von 1,4 kN an einer 250 kN Prüfmaschine der Fa. Toni Technik GmbH mit integrierter Kraftmessdose und Wegaufnehmer geprüft.

Es ergaben sich mittlere Biegezugfestigkeiten von 78,0 MPa (±5,5 MPa) und Druckfestigkeiten von 107,6 MPa (±11,9 MPa). Anschließend wurde der Carbonfasergehalt auf 3,0 Vol.-% erhöht. Bei diesem Fasergehalt ergaben sich mittlere Biegezugfestigkeiten von 97,7 MPa (±7,2 MPa) und Druckfestigkeiten von 112,2 MPa (±7,4 MPa).

Wie in Abbildung 5-8 deutlich zu erkennen ist, liegen die Biegezugfestigkeiten der Proben unter dem zu erwartenden Wert. Dies kann einerseits mit der Faserzerstörung beim Mischvorgang zusammenhängen (vgl. auch Absatz 4.2). Bei der Mischung mit 2,0 Vol.-% Carbonfasern wurden die Fasern erst am Ende des Mischvorgangs eingebracht, bei der 3,0 Vol.-% Mischung bereits zu Beginn. Andererseits zeigt sich hier möglicherweise der Einfluss des Maßstabseffekts. Schließlich ergeben sich durch die manuelle Herstellung extrem viele Makroporen, die Fehlstellen im Querschnitt darstellen und diesen schwächen. Eine weitere mögliche Ursache kann der etwas größerer Düsendurchmesser sein, der bei der sehr hochviskosen Matrix mit 3,0 Vol.-% CF zu einer schlechteren Faserausrichtung führt.





Abbildung 5-8: Einstufung der Biegezugfestigkeit (28 Tage) der Normprismen in die Ergebnisse der Uni Augsburg [1]

Abbildung 5-9: Normprisma im 3-Punkt-Biegezugversuch mit 100 mm Spannweite

Bei der Bewertung der Druckfestigkeiten müssen folgenden Einschränkungen beachtet werden:

- Die Carbonfasern waren quer zur Kraftrichtung ausgerichtet. Da der Beton im Druckversuch auf Querzug versagt, nehmen die Carbonfasern in dieser Richtung die Querzugspannungen auf, sodass eine höhere Druckfestigkeit gemessen wird als sich nach den Messungen der Universität Augsburg ergeben.
- Die Druckfestigkeit wird im Anschluss an den Biegezugversuch am selben Prüfkörper gemäß DIN EN 196 durchgeführt. Die beiden auseinander gebrochenen Probekörperhälften werden separat auf einer Druckfläche von 40x40 mm belastet. Dabei wird gerade der Bereich belastet, der durch die Führung der Düse besonders diskontinuierlich ist. Dort wird die Düsenrichtung umgekehrt, sodass eine gleichmäßige Faserausrichtung nicht mehr gewährleistet ist (siehe auch Abbildung 5-1 am linken und rechten Ende des Probekörpers).

5.3 Entwicklung des maschinellen Extrusionsverfahrens

Aufgrund der vielen makroskopischen Luftporen und des manuellen Aufwands mit einer händisch geführten Kartuschenpresse muss ein mechanisches Verfahren mit akkuraterer Stranglegung entwickelt werden. Dazu eignet sich besonders die in den letzten Jahren sehr stark weiterentwickelte 3D-Drucktechnik. Insbesondere kommt hier für das Drucken von Betonbauteilen die Technik Fused Desposition Modelling (FDM) zum Einsatz, bei der das flüssige Material aus einer Düse an der gewünschten Stelle ausgepresst wird, wo es dann zum Aushärten des Betons kommt.

Zum einen wird dazu ein Bewegungsmechanismus für die Düse benötigt. Hier zeichnen sich besonders die folgenden beiden Möglichkeiten aus:



Tabelle 5-1: mögliche Fahrmechanismen zur Positionierung des Druckkopfes

Abbildung 5-12: Linearführungssystem zur dreidimensionalen Steuerung [http://www.vansichen.be]

[http://www.kuka.de]

Bei beiden Systemen lassen sich die Bewegungen im Mikrometerbereich steuern und sind somit für das Upscaling, welches eine Genauigkeit im Millimeterbereich benötigt, geeignet.

Der Vorteil des Linearführungssystems ist dabei, dass die Schienen je nach gewünschter Bauteilgröße in der Länge angepasst werden können, während der Industrieroboter nur einen festgelegten Arbeitsbereich hat. Durch das Austauschen einer Achse lässt sich somit ein größerer Verfahrbereich herstellen, ohne dass die anderen Achsen angepasst werden müssen.

Aus diesem Grund wurde das Linearachsensystem für dieses Projekt gewählt. Um ein aussagekräftiges Upscaling der Probekörper vornehmen zu können, wurde ein möglicher Arbeitsraum von 1,00 x 1,00 x 0,50 m³ gewählt. Es wurden zwei parallel x-Achsen gewählt, die mithilfe einer Welle starr gekoppelt sind. Zwischen diesen beiden Achsen spannt die y-Achse, an welcher wiederum die z-Achse angeschlossen ist. An letztere wird dann der Extrusionskopf befestigt.



Abbildung 5-13: 3D-Drucker aus Linearführungen mit Druckluft-Kolbenpumpe

Um die Motoren anzutreiben wird eine CNC-Steuerung für Schrittmotoren verwendet. Es wurde ein Programm entwickelt, welches das Einlesen von DXF-Dateien ermöglicht, sodass Fahrwege in einem CAD-Programm gezeichnet werden können und so an die Steuerung übergeben werden können.

Des Weiteren ist es notwendig, den Beton mittels einer Pumpe aus der Düse herauszupressen. In Tabelle 5-2 wird eine Bewertung verschiedener Pumpen in Hinsicht auf die Anwendbarkeit zur Förderung von Carbonkurzfaserbeton vorgenommen. An die Pumpen werden folgende Anforderungen gestellt:

- schonende Verarbeitung des Materials, da es sonst zur Faserzerstörung kommt
- pulsationsarmes Fördern, damit ein gleichmäßiger Strang extrudiert werden kann
- für Pumpverhältnisse wird ein geringes Fördervolumen von bis zu 10 l/h benötigt (bei Verwendung von nur einer Düse), wodurch die Pumpengeometrie klein sein muss, jedoch die 3mm Fasern gefördert werden müssen
- hohe Arbeitsdrücke müssen möglich sein

Pumpenart	schonende Verarbeitung	pulsations- armes Fördern	hoher Förderdruck
Zahnradpumpe	-	+	+
Schneckenpumpe	-	+	ο
Exzenterschneckenpumpe	+	+	+
Sinuspumpe	+	+	-
Schlauchpumpe	+	0	+
Impellerpumpe	-	+	-
Kolbenpumpe	+	+	+
Membranpumpe	+	-	0

Tabelle 5-2: Pumpenbewertung (+: gut; o: mittelmäßig; -: schlecht)

Entsprechend der Tabelle können nur die Exzenterschneckenpumpe und die Kolbenpumpe alle Anforderungen erfüllen. Nichtsdestotrotz wurden ebenfalls Versuche mit einer Schlauchpumpe und einer Schneckenpumpe durchgeführt. Letztere stammt aus dem Zukunft Bau-Forschungsprojekt [73], welches am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TUM bearbeitet wurde. Sie zeigte für die Verwendung von holzfaserbewehrtem Beton sehr gute Ergebnisse und wurde erfolgreich zum Drucken großformatiger Prüfkörper eingesetzt. Neben der Kolbenpumpe wurde auch die Schlauchpumpe in einem weiteren Zukunft Bau-Forschungsprojekt [74] am Institut für Baustoffe der TU Dresden als äußerst effektiv beschrieben.

Es hat sich herausgestellt, dass die Verwendung einer Kolbenpumpe die beste Variante für die Förderung des Carbonkurzfaserbetons ist. Es konnte gezeigt werden, dass bei anderen Verfahren Carbonfasern im großen Maße zermahlen werden (Schneckenpumpe) oder aber dass der erbrachte Förderdruck nicht ausreichte, um den hochviskosen Beton aus der sehr feinen Düse zu pressen (Exzenterschneckenpumpe).Letzteres ist vor allem der Grund, weshalb sich die in den beiden anderen Forschungsprojekten [73, 74] genannten Pumpenarten nicht zur Förderung des Carbonkurzfaserbetons eigneten, da die Pumpe möglichst nah am Extruderkopf befinden muss um große Druckverluste in der Schlauchleitung zu vermeiden.

Die Faserzerstörung wurde durch anschließendes Auswaschen der Fasern nach der Extrusion anhand von Mikroskopaufnahmen untersucht. Eine photogrammetrische Vermessung der Einzelfasern zeigte, dass nach dem Extrudieren mit einer Schneckenpumpe die mittlere Faserlänge bei 0,98 (±0,62) mm von ursprünglich 3 mm lag [75].



Abbildung 5-14: Carbonfasern vor (links) und nach (rechts) dem Extrudieren mit der Schneckenpumpe

Die eingesetzte Kolbenpumpe wird mit bis zu 2,5 l Beton befüllt. Diese Menge ist für ein erfolgreiches Upscaling gut geeignet, da der Druckprozess nicht unnötig häufig unterbrochen werden muss.

5.4 Maschinelles Upscaling

5.4.1 Erste Probekörper

Mithilfe der Kolbenpumpe konnten erste Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³ hergestellt werden. Dabei wurde die von der Universität Augsburg entwickelte Mörtelmischung nach Tabelle 4-14 mit 2,0 Vol.-% Carbonfasern verwendet.



Abbildung 5-15: 3D-gedruckte Normprismen (40 x 40 x 160 mm³) und deren Bruchflächen (ober re eines zuerst hergestellten, untere eines später hergestellten Prüfkörpers)

Wie beim manuellen Upscaling (Kapitel 5.2) wurde an den Probekörpern ein 3-Punkt-Biegezugversuch durchgeführt. Die Prüfungen wurden 7 Tage nach der Herstellung durchgeführt (24h Feuchtekammer, 6d Wasserlagerung). Es ergaben sich Biegezugfestigkeiten von 58,7MPa (±5,6). Der höchste Einzelwert lag beim zuerst hergestellten Probekörper dieser Mischung bei 66,1MPa, welcher durchaus ein wirklichkeitsnäherer Wert ist, da die geringeren Festigkeiten der anderen zwei Probekörper auf den Herstellprozess zurückzuführen sind. Zu dem Zeitpunkt der Probenherstellung war noch nicht bekannt, dass die Thixotropie des Carbonkurzfaserbetons einen so großen Einfluss auf die Hohlräume zwischen den einzelnen Strängen hat. Folglich gab es beim 3D-Drucker noch nicht die Möglichkeit, den Arbeitsdruck während des Druckprozesses einzustellen, um diesem Verhalten entgegenzusteuern. An der Bruchfläche konnten gerade beim zuletzt hergestellten Probekörper die einzelnen Stränge erkannt werden, wohingegen es sich bei dem ersten Probekörper um eine geschlossene Matrix handelt (Abbildung 5-15). Die in Abbildung 5-16 gezeigten Spannungs-Dehnungs-Linien zeigen für den zuerst hergestellten Prüfkörper eine ähnlichere Beziehung wie bei früheren Messergebnissen, wohingegen die Dehnung der anderen beiden Probekörper deutlich größer sind. Dies kann im Zusammenhang mit dem Porenbild stehen.



Abbildung 5-16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der ersten 3D-gedruckten Probekörper

5.4.2 Düsenentwicklung

Bei den bis hierhin verwendeten Düsen wurde festgestellt, dass der Durchmesser zwischen 2,5 und 3,5 mm schwankt. Außerdem bestand die Bestrebung, die Düse zu vergrößern um Verstopfer vorzubeugen und einen gleichmäßigen Druck zu gewährleisten. Aus diesen Gründen wurde der Einfluss der Düsengröße untersucht. Die Carbonfaserlänge sollte nach [1] größer sein, als der Düsendurchmesser. Da dies bereits bei den Kartuschendüsen teilweise nicht der Fall war, wurden hierzu nähere Untersuchungen durchgeführt.

Außerdem hat sich gezeigt, dass noch relativ viele makroskopische Hohlräume zwischen den Strängen vorhanden waren. Diese stellen eine Querschnittsschwächung dar und sollten so gering wie möglich gehalten werden, um die maximale Traglast des Materials zu erreichen. Dazu wurde die Düsenform optimiert.

5.4.2.1 Düsendurchmesser und -form

Aufgrund der konischen Form der Kartuschendüsen ließ sich der Düsendurchmesser durch entsprechendes Ablängen anpassen. Es wurden Durchmesser mit 3,5, 4,5 und 5,5 mm unter Verwendung von 3 und 6 mm langen Carbonfasern untersucht. Zur Herstellung der Probekörper wurden Platten mit 110x240x40 mm hergestellt, aus denen zwei Prismen mit einer Breite von 40 mm herausgesägt wurden. Durch dieses Verfahren konnten definierte Geometrien und glatte Oberflächen zur Applizierung von Messtechnik sichergestellt werden. Aufgrund von Querkraftversagen wurde eine größere Spannweite festgelegt (vgl. Kapitel 5.5.3).

Die Verarbeitbarkeit in Bezug auf Verstopfer konnte nicht bei allen Varianten festgestellt werden. So konnten keine Probekörper mit einem Düsendurchmesser von 3,5 mm und eine CF-Länge von 6 mm hergestellt werden. Die übrigen Probekörper konnten hergestellt werden, es kam jedoch gelegentlich zum Verstopfen der Düse.

Die Festigkeitsanalyse zeigte keine Unterschiede durch die Verwendung von unterschiedlichen Düsendurchmessern, außer bei der Kombination der 5,5 mm Düse mit einer CF-Länge von 3 mm. Bei allen Proben wurden 2,0 Vol.-% Carbonfasern beigemischt und nach 7 Tagen (24 h Feuchtraum, 6 d Wasserlagerung) geprüft.

CF-Länge	Ø = 3,5 mm	Ø = 4,5 mm	Ø = 5,5 mm
3 mm	49,1 N/mm²	50,2 N/mm²	43,1 N/mm²
6 mm		48,9 N/mm²	48,8 N/mm²

Tabelle 5-3: mittlere Biegezugfestigkeit bei verschiedenen Düsendurchmessern und CF-Längen

Auffällig ist zunächst, dass die Biegezugfestigkeit generell kleiner ist als bei den ersten Probekörpern (Kapitel 5.4.1). Es kann nicht mehr genau zurückverfolgt werden, wodurch sich die geringere Festigkeit ergibt. Es wird jedoch vermutet, dass es an unterschiedlichen Behandlungsdauern der Carbonfasern im Ofen liegen kann. Anfangs wurden die Carbonfasern 5h, später wie in [1] beschrieben nur 4h oxidiert. Da immer relativ große Mengen an CF behandelt werden, kann es sein, dass die innenliegenden Fasern nicht auf 425°C aufgeheizt werden und zudem nicht genügend Sauerstoff im Ofen für eine vollständige Oberflächenoxidation vorhanden ist.

Bei Analyse der in Tabelle 5-3 dargestellten Festigkeiten zeigt sich durch die Verwendung eines größeren Düsendurchmessers kein signifikanter Unterschied. Es wird entgegen Hambachs Vermutung [1], dass die Carbonfaserlänge größer sein muss als der Düsendurchmesser, angenommen, dass sich die hauptsächliche Faserausrichtung durch die gleichmäßige Fließbewegung innerhalb der Düse ergibt. Ähnliches wurde bereits bei stahlfaserbewehrten Betonen festgestellt. Oesch [76] untersuchte mithilfe von CT-Scans die Faserausrichtung von zwei stahlfaserbewehrten Betonzylindern. Der erste wurde in einer zylindrischen Schalung hergestellt und es ergab sich eine willkürliche Verteilung der Faserausrichtung. Der zweite Zylinder wurde durch Kernbohrung erzeugt und stammt aus einer Platte, bei der der Beton während der Betonage eine Fließbewegung ausbildete. Dadurch stellte sich eine sehr deutliche Faserausrichtung in Fließrichtung ein. Kürzlich veröffentlichte Simulationen von Kanarska et. al. bestätigen, dass auch Fasern unterhalb des Düsendurchmessers deutliche Ausrichtungserscheinungen aufzeigen, die auf komplexen Begebenheiten der Strömungsdynamik zurückzuführen sind [77].



Zylinder (geschalt)

Abbildung 5-17: Stahlfaserverteilung bei unterschiedlicher Probekörperherstellung (aus [76])

Dieses Verhalten ist allerdings auch stark von der aktuellen Fließfähigkeit des Betons abhängig. Da ein Druckprozess je nach Mörtelmenge bis zu zwei Stunde dauern kann, steift der Beton durch seine Thixotropie an. Es hat sich gezeigt, dass bei später hergestellten Probekörpern geringere Festigkeiten erzielt werden (siehe auch Ergebnisse der ersten Probekörper, Abbildung 5-16). Durch die höhere Fließfähigkeit zu Beginn des Drucks ist die innere Reibung im Beton geringer, sodass sich die Carbonfasern leichter ausrichten lassen. Ähnliches wurde auch bei Proben mit 2,5 und 3,0 Vol.-% Carbonfasern festgestellt. Durch den höheren Fasergehalt ist der Beton sehr viel zähflüssiger und es kommt zu einem kleineren Anteil an ausgerichteten Fasern. Hierbei lässt sich ein deutlicher Zusammenhang von Düsengröße und Biegezugfestigkeit belegen, es ergibt sich bei 3,0 Vol.-% nur eine Festigkeit von 67,2 N/mm² (vgl. Kapitel 5.5.3).

Da die Verarbeitbarkeit mit 2,0 Vol.-% am sichersten in Bezug auf einen zusammenhängenden Druckprozess ohne Unterbrechungen aufgrund von Verstopfern war, wurde der Einfluss auf höher bewehrte Rezepturen nicht weiter berücksichtigt und im Folgenden mit 2,0 Vol.-% gearbeitet. Schließlich wurde eine Düsengröße von 4 mm gewählt, um eine Ausrichtung der Fasern auf jeden Fall zu gewährleisten.

Um makroskopische Poren, die während des Druckprozesses zwischen den einzelnen Strängen in den Probekörper eingearbeitet werden, zu vermeiden, wurde die Geometrie der Düse angepasst. Durch die kreisrunde Öffnung der Kartuschendüse ergeben sich in den Kreiszwickeln Hohlräume, die zwar durch die Fließfähigkeit (insbesondere am Anfang des Druckprozesses) recht gut ausgefüllt werden können, bei einer steiferen Konsistenz steigt der Porengehalt jedoch an. Eine Anpassung der Düsengeometrie zu einem Quadrat vermindert Hohlräume und extrudiert einen Strang, der sich besser neben einem bereits gedruckten Strang eingliedert.

Da die Diagonale der Düsenöffnung einer quadratischen Düse um den Faktor 1,41 größer ist als die Seitenlänge, wurde diese auf 4 mm begrenzt. Die Versuche mit einer 5,5 mm breiten Runddüse haben gezeigt, dass es immer noch zu einer Faserausrichtung kommt, allerdings die Festigkeiten etwas nachlassen. Versuche mit der 4 mm breiten Quadratdüse zeigten jedoch die gleichen Festigkeitswerte wie bei kleineren Düsengrößen. Diese Düsengeometrie wurde für die Herstellung der nachfolgenden Prüfkörper verwendet.

5.4.2.2 Multidüse

Der zeitliche Aufwand, die Probekörper mit einer einzelnen Düse herzustellen, ist für großformatige Bauteile sehr groß, sodass es notwendig ist, den Druckprozess zu beschleunigen. Dazu wäre es möglich, mehrere unabhängig voneinander fahrende Druckköpfe zu verwenden, deren Fahrwege sich in einem gewissen Bereich überlappen, sodass es zu einem kraftschlüssigen Verbund der Teilbauteile kommt, die Druckköpfe aber nicht kollidieren.

Des Weiteren kann an jeden Druckkopf eine Multidüse verwendet werden. Abbildung 5-18 zeigt einen Entwurf, bei dem der Zulauf in drei gleich große Bereiche eingeteilt wurde. Die Verjüngung sollte möglichst durch gekrümmte und gewölbte Flächen erfolgen, sodass eine gleichmäßige Fließbewegung gewährleistet ist.



Abbildung 5-18: Drunter- und Draufsicht der getesteten Multidüse mit drei Extrusionsöffnungen

Erste Versuche mit dieser Multidüse zeigen vielversprechende Ergebnisse. Die Extrusion erfolgte aus allen drei Düsen gleichmäßig, sodass alle drei Stränge den gleichen Durchmesser hatten. Optisch wurden keine Unterschiede zum Druckbild mit einer einfachen Düse festgestellt. Auch die gemessenen Festigkeiten unterscheiden sich nicht von Probekörpern, die mit der einfachen Düse hergestellt wurden.

Die Fahrtrichtung mit dieser Düse ist vorgegeben und es kann nicht quer dazu oder schräg gefahren werden. Somit eignet sich diese Düse nur für die Anordnung geradliniger Druckpfade bzw. Bauteile. Durch eine mögliche Weiterentwicklung hin zu einer drehbaren Multidüse kann diese Einschränkung aufgelöst werden.

Eine weitere Restriktion stellte sich dar, als eine der drei Düse verstopfte. Da es mit dieser Konstruktion nicht möglich ist, die einzelnen Düsen über ein Ventil zu steuern, musste der komplette Druck des Bauteils abgebrochen werden. Ein Verstopfer der Düse wird erst nach mind. 20 bis 30 cm festgestellt. Anschließend muss wieder zurück gefahren werden und der fehlende Strang aufgefüllt werden. Dabei haben die anderen beiden Düsen im ersten Druckprozess bereits ihre Stränge abgelegt und müssten jetzt über ein Ventil geschlossen werden. Eine mögliche Umsetzung könnte mit einem Schlauchventil erfolgen, bei dem das Material durch einen in der Düse verlaufenden, durch Quetschen verschließbaren Schlauch geführt wird.

5.4.3 Untersuchung zur Verwendung von Nachbehandlungsmitteln

Durch die Verwendung von 3D-Druckern für den Betonbau ergeben sich besondere Anforderungen an die Nachbehandlung der so hergestellten Bauteile. Bereits während des Drucks ist der Beton der Luft ausgesetzt, sodass es besonders bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen mit niedrigen w/z-Werten zum Austrocknen des Betons kommt, wodurch wiederum Einbuße in der Festigkeit entstehen. Auch nach dem Abschluss der Druckarbeiten fehlt im Gegensatz zum konventionellen Betonbau die Schalung als Schutzschicht, sodass das Bauteil weiter austrocknen kann, sofern keine Nachbehandlung durchgeführt wird. Aus diesem Grund wurden fünf Nachbehandlungsmittel ("NBM 1" bis "NBM 5") verschiedener Hersteller näher untersucht und auf je drei Normprismen aufgebracht. Zusätzlich wurde je eine Charge mit drei Normprismen unbehandelt an freier Luft ("Luft") und unter Wasser ("Wasser") gelagert. Die Prüfung wurde 7 Tage nach der Herstellung durchgeführt. Durch den 3D-Druck ist die Oberfläche der Probekörper sehr uneben, weshalb sie vor der Prüfung geschliffen wird, um punktuelle Zwangsspannungen zu vermeiden.

Wie Abbildung 5-19 zeigt, liegen alle Messergebnisse relativ dicht beieinander, sodass sich ein Mittelwert aller Proben von 66,6MPa (±4,5) ergibt. Diese Probekörper wurden wie die ersten Probekörper (Kapitel 5.4.1) mit den länger wärmebehandelten Carbonfasern hergestellt, weshalb sich höhere Festigkeiten im Vergleich zu denen aus Kapitel 5.4.2.1 ergeben.

In Abbildung 5-19 ist deutlich zu erkennen, dass die nicht nachbehandelten Probekörper keine niedrigeren Festigkeiten als die nachbehandelten aufweisen. Auch im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 5.4.1 ("Wasser" in Abbildung 5-19) ergeben sich keine niedrigeren Festigkeiten. Dies kann auf den hohen w/z-Wert der verwendeten Mischung von 0,435 zurückgeführt werden, sodass zwar eine kleine Oberflächenschicht austrocknet, aber der Großteil des Querschnitts genügend Wasser zur Hydratation des Zements zur Verfügung hat. Außerdem ergibt sich durch das Abstreifen des Betons an der Düse eine dichte Oberfläche, bei der keine oder nur sehr wenige Kapillarporen aus dem gedruckten Strang herausführen. Dementsprechend ist es dem freien Wasser der innenliegenden Stränge kaum möglich, durch die äußeren Stränge hindurch zu diffundieren.



Abbildung 5-19: Festigkeiten von nachbehandelten Probekörpern und Referenzprobekörpern

5.5 Bauteilprüfung, Materialgesetze

Zur Bestimmung des Materialverhaltens und deren Gesetzen wurden schwerpunktmäßig Biegezugversuche, aber auch einaxiale Druck- und Zugversuche durchgeführt. Bei Carbonkurzfaserbeton handelt es sich aufgrund der Faserorientierung um ein anisotropes Material, für welches die Richtung des Faser-Last-Winkels äquivalent zu Holzwerkstoffen zu berücksichtigt ist. Zur Beschreibung der Biegetragwirkung sind hauptsächlich die Beanspruchbarkeiten in Faserrichtung von Interesse.

Es wurde die Mörtelmischung nach Tabelle 4-14, mit 2,0 Vol.-% Carbonfasern verwendet. Zur Probekörperherstellung wurde die einfache Quadratdüse mit 4 mm Seitenlänge verwendet. Rechnerisch ergibt sich aus den Einzelbestandteilen eine Rohdichte von 2,2 kg/dm³, tatsächlich liegt die Dichte bei ca. 2,0 kg/dm³, wodurch sich ein Porengehalt von 9,1% ergibt. Für eine unbewehrte Betonprobe wurde eine Dichte von 2,1 kg/dm³ festgestellt.

Es konnte bei keinem Versuch ein Anzeichen für eine Delamination der einzelnen Schichten festgestellt werden. Dadurch, dass die einzelnen Stränge zeitnah aufeinander gedruckt werden, werden diese "frisch in frisch" betoniert.

5.5.1 Einaxiale Druckversuche

Zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften unter einaxialer Druckbeanspruchung (parallel und quer zur Faser), wurden Prüfkörper mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 100 mm aus einem gedruckten Quader mithilfe eines Kernbohrgeräts entnommen.

Im Druckversuch zeigt sich ein für Beton untypisches Bruchbild (vgl. Abbildung 5-20). Aufgrund der unidirektionalen Faserausrichtung bilden sich nicht die üblichen Kegelformen an Ober- und Unterseite des Prüfkörpers aus. Vielmehr kann die Querzugspannung nicht aufgenommen werden, sodass längliche Splitter ausbrechen. Die Bruchflächen verlaufen nicht direkt an Strangrändern bzw. kreuzen die gedruckten Stränge immer wieder, sodass es sich hierbei nicht um eine Delamination handelt. Ein ähnliches Versagensbild wie in Abbildung 5-20 zeigt sich auch bei Proben mit einer Faserausrichtung quer zur Lastrichtung, nur dass vertikale Scheiben aus dem Probekörper herausbrechen.



Abbildung 5-20: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Druckversuche und geprüfter Zylinder mit paralleler Faserausrichtung

Die E-Modul-Messung wird gemäß DIN EN 12390-13 zerstörungsfrei durchgeführt. Dazu wird in mehreren Zyklen eine Unter- und Oberlast von 10 % und 33 % der maximalen Prüfkraft angefahren. Der E-Modul ergibt sich schließlich als Mittelwert von drei Zyklen. Anschließend wurde die Druckfestigkeitsprüfung durchgeführt.

Tabelle 5-4: Druckfestigkeiten und E-Moduln von unbewehrtem Beton und Carbonkurzfaserbeton (CSRFC)

Probe	σ_c in N/mm²	E _c in N/mm²
unbewehrt, 7d	98,2 (± 6,8)	28.300
CSFRC, 7d,	107,2 (± 14,6)	33.600
CSFRC, 7d, \perp	87,7 (± 6,7)	28.400
unbewehrt, 28d	129,3 (± 8,2)	33.000
CSFRC, 28d,	141,4 (± 13,6)	38.100

Grundsätzlich wird die Druckfestigkeit durch die Carbonkurzfasern nur wenig beeinflusst. Da die Carbonfasern einen hohen E-Modul besitzen, steigt der des Verbundwerkstoffs in Faserrichtung geringfügig an. Die verwendete Feinstbetonmischung liegt im Festigkeitsbereich von hochfestem bis ultrahochfestem Beton und verhält sich bis zum Bruch linear elastisch, wobei der Prüfkörper schlagartig versagt. Bei den quer zur Faserrichtung beanspruchten Proben konnte ein gewisses Nachbruchverhalten dokumentiert werden, welches sich durch den Ausbruch von scheibenartigen Splittern, die die gleiche Höhe wie der Probekörper haben und daher tragfähiger als die länglichen Splitter sind, erklären lässt. Allerdings liegt bei diesen Proben die Festigkeit etwas unterhalb der unbewehrten Proben, was sich durch die geringe Festigkeit der Carbonfaser in Querrichtung erklären lässt. Somit stellen die Carbonfasern eine Störstelle dar.

5.5.2 Einaxiale Zugversuche

Die zentrische Zugfestigkeit wurde an Zugknochen mit Abmessungen gemäß Abbildung 5-21 ermittelt. Der konstant breite Querschnitt im zentralen Bereich der Probekörper weist eine Querschnittsfläche von 50 x 50 mm auf. Um die "Erhebungen" der Stränge der einzelnen Schichten auf den seitlichen Oberflächen des Prüfkörpers zu entfernen, wurde eine CNC-gefräste Schalung nach dem Druckprozess angepresst. Die Oberseite wird nach einer Aushärtezeit von etwa 5 Tagen geschliffen, um definierte Bauteilkanten und Querschnittsflächen zu erhalten.



Abbildung 5-21: Zugknochengeometrie und Prüfkörper nach dem Ausschalen

Die Prüfkörper werden jeweils beidseitig eingespannt geprüft. Dies erfordert ein sehr genaues Einbauen in die Prüfmaschine, da es sonst zu ungewollten Exzentrizitäten kommt. Zugprüfungen mit beidseits gelenkiger Lagerung eignen sich lediglich zur Erfassung der Zugfestigkeit, nicht aber um ein Nachrissverhalten zu dokumentieren. Reißt der Querschnitt an einer Ecke auf, verschiebt sich die Systemachse in den Schwerpunkt des gerissenen Querschnitts. Durch die gelenkige Lagerung verdrehen sich daraufhin die Auflager, sodass der Restquerschnitt wieder zentrisch belastet ist. Für den Gesamtquerschnitt ergibt sich daraus allerdings eine exzentrische Belastung, die sich nur bedingt aus den gemessenen Dehnungen und Verschiebungen errechnen lässt. Das bedeutet, dass die eigentlich wirkende Belastung unbekannt ist. Bei der Prüfung mit eingespannten Prüfkörperenden ist sichergestellt, dass die Belastung bezogen auf den Gesamtquerschnitt immer zentrisch ist. Die Rissstelle wird ohne eine Verdrehung parallel auseinander gezogen.

Der Einfluss der Carbonfasern auf die Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs ist immens. Die zentrische Zugfestigkeit von unbewehrtem Beton erreicht Werte in der Größenordnung von 3 MPa für Normalbeton und rund 8 MPa für UHPC (Matrixzugfestigkeit). Durch das Einbringen von gerichteten Carbonfasern können Festigkeiten von 22,3 MPa nach 28 Tagen erzielt werden. Besonders auffällig zeigt sich ein ausgedehnt plastischer Bereich. Zwischen einer Dehnung von etwa 0,4 – 0,6 ‰ fällt der E-Modul drastisch ab, sodass in einer weggesteuerten Prüfung die Prüfkraft annähernd stagniert. Unter dieser Last wächst die Bruchdehnung auf bis zu 7,5 ‰ an. Die erste Rissbildung der Betonmatrix zeigt sich bei einer Dehnung von ca. 0,4 ‰.

Das Zugtragverhalten kann gemäß Abbildung 5-22 als bilinear beschrieben werden. Dabei beträgt der E-Modul des ersten steigenden Astes etwa 30.000 MPa, während sich nach der Bildung von Mikrorissen ein deutliches Plateau einstellt, für das sich ein "E-Modul" in der Größenordnung von nur mehr etwa 150 MPa ermitteln lässt.



Abbildung 5-22: Spannungs-Dehnungs-Linie im einaxialen Zugversuch und photogrammetrische Aufnahme mit Darstellung der Dehnungen kurz vor Versagen

In Abbildung 5-22 sind die Dehnungsverläufe von vier einzelnen Dehnmessstreifen (DMS) dargestellt (Grautöne). Dabei ist deutlich zu erkennen, dass bei Erreichen der Bruchlast die maximalen Dehnungen zwischen 2,5 und 7,5 ‰ schwanken. Dies liegt an der Verteilung der Mikrorisse und an der Position der DMS. In der photogrammetrischen Auswertung zeigt sich eine starke Mikrorissbildung. Liegt ein DMS genau im Bereich eines Risses, steigen die Dehnungen entsprechend stark an, während andere DMS, die in ungerissenen Bereichen liegen, nur sehr geringe Dehnungen messen. Betrachtet man die über einer Länge von 7,5 cm gemittelte, mittels Photogrammetrie gemessene Dehnung, so ergeben sich sogar nur maximale Dehnungen von 2,0 ‰. Die Dehnungsspitzen treten nur in lokal sehr begrenzten Bereichen auf, große Bereiche weisen geringe Dehnungen auf.

5.5.3 Biegezugversuche

Auffällig bei den ersten geprüften Probekörpern (Kapitel 5.4.1) war, dass bei etwa einem Drittel der Probekörper nicht ein Biegeriss im Bereich der Lasteinleitung senkrecht zur Bauteilachse eintrat, sondern dass es zu einem Schubversagen kam, bei dem der Riss von der Lasteinleitung zum Auflagerpunkt verläuft. Dies spricht dafür, dass in dem Bauteil ein extrem hoher Bewehrungsanteil vorhanden ist. Die Prismen wurden mit einer Stützweite von 100mm geprüft, womit sich ein Verhältnis H/L = 2,5 ergibt. Allgemein ist bekannt, dass erst ab einem Verhältnis H/L \geq 4 ein linearer Dehnungsverlauf und die Bernoulli Hypothese angenommen werden kann.



Abbildung 5-23: Unterschiedliche Versagensformen am Normprisma: a) Biegeriss, b) Schubriss

Daher wurden für die Versuche zur Tragverhaltensbeschreibung die Spannweite auf 180 mm erhöht, die Probekörper wurden mit einer Länge von 220 mm hergestellt. Die Probekörper wurden 7 Tage nach der Herstellung geprüft.

Um das Tragverhalten beschreiben zu können, wurden fünf DMS über die Höhe verteilt auf die Probekörper aufgebracht (Abbildung 5-24). Diese sind im 3-Punkt-Biegeversuch unterhalb der Lastrolle angeordnet. Abbildung 5-25 zeigt bei verschiedenen Laststufen die Dehnungen der DMS (Punkte) und deren Ausgleichsgerade.



Abbildung 5-24: Prüfaufbau und DMS-Anordnung

Sehr gut lässt sich dabei die Verschiebung der Nulllinie in den oberen Querschnittsbereich beobachten. Bei der Bewertung des Diagramms müssen jedoch folgende Punkte beachtet werden: Befindet sich der DMS im Zugbereich, kann es passieren, dass er sich direkt auf einem Riss befindet und somit die Dehnungen extrem in die Höhe schnellen. Andererseits kann es sein, dass er sich direkt neben einem Riss befindet, wo aufgrund der Nähe zum Riss geringere Dehnungen vorhanden sind. Dies zeigt sich zum Beispiel in Abbildung 5-25 bei der Laststufen 25 und 30 MPa. Der zweite DMS von unten zeigt hier größere Werte als der DMS an der Unterseite an. Da der Riss bei Carbonkurzfaserbeton nicht geradlinig verläuft (vgl. Abbildung 5-23a), kann es immer zu einem solchen Verhalten kommen, auch wenn die DMS sehr nahe beieinander lie-
gen. Weiter zu beachten ist, dass der obere DMS sehr nahe am Lasteinleitungspunkt positioniert ist. In diesem Bereich herrscht kein einaxialer Spannungszustand und das Ergebnis kann durch schräg wirkende Hauptdruckspannungen beeinflusst werden. Um diesen potentiellen Fehlerquellen entgegenzuwirken, wurde die Ausgleichsgerade berechnet.





Betrachtet man die Abweichung der DMS-Messung von der Ausgleichsgeraden, kann davon ausgegangen werden, dass die Dehnungen entsprechend der Ausgleichsgeraden linear über die Querschnittshöhe verlaufen, sodass die Bernoulli-Hypothese zum Ebenbleiben der Querschnitte zutrifft.

Zur Verifizierung der DMS-Messung wurde parallel mithilfe der Photogrammetrie die Oberflächendehnung aufgenommen. Mit Hilfe dieser Technik lässt sich die Dehnungsverteilung während des Biegezugversuches in einem großen Bereich ermitteln. Dabei ist deutlich die großflächig verteilte Mikrorissbildung zu erkennen (Abbildung 5-26). Anders als bei Stahlfaser- und Stahlbeton bilden sich sehr viele Risse im hochbeanspruchten Bereich, welche bei zunehmender Belastung ins Bauteilinnere hineinwachsen und sich zu Makrorissen vereinigen. Die tatsächliche Dehnung der Carbonfasern im Riss lässt sich nur schwer abschätzen, da die Rissdimensionen äußerst klein sind. Die Mikrorisse sind mit bloßem Auge nicht sichtbar und der zum Versagen führende Makroriss lässt sich erst kurz vor dem Bruch erkennen.

Des Weiteren sind in Abbildung 5-26 unten die Hauptdehnungen und deren Richtung dargestellt. Die Richtungsvektoren stellen deutlich den einaxialen Spannungszustand auf der Zugseite dar. Im oberen Bereich, wo die Lastrolle positioniert ist, zeigt sich deutlich der Diskontinuitätsbereich und der Einfluss der punktuellen Lasteinleitung, die Haupttrajektorien verlaufen im Druckbereich konzentrisch um diesen Punkt.



Abbildung 5-26: *oben:* Photogrammetrische Auswertung (horizontale Dehnung) eines 3-Punkt-Biegezugversuches kurz vor dem Versagen. *unten:* Hauptdehnungen und deren Richtung

Um einen Vergleich zur DMS Messung herstellen zu können, wurden die Dehnungen in zwei vertikalen Schnitte im Diagramm in Abbildung 5-27 aufgetragen. Der rote Schnitt befindet sich genau im Bereich der Lastrolle und der DMS (diese sind auf der gegenüberliegenden Seite des Prüfkörpers angebracht), der blaue in dem Bereich, wo an der Unterseite der zum Versagen führende Riss entsteht. Die Schnitte haben einen horizontalen Abstand von 5 bis 6 mm.



Abbildung 5-27: Dehnungsverlauf errechnet aus der photogrammetrischen Auswertung

In Abbildung 5-27 lässt sich eine Druckzonenhöhe von ca. 10 mm ablesen, bei Abbildung 5-25 liegt sie bei ca. 12 mm. Der Vergleich der Maximaldehnungen liefert ähnliche Übereinstimmungen (im Mittel etwa -2 ‰ bzw. +7 ‰), wobei die Abweichungen der geringen Auflösung der Photogrammetrie und dem Rissverlauf zugeschrieben werden kann.

Diese Auswertung zeigt, dass eine linear elastische Berechnung der einwirkenden Spannung, der Dehnungsverteilung und des E-Moduls gemäß Kapitel 4.1.8.1 nicht anwendbar ist. Dies bestätigt auch das Momenten-Krümmungs-Diagramm der Ausgleichsgeraden in Abbildung 5-28. Hier zeigt sich ein deutlicher Steifigkeitsabfall bei einer rechnerischen (linear elastischen) Spannung von etwa 20 MPa.



Abbildung 5-28: Momenten-Krümmungs-Diagramm

5.5.4 Entwicklung eines Bemessungsmodells

Zur Beschreibung des Tragverhaltens werden 28 Tage alte Prüfkörper verwendet (vgl. Kapitel 5.5.8.1). Es wurden vier Prüfkörper, auf die über die Höhe verteilte DMS angebracht wurden, untersucht. Um Schwankungen der DMS zu minimieren wurde wie in Kapitel 5.5.3 beschrieben eine Ausgleichsgerade aus den gemessenen Dehnungen errechnet. In Abbildung 5-29 ist die Spannungs-Dehnungs-Beziehung der an der Prüfkörperunterseite gemessenen Dehnungen über die linear elastisch berechnete Spannung aufgetragen. Dabei stellt die linear elastische Spannung lediglich ein auf den Querschnitt bezogenes Moment ($\sigma = M/W$) dar und ist nicht als tatsächlich wirkende Spannung zu interpretieren. Da die Prüfkörpergeometrie immer um einige Millimeter schwankt, ist dieser Schritt zur Wahrung der Vergleichbarkeit der Einzelergebnisse notwendig. Die Dehnung wurde anhand von drei über die Höhe verteilte DMS, aus deren Messwerte eine Ausgleichsgerade berechnet wurde, ermittelt. Die in Abbildung 5-29 schwarz gestrichelt dargestellte Linie stellt die Mittelwerte der Einzelproben dar.



Abbildung 5-29: Momenten-Dehnungs-Beziehung der mittels Ausgleichsgeraden gemittelten DMS-Dehnung an der Prüfkörperunterseite und der linear elastischen Spannung

Zunächst wurde versucht, mithilfe der aus den einaxialen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für den Druck- und Zugbereich ein Kräfte- und Momentengleichgewicht bei Biegebelastung zu erhalten [78]. Dabei wurden folgende Wert angesetzt:

Bezeichnung	ε in μm/m	σ in N/mm²	50	
ϵ_{c} / f_{c}	-4000	-140		
	0	0	-5000 0 5000	ε [μm/m]
ϵ_y / f _y	650	23	-100 -	
ϵ_{u} / f_{u}	7500	24	-150 ^σ [N/mm ²]	

Tabelle 5-5: Arbeitslinie mit Plateau

Wie im Stahlbetonbau kann durch iterative Berechnung für eine gegebene Zugdehnung ε_u die Druckdehnung ε_o und damit auch die Druckzonenhöhe x so angepasst werden, dass die Druckkraft F_c betragsmäßig gleichgroß mit der Summe der Teilzugkräften F_y, F_{u1} und F_{u2} ist und somit die Summe der Horizontalkräfte gleich null ist. Durch Multiplikation der Kräfte mit den entsprechenden Hebelarmen lässt sich das Moment und daraus wiederum die linear elastische Spannung berechnen.

Die Indizes wurden an die bekannten Bezeichnungen für Beton "c" (engl. concrete), der Streckgrenze von Stahl "y" (engl. yield) und der Zugfestigkeit von Stahl "u" (engl. ultimate) angelehnt.



Abbildung 5-30: schematischer, innerer Spannungs- und Kräfteverlauf bei Ansatz der einaxialen Festigkeiten und das daraus resultierende bezogene Momenten-Dehnungs-Diagramm

In Abbildung 5-30 ist am Verlauf des bezogenen Momente-Dehnungs-Diagramms zu sehen, dass sich dieses Modell schon recht gut mit den tatsächlich vorhandenen Dehnungen und dem einwirkenden Moment in Einklang bringen lässt [78]. Allerdings lässt sich durch Anpassung der Nachrisszugfestigkeit eine größere Übereinstimmung erreichen. Dazu wird nach Erreichen der "Streckgrenze" ein kleiner Spannungsabfall mit anschließendem höherem E-Modul und größerer Bruchspannung angesetzt:

Tabelle 5-6: modifizierte Arbeitslinie (Diagramm zeigt nur den Zugbereich) und das daraus resultierende bezogene Momenten-Dehnungs-Diagramm

Bezeichnung	ε in µm/m	σ in N/mm²	× 40
ϵ_{c} / f_{c}	-4000	-140	ε [μm/m]
	0	0	0 2000 4000 6000 8000
ϵ_y / f _y	650	23	60 - [zu] 40 -
ϵ_y ʻ / fyʻ	650	19	Ž. ™20 - Modell – – gemittelt
ϵ_u / f _u	7500	31	0 <u>ε_u [μm/m]</u> 0 2000 4000 6000 8000

Es kann so eine sehr gute Übereinstimmung des tatsächlichen Dehnungsverlaufs und des Modells erzielt werden. Der einaxiale Zugversuch lässt sich mit diesem Ansatz auch beschreiben. Durch die extrem verteilte Mikrorissbildung und der in der Photogrammmetrie in Abbildung 5-22 gezeigten punktuellen Dehnungsspitzen tritt innerhalb eines Querschnitts nie ein einziger Dehnungszustand auf. Bei steigender Belastung nimmt nach Erstrissbildung in einigen Querschnittsteilen die Spannung ab, steigt im weiteren Prüfverlauf aber wieder an, während sie dann in anderen Teilen abfällt. In Summe ergibt sich ein annähernd konstanter Spannungsverlauf wie es beim einaxialen Zugversuch beschrieben wurde.

Zur Validierung des Modellansatzes wurden zusätzlich die Druckzonenhöhenentwicklung und die bezogene Momenten-Krümmungs-Beziehung mit den Versuchsergebnissen verglichen. Wie in Abbildung 5-31 zu sehen, zeigt sich auch hier eine hohe Übereinstimmung.



Abbildung 5-31: Vergleich der Druckzonen- und Krümmungsentwicklung der Versuche mit dem Modell

Bei den hier durchgeführten Versuchen an 28 Tage alten Prüfkörpern wurden anders als in Kapitel 5.5.3 beschrieben nur drei anstatt fünf DMS über die Höhe verteilt angeordnet (an der Unterkante, 5 mm von der Unterkante entfernt und in der Schwerachse). Dadurch befand sich kein DMS in der Druckzone, welche aber im Vergleich zur Zugzone eine linear elastische Beziehung aufweist. Hintergrund war eine Vermeidung von Fehlmessungen durch die Nähe zum Lasteinleitungspunkt. Allerdings werden durch die geringere DMS-Anzahl bei der Berechnung der Ausgleichsgeraden etwaige Messfehler extrapoliert und gerade bei hoher Beanspruchung kommt es zu Ungenauigkeiten. Es ist daher zu empfehlen, mindestens einen DMS im Druckbereich anzuordnen. Wird die kurz vor Versagen erreichte bezogene Druckzonenhöhe x/h = 0,3 auf die in Abbildung 5-25 durchgeführte Messung angewendet, so ergibt sich eine Druckzonenhöhe von 12,2 mm, was sehr gut mit dem dort ermittelten Wert übereinstimmt.

Bei der Entwicklung dieses Modellansatzes wurde auf eine Angleichung des Druckbereiches verzichtet, da die Carbonfaserbewehrung wenig Einfluss auf die Druckfestigkeit aufzeigte und sich generell ein linear elastisches Verhalten zeigte.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass eine Dehnungsberechnung auf Grundlage linear elastischer Ansätze nach Kapitel 4.1.7 zu deutlich höheren Werten führt und aufgrund des nichtlinearen Verhaltens nicht anwendbar ist. In Bezug auf die linear elastische Spannungsberechnung zeigt sich jedoch bei direktem Vergleich zum Bemessungsmodell, dass die Spannung bei Rechteckquerschnitten unabhängig von den Abmessungen des Probekörpers immer gleich groß ist. Daher ist die linear elastische Spannung sicher ein guter Vergleichswert, es muss jedoch berücksichtigt werden, dass dies nicht der Wirklichkeit entspricht.

5.5.5 Brandverhalten

Gerade für die Anwendung von Carbonkurzfaserbeton im Bauwesen ist es unbedingt notwendig, das Brandverhalten zu kennen und geeignete Schutzmaßnahmen gegen das Versagen der tragenden Strukturen zu ergreifen. Stand der Technik solcher Schutzmaßnahmen sind die Verwendung von PP-Fasern, quellenden Schutzanstrichen und Brandschutzmörtel / Porenbetoneinhausungen mit wärmedämmenden Eigenschaften.

Während des Brandfalls kommt es zu komplexen betontechnologischen Vorgängen, die sich aus Wassertransport, physikalischen Schädigungsmechanismen und chemischen Umwandlungen zusammensetzen. Insbesondere ersterer Aspekt ist bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen von großer Bedeutung. Durch das äußerst dichte Gefüge kann der im Bauteilinneren durch Verdunstung von freiem und chemisch gebundenem Wasser entstehende Dampfdruck nicht abgeleitet werden. Dieser baut sich ab einer Temperatur von 105°C auf und führt zu explosionsartigen Abplatzungen an der Bauteiloberfläche. [79]

Parallel zur Verdunstung des Wassers kommt es zur Dehydratation der festigkeitsbildenden CSH-Phasen, weshalb es bei höheren Temperaturen zu Schwindverformungen und zum Abfall der Festigkeit kommt. Bei ca. 500°C beginnt die Umwandlung des Portlandits in Calciumoxid und gasförmiges Wasser, wobei das Porenvolumen stark zunimmt. Neben den thermischen inneren Spannungen kommt es durch den Sprung von α - zu β -Quarzen zu einer Volumenzunahme von 0,8%, welche eine zusätzliche innere Spannung hervorruft. Ab Temperaturen von 600°C kommt es zur Zersetzung der Karbonate und CSH-Phasen, wodurch es zu einem starken Festigkeitsabfall kommt. [79]



Abbildung 5-32: Betonverhalten während des Brandfalls [80]

Um den Abplatzungen entgegenzuwirken, werden PP-Fasern (Polypropylen) mit einem Durchmesser von 18µm und einer Länge von 6 mm der Fa. Ha-Be Betonchemie GmbH in den Beton eingemischt. Bei einer Temperatur von ca. 160°C beginnen die Fasern zu schmelzen und geben damit einerseits Raum für den Wasserdampf frei um den Wasserdampfdruck zu mindern und andererseits bilden sich durch sich berührende PP-Fasern an die Prüfkörperoberfläche führende Kapillarporen, wodurch der Wasserdampf entweichen kann [81]. Üblicherweise werden 2 kg PP-Fasern je Kubikmeter Beton eingemischt, um das Abplatzverhalten zu unterbinden. Dies entspricht einem Gehalt von 0,1 M.-% bzw. 0,2 Vol.-%. Da der Carbonfasergehalt mit 2,0 Vol.-% bereits recht hoch ist, haben die PP-Fasern nur einen sehr geringen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit im 3D-Druck. Die größere Faserlänge führte auch nicht zu einer größeren Neigung zum Verstopfen der Düse.

Im Gegensatz zu den PP-Fasern liegt der Grundgedanke bei quellenden Schutzanstrichen und Brandschutzmörteln darin, die Bauteile vor dem Temperatureinfluss zu schützen. Damit kann sich kein oder nur wenig Wasserdampfdruck aufbauen und auch die chemischen Veränderungen unterbunden werden. Der Brandschutzanstrich wird mit einer Dicke von 0,5 mm bis wenige Millimeter aufgetragen und quillt unter Temperatureinwirkung ab 200°C auf eine mehrere Zentimeter dicke Schicht auf.

An Carbonkurzfaserbeton wurde das Brandverhalten mit verschiedenen Parametern untersucht (vgl. Abbildung 5-33). Zunächst wurde entsprechend der Einheitstemperaturkurve (ETK 90) nach DIN EN 1991-1-2 Probekörper ohne jegliche Behandlung, mit PP-Faserzusatz und mit dem Brandschutzanstrich Sika Unitherm Concrete W erhitzt. Prüfkörper wurden zuvor bei 60°C 2 Tage lang getrocknet, um das Porenwasser, welches durch die Nachbehandlung im Wasserbad vorhanden war, zu entfernen. Die Anwendung der ETK auf eine Prüfkörpergröße von ca. 220 x 40 x 40 mm² entspricht wegen des thermischen Zwangs nicht einem maßstabsgetreuen Brandverhalten von realen Bauteilen, weshalb eine zusätzliche Untersuchung mit einer konstanten Erwärmung von 5 K/min durchgeführt wurde.

Schutz	Temperaturkurve	1200
ohne		1000 -
PP-Fasern	ETK 90	800 -
Anstrich		ਹੁ ⁶⁰⁰
ohne		
PP-Fasern	5 K/min	200 - ETK
Anstrich		0
ohne	200°C konst.	0 30 60 90 120 150 180 t [min]

Abbildung 5-33: Prüfprogramm und Temperaturverlauf der Brandversuche

Wie in Abbildung 5-34 zu erkennen ist, versagten die Prüfkörper ohne Schutzmaßnahme schlagartig. Gerade bei Anwendung der ETK, bei der eine Temperatur von 500°C bereits nach 3 min erreicht wird, explodierten die Prüfkörper innerhalb der ersten zwei Minuten. Das gleiche Schicksal ereilte auch die mit PP-Fasern verstärkten und mit dem Anstrich versehenen Prüfkörper. Zwar schäumte der Anstrich in geringem Maße auf, anscheinend wurde jedoch schon im Probekörper eine kritische Temperatur erreicht, sodass es zum Versagen kam. Interessanterweise verliefen die Risse immer in Druckrichtung horizontal. Es können zwar keine einzelnen Stränge ausgemacht werden und die Rissflanken laufen nicht geradlinig wie die gedruckten Stränge (die einzelnen Druckebenen werden immer wieder gekreuzt), es lässt sich allerdings eine klare Tendenz ausmachen.

Bei Anwendung einer konstanten Temperaturerhöhung zeigte sich das gleiche Versagensbild. Bei einer Temperatur von ca. 300°C kam es zur Explosion bei unbehandelten Prüfkörpern, bei mit PP-Fasern verstärkten Prismen bei ca. 320°C und bei denen mit dem Schutzanstrich bei ca. 350°C Ofentemperatur.



Abbildung 5-34: unbehandelter Prüfkörper vor und nach dem Brandversuch

Abschließend wurden unbehandelte Prüfkörper bei 200°C konstanter Temperatur erwärmt. Nach 3 Stunden Wärmebehandlung zeigte sich kein explosionsartiges Versagen, allerdings können an der Oberfläche diverse horizontalverlaufende Mikrorisse festgestellt werden. Die Rissweite beträgt deutlich unter 0,1 mm.



Abbildung 5-35: horizontal verlaufender Mikroriss infolge 200°C konstanter Temperatureinwirkung

Offensichtlich stellen die gerichteten Carbonfasern im Brandfall eine Bauteilschwächung dar. Aufgrund des äußerst dichten Materials, durch das kein Wasserdampf entweichen kann, kommt es zur Bildung von Rissen bzw. bei zu hohen Temperaturen zum schlagartigen Explodieren des Materials. Bei einer konstanten Temperatur von 200°C reißt durch den Wasserdampfdruck die Betonmatrix auf, allerdings kann der Wasserdampf im Gegensatz zur höheren thermischen Belastung entweichen und abgeführt werden.

Es sind genauere und weitreichendere Untersuchungen notwendig, um das Brandverhalten von Carbonkurzfaserbeton zu erforschen und zu verbessern. Möglichkeiten bestehen dabei in Veränderung der Rezeptur um den w/z-Wert zu senken und so grundsätzlich den durch die Wärmezufuhr frei werdenden Wasserdampf zu minimieren. Eine Wärmebehandlung während des Aushärteprozesses (vgl. Kapitel 5.5.8.3) kann ebenfalls einen positiven Effekt haben, da überschüssiges Wasser chemisch nicht gebunden wird.

5.5.6 Ermüdungsverhalten

Carbonfasern wird ein gutes Ermüdungsverhalten zugesagt [82]. Es zeigt sich, dass Carbonkurzfaserbeton von dieser guten Eigenschaft profitiert. Das Schädigungsverhalten von Beton lässt sich in drei Phasen gliedern (Abbildung 5-36). In der ersten Phase kommt es zur Rissinitiierung und zum Aufreißen des Querschnitts und damit zu großen Verformungen. Die zweite Phase beschreibt einen Bereich mit stabilem Risswachstum und unwesentlicher Zunahme der Verformungen. Kurz vorm Versagen des Prüfkörpers stellen sich infolge entstehender Makrorisse erneut große Verformungen ein. Dieser Bereich wird als dritte Phase mit instabilem Risswachstum definiert.



Abbildung 5-36: 3-Phasenbeschreibung des Schädigungsverlaufs für normal-, hoch- und ultrahochfesten Beton (aus [83])

Zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens wurden an der Universität Augsburg Biegezugversuche an Kleinstprüfkörpern mit einem Querschnitt von 3 x 3 mm² und an der Technischen Universität München zentrische Zugversuche an Zugknochen mit einem Prüfquerschnitt von 50 x 50 mm² durchgeführt (vgl. Kapitel 5.5.2).

Versuche an den Kleinstprüfkörpern haben ergeben, dass der Übergang von Phase 1 in Phase 2 sehr ausgeprägt ist, die Phase 3 wiederrum sehr kurz ist und das Versagen sehr plötzlich und ohne Vorankündigung ähnlich wie im statischen Versuch eintritt (vgl. Kapitel 4.7). Für die Versuche unter zentrische Zugschwellbeanspruchung wurden die Prüfkörper mit 2,0 Vol.-% Carbonfasern verstärkt. Dabei ergaben sich völlig unterschiedliche Prüfergebnisse als es aus der Literatur bzw. aus den Ergebnissen der Uni Augsburg bekannt war. Es wurden drei Probekörper untersucht:

Probennr.	E0.4	E3.2	E3.1
Lastwechsel	ca. 7,5 Mio.	ca. 9 Mio.	ca. 4 Mio.
Prüffrequenz	5 bzw. 8 Hz	5 Hz	5 Hz
Unter- / Oberlast	60 - 80%	60 - 80%	20 - 80%

Tabelle 5-7: Übersicht der durchgeführten Ermüdungsversuche (aus [78])

Nur bei Probe E3.1 ist ein Versagen aufgrund von Ermüdung eingetreten. Die Versuche E0.4 und E3.2 wurden abgebrochen und die Resttragfähigkeit ermittelt.

Der Prüfaufbau ist in Abbildung 5-37 dargestellt. Der Zugknochen wurde mit einem Duromerklebstoff MC-DUR 1280 der Fa. MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG in die Vorrichtung eingeklebt. Zur Messung der Auflagerverdrehung wurden drei Wegaufnehmer (WA) an den oberen Lastplatten positioniert. Vier Dehnmessstreifen (DMS) wurden am oberen und unteren Übergang vom gevouteten in den linearen Querschnittsbereich angeordnet. Zusätzlich wurde in diesem Bereich mit einem Lichtbandmikrometer (LBM) die gemittelte Dehnung erfasst.



Abbildung 5-37: Prüfaufbau für Zugversuche

In den Lastwechsel-Dehnungs-Diagrammen der ersten beiden Versuche zeigte sich keine Dehnungszunahme. Lediglich bei Probe E3.1 zeigte sich mit höherer Lastamplitude nach ca. 3 Mio. Lastwechsel (n = 0,75, Abbildung 5-38) eine leichte Dehnungszunahme bei den Wegaufnehmern WA1O und der Dehnungsmessung LBM.

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass die Dehnungen anfangs sogar rückläufig sind. Dies lässt sich einerseits durch Schwinden des Prüfkörpers und andererseits durch zusätzliche Festigkeitsentwicklung erklärt werden. Die Versuche wurden an ca. 28 Tage alten Prüfkörpern durchgeführt, bei denen die Hydratation noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

Kleine Schwankungen im Dehnungsdiagramm in Abbildung 5-38 sind auf Temperaturänderungen der Umgebung zurückzuführen. Die dargestellten Graphen zeigen jeweils die Messdaten zum Zeitpunkt eines Hochpunktes der sinusförmigen Belastung.



Abbildung 5-38: Verformungs- und Dehnungsverhalten während des Ermüdungsversuchs E3.1

Mit diesen Ergebnissen zeigt sich, dass selbst bei hohen Spannungsamplituden ein sehr gutes Ermüdungsverhalten des Carbonkurzfaserbetons mit 2,0 Vol.-% gegeben ist. Leider konnte hier nur eine geringe Anzahl der zeitlich sehr aufwendigen Ermüdungsversuche durchgeführt werden. Interessant ist außerdem die Verbindung zu den Versuchen der Universität Augsburg, die mit einem Carbonfasergehalt von 1,0 Vol.-% zu üblichen Versagenslastwechselzahlen führten (Kapitel 4.7).

5.5.7 Zeitabhängiges Verhalten

Um das zeitabhängige Tragverhalten zu untersuchen, wurde ein Versuchsstand entworfen, der es erlaubt, 3-Punkt-Biegezugversuche lastgeregelt über eine Dauer von 17 Wochen durchzuführen. Dazu war es wichtig, unabhängig von Energieträgern zu sein, damit ein Stromausfall oder ein Ausfall einer Hydraulikpumpe keinen Einfluss auf die Prüfung hat. Um eine konstante Belastung zu gewährleisten, wurde eine Hebelkonstruktion gewählt, welche eine Lastverstärkung von maximal 10 erreicht, um die aufzubringende Last möglichst gering zu halten. Außerdem sollte die gleiche Spannweite wie in den anderen Biegezugversuchen verwendet werden, um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Es wurde das in Abbildung 5-39 dargestellte Prüfprogramm durchgeführt. Dabei wurde ein Carbonfasergehalt von 2,0 Vol.-% verwendet. Um die erforderlichen Lasten aufzubringen, wurden verschiebliche Gewichte auf einem Hebelarm positioniert. Durch das Hebelgesetz konnte so mit einem Gewicht von 100kg (=1 kN) eine Prüflast von ca. 10kN für ein Lastniveau von 80 % aufgebracht werden. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 20°C und ca. 60 % relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Die Probennachbehandlung umfasste 24 h Lagerung in der Feuchtkammer und 6 d Wasserlagerung. Die Proben, die nach 28 d geprüft wurden, wurden nach der Wasserlagerung an der Luft gelagert.

Lastniveau	Probenalter	
20%		
40%	7 d	
80%		
40%	00 d	
60%	20 U	



Abbildung 5-39: Prüfprogramm und Prüfgerät für die Zeitstandversuche

Während der Versuchslaufzeit wurde die Verformung der Prüfkörper kontinuierlich mit Wegaufnehmern gemessen. Wie zu erkennen ist, nehmen die Verformungen stetig zu, werden jedoch deutlich kleiner mit zunehmender Prüflaufzeit. In der logarithmischen Darstellung wird ersichtlich, dass der Verlauf jedoch stetig konvex ist. Lediglich bei einem Belastungsniveau von 80 % zeichnet sich ein Wendepunkt ab, der auf eine stagnierende Verformung deuten lässt. Die dargestellten Verformungen beinhalten nicht die elastische Verformung, die sich durch das Aufbringen der Last einstellt.



Abbildung 5-40 sprunghaften Verläufe lassen sich so erklären, dass es im Prüfaufbau durch innere Reibung zu Zwangsspannungen kommt, die einen Teil der Last aufnehmen und das Verdrehen des Hebelarms behindern. Nimmt die Durchbiegung des Prüfkörpers zu, kommt es dadurch zu einer geringen Entlastung, bis sich der Hebelarm schlagartig setzt. Dadurch erhöht sich die Belastung wieder und die Verformung des Prüfkörpers nimmt zu. Da bei dem Lastniveau von 80 % die Last deutlich höher ist, kann die innere Reibung besser überwunden werden, wodurch es zu einem stetigeren Verlauf kommt.

Grundsätzlich ist nicht davon auszugehen, dass es zu einem Versagen der Prüfkörper kommt. In der Literatur wird häufig beschreiben, dass Versuchskörper, welche nach 14 d nicht versagt haben, nicht versagen werden, sondern dass nur die Verformungen zunehmen [84].





Abbildung 5-40: Ergebnisse der Verformungsmessung im Zeitstandversuch in linearer und logarithmischen Darstellung



Abbildung 5-40: Ergebnisse der Verformungsmessung im Zeitstandversuch in linearer und logarithmischer Darstellung (fortgesetzt)

Das Kriechverhalten von Betonkörpern kann in zwei Teile, das Grund- und das Trocknungskriechen, unterteilt werden. Dabei spielen Faktoren wie w/z-Wert, E-Modul der Gesteinskörnung, Temperatur, Belastungsniveau, Luftfeuchtigkeit und Festigkeit zu Beginn der Belastung auf das Kriechverhalten mit ein. Im Wesentlichen werden die Kriechvorgänge auf die Bewegung und Umlagerung von Wasser im Zementstein und damit verbundene Gleitvorgänge zurückgeführt. Durch die äußere Belastung werden die Wassermoleküle im Zementstein zum Platzwechsel gezwungen. Dazu kommen Gleit- und Verdichtungsvorgänge zwischen den Gelpartikeln. [85]

Zur Bestimmung des Kriecheinflusses wird die Kriechzahl φ berechnet. Sie ist nach DIN EN 1992 abhängig von der Betongüte, des Zeitpunkts der Erstbelastung, der Dauer der Belastung, der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft, der Querschnittsfläche und dessen Umfang. Sie ergibt sich als Quotient der aus Kriechverformung erzeugten Dehnung zur elastischen Dehnung des Materials. Vereinfacht wird in Tabelle 5-8 die Kriechzahl aus der elastischen Mittendurchbiegung und der zusätzlichen Durchbiegung infolge Kriechens berechnet.

Lastniveau, Probenalter	δ _{Kurzzeit} [mm]	δ _{Kriechen} [mm]	$\phi = \delta_{\text{Kriechen}} \ / \ \delta_{\text{Kurzzeit}} \ \textbf{[-]}$
20%, 7d	0,13	0,07	0,54
40%, 7d	0,32	0,15	0,47
80%, 7d	0,82	0,50	0,61
40%, 28d	0,55	0,11	0,20
60%, 28d	0,87	0,16	0,18

Tabelle 5-8: Kriecheinfluss auf Biegezugprismen nach 121 bzw. 100 Tagen

Nach DIN EN 1992, Anhang B ergibt sich für die 7d alten Prüfkörper eine Kriechzahl von 0,706, bei den 28d alten Prüfkörpern von 0,538. Hierzu sei allerdings angemerkt, dass die verwendete Prüfkörpergeometrie und die Betondruckfestigkeit nicht in den Grenzen der Norm liegen, sodass diese Werte nur als grober Richtwert dienen sollen. Es zeigt sich allerdings, dass die Kriechverformungen bei älteren Prüfkörpern erwartungsgemäß geringer werden. Die hier durchgeführten Versuche konnten nur 120 bzw. 100 Tage durchgeführt werden. Nach Norm ergibt sich eine Endkriechzahl (nach 70 Jahren Belastungsdauer) von 0,909 bzw. 0,754. Demnach sind für die durchgeführten Versuche Endkriechzahlen von 0,7-0,8 (Erstbelastung nach 7d) bzw. 0,3-0,4 (Erstbelastung nach 28d) anzunehmen. Im Vergleich zu Untersuchungen an UHPC [86] ergeben sich bei reiner Druckbeanspruchung Kriechwerte von 0,5-0,6 nach 100 Tagen an 28d alten Prüfkörpern. Die Endkriechzahl wird mit ca. 1,1 angegeben.

5.5.8 Weitere durchgeführte Untersuchungen

5.5.8.1 Prüfaltervariation

Die Hauptversuche zur Ermittlung des Tragverhaltens (Kapitel 5.5.1 bis 5.5.4) wurden an 7 Tage alten Prüfkörpern durchgeführt. Zur Verifikation der Gleichwertigkeit der Messergebnisse mit 28 Tage alten Proben und zur Bestätigung der an kleinen Prüfkörpern durchgeführten zeitlichen Festigkeitsentwicklung (Kapitel 4.5.1.1) wurden verschieden alte Prüfkörper untersucht. Dabei wurden die Probekörper 24h in der Feuchtkammer, (bis zu) 6d im Wasserbad und anschließend bei 20°C und 60% RH gelagert. In Abbildung 5-41 basiert die Ermittlung der Spannung auf einer linear elastischen Berechnung (σ =M/W), die angegebene Dehnungsentwicklung zeigt die Zugdehnung der Ausgleichsgeraden der DMS-Messung (vgl. Kapitel 5.5.3). Dazu ist bei den Proben bei 2 und 7 Tagen anzumerken, dass es teilweise zum frühzeitigen Ausfall des DMS kam und dadurch die Fehlerindikatoren entsprechend groß sind.



Abbildung 5-41: zeitliche Entwicklung der linear elastischen Festigkeit und der maximalen Zugdehnung

Bei der Festigkeitsentwicklung zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bereits in Kapitel 4.5.1.1 beschrieben. Zunächst steigt sie auf ein lokales Maximum nach 5 Tagen an, fällt danach wieder etwas ab und zeigt anschließend eine betontypische Entwicklung. Die maximalen Zugdehnungen sind zunächst konstant, nehmen jedoch nach 14 Tagen deutlich zu.

5.5.8.2 Fasergehaltvariation

Bei der Forschung wurde das Augenmerk hauptsächlich auf einen Carbonfasergehalt von 2,0 Vol.-% gerichtet, da diese Mischung einerseits durch eine nicht zu flüssige Konsistenz und andererseits durch wenige Düsenverstopfer am besten verarbeiten ließ. Jedoch stellte sich die Frage, ob es durch die Vergrößerung der Düse (vgl. Kapitel 5.4.2.1) auch bei höheren Fasergehalten zur Steigerung der Biegezugfestigkeit kommt, wie es bei den Versuchen der Uni Augsburg der Fall ist. Es wurde im Folgenden ein Fasergehalt von 2,5 und von 3,0 Vol.-% Carbonfaser in den Beton eingemischt. Die Prüfkörper wurden nach 7 Tagen geprüft.

Fasergehalt	σ [MPa]	E₁ [GPa]	E₂ [GPa]	E _m [GPa]	max ε _m [‰]
2,0 Vol%	50,4 (±2,0)	32,7 (±12,0)	4,14 (±0,3)	8,27 (±1,9)	5,03
2,5 Vol%	62,3 (±6,2)	32,4 (±1,1)	5,12 (±0,9)	9,07 (±1,3)	6,37
3,0 Vol%	67,2 (±0,9)	34,7 (±2,3)	5,08 (±0,2)	8,96 (±0,3)	6,28

Tabelle 5-9: Festigkeits- und Steifigkeitsvergleich unterschiedlicher Fasergehalte

Es zeigt sich, dass die Festigkeit geringfügig gesteigert werden kann, jedoch bei weitem nicht in dem Maße, wie es mit kleineren Düsendurchmessern (vgl. Kapitel 4.2 und 5.2) festgestellt wurde. Es wird vermutet, dass die Carbonfasern aufgrund der sehr viel steiferen Frischbetonkonsistenz nicht in der Lage sind, durch die gleichmäßige Fließbewegung ausgerichtet zu werden, da die innere Reibung der Matrix zu hoch ist. Die Steifigkeiten und Bruchdehnungen werden durch höhere Fasergehalte nur sehr wenig bis gar nicht beeinflusst.

5.5.8.3 Wärmebehandlung

Bei Untersuchungen an UHPC wurde festgestellt, dass die Anwendung einer Wärmebehandlung eine festigkeitssteigernde Wirkung hat [87]. Die Prüfkörper werden zwei Tage lang einer Wärmebehandlung bei 90°C unterzogen, die Druckfestigkeit steigt von 147 auf 237 MPa. Eine längere Behandlungsdauer führt nur zu geringfügig höheren Werten.

Parallel zu den Untersuchungen der Nachbehandlungsmittel (vgl. Kapitel 5.4.3) wurde eine Serie Prüfkörper einen Tag lang in der Feuchtekammer, 2 Tage bei 90°C und anschließend 5 Tage bei Normklima gelagert. Diese Prüfkörper wurden mit den länger wärmebehandelten Carbonfasern hergestellt (vgl. Kapitel 5.4.2.1). Bei den unbehandelten Proben ergaben sich Biegezugfestigkeiten von 58,7 MPa (±5,6), vgl. Kapitel 5.4.1, bei den wärmebehandelten Probekörpern waren es 76,5 MPa (±4,1). Dies entspricht einer Steigerung von 30%. Nach [87] konnte eine ähnlich große Steigerung der Biegezugfestigkeit an UHPC festgestellt werden, allerdings unterscheidet sich diese Steigerung deutlich von der der Druckfestigkeitserhöhung des UHPCs (ca. 60%).

5.5.8.4 Größere Spannweite

Da wie in Kapitel 5.5.3 beschrieben die Spannweite zunächst von 100 auf 180 mm erhöht wurde, sollte untersucht werden, ob sich dieser Einfluss auf die Biegezugfestigkeit auswirkt. Dazu wurden Prismen mit einer Länge von 310 mm und einer Spannweite von 270 mm geprüft. Der Querschnitt wurde beibehalten.

Es hat sich gezeigt, dass sich die gleichen Biegezugfestigkeiten, Druckzonenhöhen und Momenten-Krümmungs-Beziehungen wie bei einer Spannweite von 180 mm ergeben. Somit hat die Prüfkörperlänge, wie zu erwarten war, keinen Einfluss auf das Tragverhalten des Carbonkurzfaserbetons.

5.5.8.5 Großer Balken

Als letzter Schritt des Upscalingprozesses wurde ein großer Balken mit einem Querschnitt von B x H = 96 x 86 mm² und einer Länge von 850 mm hergestellt. Dieser wurde im Vier-Punkt-Biegeversuch mit einer Spannweite von 750 mm und einer mittigen Anordnung der Lasteinleitungspunkte mit einem Abstand von 150 mm geprüft. Es wurde eine Dichte von 2,04 bestimmt, welche der von kleinformatigen Prüfkörpern entspricht. Der Prüfkörper hatte ein Alter von 19 Tagen zum Zeitpunkt der Prüfung.

Zur Erfassung der Dehnungen wurden an den Stellen der Lasteinleitung jeweils zwei DMS an der Prüfkörperunterseite und vier DMS seitlich über die Prüfkörperhöhe verteilt angebracht. Zur Bestimmung einer ungleichmäßigen Lasteinleitung bzw. einer unsymmetrischen Verformung wurden an die Lasteinleitungspunkte Wegaufnehmer appliziert. Zusätzlich wurde die andere Seitenfläche mit einem schwarz-weiß Sprühmuster versehen, um eine photogrammetrische Messung durchzuführen. Unglücklicherweise ist ein Großteil der Messtechnik während des Versuchs unbemerkt ausgefallen, sodass für die DMS und Wegaufnehmer nur Daten des ersten Drittels des Versuchs vorliegen. Aus zeitlichen Gründen ließ sich kein weiterer Prüfkörper herstellen und prüfen. Allerdings lassen sich aus der Messaufzeichnung der Prüfmaschine (Kraft und Weg) und der photogrammetrischen Auswertung gute Ergebnisse ableiten.

Es ergab sich eine rechnerische Biegezugspannung von 48,8 N/mm², dies entspricht bezogen auf einen Querschnitt von 40 x 40 mm² einem Maßstabsfaktor von 91%. Um eine genauere Aussage treffen und eine Formel zur Berechnung des Maßstabfaktors entwickeln zu können ist es jedoch erforderlich, mehrere Prüfkörper und vor allem solche mit noch größerem Querschnitt zu untersuchen.

Entsprechend der photogrammetrischen Auswertung in Abbildung 5-42 liegt an der Unterseite des Prüfkörpers in etwa eine Dehnung von 5,93‰ (extrapoliert) und an der Oberseite von etwa -1,23‰ (extrapoliert) an. Werden diese Dehnungen im dem in Kapitel 5.5.4 beschriebenen Bemessungsansatz eingegeben, zeigt sich, dass kein Kräftegleichgewicht besteht. Wird die Druckdehnung auf -2,68‰ erhöht, ist die Summe der Horizontalkräfte gleich Null und das einwirkende Moment ergibt sich zu 6,08 kNm. Das tatsächliche Moment beträgt 5,86 kNm. Unter der Annahme, dass die mittels Photogrammetrie berechneten Dehnungen fehlerbehaftet sind (vgl. die Dehnungen in Abbildung 5-26), kann mit diesem Berechnungsansatz ein Gleichgewicht gefunden werden, bei dem die tatsächlich wirkenden Zugdehnungen mit einfließen.



Abbildung 5-42: Photogrammetrische Auswertung des großen Balkens kurz vor Versagen

Bei Betrachtung der Bruchfläche in Abbildung 5-43 fällt genau wie bei den kleinen Prüfkörpern die äußerst zerklüftete Bruchfläche auf. Das Porenbild ist jedoch verhältnismäßig gut zu bewerten und zeigt eine gute Verarbeitung im Herstellprozess.



Abbildung 5-43: zerklüftete Bruchfläche des großen Balkens

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

6.1.1 Materialentwicklung (Uni Augsburg)

In den Untersuchungen zur Materialentwicklung konnte gezeigt werden, dass die hohen Festigkeiten der faserverstärkten Prüfkörper auch mit kürzeren Fasern erreicht werden können und somit besser verarbeitbare Mörtel gleicher Festigkeit herstellbar sind. Ein sowohl preisliches als auch in der Ökobilanz günstigeres System konnte ohne Festigkeitsverlust realisiert werden, indem teure neuwertige Fasern durch günstigere Recyclingprodukte ersetzt wurden. Es konnte deutlich aufgezeigt werden, dass sich die Ausrichtung der Fasern in einem engen Winkelbereich abspielen muss, bereits bei Abweichungen von ca. 10° ist ein deutlicher Festigkeitsverlust spürbar. Die Druckfestigkeit der Systeme scheint nicht direkt mit der Faserausrichtung zusammenzuhängen. Die Festigkeitsentwicklung der faserverstärkten Systeme verläuft schnell, der entscheidende Faktor scheint die Geschwindigkeit des Erstarrens und Verfestigens der Zementmatrix zu sein, eventuelle Nachhärtungseffekte scheinen keine große Rolle zu spielenDie bisher verwendeten Rezepturen sind auf den Einsatz von CEM I 52,5 R ausgelegt; es konnte allerdings gezeigt werden, dass mit relativ einfachen Anpassungen auch andere Zementarten einsetzbar sind, ohne die Leistungsfähigkeit des Systems groß zu verändern. Der Widerstand gegenüber Ermüdung wird durch die Faserbewehrung deutlich heraufgesetzt, bei gleichem Verhältnis von Oberspannung zu Bruchspannung steigt die Anzahl der Lastwechsel bis zum Bruch um ungefähr den Faktor 100 an.

Die Machbarkeit des Einbringens von Füllstoffen zur weiteren Preissenkung wurde aufgezeigt und lieferte vielversprechende Ergebnisse. Durch Einsatz feinkörniger Quarzmehle konnte eine Rezeptur gefunden werden, die gut spritzbare Mörtelsysteme bei vergleichsweise niederem w/z-Wert liefert. Diese Mörtelmischung zeigt bei niedrigeren Fasergehalten bessere Biegezugfestigkeiten als das Zementleimrezept, bei Fasergehalten über 2 Vol.-% sinkt die Festigkeit im Vergleich zur Zementleimrezeptur leicht ab. Das System ist problemlos durch einen Extrusionsprozess druckbar und hat damit hohes Potential für Anwendungen in der additiven Fertigung ("3D-Druck").

Die Biegezugfestigkeit des Mörtelsystems wurde bis zu einem Faservolumengehalt von 2% überprüft und entspricht den hohen Werten der bisher verwendeten Zementleimrezeptur. Durch eine spezifische Anpassung des w/z-Wertes an den Faservolumengehalt konnten Mischungen erstellt werden, die von Hand gut spritzbar waren und damit deutliches Potential zur automatischen Druckbarkeit haben.

6.1.2 Upscaling (TUM)

Erste manuelle Versuche zum Hochskalieren der an kleinformatigen Prüfkörpern entwickelten Technik zur Ausrichtung von Carbonkurzfasern in einer Zementleimmatrix haben gezeigt, dass auch an größeren Probekörpern ähnlich hohe Biegezugspannungen aufnehmbar sind. Nachdem ein 3D-Drucker für Carbonkurzfaserbeton entwickelt wurde, konnten mit ersten Ergebnissen an Normprismen etwas geringere Festigkeiten als bei den an der Universität Augsburg hergestellten Kleinstprobekörpern gemessen werden. Dabei wurden verschiedene Düsengeometrien und Pumpen zur Betonförderung im Hinblick auf Betonverarbeitbarkeit, Wirtschaftlichkeit und spezifische Eignung untersucht. Es wurde die Grundlage für die Verwendung einer Multidüse geschaffen.

Mit der dabei hauptsächlich verwendeten Mörtelmischung konnte gezeigt werden, dass aufgrund des hohen w/z-Wertes eine Nachbehandlung der hergestellten Probekörper keinen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit hat.

Es wurden ausführliche Untersuchungen zum Tragverhalten mit zentrisch belasteten Proben und unter einachsiger Biegung durchgeführt. Dabei zeigte sich im Zugbereich ein ausgesprochen duktiles Verhalten, welches dem von Stahl nahegeht. Im Druckbereich zeigte sich das für hochfesten Beton übliche linear elastische Verhalten. Diese Tragverhalten lassen sich auf den komplexeren Spannungszustand im Biegeversuch übertragen und es konnte ein schlüssiges Bemessungskonzept entwickelt werden. Grundsätzlich konnte eine sehr hohe Tragfähigkeit ohne den Einsatz von herkömmlicher Stahlbewehrung erzielt werden.

Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten zeigten das außerordentlich hohe Potential des Materials. Das gutmütige Verhalten der Carbonfasern als einzelnes überträgt sich sehr gut auf das Kompositmaterial, wodurch sich neue Möglichkeiten für den Einsatz, im Bereich von Kranbahnen, Brücken oder Windkraftanlagen ergeben.

Auch bei Langzeitbelastungen zeigte sich, dass es durch den Verzicht der für CFK optimierten Schlichte, welche ab Werk auf den Carbonfasern aufgebracht und während des Oxidationsprozesses thermisch entfernt wird, zu keinem Faserauszug kommt. Hier gab es bei bisherigen Untersuchungen zur Einbringung von Carbon in Beton häufig mangelhafte Ergebnisse.

Im Brandversuch konnte keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden, um ein Bauteilversagen schon bei "geringen" Temperaturen zu verhindern. Allerdings handelt es sich hierbei nur um eine geringe Anzahl an Versuchen und erste Ansätze, dem Versagen entgegenzuwirken. Genauere Untersuchungen sind zwingend erforderlich und können deutlich bessere Ergebnisse erzielen. Möglichkeiten bestehen dabei in Veränderung der Rezeptur um den w/z-Wert zu senken und so grundsätzlich den durch die Wärmezufuhr frei werdenden Wasserdampf zu minimieren. Eine Wärmebehandlung während des Aushärteprozesses (vgl. Kapitel 5.5.8.3) kann ebenfalls einen positiven Effekt haben, da überschüssiges Wasser chemisch nicht gebunden wird. Zusätzlich kann statt des Quarzzuschlags auch ein Basaltzuschlag verwendet werden, welcher zu höheren Festigkeiten nach dem Brand führt [72].

6.2 Ausblick

6.2.1 Materialentwicklung (Uni Augsburg)

Im Laufe des Projektes konnten einige interessante Zusammenhänge zwischen Rezeptparametern und Materialeigenschaften des erhärteten Produktes gefunden werden. Insbesondere interessant erscheint das Fakt, dass mit zunehmender Viskosität der faserverstärkten Paste die Verarbeitbarkeit im Spritzprozess (bis zu einem gewissen Punkt) zunimmt. Augenscheinlich wirkt eine höherviskose Masse der Agglomeration von Fasern während dem Prozess entgegen. Hier könnten rheologische Messungen an Zementleim mit mikroskopischen Untersuchungen zur Qualität der Faservereinzelung und Größe von auftretenden Faseragglomeraten in hoch- und niederviskosem Leim kombiniert werden.

Im Bereich der zyklischen Belastung und Ermüdung konnten erste sehr vielversprechende Daten gesammelt werden, die durch größere Probenanzahl statistisch abgesichert werden sollten. Im Allgemeinen sollte das Rissbildungs- und Risswachstumsverhalten des Materials so genau als möglich untersucht und mit mikrostrukturellen Parametern (vor allem Porosität und Faserausrichtung) korreliert werden, um ein auf Festigkeit optimiertes Material herstellen zu können.

Ebenfalls großes Potential haben die faserbewehrten Mörtel als Material, das spezifisch nur in zugbelasteten Zonen eines Bauteils eingesetzt wird. Insbesondere da die hohen Kosten der Carbonfaserbewehrung gegen einen großvolumigen Einsatz eines solchen Mörtels spricht, ist es wichtig, einen solchen Werkstoff gezielt und effizient einzusetzen. So könnte ein Kompositwerkteil erstellt werden, dass einen hohen Carbonfaseranteil an einer stark auf Zug belasteten Zone aufweist und an nicht oder nur auf Druck belasteten Stellen nur aus einem Standardmörtel besteht. Zur Herstellung solcher Bauteile könnten verschiedene Druckverfahren getestet werden. Im einfachsten Fall könnte durch Kartuschenwechsel während einer Druckpause schichtweise unterschiedliche Materialien "nass-auf-nass" appliziert werden (Sandwichbauweise). Für kompliziertere Strukturen könnten mehrere Drucker an einem Bauteil arbeiten oder ein Drucker mit mehreren Extrusionsdüsen herangezogen werden. Beide Herangehensweisen sind mit auf dem Markt erhältlichen 3D-Drucksystemen prinzipiell realisierbar. [89, 90]

6.2.2 Upscaling (TUM)

Mithilfe des entwickelten 3D-Druck-Systems können größere Prüfkörper hergestellt werden, um das Tragverhalten zu untersuchen. Dabei sind neben Untersuchungen mit geradliniger Düsenführung an Balken auch ingenieurmäßigen Faserausrichtungen ähn-

lich der Orientierung der Hauptspannungstrajektorien im Balken oder Untersuchungen an zweiachsig gespannte Platten denkbar.

Bisher wurden die Prismen mit einer geradlinigen Düsenführung erstellt. Im Hinblick auf die Bewehrungsführung im Stahlbeton kann es aber traglaststeigernd sein, jede zweite oder dritte Schicht als Querkraftbewehrung auszuführen. Dazu wird der Balken auf der Seite liegend gedruckt. Bei Betrachtung der Hauptspannungstrajektorien ergibt sich ein Verlauf mit deutlichen Ausrundungen an den Trägerenden. Dabei spielt vor allem das Verhältnis des Düsendurchmessers zur Prüfkörpergröße eine Rolle, um die Hauptspannungstrajektorien in einer entsprechenden Auflösung drucken zu können.



Abbildung 6-1: Mögliche Druckpfade für Balken: a) geradlinig, b) Querkraftbewehrung, c) Hauptspannungstrajektorien, d) FEM-Berechnung der Hauptspannungstrajektorien

Platten können wie im Stahlbetonbau üblich mit einer Netzbewehrung ausgeführt werden, jede zweite Schicht ist um 90° gedreht. Tatsächlich ist jedoch bei quadratischen Platten eine schräge, um 45° gedrehte Anordnung der Stränge deutlich effizienter und wirtschaftlicher, da die Hauptspannungen genau in dieser Richtung verlaufen (Abbildung 6-2). Bei rechteckigen Platten ergibt sich ein einachsig gespannter Bereich, in dem alle Stränge in einer Richtung verlaufen können. In den zweiachsig gespannten Randbereichen können die Schichten um 90° gedreht gedruckt werden. Sollen die tatsächlichen Hauptspannungstrajektorien für rechteckige Platten abgefahren werden, ergeben sich komplexe Kreisformen, die an den Querschnitt einer Zwiebel erinnern (Abbildung 6-3).



Abbildung 6-2: Mögliche Druckpfade für quadratische Platten: a) wie im Stahlbetonbau üblich, b) entsprechend der Hauptspannungstrajektorien



Abbildung 6-3: Mögliche Druckpfade für rechteckige Platten: a) geradlinig, b) komplexe Rundungen in Zwiebelform

Das im Zuge dieses Forschungsprojekts entwickelte Bemessungsmodell bezieht sich lediglich auf einachsige Biegung. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Übertragbarkeit dieses Modells auf zweiachsige Biegung und gleichzeitige Normalkraftbeanspruchung zu bestätigen. Außerdem wurde hier bewusst das Problem des Querkraftversagens aufgrund der bekannten Komplexität des Querkrafttragverhaltens im Stahlbetonbau und dem hier äußerst anisotropen vorliegenden Werkstoffs durch die Vergrößerung der Spannweite umgangen. Des Weiteren ist die Anwendbarkeit des Bemessungsmodells bei profilierten Querschnitten (vgl. Abbildung 3-2) zu untersuchen und der traglaststeigernde Einfluss muss evaluiert werden. Bei solchen Querschnitten kommen weitere zu berücksichtigende Einflüsse wie zum Beispiel Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten und Schubkraftübertragung in Fugen hinzu. Ebenso muss das Modell für weitere Fasergehalte erweitert werden und das Torsionstragverhalten sowie das Durchstanzverhalten bei Platten untersucht werden.

Durch die bei Carbonkurzfaserbeton sehr kleinen Rissweiten (< 0,1 mm) eignet sich das Material hervorragend für den Einsatz im Bereich von WU-Bauteilen. Die selbstheilende Wirkung des Betons kann auf lange Sicht gesehen die Risse wieder verschließen, wodurch das Bauteil dauerhaft vor drückendem Wasser schützen kann. Solches selbstheilendes Verhalten unter Feuchteeinwirkung wurde bereits in anderen faserverstärkten Betonen nachgewiesen [91, 92]. Daher ist auch ein Einsatz im Bereich von Silos äußerst effektiv und wird durch das inerte Verhalten der Carbonfasern untermauert. Da sich die Herstellung von Bauteilen aus Carbonkurzfaserbeton nur im Fertigteilwerk eignet, muss eine entsprechende Fügetechnik entwickelt werden, um die einzelnen Elemente kraftschlüssig und wasserundurchlässig verbinden zu können.

Die Modulbauweise ermöglicht es, großformatige Strukturen durch Fügen einzelner Elemente herzustellen. Vorteil dieser Technik ist es, dass der erforderliche Verfahrbereich des 3D-Druckers klein gehalten werden kann und außerdem die Option einer Autoklavierung der Probekörper (vgl. Kapitel 5.5.8.3) zu höheren Festigkeiten führt.

Gerade für die Anwendung im Hochbau ist es unerlässlich, ein geeignetes Brandschutzsystem zu entwickeln. Die in diesem Forschungsprojekt dargestellten Ergebnisse zum Brandtragverhalten haben gezeigt, dass es selbst bei verhältnismäßig geringen Temperaturen zum Versagen durch explosionsartige Abplatzungen kommt. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um dem Abplatzverhalten entgegenzuwirken. Es muss ein geeignetes Schutzsystem entwickelt werden, um die Temperaturbelastung vom Bauteil fern zu halten, oder auch materialtechnische Parameter verändert werden, um den frei werdenden Wasserdampf zu minimieren. In einem aktuellen Forschungsprojekt zum Brandverhalten von UHPC (Zukunft Bau, SWD-10.08.18.7-16.47) wird am Lehrstuhl für Massivbau an der TUM ein Versuchsstand entwickelt, der es erlaubt, die Brandlast auf einen belasteten Probekörper aufzubringen. Bei Carbonkurzfaserbeton wäre dann insbesondere das Tragverhalten im einaxialen Zugversuch mit Brandlast interessant.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: S	pannungs-Dehnungs-Linie (aus Biegezugversuch) für Proben mit unterschiedlicher Carbonfasermenge und –orientierung [1]2
Abbildung 2-1: N	Vergleich der Kraft-Verformungskurven von Normalbeton, Beton mit nur geringfügig wirksamer Faserbewehrung ("strain bzw. deflection softening") und faserverstärktem Hochleistungsbeton ("strain bzw. deflection hardening") im (Biege-)Zugversuch
Abbildung 2-2:	Skizze der Düsentechnik; Innenbild: Ausgerichtete CF an einer Bruchkante im Elektronenmikroskop (nach [1])7
Abbildung 2-3	: Statistische Analyse der Faserorientierung (mittels Dünnschliffaufnahmen und dem ImageJ Directionality Plugin) von Proben mit homogen dispergierten CF und 1 bzw. 3 Vol% ausgerichteten CF (nach Lit. [1])
Abbildung 2-4: (a	a) 3D-Druck von Prüfkörpern; (b) Skizze der Ausrichtung von CF beim 3D-Druck; (c) mikroskopische Aufnahmen von Proben mit gerichteten CF (nach [52])
Abbildung 3-1:	Mögliche Einsatzgebiete für Carbonkurzfaserbeton: a) Fertigteilbalken zum Auflegen von Betonplatten oder Trapezprofilen, b) Fertigteilplatte, c) Wandartige Träger, d) Silosegmente
Abbildung 3-2:	Mögliche Unterzugformen mit verstärktem Zugbereich für Teilfertigteile11
Abbildung 3-3: F	iligranplatten aus Carbonkurzfaserbeton mit Ortbetonergänzung11
Abbildung 4-1: (a	a) TGA-Kurve von CF in Inertgas- und Sauerstoffatmosphäre; (b) CF im Muffelofen zur thermischen Behandlung13
Abbildung 4-2: S	ieblinien der verwendeten Füllstoffe [55] [56] [57] [58]14
Abbildung 4-3: /	Anfertigung der Prüflinge für den 3-Punkt-Biegezugversuch: (a) Spritze gefüllt mit Zementmischung, (b) Einbringen der Zementmischung in parallelen Raupen in die Teflonformen (60 × 13 × 3 mm) und (c) Prüfkörper nach 28 d für die mechanische Prüfung
Abbildung 4-4:	 (a) Skizze des Versuchsaufbaus und (b) Fotografie der mechanischen Pr
Abbildung 4-5: (a	a) Skizze des einaxialen Druckversuchs und (b) Fotografie eines Druckversuchs mit einem 15 × 15 × 15 mm Prüfling18
Abbildung 4-6: (a	a) CF vor dem Einrühren, (b) CF nach dem Rühren per Hand, (c) CF nach dem Rühren im Eirich EL1 und (d) CF nach dem Rühren im Bredent Ecovac20
Abbildung 4-7:	Spannungs-Verformungs-Kurven für eine faserfreie Probe, eine Probe mit 3 Vol% CF-1 (7 μ m Durchmesser, 3 mm Länge) und CF-3 (18 μ m Durchmesser, 6 mm Länge)
Abbildung 4-8:	Prinzipielles Vorgehen zur Herstellung von Probekörpern mit spezifischem Faserlastwinkel. a) Anhand einer Vorlage mit spezifisch gewinkelten Linien wird eine Platte angefertigt. Nach dem Erhärten wird die Platte in Kleinprüfkörper gesägt und nach 28 Tagen Lagerungszeit geprüft. b) Schematische Darstellung der Faserausrichtung im 3-Punkt-Biegeversuch. Als Ausrichtung

	von 0° werden Proben bezeichnet, deren Fasern exakt in Richtung der auftretenden Zugspannungen liegen
Abbildung 4-9: 2	28d-Biegezugfestigkeit bei 1 Vol% und 3 Vol.% ausgerichteten Carbonfasern in Abhängigkeit der Faserausrichtung. 0° entsprechen einer Faserausrichtung längs zur Biegebelastung. Die schwarze Linie entspricht der Festigkeit eines faserfreien
	Prüfkörpers (12,6 MPa)27
Abbildung 4-10:	Spannungs-Dehnungs-Diagramme für Proben mit 1 Vol% (links) und 3 Vol% (rechts) Faservolumengehalt bei unterschiedlicher Faserausrichtung
Abbildung 4-11:	Schematische Darstellung der Faserausrichtung im Druckversuch.
5	Als 0° werden solche Proben bezeichnet, deren Fasern in Richtung des aufgebrachten Druckes liegen
Abbildung 4-12:	28 d Druckfestigkeit der Probekörper in Abhängigkeit des Faserwinkels. Die schwarze Linie entspricht dem Festigkeitswert eines unverstärkten Prüfkörpers (92,88 MPa)
Abbildung 4-13:	Entwicklung der Biegezugfestigkeit und des E-Moduls einer mit CEM I 52,5 R (Schwenk) rezeptierten Zementleimmischung
Abbildung 4-14:	Entwicklung der Druckfestigkeit von unbewehrten und mit 1 Vol % C-Fasern bewehrten Probekörpern aus einer mit CEM I 52,5 R (Schwenk) rezeptierten Zementleimmischung
Abbildung 4-15:	Entwicklung der Biegezugfestigkeit vom mit CEM I 32,5 R (blau, links) und CEM 42,5 R (rot, rechts) hergestellten Zementsteinprobekörpern mit 1 Vol% ausgerichteten C-Fasern33
Abbildung 4-16	: Typisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter 3-Punkt Biegebelsatung einzelner Probekörper bei unterschiedlichem Probenalter. Links: Probekörper aus CEM I 32,5 R (Märker) mit 1 Vol% ausgerichteten CF. Rechts: Probekörper aus CEM I 42,5 R (Märker) mit 1 Vol% ausgerichteten CF
Abbildung 4-17:	Verformung von Probekörpern ohne Fasern und mit 1 Vol% ausgerichteten C-Fasern während zyklischer 3-Punkt-Biegung bei unterschiedlichen Lastniveaus [60]
Abbildung 4-18:	Verformung von unverstärkten Probekörpern während zyklischer 3-Punkt-Biegung bei unterschiedlichen Lastniveaus [60]
Abbildung 4-19	9: Messpunkte der zyklischen Biegeversuche in einer Wöhlerauftragung [60]36
Abbildung 4-20: 2	28 d Biegezugfestigkeit der in Tabelle 4-14 gelisteten Rezepturen40
Abbildung 4-21:	Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Mörtelproben im 3-Punkt- Biegeversuch
Abbildung 5-1:	Herstellung der Verifizierungsprobekörper mit herkömmlichen Leerkartuschen
Abbildung 5-2:	Glätten der mit Teflonfolie abgedeckten Oberfläche durch Walzen mit einer Leerkartusche43
Abbildung 5-3:	Ausgehärtete Verifizierungsplatte mit geglätteter Oberfläche (400x100x7 mm)
Abbildung 5-4:	Einstufung der Biegezugfestigkeit (28 Tage) der Kleinstproben in die Ergebnisse der Uni Augsburg [1]44
Abbildung 5-5:	Probekörper für den 3-Punkt-Biegezugversuch mit den Abmessungen 60x13x7mm44
Abbildung 5-6:	Aus der Verifizierungsplatte herausgesägte Zugprobe mit eingeschliffener Verjüngung

Abbildung 5	5-7:	links: vorhandene Carbonfaserausrichtung mit gekürzten Fasern im Bereich der Verjüngung; rechts: optimierte Faserausrichtung durch entsprechende Düsenführung	.46
Abbildung 5	5-8:	Einstufung der Biegezugfestigkeit (28 Tage) der Normprismen in die Ergebnisse der Uni Augsburg [1]	.47
Abbildung 5	5-9:	Normprisma im 3-Punkt-Biegezugversuch mit 100 mm Spannweite	.47
Abbildung 5	5-10:	Linearführungsschiene mit Schlitten [http://www.hepcomotion.com]	.48
Abbildung 5	5-11:	Linearführungssystem zur dreidimensionalen Steuerung [http://www.vansichen.be]	.48
Abbildung 5	5-12:	Industrieroboter [http://www.kuka.de]	.48
Abbildung 5	5-13: 3	BD-Drucker aus Linearführungen mit Druckluft-Kolbenpumpe	.49
Abbildung 5	5-14: 3	BD-gedruckte Normprismen (40x40x160mm)	.51
Abbildung	5-15:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der ersten 3D-gedruckten Probekörper	.52
Abbildung &	5-16: \$	Stahlfaserverteilung bei unterschiedlicher Probekörperherstellung (aus [63])	.54
Abbildung	5-17:	Drunter- und Draufsicht der getesteten Multidüse mit drei Extrusionsöffnungen	.55
Abbildung	5-18	: Festigkeiten von nachbehandelten Probekörpern und Referenzprobekörpern	. 56
Abbildung	5-19:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Druckversuche und geprüfter Zylinder mit paralleler Faserausrichtung	. 58
Abbildung 5	5-20:	Zugknochengeometrie und Prüfkörper nach dem Ausschalen	. 59
Abbildung 5	5-21:	Spannungs-Dehnungs-Linie im einaxialen Zugversuch und photogrammetrische Aufnahme mit Darstellung der Dehnungen	.60
Abbildung &	5-22: เ	Jnterschiedliche Versagensformen am Normprisma: a) Biegeriss, b) Schubriss	.61
Abbildung &	5-23:	Dehnungsmessung und Ausgleichsgerade bei unterschiedlichen Laststufen	.62
Abbildung	5-24:	<i>oben:</i> Photogrammetrische Auswertung (horizontale Dehnung) eines 3-Punkt-Biegezugversuches kurz vor dem Versagen. <i>unten:</i> Hauptdehnungen und deren Richtung	.63
Abbildung	5-25:	Dehnungsverlauf errechnet aus der photogrammetrischen Auswertung	.63
Abbildung 5	5-26: N	Aomenten-Krümmungs-Diagramm	.64
Abbildung 5	5-27: E	Betonverhalten während des Brandfalls [66]	.65
Abbildung 5	5-28: F	Prüfprogramm und Temperaturverlauf der Brandversuche	.66
Abbildung 5	5-29: เ	Inbehandelter Prüfkörper vor und nach dem Brandversuch	.67
Abbildung	5-30:	horizontal verlaufender Mikroriss infolge 200°C konstanter Temperatureinwirkung	.67
Abbildung	5-31:	3-Phasenbeschreibung des Schädigungsverlaufs für normal-, hoch- und ultrahochfesten Beton (aus [69])	.68
Abbildung	5-32	2: Verformungs- und Dehnungsverhalten während des Ermüdungsversuchs E3.1	.69
Abbildung 5	5-33: F	Prüfprogramm und Prüfgerät für die Zeitstandversuche	.70
Abbildung	5-34:	Ergebnisse der Verformungsmessung im Zeitstandversuch in	
-		linearer und logarithmischen Darstellung	.72

Abbildung 5-35: Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung	.76
Abbildung 5-36: Photogrammetrische Auswertung des großen Balkens kurz vor Versagen	.79
Abbildung 5-37: zerklüftete Bruchfläche des großen Balkens	.79
Abbildung 6-1: Mögliche Druckpfade für Balken: a) geradlinig, b) Querkraftbewehrung, c) Hauptspannungstrajektorien, d) FEM- Berechnung der Hauptspannungstrajektorien	. 83
Abbildung 6-2: Mögliche Druckpfade für quadratische Platten: a) wie im Stahlbetonbau üblich, b) entsprechend der Hauptspannungstrajektorien	. 83
Abbildung 6-3: Mögliche Druckpfade für rechteckige Platten: a) geradlinig, b) komplexe Rundungen in Zwiebelform	. 84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Vergleich der Festigkeit von Baustoffen und Hochleistungsfasern	2
Tabelle 3-1: Vergleich der Materialkosten	.12
Tabelle 3-2: Vergleich der Personal- und Maschinenkosten	.12
Tabelle 3-3: Primärenergiebedarf und Erwärmungspotential der im Projekt verwendeten Materialien	. 13
Tabelle 3-4: Kalkulation des Primärenergiebedarfs (in MJ) der in Tabelle 3-1 dargestellten Rezepturen	. 14
Tabelle 3-5: Kalkulation des Erwärmungspotentials (in kg CO2-Äquivalent) der inTabelle 3-1 dargestellten Rezepturen	.14
Tabelle 4-1: Eigenschaften der Carbonschnittfasern	.18
Tabelle 4-2: Eigenschaften der verwendeten Hochleistungsfasern	19
Tabelle 4-3: Zusammensetzung der verwendeten Faserzementmischung	20
Tabelle 4-4: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, deren Armierungsfasern mit unterschiedlichen Mischgeräten eindispergiert wurden	.24
Tabelle 4-5: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, verstärkt mit C- Fasern von unterschiedlichem Durchmesser	.26
Tabelle 4-6: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, verstärkt mit C- Fasern unterschiedlicher Schnittlänge	.28
Tabelle 4-7: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, verstärkt mit neuwertigen und rezyklierten C-Schnittfasern Schnittfasern Schnitfasern Schnittfasern	.29
Tabelle 4-8: 28 d-Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, verstärkt mit Armierungsfasern aus unterschiedlichen Materialien	.30
Tabelle 4-9: Rezepturen und Biegezugfestigkeiten von Zementsteinproben, hergestellt aus unterschiedlichen Zementarten	.37
Tabelle 4-10: 28 d Biegezugfestigkeit und Lastgrenzen des zyklischen Versuchs für verstärkte und unverstärkte Proben mit einem Querschnitt von 3 mm × 3 mm	.40
Tabelle 4-11: Mischungsverhältnisse der Mörtelproben mit 1 Vol% gerichteten CF	42
Tabelle 4-12: Mörtelrezepturen mit unterschiedlichen Füllstoffkombinationen, angepasst auf einen Faservolumengehalt von 2% [70]	.43
Tabelle 4-13: Daten und Anmerkungen zu den Mörtelmischungen aus Tabelle 4-12 [70]	.43
Tabelle 4-14: Mörtelrezepturen mit angepasstem w/z, optimiert für verschiedene Faservolumengehalte von CF-1 [70]	.44
Tabelle 5-1: mögliche Fahrmechanismen zur Positionierung des Druckkopfes	52
Tabelle 5-2: Pumpenbewertung (+: gut; o: mittelmäßig; -: schlecht)	54
Tabelle 5-3: mittlere Biegezugfestigkeit bei verschiedenen Düsendurchmessern und CF-Längen	.57
Tabelle 5-4: Druckfestigkeiten und E-Moduln von unbewehrtem Beton und Carbonkurzfaserbeton (CSRFC)	.62
Tabelle 5-5: Arbeitslinie mit Plateau	.69
Tabelle 5-6: modifizierte Arbeitslinie (Diagramm zeigt nur den Zugbereich) und das daraus resultierende bezogene Momenten-Dehnungs-Diagramm	.70

Tabelle 5-7: Übersicht der durchgeführten Ermüdungsversuche (aus [78])	76
Tabelle 5-8: Kriecheinfluss auf Biegezugprismen nach 121 bzw. 100 Tagen	82
Tabelle 5-9: Festigkeits- und Steifigkeitsvergleich unterschiedlicher Fasergehalte	83

Quellenverzeichnis

[1] M. Hambach, H. Möller, T. Neumann, D. Volkmer, Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (> 100 MPa), Cement Concrete Res, 89 (2016) 80-86.

[2] H.-G. Ni, J.-Z. Wang, Prediction of compressive strength of concrete by neural network, Cement Concrete Res, 30 (2000) 1245-1250.

[3] J.D. Birchall, A.J. Howard, K. Kendall, Flexural Strength and Porosity of Cements, Nature, 289 (1981) 388-390.

[4] D.D. Higgins, J.E. Bailey, Fracture Measurements on Cement Paste, J Mater Sci, 11 (1976) 1995-2003.

[5] R.N. Swamy, Fibre reinforcement of cement and concrete, Mater Struct, 8 (1975) 235-254.

[6] M. Schmidt, Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton, 1. Aufl. ed., Beuth, Berlin, 2008.

[7] G. Franz, Konstruktionslehre Des Stahlbetons - Grundlagen Und Bauelemente, Springer, Heidelberg, 1980.

[8] B. Wietek, Faserbeton im Bauwesen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.

[9] P. Morgan, Carbon fibers and their composites, Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.

[10] M.M. Reda, N.G. Shrive, J.E. Gillott, Microstructural investigation of innovative UHPC, Cement Concrete Res, 29 (1999) 323-329.

[11] R.F. Zollo, Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, Cement Concrete Comp, 19 (1997) 107-122.

[12] A.M. Brandt, Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, Compos Struct, 86 (2008) 3-9.

[13] H. Stang, V.C. Li, H. Krenchel, Design and Structural Applications of Stress-Crack Width Relations in Fiber-Reinforced Concrete, Mater Struct, 28 (1995) 210-219.

[14] K. Wille, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, Cement Concrete Comp, 48 (2014) 53-66.

[15] K. Wille, A.E. Naaman, S. El-Tawil, G.J. Parra-Montesinos, Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, Mater Struct, 45 (2012) 309-324.

[16] A.P. Fantilli, H. Mihashi, P. Vallini, Multiple cracking and strain hardening in fiberreinforced concrete under uniaxial tension, Cement Concrete Res, 39 (2009) 1217-1229.

[17] A.E. Naaman, Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites, in: A.E. Naaman, H.W. Reinhardt (Eds.) High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), RILEM Publications SARL, 2003, pp. 95-113.

[18] B. Mobasher, H. Stang, S.P. Shah, Microcracking in Fiber Reinforced-Concrete, Cement Concrete Res, 20 (1990) 665-676.

[19] S.P. Shah, S.E. Swartz, C. Ouyang, Fracture mechanics of concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials, Wiley, New York, 1995.

[20] P. Jun, V. Mechtcherine, Behaviour of Strain-hardening Cement-based Composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading Part 1-Experimental investigations, Cement Concrete Comp, 32 (2010) 801-809.

[21] V. Mechtcherine, O. Millon, M. Butler, K. Thoma, Mechanical behaviour of strain hardening cement-based composites under impact loading, Cement Concrete Comp, 33 (2011) 1-11.

[22] C. Shi, Y.L. Mo, High-performance construction materials science and applications, World Scientific, Singapore, 2008.

[23] D.D.L. Chung, Carbon Fiber Composites, Butterworth-Heinemann, Newton, 1994.

[24] N. Banthia, J. Sheng, Micro-reinforced cementitious materials, Materials Research Society Symposium Proceedings, 211 (1991) 25-32.

[25] A. Briggs, Carbon Fiber-Reinforced Cement, J Mater Sci, 12 (1977) 384-404.

[26] T.J. Kim, C.K. Park, Flexural and tensile strength developments of various shape carbon fiber-reinforced lightweight cementitious composites, Cement Concrete Res, 28 (1998) 955-960.

[27] S.B. Park, Experimental-Study on the Engineering Properties of Carbon-Fiber Reinforced Cement Composites, Cement Concrete Res, 21 (1991) 589-600.

[28] H.A. Toutanji, T. Elkorchi, R.N. Katz, G.L. Leatherman, Behavior of Carbon-Fiber Reinforced Cement Composites in Direct Tension, Cement Concrete Res, 23 (1993) 618-626.

[29] Q.J. Zheng, D.D.L. Chung, Carbon-Fiber Reinforced Cement Composites Improved by Using Chemical-Agents, Cement Concrete Res, 19 (1989) 25-41.

[30] C.X. Qian, P. Stroeven, Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete, Cement Concrete Res, 30 (2000) 63-69.

[31] Y.X. Shao, S.P. Shah, Mechanical properties of PVA fiber reinforced cement composites fabricated by extrusion processing, Aci Mater J, 94 (1997) 555-564.

[32] X.Q. Qian, X.M. Zhou, B. Mu, Z.J. Li, Fiber alignment and property direction dependency of FRC extrudate, Cement Concrete Res, 33 (2003) 1575-1581.

[33] H. Takashima, K. Miyagai, T. Hashida, V.C. Li, A design approach for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fiber reinforced cementitious composites by extrusion molding, Eng Fract Mech, 70 (2003) 853-870.

[34] K.G. Kuder, S.P. Shah, Processing of high-performance fiber-reinforced cementbased composites, Constr Build Mater, 24 (2010) 181-186.

[35] B. Mu, M.F. Cyr, S.P. Shah, Extruded fiber-reinforced composites, Advan. Build. Techno., 1 (2002) 239-246.

[36] B. Shen, M. Hubler, G.H. Paulino, L.J. Struble, Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: Processing, microstructure, and properties, Cement Concrete Comp, 30 (2008) 663-673.

[37] H. Lipson, M. Kurman, Fabricated The New World of 3D Printing, Wiley, Hoboken, 2013.

[38] J. Malda, J. Visser, F.P. Melchels, T. Jungst, W.E. Hennink, W.J.A. Dhert, J. Groll, D.W. Hutmacher, 25th Anniversary Article: Engineering Hydrogels for Biofabrication, Adv Mater, 25 (2013) 5011-5028.

[39] S.V. Murphy, A. Atala, 3D bioprinting of tissues and organs, Nat Biotechnol, 32 (2014) 773-785.

[40] R. Bogue, 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?, Assembly Autom, 33 (2013) 307-311.

[41] T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, R.A. Buswell, A.G.F. Gibb, T. Thorpe, Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, Mater Struct, 45 (2012) 1221-1232.

[42] T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, R.A. Buswell, R. Law, A.G.F. Gibb, T. Thorpe, Hardened properties of high-performance printing concrete, Cement Concrete Res, 42 (2012) 558-566.

[43] G. Villar, A.D. Graham, H. Bayley, A Tissue-Like Printed Material, Science, 340 (2013) 48-52.

[44] C.B. Highley, C.B. Rodell, J.A. Burdick, Direct 3D Printing of Shear-Thinning Hydrogels into Self-Healing Hydrogels, Adv Mater, 27 (2015) 5075-5079.

[45] R. Kruger, J. Groll, Fiber reinforced calcium phosphate cements - On the way to degradable load bearing bone substitutes?, Biomaterials, 33 (2012) 5887-5900.

[46] S. Bose, S. Vahabzadeh, A. Bandyopadhyay, Bone tissue engineering using 3D printing, Mater Today, 16 (2013) 496-504.

[47] U. Gbureck, T. Hozel, U. Klammert, K. Wurzler, F.A. Muller, J.E. Barralet, Resorbable dicalcium phosphate bone substitutes prepared by 3D powder printing, Adv Funct Mater, 17 (2007) 3940-3945.

[48] J.A. Inzana, D. Olvera, S.M. Fuller, J.P. Kelly, O.A. Graeve, E.M. Schwarz, S.L. Kates, H.A. Awad, 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration, Biomaterials, 35 (2014) 4026-4034.

[49] S. Christ, M. Schnabel, E. Vorndran, J. Groll, U. Gbureck, Fiber reinforcement during 3D printing, Mater Lett, 139 (2015) 165-168.

[50] B.G. Compton, J.A. Lewis, 3D-Printing of Lightweight Cellular Composites, Adv Mater, 26 (2014) 5930-5935.

[51] J.T. Muth, D.M. Vogt, R.L. Truby, Y. Menguc, D.B. Kolesky, R.J. Wood, J.A. Lewis, Embedded 3D Printing of Strain Sensors within Highly Stretchable Elastomers, Adv Mater, 26 (2014) 6307-6312.

[52] M. Hambach, D. Volkmer, Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste, Cement Concrete Comp, 79 (2017) 62-70.

[53] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Onlinedatenbank Ökobaudat, Prozess-Datensatz: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30 (de), URL:< https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=71667cf 3-ede8-42d2-b0ff-6f1071ad3b86&stock=OBD_2019_III&lang=de>, veröffentlicht 2018, abgerufen am 16.07.2019

[54] M. Link, M. Weiland, T. Hahn, Structural Health Monitoring of the Gaertnerplatz Bridge over the Fulda River in Kassel, Proceedings of the 2nd International UHPC Symposium, Kassel University Press, 2008

[55] S. J. Kwon, X. Y. Wang, Optimization and Mixture Design of Low-CO₂ High-Strength Concrete Containing Silica Fume, Advances in Civil Engineering, Article ID 7168703, 2019, https://doi.org/10.1155/2019/7168703

[56] T. Ketelaer, S. Vögele, Situation der Stahlindustrie vor dem Hintergrund der Anwendung von Effizienzmaßnahmen, STE Research Report, Institut für
Klimaforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE), Forschungszentrum Jülich, 2014

[57] M. C. Johnson, J. L. Sulivan, Lightweight Materials for Automotive Application – An Assessment of Material Production Data for Magnesium and Carbon Fiber, U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory, 2014

[58] T. Suzuki, J. Takahashi, Prediction of Energy Intensity of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Mass-Produced Passenger Cars, 9th International SAMPE symposium, 2005

[59] J. Takahashi, Life Cycle Assessment of Ultra Lightweight Vehiles using CFRP, 5th International Conference on EcoBalance, 2002

[60] k. Van Acker, I. Verpoest, J. Duflou, W. Dewulf, Lightweight Materials for the automotive: Environmental Impact Analysis of the use of Composites, 3rd Seminar on Society and Materials SAM3, 2009

[61] ELG Carbon Fiber Ltd., Konferenzbeitrag: LCA benefits of rCF, Composite recycling & LCA, Stuttgart, 09.03.2017, URL: http://www.elgcf.com/assets/documents/ELGCF-Presentation-Composite-Recycling-LCA-March2017.pdf, abgerufen am 16.07.20190

[62] F. Meng, E. A. Olivetti, Y. Zhao, J. C. Chang, S. J. Pickering, J. McKechnie, Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential of Carbon Fiber Composite Recycling Technologies and Waste Management Options, ACS Sustainable Chem. Eng. 6 (2018), 9854-9865

[63] FAQ des C³ e.V., C³ – Carbon Concrete Composite e. V., URL: https://www.bauen-neu-denken.de/faq/>, abgerufen am 16.07.2019

[64] U. Arnold, T. Brück, A. De Palmenaer, K. Kuse, Carbon Capture and Sustainable Utilization by Algal Polyacrylonitrile Fiber Production: Process Design, Techno-Economic Analysis, and Climate Related Aspects, Industrial & Engineering Chemistry Research 57 (2018), 7922-7933, DOI: 10.1021/acs.iecr.7b04828

[65] U. Arnold, A. De Palmenaer, T. Brück, K. Kuse, Energy-Efficient Carbon Fiber Production with Concentrated Solar Power: Process Design and Techno-economic Analysis, Industrial & Engineering Chemistry Research 57 (2018), 7934-7945, DOI: 10.1021/acs.iecr.7b04841

[66] ELG Carbon Fibre Ltd., Vortrag: The Role of Recycled Carbon Fibres in Cost Effective Lightweight Structures, SPE Automotive Composites Conference & Exhibition, URL: http://www.elgcf.com/assets/documents/SPE-ACCE-2016.pdf, veröffentlicht: November 2016, abgerufen am: 14.05.2019

[67] Frazer Barnes, ELG Carbon Fibre Ltd., Vortrag: Recycled Carbon: Adressing the Issues of High Volume Supply, The Composites and Advanced Materials Expo, URL: http://www.elgcf.com/assets/documents/CAMX2016-PPT-ELG.PDF, veröffentlicht: September 2016, abgerufen am: 14.05.2019

[68] J. P. Lewicki, J. N. Rodriguez, C. Zhu, M. A. Worsley, A. S. Wu, Y. Kanarska, J. D. Horn, E. B. Duoss, J. M. Ortega, W. Elmer, R. Hensleigh, R. A. Fellini, M. J. King; 3D-Printing of Meso-structurally Ordered Carbon Fiber/Polymer Composites with Unprecedented Orthotropic Physical Properties; Sci. Rep. 7, 43401; 2017.

[69] E. Croner, Bachelorarbeit: Einfluss ausgerichteter Carbonkurzfasern auf zyklische Belastbarkeit und Rissbildungsverhalten einer ultrahochfesten Zementleimpaste; Universität Augsburg, Lehrstuhl für Festkörperchemie; 2018

[70] F. Lippert, Bachelorarbeit: Rezeptoptimierung und Erstellung eines Mischregimes an einem 3D-druckbaren Mörtel; Universität Augsburg; Lehrstuhl für Festkörperchemie, 2017 [71] O. Fischer, T. Lechner, M. Mensinger, J. Ndogmo, G. Seidl, M. Stambuk, Entwicklung dünnwandiger, flächenhafter Konstruktionselemente aus UHPC und geeigneter Verbindungstechniken zum Einsatz im Hoch- und Industriebau; Forschungsbericht der Forschungsinitiative "Zukunft Bau" des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Fraunhofer IRB Verlag, 2014.

[72] O. Graf, W. Albrecht, H. Schäffler, Die Eigenschaften des Betons, Springer Verlag, 1960.

[73] S. Winter, K. Henke, D. Talke, Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton, Abschlussbericht des Forschungsvorhabens F20-13-1-143 - 10.08.18.7-14.10 der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, ISBN 978-3-8167-9821-7, 2016

[74] M. Näther, V. N. Nerella, M. Krause, G. Kunze, V. Mechtcherine, R. Schach, Beton-3D-Druck – Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Fromung von Frischbeton, Abschlussbericht des Forschungsvorhabens SWD-10.08.18.7-14.07 der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, ISBN 978-3-7388-0028-9, 2017

[75] M. Schneider, Untersuchung von Pumpverfahren für faserverstärkten Zementleim und Mörtel und deren Einfluss auf die Fasern, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2018

[76] T. Oesch; Dissertationsschrift: Investigation of fiber and cracking behavior for conventional and ultra-high performance concretes using x-ray computed tomography; University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015

[77] Y. Kanarska, E. B. Duoss, J. P. Lewicki, J. N. Rodriguez, A. Wu, Fiber motion in highly confined flows of carbon fiber and non-Newtonian polymer, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 265 (2019) 41-52

[78] P. Lauff, Beitrag zum Trag- und Ermüdungsverhalten von Carbonkurzfaserbeton (CSFRC), Dissertation, Technische Universität München, in Bearbeitung

[79] M. Fleischhauer; O. Fischer, Materialverhalten von hochfestem (HPC) und ultrahochfestem (UHPC) Beton unter hohen Temperatureinwirkungen (Lastfall Brand). Beiträge zur 6. DAfStb-Jahrestagung mit 59. Forschungkolloquium, München, 2018

[80] James Hardie Europe GmbH: Brandschutz im Tunnelbau. Brandschutz Kompakt, Aestuver, 2018

[81] I. Hager, Behaviour of cement concrete at high temperature, Bulletin of the Polish Academy of Science Technical Science, 61 (1), 2013

[82] B. Zwingmann, Y. Liu, M. Schlaich, Zum Potential von Carbon – Anwendungen im Bauwesen. Deutsche Bauzeitschrift, pp. 58-62, 2014

[83] B. Fitik, Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC)(bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich. Dissertation, TU München, 2012

[84] R. Sell, C. Zelger, Versuche zur Dauerstandsfestigkeit von Leichtbeton. TH München, Ernst-Verlag, pp. 1-10, 1969

[85] K. Zilch, C. J. Diederichs, R. Katzenbach, K. J. Beckmann, Handbuch für Bauingenieure – Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit. Springer-Verlag Heidelberg, 2. Auflage, ISBN 978-3-642-14449-3, DOI 10.1007/978-3-642-14450-9, 2012

[86] N. Tue, J. a, M. Orgass, Kriechen von Ultrahochfestem Beton (UHFB). Ernst & Sohn Verlag, Bautechnik 83, Heft 2, DOI: 10.1002/bate.200610012, 2006

[87] E. Fehling, M. Schmidt, T. Teichmann, K. Bunje, R. Bornemann, B. Middendorf, Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC), Forschungsbericht DFG FE 467/1-1. kassel university press GmbH, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, ISBN 3-89958-108-3, 2005

[88] J. M. Fröse, Optimierung der stofflichen Zusammensetzung von ultrahochfesten Betonrezepturen zur Steigerung deren thermischer Beanspruchbarkeit, Masterarbeit, Technische Universität München, 2018

[89] 3D Potter, Dueling Scaras, Internetseite YouTube, URL: <https://youtu.be/3Q72nOSKyww>, veröffentlicht am 12.04.2019, abgerufen am 13.05.2019

[90] New LUTUM 3 Dual Extruder Clay 3D Printer, Internetseite: 3D Clay Printing, URL: https://3dclayprinting.com/new-lutum-3-clay-3d-printer/, veröffentlicht am 14.11.2016, abgerufen am 13.05.2019

[91] E. N. Herbert, V. C. Li, Self-Healing of Microcracks in Engineered Cementitious Composites (ECC) Under a Natural Environment, Materials (Basel), 6,7 (2013), 2831-2845

[92] P. Zhang, Y. Dai, X. Ding, C. Zhou, X. Xue, T. Zhao, Self-healing behaviour of multiple microcracks of strain hardening cementitious composites (SHCC), Cement Concrete Res, 169 (2018) 705-715