

# **Einfluss des Fasergehaltes auf die Eigenschaften von ultrahochfestem carbonfaserverstärkten Beton**

**Masterarbeit von:**

**Eva Maria Pirker**

**Betreuer:**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue**

**Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Martina Winkler**

**Eingereicht am**

**Institut für Betonbau an der technischen Universität Graz**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue**

**Graz, März 2011**

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als angegebene Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland einem Beurteiler oder einer Beurteilerin in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, 20.03.2011

Eva Maria Pirker

---

## Vorwort

Die Masterarbeit entstand aus einer Zusammenarbeit der SGL Group mit dem Institut für Betonbau der TU Graz. Es soll die Eignung von Carbonfasern als UHPC Fasermaterial untersucht werden. Diese Arbeit bildet den ersten Abschnitt der in diesem Rahmen am Institut für Betonbau durchgeführten Untersuchungen. Ich möchte mich an dieser Stelle bei der SGL Group für die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue, dem Institutsvorstand des Instituts für Betonbau, Frau Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Martina Winkler und Herrn Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lutz Sparowitz für die engagierte Betreuung. Weiters möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Instituts für Betonbau für die Ratschläge bedanken.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern der TVFA der TU Graz die mich bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen unterstützt haben, wie auch bei den Mitarbeitern des Instituts für Angewandte Geowissenschaften, insbesondere bei Herrn Mgr. Dr. Artur Deditius, für die Ermöglichung der mikroskopischen Untersuchungen und die fachlichen Hinweise.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinem Freund Harald, die mich stets unterstützt haben.

---

## Kurzfassung

Diese Arbeit entstand auf Basis eines Forschungsauftrages der von der SGL Group, Hersteller von Carbon Produkten, an das Institut für Betonbau der TU Graz erteilt wurde. Dabei soll die Eignung von Carbonfasern zur Verstärkung von ultrahochfestem Beton (UHPC) untersucht werden. Im Detail wird der Einfluss des Carbonfasergehaltes auf die Verarbeitbarkeit, die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit von faserverstärktem UHPC analysiert. Dafür werden von der SGL Group verschiedene Typen von Carbonfasern zur Verfügung gestellt.

Ausgehend von einem Versuchsprogramm werden in Anlehnung an die DIN EN 196 -1 UHPC Probekörper mit variierendem Fasergehalt hergestellt und geprüft. Die erzeugten Mischungen werden im Rahmen der Frisch- und Festbetonprüfung bewertet. Um näheren Aufschluss über das Bruchverhalten der Fasern zu erlangen, werden ausgewählte Prüfkörper mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht.

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit beinhaltet einen Einblick in den Stand der Technik des ultrahochfesten Betons. Dieses Kapitel bietet weiters eine Übersicht über die Möglichkeiten der Verstärkung von UHPC mit anderen Faserarten. Anschließend werden die in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe, Carbonfasern und UHPC, erläutert. Im Hauptteil wird auf die durchgeführten experimentellen Untersuchungen näher eingegangen. Im Schlussteil werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

Es zeigt sich, dass Carbonfasern auf Grund ihres großen Längen- zu Durchmesser- Verhältnisses die Fließfähigkeit des UHPC in starkem Maße einschränken. Ein niederer Fasergehalt, bei dem die Verarbeitbarkeit des Frischbetons noch gegeben ist, führt zu keinen Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften des UHPC. Die Festbetoneigenschaften werden jedoch durch einen hohen Fasergehalt deutlich verbessert. Die Verstärkung von UHPC mit den untersuchten Carbonfasern ist derzeit noch nicht in der Praxis anwendbar. Durch diese Arbeit konnten aber Potenziale aufgezeigt, Problempunkte erläutert, wie auch Vorschläge zur Weiterentwicklung des Produktes gegeben werden.

---

## Abstract

This thesis is based on a cooperation between the SGL Group, a carbon product manufacturer, and the Institute of structural concrete (TU Graz). The objective was to prove the suitability of using carbon fibers for ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). In detail, investigations on the influence of the fiber content on the plasticity, as well as the flexural and compressive strength of carbon fiber reinforced ultra high performance concrete (UHPC) were carried out. Different types of carbon fibers for these investigations were provided by SGL Group.

UHPC specimens with varying fiber content were produced and tested according to DIN EN 196-1. Within the program, the concrete was analyzed in terms of slump flow and mechanical properties. In addition, further analyses were conducted using a scanning electron microscope (SEM) in order to obtain detailed information on the fracture behavior of carbon fibers.

The first part of the thesis defines the state of the art of UHPFRC in general. It provides an overview about today's use of different kinds of fibers for reinforcing UHPC. Following on from that, the materials used for the investigations are described. The main part contains the research program, the testing methods and the test results of the carbon fiber reinforced UHPC. The final part includes a summary and future perspectives.

The carbon fibers reduce the slump flow significantly, due to their high length to diameter ratio. Hence, low fiber content had to be used to allow processing of the concrete which in turn did not lead to an improvement of the mechanical properties. However, high fiber concentrations significantly improve concrete strength. The use of carbon fibers in order to reinforce UHPC is not practicable today; nevertheless in this thesis potentials for future applications are identified and suggestions for product improvement are made.

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>II</b>
<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung	1
<b>2 Ultrahochfester Beton – Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Ultrahochfester Beton	3
2.2 Faserverstärkter ultrahochfester Beton	5
2.2.1 Rissbildung	7
2.3 Stahlfasern in Zementmatrix	10
2.3.1 Stahlfasern	11
2.3.2 Einfluss der Stahlfasern auf Beton	11
2.3.3 Anwendungsbeispiele	13
2.4 Carbonfasern in Zementmatrix	14
2.4.1 Carbonfasern	15
2.4.2 Einfluss der Carbonfasern auf Beton	16
2.4.3 Anwendungsbeispiele	18
2.5 Glasfasern in Zementmatrix	19
2.5.1 AR – Glasfasern	19
2.5.2 Einfluss der AR- Glasfasern auf Beton	20
2.5.3 Anwendungsbeispiele	21
2.6 Kunststofffasern in Zementmatrix	22
2.6.1 Kunststofffasern	22

---

---

2.6.2	Einfluss der Kunststofffasern auf Beton	22
2.6.3	Anwendungsbeispiele	23
<b>3</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>24</b>
3.1	Carbonfasern	24
3.2	Ultrahochfester Beton (UHPC)	28
3.2.1	Zement	28
3.2.2	Mikrosilica	28
3.2.3	Quarzmehl	29
3.2.4	Fließmittel	29
3.2.5	Gesteinskörnung	30
3.2.6	UHPC - Rezeptur	31
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>32</b>
4.1	Zielsetzung	32
4.2	Versuchsprogramm	32
4.2.1	Versuchsserien	33
4.2.2	Probenlagerung	33
4.2.3	Faserzugabe	33
4.2.4	Wasser/Zement (W/Z) - Wert und Fließmittelgehalt	34
4.2.5	Mischdauer – Mischvorgang	34
4.3	Herstellung der Probekörper	36
4.4	Versuchsaufbau	38
4.4.1	Frischbetonprüfung	38
4.4.2	Festbetonprüfung	39
4.5	Ergebnisse	41
4.5.1	Grenze der Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit des Fasergehaltes	43
4.5.2	Einfluss des Fasergehaltes auf Biegezug – und Druckfestigkeit	49

---

---

4.5.3	Einfluss der Faserverteilung auf die Duktilität	53
4.5.4	Bruchmechanismus und Verbundverhalten der Fasern	56
4.5.5	Festigkeit und Verarbeitbarkeit von UHPC mit gebrochenen Carbonfasern	61
4.5.6	Vergleich Carbonfaser – verstärkter UHPC – Stahlfaser – verstärkter UHPC	62
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick</b>	<b>65</b>
5.1	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	65
5.2	Ausblick	67
<b>6</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>69</b>
6.1	Abbildungsverzeichnis	69
6.2	Tabellenverzeichnis	72
6.3	Quellen	72

---

# 1 Einleitung

Die Geschichte von Beton und dessen Vorläufer, Mörtel, greift weit in die Vergangenheit zurück. Der Entwicklungsprozess ist jedoch, wie auf fast allen Gebieten, nicht abgeschlossen. Verschiedenste Formen von Mörtel mit nicht hydraulischen Bindemitteln waren bereits vor mehreren tausend Jahren weit verbreitet. Bereits bei den Römern wurde Mörtel mit hydraulischen Bindemitteln, Puzzolanen, eingesetzt. Diese ermöglichen neben höheren Festigkeiten auch eine Beständigkeit des Mörtels im Wasser. Erst im 19. Jahrhundert wurde mit der Entwicklung des Portlandzementes die Grundlage für den heute gebräuchlichen Normalbeton geschaffen. Seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts wurde in Richtung hochfester Beton und in den letzten Jahrzehnten in Richtung ultrahochfester Beton (UHPC) weitergeforscht. Letztgenannter wurde erst bei einigen ausgewählten Pilotprojekten eingesetzt und ist weiterhin Gegenstand weltweiter Forschung.

Durch die spezielle Zusammensetzung der Komponenten des UHPC werden Druckfestigkeiten von einem Vielfachen der Druckfestigkeit von Normalbeton erreicht. Ab 150 N/mm<sup>2</sup> spricht man von UHPC. Dessen Matrix genügt aber nicht allen Anforderungen. Ihr werden zur Steigerung der Zug- und Biegezugfestigkeit und zum Erreichen eines duktilen Bruchverhaltens meist Stahlfasern beigemischt. Ohne diese kann UHPC einer hohen Druckbelastung standhalten, jedoch ist sein Widerstand gegenüber Zugspannungen gering und er versagt unter einer Maximallast spröde.

Stahlfasern eignen sich gut um die mechanischen Eigenschaften des UHPC zu verbessern und schaffen somit die Grundlage für den Einsatz in vielerlei Anwendungsbeispielen. Oberflächennahe Fasern führen jedoch durch Korrosion zu optischen Mängeln, des Weiteren ist durch sie eine Verletzungsgefahr bei Kontakt nicht ausgeschlossen. Dies kann in manchen Anwendungsfällen als nachteilig angesehen werden und veranlasst deshalb eine Suche nach alternativen Fasermaterialien. In dieser Arbeit werden Carbonfasern als Material zur Verbesserung des Verhaltens von UHPC untersucht.

## 1.1 Zielsetzung

Diese Arbeit basiert auf einer Zusammenarbeit der Firma SGL Group mit dem Institut für Betonbau der TU Graz. Die SGL Group stellte dem Institut für Betonbau Kurz-

---

schnitt - Carbonfasern zur Verfügung, deren Eignung als Fasermaterial für UHPC geprüft werden soll.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses des Fasergehaltes auf die Eigenschaften von UHPC. Im Detail sollen folgende Punkte untersucht werden:

- Einfluss des Fasergehaltes auf die Verarbeitbarkeit von UHPC
- Einfluss des Fasergehaltes auf die Biegezugfestigkeit von UHPC
- Einfluss des Fasergehaltes auf die Druckfestigkeit von UHPC

Die Ergebnisse zu diesen Punkten sollen eine grundlegende Abschätzung der Eignung der verwendeten Carbonfasern als Fasermaterial zur Verbesserung des Verhaltens von UHPC ermöglichen.

---

## 2 Ultrahochfester Beton – Stand der Technik

### 2.1 Ultrahochfester Beton

In den letzten Jahrzehnten fand eine völlig neue Herangehensweise an das Material Beton statt. Die Betonstruktur wurde dahingehend verändert, dass ein sehr dichtes Korngerüst geschaffen, sowie die Porosität des Zementsteines gesenkt wurde. Dadurch konnte die Druckfestigkeit im Vergleich zu Normalbeton, welcher Festigkeiten im Bereich von 20 bis 60 N/mm<sup>2</sup> aufweist, um ein Vielfaches, auf über 200 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Ab einer Druckfestigkeit von 150 N/mm<sup>2</sup> spricht man von ultrahochfestem Beton (UHPC).

Bei gleichbleibendem Wasserzementwert und einer Steigerung der Kornpackungsdichte der Matrix, nimmt die Druckfestigkeit des Betons zu. Ein optimiertes Korngerüst ist daher ein wichtiger Faktor zum Erreichen hoher Festigkeiten. Bei der Herstellung von UHPC werden neben Zuschlagstoff (meist Quarzsand) und Zement weitere Feinstoffe wie Gesteinsmehl und Microsilica eingesetzt, um die entstehenden Hohlräume zwischen den einzelnen Körnern durch immer kleinere Körner auszufüllen. Ihre Korngrößen, Teilmengen und Kornzusammensetzungen sind so aufeinander abgestimmt, dass ein möglichst dichtes Korngerüst geschaffen und somit ein geringer Wasserverbrauch in Verbindung mit hohen Festigkeiten erzielt werden können. Der Anteil an zu füllenden Gefügaporen wird auf diese Art reduziert.

Eine Verringerung der Porosität des Zementsteins wird darüber hinaus durch Senkung des Wasserbindemittelwertes, dem Massenverhältnis von Wasser und Bindemittel, erreicht. Dieser wird unter den theoretisch zur vollständigen Hydratation notwendigen Wert von 0,20 bis 0,25 gesenkt [1]. Bei Normalbeton ist ein Wert zwischen 0,4 und 0,6 üblich. Kapillarporen, deren Gesamtvolumen durch die Zugabe von mehr Wasser als zur vollständigen Hydratation benötigt wird, stark zunimmt, werden auf diese Weise erheblich reduziert. Die Schaffung eines Zementsteines von hoher Festigkeit wird auch durch die Verringerung des Hydratationsproduktes Calciumhydroxid (CA(OH)<sub>2</sub>) durch Mikrosilica begünstigt. CA(OH)<sub>2</sub> weist die Form von hexagonalen Plättchen auf. Deren Oberfläche ist im Vergleich zu anderen Hydratationsprodukten klein. Da zwischen den Oberflächen der einzelnen Teilchen Bindungskräfte herrschen, sind große Oberflächen zum Erreichen hoher Festigkeiten förderlich. Neben der geringen Oberfläche des CA(OH)<sub>2</sub> ist auch dessen anisotropische Form von Nachteil. [2]

Die Zugabe des geringen Wasservolumens reicht zur Schaffung einer verarbeitbaren Konsistenz nicht aus. Der Einsatz von Fließmitteln erlaubt eine Verarbeitbarkeit bei geringen Wasserbindemittelwerten. Bei UHPC wird eine gute Fließfähigkeit des Frischbetons, ohne Neigung zur Entmischung, angestrebt. Dies ermöglicht die Anwendung bei dünnwandigen Bauteilen und anspruchsvollen Geometrien. Auch selbstverdichtende Eigenschaften des Frischbetons können durch eine entsprechende Mischzusammensetzung und den Einsatz von Fließmitteln erreicht werden. Luftblasen, die in der frischen Betonmatrix vorhanden sind, wandern bei selbstverdichtendem UHPC ohne äußere Einwirkungen an die Oberfläche. Es entsteht ein gefügedichter, porenarmer Zementstein.

Mit der hohen Druckfestigkeit des UHPC gehen aber auch eine verhältnismäßig geringe Zug- bzw. Biegezugfestigkeit und Sprödheit des Materials einher. Für den Einsatz von UHPC als Konstruktionswerkstoff werden eine gewisse Duktilität, Zug- sowie Biegezugfestigkeit von ihm gefordert.

Die hohen Druckfestigkeiten, die das Material aufweist, ermöglichen die Anwendung in schlanken feingliedrigen Bauteilen. Konstruktionen werden häufig in Haupttragrichtung vorgespannt, die Aufgabe der Lastabtragung in Sekundärrichtung soll meist vom UHPC alleine erfüllt werden [9]. Dabei kommt es nicht nur zu Druck, sondern auch zu Zug- und Biegebeanspruchungen im Beton. UHPC ohne Zusatz von Fasern kann diese Anforderungen nicht erfüllen. Durch die Sprödheit des Materials, tritt das Versagen bei Erreichen der Maximallast plötzlich ein. Es kommt zu keinen sichtbaren Verformungen als Vorankündigung. Das Material ist nicht in der Lage, Lastspitzen umzulagern.

Beim Vergleich typischer Spannungs – Dehnungs – Linien von Normalbeton, hochfestem Beton und UHPC mit und ohne Fasern (Abb. 1) sind deutliche Unterschiede im Verformungsverhalten festzustellen. Bei Normalbeton nimmt die Stauchung ab etwa 40% der Druckfestigkeit überproportional zu, es bilden sich Energie konsumierende Mikrorisse. Der Normalbeton kann nach Erreichen der Festigkeit bei Vergrößerung der Stauchung eine verringernde Druckbeanspruchung aufnehmen. Bei UHPC hingegen ist bis zu einer Druckspannung von ca. 90% der Maximalspannung ein linearer Spannungs- Dehnungs- Verlauf zu beobachten. Bei UHPC ohne Fasern kommt es in Folge zu einem plötzlichen Versagen des Materials, faserverstärkter UHPC kann nach Erreichen der Festigkeit bei fortschreitender Stauchung einer abnehmenden Druckspannung standhalten. [10]

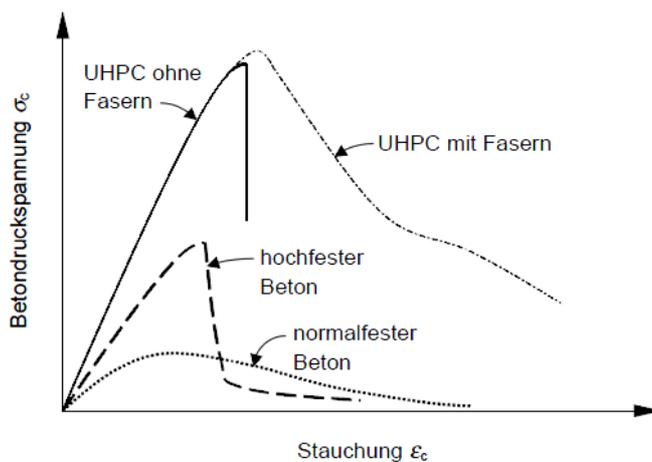


Abbildung 1: Qualitativer Vergleich der Druckspannungs – Dehnungslinien von Beton, [8]

## 2.2 Faserverstärkter ultrahochfester Beton

UHPC ohne Faserzusatz weist unter Biegebeanspruchung eine bis zum Bruch lineare Last- Verformungskurve auf. Diese fällt bei Erreichen der Versagenslast abrupt ab, das Material bricht explosionsartig. Die Zugabe von Fasern in die UHPC Matrix verringert das spröde Verhalten des UHPC. Durch Belastungen in der Größenordnung der Materialfestigkeit kommt es zur Ausbildung von Makrorissen. Fasern im UHPC verzögern das Auftreten der Risse. Sie überbrücken die Rissufer und ermöglichen dadurch eine Lastübertragung über den Riss. Einem schnellen Fortschreiten der Risspitze in der Matrix wird entgegengewirkt.

Der Einsatz von Fasern unterschiedlichster Ausgangsstoffe ist möglich. Deren Materialkennwerte sowie Geometrie bestimmen deren Eignung zur Verbesserung der Eigenschaften des UHPC. Während die Geometrie der Fasern Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften hat, wirken sich Veränderungen der Materialkennwerte nur auf die Festbetoneigenschaften aus.

Entscheidende Materialkennwerte für die Eignung von Fasern zur Verstärkung von UHPC sind die Alkalibeständigkeit, Zugfestigkeit, Bruchdehnung sowie der E-Modul. Zusätzlich ist auch deren Verbundwirkung in der Matrix von großer Bedeutung. Fasern sollen eine hohe Zugfestigkeit sowie eine ausreichende Bruchdehnung aufweisen. Des Weiteren ist ein sprödes Verhalten von Nachteil, dadurch können Fasern bereits beim Mischen brechen. Auch kann dies zu frühem Versagen einer rissüberbrückenden Faser, beim Öffnen des Risses, führen.

Tabelle 1: Gebräuchliche Faserarten, [8]

Zeile	Spalte	1	2	3	4	5	6
	Faserart	Typischer Faserdurchmesser in $\mu\text{m}$	Typische Faserlänge in mm	Dichte in $\text{kg}/\text{dm}^3$	E-Modul in GPa	Zugfestigkeit in $\text{N}/\text{mm}^2$	Bruchdehnung in %
1	Metallische Fasern						
	- Stahldrahtfasern	150-1200	6-70	7,85	160-210	1000-2600	1-10
2	- Spanfasern	400	30	7,85	210	900	
3	- Blechfasern	400-650	12-50	7,85	210	270-1000	10
4	Glasfasern						
	- E-Glas	3-30	3-25	2,60	72-75	2000-4000	2,0-3,5
5	- AR-Glas	3-30	3-25	2,68-2,70	72-75	1500-3700	1,5-2,4
6	Kunststofffasern						
	- Polypropylenfasern						
	monofil	18-22	6-18	0,91	4-18	320-560	8-20
7	fibrilliert	50-100	6-19	0,91	3,5-10	320-400	5-15
8	- Polyacrylnitrilfasern	18-104	4-24	1,18	15-20	330-530	6-10
9	- Polyvinylalkoholfasern	27-660	6-30	1,30	25-41	880-1600	6-10
10	- Polyethylenfasern	38	12-38	0,97	87-170	2500-3100	2,7-3,5
11	- Aramidfasern	10	12-20	1,38-1,45	59-130	2700-3600	2,1-4,0
12	Kohlenstofffasern						
	- HT-Typ	5-10	6-12	1,75-2,00	200-250	3000-5000	1,2-1,5
13	- IM-Typ	5-10	6-12	1,75-2,00	250-350	4000-5000	1,1-2,0
14	- HM-Typ	5-10	6-12	1,75-2,00	350-450	2000-4000	0,4-1,1
15	Zellulosefasern	15-400	2,5-350	1,05-1,50	5-100	120-1000	3,0-25
16	Mineralische Fasern						
	- Asbestfasern	0,02-30	< 40	2,60-3,40	160-200	1000-4500	2,0-3,0
17	- Basaltfasern	9-12	< 50	2,75-2,90	89-100	1850-4840	3,2

Die Geometrie der Fasern beeinflusst den Frischbeton dahingehend, dass Fasern mit einem großen Längen zu Durchmesser ( $L/D$ ) – Verhältnis, die Verarbeitbarkeit des Betons verringern. Sehr schlanke Fasern bilden eine stabile räumliche Struktur im Frischbeton, die ein selbstständiges Fließen und Verdichten des Betons einschränkt. Übliche Stahlfaser - Geometrien mit einer Schlankheit ( $L/D$ ) deutlich unter 100 haben nur geringe Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit. Der beschriebene Einfluss ist immer abhängig vom beigemengten Faservolumen.

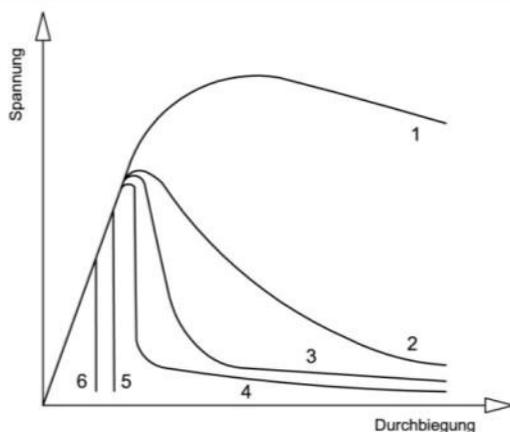
Weiters wirkt sich die Geometrie der Fasern auch auf die Festbetoneigenschaften aus. Sehr feine Fasern können das Auftreten und Ausbreiten von Mikrorissen verringern. Die Schlankheit beeinflusst auch die Bruchmechanik. Bei Fasern mit großen Einbindelängen im Verhältnis zu ihrem Querschnitt können über die Oberflächen Kräfte übertragen werden, die die Zugfestigkeiten der Fasern überschreiten. Es kommt damit zum Versagen der Fasern. Bei gedungeneren Fasern können über die Verbundfläche zwischen Faser und Matrix, bei gleicher Haftung wie im Fall zuvor, nur Kräfte übertragen werden, die unter den Zugfestigkeiten der Fasern liegen. Hierbei kommt es

während des Öffnen des Risses im UHPC zum Versagen des Faser – Matrix Verbundes und damit zum Herausziehen der Fasern aus den Rissufern. Dies führt zu einem duktilen Verhalten.

Die Auswirkungen von Fasern auf die Eigenschaften von UHPC hängen neben der Geometrie und den Materialkennwerten der Faser auch von dem beigemengten Faservolumen, der Faserverteilung und der Orientierung ab. Die Faserorientierung ergibt sich weitgehend zufällig. Durch die Betonierichtung kann sich eine Hauptorientierungsrichtung ergeben, weiters können sich Schalfflächen auf die Ausrichtung auswirken.

### 2.2.1 Rissbildung

Zugspannungen im Beton infolge äußerer Lasten führen zum Auftreten von Mikrosissen in der Zementmatrix und zur Vergrößerung bereits bestehender. Über feine Mikrorisse können auch vom Beton Kräfte übertragen werden. Mit weiterer Dehnung sinkt der vom Beton übertragbare Anteil.



Spannungs–Durchbiegungslinien (Beispielverläufe):

- 1 überkritischer Fasergehalt
- 2–5 unterkritischer Fasergehalt - Verlauf unter Anderem abhängig von den Fasereigenschaften und deren Volumsanteil
- 4 starker Abfall ev. durch Schlupf oder Versagen eines Großteils der Fasern bei Makrorissbildung
- 5 Versagen der Fasern bei Makrorissbildung
- 6 Sprödes Versagen von faserfreiem UHPC

Abbildung 2: Qualitative Verläufe der Spannungs- Durchbiegungsbeziehung von UHPC unter Biegezugbelastung

Gleichzeitig kommt es aber zu einer Vergrößerung der von den Fasern übertragenen Kräfte. Bei weiterer Laststeigerung öffnen sich die Risse zu Makrorissen. Mit zunehmender Rissweite ist der Beton nicht mehr in der Lage weiterhin Kräfte über den Riss zu übertragen, die Lastübertragung erfolgt rein über die rissüberbrückenden Fasern. Ab einem vom Werkstoff abhängigen Lastniveau kommt es zum Herausziehen der Fasern aus den Rissufern und damit zu einer Abnahme der übertragbaren Kraft. Je nachdem, ob durch die Menge an Fasern eine signifikante Steigerung der Zugtragfähigkeit des

UHPC möglich ist oder nicht, spricht man von einem überkritischen oder unterkritischen Fasergehalt. Bei Fasern mit einem großen Oberflächen- zu Querschnitts- Verhältnis kann die zwischen Faser und Matrix übertragbare Kraft über der Maximalzugkraft der Faser liegen. Damit kann es zu einem Versagen der Faser, ohne Herausziehen dieser aus der Matrix, kommen.

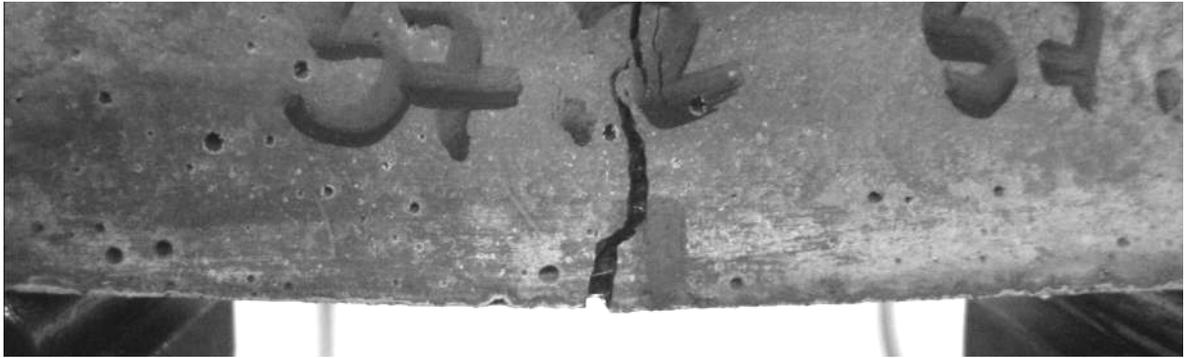


Abbildung 3: Makroriss mit rissüberbrückenden Stahlfasern

Da die Fasern im Beton zufällig dreidimensional verteilt sind, verlaufen sie nicht normal zur Rissfläche. Dies führt beim Öffnen eines Risses nicht nur zu einer Längsbeanspruchung der Faser, sondern auch zu Kräften quer zur Faser, da sie an den Rissufern geknickt und gegen den Beton gepresst wird. Dadurch ergibt sich ein größerer Ausziehungswiderstand der Fasern. Die Kräfte quer zur Faser können bei Fasern mit hoher Sprödigkeit frühzeitig zum Versagen der Faser führen.

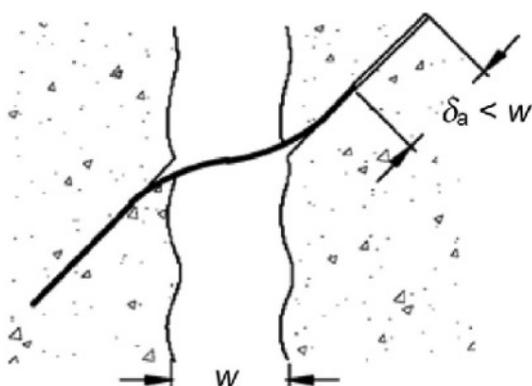


Abbildung 4: Umlenkung einer nicht normal zur Bruchebene verlaufenden Faser, [9]

Abhängig vom Fasergehalt und vom Versagensfall der Fasern, zu dem es infolge zunehmender Lasteinwirkung kommt, ergeben sich unterschiedliche Verläufe der Spannungs- Durchbiegungsbeziehung von UHPC. Dies wird in Abbildung 2 dargestellt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es im Zuge der Rissbildung zu drei verschiedenen Versagensmöglichkeiten kommen kann:

- Versagen des Verbundes Faser – Matrix
- Versagen der Faser :
  - Durch hohe Zugkräfte in der Faser und Umlenkkräfte quer zur Faser in der Rissebene
  - Durch Querbeanspruchung aufgrund von Umlenkkräften quer zur Faser in der Rissebene

Das Versagen des Faser – Matrix Verbundes wird angestrebt, da es sich hierbei um einen langsam fortschreitenden Prozess handelt. Beim Erreichen der Kraft in der Faser, die über den Verbund zwischen Faser und Matrix an einem Rissufer maximal übertragen werden kann, kommt es zum Gleiten zwischen Faser und Matrix. Die Reibung, wie auch die Umlenkung der Faser am Rissufer führt zu einem Widerstand der Faser gegen Herausziehen, der mit dem Ausziehen der Faser immer weiter abnimmt. Dadurch ergibt sich ein duktiler Verhalten.

Zum Versagen der Faser kommt es durch Zugkräfte in der Faser und Kräfte quer zur Faser aufgrund der Schrägstellung dieser zum Riss. Bei spröden, querdruckempfindlichen Fasern, kann es durch die Umlenkkräfte am Rissufer frühzeitig zu einem Versagen der Fasern durch Querbeanspruchung kommen, obwohl die Zugfestigkeit der Fasern nur in sehr geringem Maße ausgenutzt ist. Bei Fasern, die nicht auf Querdruck empfindlich sind, wie z.B. Stahlfasern, können über sehr große Einbindelängen Kräfte übertragen werden, die im Bereich der Faserzugfestigkeit liegen. Die zusammengesetzte Beanspruchung aus den hohen Zugkräften in der Faser, wie auch aus den Umlenkkräften am Rissufer, führt zu einem Versagen der Faser.

## 2.3 Stahlfasern in Zementmatrix

Ultrahochfestem Beton als auch normal – und hochfestem Beton, werden zum Erreichen bestimmter Eigenschaften Fasern zugesetzt. Wie in Kapitel 2.2 Faserverstärkter UHPC dargestellt, sind die Materialeigenschaften von Fasern entscheidend für deren erfolgreichen Einsatz im Betonbau. Die Materialcharakteristika der Stahlfasern entsprechen den erwünschten Anforderungen in vielerlei Bereichen. Sie weisen eine hohe Zugfestigkeit, einen hohen E- Modul sowie eine hohe Bruchdehnung auf. Ihre Eignung hat sich in zahlreichen Anwendungen bestätigt.

In bewehrtem und unbewehrtem Normalbeton erzielen Stahlfasern eine Verbesserung des Zugtragverhaltens, des Bruchverhaltens sowie des Schwindverhaltens, der Widerstand gegen Stoß und Abrieb wird erhöht. Stahlfasern sind schon seit mehreren Jahrzehnten im Einsatz. Sie werden unter anderem bei Industrieböden, Fundamentplatten, Kellerwänden, Estrichen wie auch im Tunnelbau eingesetzt. Bei der Bemessung und Anwendung kann auf Richtlinien zurückgegriffen werden.

Zum Erreichen eines duktilen Verhaltens von ultrahochfestem Beton werden der Matrix meist Stahlfasern beigemischt. Sie sind die meist erprobten Fasern für diese Anwendung. Dieser Thematik wurden bereits zahlreiche Forschungsarbeiten gewidmet. Die Untersuchungen und Optimierungen des Hochleistungsmaterials dauern an, jedoch konnte der Baustoff bis heute schon in ein paar Bauwerken erfolgreich eingesetzt werden.

Stahlfasern ermöglichen ein ausreichend duktilen Verhalten des ohne Fasern sehr spröde versagenden UHPC. Des Weiteren wurden durch Stahlfasern Biegezugfestigkeiten bis  $50 \text{ N/mm}^2$  erreicht[10]. Stahlfasern bringen aber auch Nachteile mit sich, die den Gebrauch und weniger die Festigkeit des mit ihnen modifizierten Betons betreffen. Fasern an der Oberfläche korrodieren, dies wirkt sich störend auf das Erscheinungsbild des UHPC aus. Soweit bekannt führt dies aber zu keiner negativen Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Werkstoffes [8]. Die Verletzungsgefahr durch spitze Stahlfasern an der Oberfläche kann gewisse Anwendungsmöglichkeiten einschränken. Die Fasern erschweren auch die Oberflächenbearbeitung des Materials.

### 2.3.1 Stahlfasern

Meist werden hochfeste Stahldrahtfasern zur Verstärkung von Beton verwendet. Es können auch gefräste Stahlfasern und Blechfasern bei Normalbeton zum Einsatz kommen, ihre Zugfestigkeiten sind jedoch geringer. Unterschiedliche Geometrien der Stahldrahtfasern, wie Wellen und geknickte Formen, sollen den Widerstand gegen Herausziehen verbessern.

In UHPC werden hochfeste Stahldrahtfasern unterschiedlicher Form eingesetzt. Meist werden gerade Mikrostahtfasern mit Durchmesser im Bereich von 0,15 - 0,20 mm und Längen zwischen 6 und 25 mm dem Frischbeton beigemischt. Hergestellt werden die Fasern aus kaltgezogenem Walzdraht, welcher auf die entsprechende Länge geschnitten wird [11]. Die Stahldrahtfasern weisen Zugfestigkeiten ab 2100 N/mm<sup>2</sup> auf, die Bruchdehnung hängt stark vom Werkstoff ab und beträgt einige Prozent. Die abgestimmten Abmessungen und Festigkeiten führen unter hoher Beanspruchung und Rissbildung des UHPC zu einem Ausziehen der Fasern aus der Matrix und damit zu einem duktilen Verhalten.



Abbildung 5: Mikrostahtfasern, [11]

### 2.3.2 Einfluss der Stahlfasern auf Beton

In diesem Abschnitt werden exemplarisch, auf einen DFG Forschungsbericht [10] zurückgreifend, mechanische Eigenschaften von mit Stahlfasern verstärktem UHPC aufgezeigt.

Im Rahmen der durchgeführten Forschungsarbeit konnten UHPC Druckfestigkeiten von 200 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Der lineare Anstieg der Spannungs- Dehnungs- Linie bis knapp vor dem Erreichen der Druckfestigkeit, wie auch die Druckfestigkeit selbst, wiesen kaum Unterschiede beim Vergleich der Ergebnisse einer UHPC Rezeptur ohne Fasern und der gleichen Rezeptur mit 2,5 Vol.- % 9mm langer Mikrofasern auf. Nach dem Erreichen der Druckfestigkeit versagt jedoch der Stahlfaser- freie UHPC explosi-

onsartig, der UHPC mit Fasern zeigt hingegen einen Abfall der Druckspannung mit fortschreitender Dehnung. Bei 7 % Stauchung war eine reduzierte Druckspannung von 40 -70 % der Festigkeit vorhanden. Dies bedeutet, dass das Erreichen eines duktilen Nachrissverhaltens möglich ist, der untersuchte Stahlfaser- verstärkte UHPC jedoch große Streuungen im Bereich der Nachrissfestigkeit aufweist. [10]

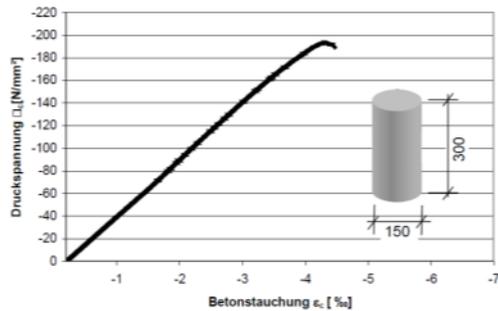


Abbildung 6: Spannungs- Dehnungslinie eines UHPC Probekörpers ohne Fasern, [10]

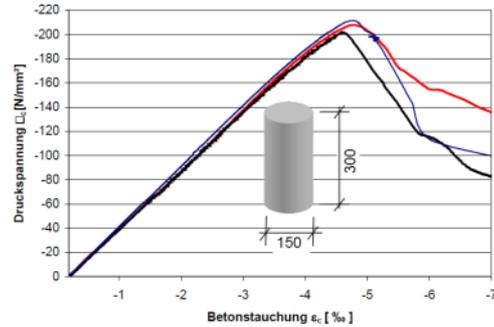


Abbildung 7: Spannungs- Dehnungslinien von UHPC Probekörpern mit 2,5Vol.% Stahlfasern, [10]

Bei der Biegezugprüfung eines Feinkorn- UHPC mit 2,5 Vol. % 9mm langer Mikrofasern im Rahmen der zuvor angeführten Untersuchungen konnte Biegezugfestigkeiten zwischen 33 und 41 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden, dieser Festigkeitskennwert unterliegt deutlichen Schwankungen. Die mittlere Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit des Maschinenweges ist in Abbildung 8 dargestellt. Es wurden weitere Versuche an Proben unterschiedlicher Größe durchgeführt, dabei konnte ein bedeutender Maßstabseinfluss beobachtet werden. [10]

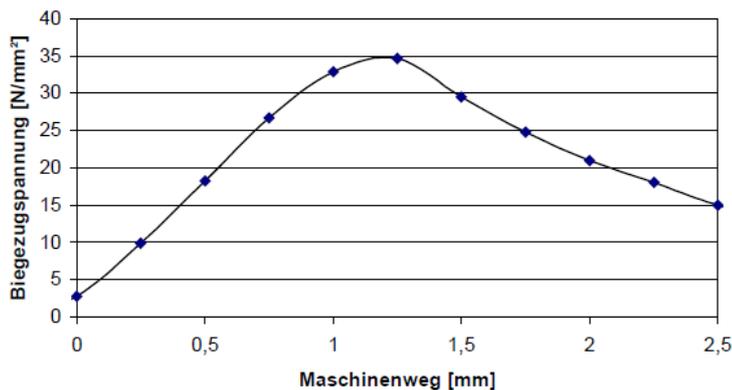


Abbildung 8: Biegezugspannung - Maschinenweg - Verlauf von UHPC Prismen mit Stahlfasern, [10]

### 2.3.3 Anwendungsbeispiele

Es existieren bereits einige Anwendungsbeispiele, bei denen Stahlfasern zur Verbesserung der Eigenschaften von UHPC eingesetzt wurden. Im Gegensatz dazu finden sich kaum Beispiele von Projekten die mit anderen Fasersorten realisiert worden sind.

Ein Vorreiterprojekt, bei dem Stahlfaser- verstärkter UHPC eingesetzt wurde ist die Sherbrook Fußgängerbrücke in Quebec aus dem Jahre 1997. Die 60m überspannende Brücke wurde als Raumfachwerkträger aus Stahlfaser- verstärktem UHPC und Stahlrohren in sechs Teilen vorgefertigt. Das Brückendeck weist eine Stärke von 30mm auf [12]. Ein weiteres ausgeführtes Beispiel ist die Sakata - Mirai Fußgängerbrücke in Sakata, Japan. Deren 50m überspannende Hohlquerschnitt wurde in mehreren Teilen vorgefertigt und weist eine Querschnittshöhe von 55 bis 156cm auf. Die Flanschdicke des Trägers beträgt 50mm, die Stegdicke 80mm. Das Gewicht der vorgespannten Brücke beträgt in etwa 20 % einer gleichwertigen Brücke aus Normalbeton. [12]



Abbildung 9: Sherbrook Fußgängerbrücke, [13]



Abbildung 10: Sakata - Mirai Fußgängerbrücke, [14]



Abbildung 11: Montage Sakata - Mirai Fußgängerbrücke, [15]

## 2.4 Carbonfasern in Zementmatrix

Carbonfasern sind für deren Anwendung in Carbon – Faserverstärkten – Kunststoffen (CFK) sehr bekannt. Das Material ist überall dort verbreitet wo hohe Festigkeiten erzielt werden sollen, aber ein hohes Konstruktionsgewicht vermieden werden muss. Die Tatsache, dass Zugfestigkeit und E – Modul von Carbonfasern über denen von Stahlfasern liegen, lässt auch deren Eignung zur Verstärkung von Beton möglich erscheinen. Im Vergleich zu Stahlfasern weisen sie jedoch eine geringere Bruchdehnung, wie auch ein sprödes Materialverhalten auf.

Bereits in den 1980ern entstanden Forschungsarbeiten zu Carbonfaser – verstärktem Beton, in [7] wird dazu ein Überblick gegeben. Kurzschnittfasern werden dem Beton beigemischt und führen zu erhöhten Festigkeiten. Jedoch wird auch Faserbruch durch das gemeinsame Mischen mit gröberem Zuschlägen festgestellt, was eine verminderte Tragfähigkeit bewirkt, wie in Abbildung 12 und 13 dargestellt.

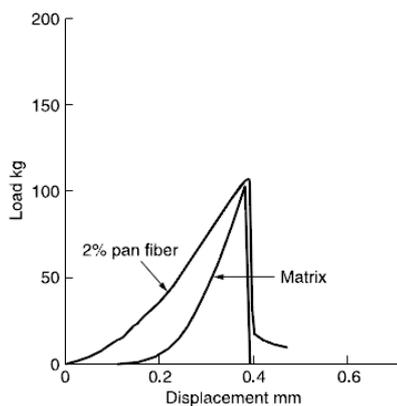


Abbildung 12: Last- Verformungsbeziehung eines Zementsteines mit Carbonfasern und Quarzsand unter Biegung, [7]

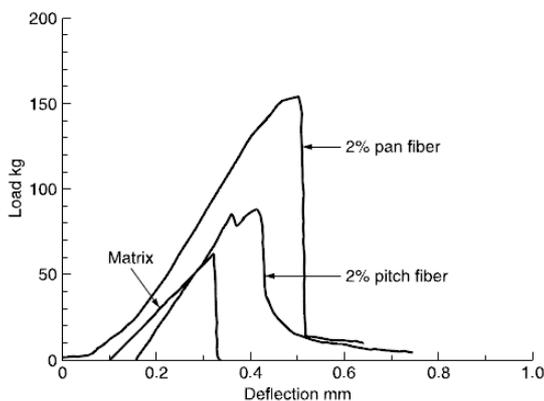


Abbildung 13: Last- Verformungsbeziehung eines Zementsteines mit Carbonfasern ohne Quarzsand unter Biegung, [7]

Ergänzend wird in [7] auch der Einfluss unterschiedlicher Carbonfasern auf die Eigenschaften von Zementstein untersucht. Es kommt zur Verwendung von PAN- und Pitch- Fasern. Beides sind Carbonfasern, die sich jedoch im Ausgangsmaterial, welches unter hohen Temperaturen zum Endprodukt verarbeitet wird, unterscheiden. Es konnten mit PAN – Fasern im Zementmörtel höhere Festigkeiten erzielt werden. Dieser Fasertyp wird auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzt.

Eine Erhöhung der Festigkeit mit Carbonfasern konnte jedoch bis heute nicht in dem Ausmaß erreicht werden, dass sich diese Methode als Praxisanwendung durchsetzte. Carbonfasern finden im Betonbau aber im Bereich des Textilbetons Anwendung. Faserrovings werden zu textilen Strukturen weiterverarbeitet, wie dies auch bei Glasfasern und Kunststofffasern der Fall ist. Die flächigen Gelege werden entsprechend der Bauteilgeometrie und den zu erwartenden Spannungen im herzustellenden Element in die Schalung eingelegt und zur Abtragung der Zugspannungen im UHPC herangezogen.

### 2.4.1 Carbonfasern

Carbonfasern können aus verschiedensten Ausgangsstoffen (Precursor) gefertigt werden. Meist werden Polyscrylnitril (PAN) Fasern zur Weiterverarbeitung bei hohen Temperaturen zu Carbonfasern herangezogen. Je nach Prozessablauf (Temperaturstufen) können Zugfestigkeit und E – Modul der Fasern variiert werden. Die produzierten Fasern werden auf Grund dieser Unterschiede in High Tensile (HT)-, Intermediate Modulus (IM)-, High Modulus (HM)- und Ultrahigh Modulus (UHM)- Fasern eingeteilt wie in Abbildung 14 ersichtlich ist. Carbonfasern sind unter hohen Temperaturen sowie im alkalischen Milieu beständig.

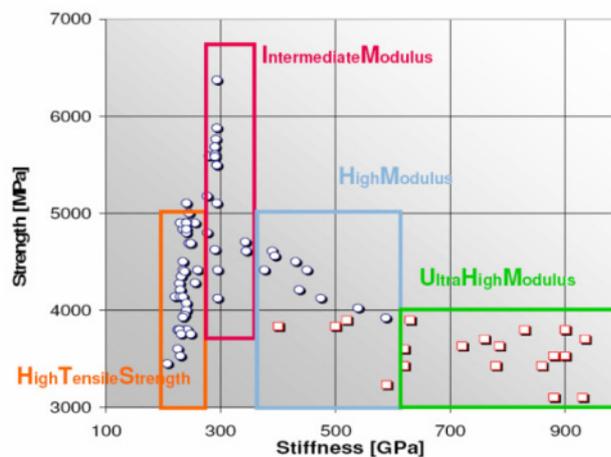


Abbildung 14: Einteilung der Carbonfasern nach Zugfestigkeit und E – Modul, [3]

Die Fasern weisen auf Grund ihrer inneren Struktur ein ausgesprochen anisotropes Verhalten in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften auf [6]. Sie verfügen über einen hohen E – Modul sowie sehr hohe Festigkeiten in Faserrichtung, normal zur Faserachse sind diese Werte geringer. Unter Anderem wird in [8] auf eine geringe Festigkeit unter Querbeanspruchung und damit auf eine Bruchgefahr der Fasern während des Mischvorganges verwiesen. Genaue Angaben dazu werden von Faserherstellern nicht zur Verfügung gestellt. Materialkennwerte quer zur Faserachse werden nur für Fasern in Kombination mit einem Matrixsystem angegeben. Der Spannungs – Dehnungs – Verlauf von Carbonfasern unter Zugbelastung ist wie in Abbildung 17 dargestellt bis zum Bruch linear.

#### **2.4.2 Einfluss der Carbonfasern auf Beton**

In experimentellen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass Carbon – Kurzschnittfasern zu einer Steigerung der Festigkeit von Normalbeton und UHPC führen können. Diese liegt aber deutlich unter den Ergebnissen die mit Stahlfasern erreicht werden können.

In [21] werden unterschiedlichen UHPC Mischungen Carbonfasern beigemischt und die daraus hergestellten Proben einer Druckprüfung unterzogen. Es zeigt sich eine statistisch feststellbare Steigerung der Druckfestigkeit durch den Zusatz von Carbonfasern, jedoch können durch eine Lagerung faserloser Proben bei hohen Temperaturen größere Druckfestigkeiten des UHPC erreicht werden als durch Faserzugabe. Des Weiteren konnte in [21] auf Grundlage von Untersuchungen mit einem Elektronenrastermikroskop, ein Haftverbund zwischen Fasern und Zementmatrix nachgewiesen werden.

Im Zuge einer Diplomarbeit [18] wird der Einfluss von Carbonfasern auf die Biegezugfestigkeit und Duktilität von UHPC untersucht. In diesem Fall wirkten sich längere Fasern positiv auf die Biegezugfestigkeit der Proben aus, jedoch kam es zum Sprödbruch. Bei dieser Untersuchung wurden die querdruckempfindlichen Fasern zu Beginn des Mischvorganges beigegeben. Es kann daher von Faserbruch während des Mischvorganges ausgegangen werden. Bei dieser Arbeit wird auf die Verschlechterung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons durch den Zusatz der Fasern hingewiesen.

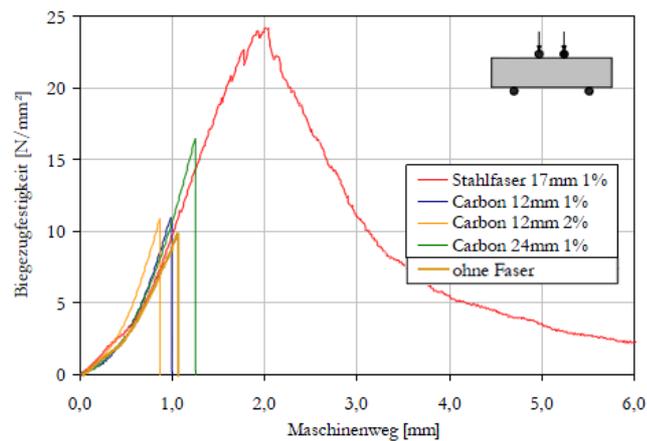


Abbildung 15: Biegezugfestigkeit von UHPC Prismen mit Carbonfasern, [18] modifiziert

Weiters liegen auch Ergebnisse zur Untersuchung des Pull – Out – Verhaltens von Carbonfasern aus einer Zementmatrix vor. Diese werden in [22] erläutert. 1 bis 2mm im Beton eingebundene Einzelfasern wurden auf Ausziehen aus der Matrix untersucht (Abb. 16). Es wurde festgestellt, dass zwischen den untersuchten Fasern des Herstellers Tenax und dem Zementstein ein Haftverbund gegeben ist. Die Verbundspannung der untersuchten Carbonfasern ist deutlich höher als die der auch untersuchten Alkaline Resistant (AR) – Glasfasern. Es wird jedoch auf die stark streuenden Ergebnisse sowie den großen Einfluss der Oberflächenbehandlung der Fasern hingewiesen.

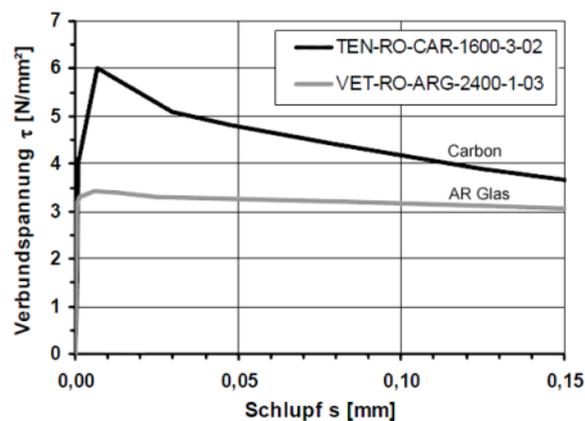


Abbildung 16: Verbundspannungs- Schlupf- Beziehung von Carbon- und Glas- Einzelfasern in Zementstein, [22] modifiziert

### **2.4.3 Anwendungsbeispiele**

Die Anwendung von Carbonfasern im Betonbau beschränkt sich meist auf textile Halbzeuge die in die Zementmatrix eingelegt werden, bezeichnet als Textilbeton. Das Tragverhalten von Textilbeton wurde in letzter Zeit vermehrt untersucht. Die Anwendung von Carbon - Kurzschnittfasern zur Verstärkung von UHPC ist derzeit noch nicht in der Praxis umsetzbar.

## 2.5 Glasfasern in Zementmatrix

Gasfasern werden sowohl als Kurzschnittfasern als auch in Form von Rovings und textilen Halbzeugen im Betonbau verwendet. Glas ist nicht alkaliresistent und verliert im basischen Milieu des Betons im Laufe der Zeit an Festigkeit. Chemisch modifizierte Fasern – alkaliresistente (AR) Glasfasern genannt – können auf Dauer als Verstärkungsmaterial im Beton eingesetzt werden. Glasfasern führen nicht zu Korrosionserscheinungen wie dies bei Stahlfasern der Fall ist und ermöglichen dadurch ein gleichbleibendes Erscheinungsbild der Betonoberfläche.

Die im Vergleich zu Stahl günstigen AR Glasfasern werden unter anderem zur Verbesserung der Eigenschaften von Normalbeton eingesetzt. Es gibt auch Untersuchungen zu Verstärkung von UHPC durch Kurzschnitt – AR Glasfasern, der Schwerpunkt der Forschung liegt bei Glasfasern aber im Bereich textiler Halbzeuge als Bewehrungselement. Glasfasertextilien werden abgestimmt auf die auftretende Spannung in den UHPC integriert und auf diese Weise optimal zur Lastabtragung genützt. Von dreidimensional verteilten Kurzschnittfasern wird ein entsprechend höherer Fasergehalt zur Erzielung gleichwertiger Ergebnisse benötigt, da auf Grund ihrer Ausrichtung nur ein geringer Anteil der Fasern für die Lastabtragung wirksam wird.

### 2.5.1 AR – Glasfasern

Die isotropen Glasfasern können durch unterschiedliche Verfahren aus flüssiger Glasschmelze produziert werden. Die bis zu 30 µm dicken Fasern werden mit einer Schlichte überzogen und zu Rovings gesponnen. Anschließend kann eine Weiterverarbeitung zu textilen Strukturen oder Kurzschnittfasern folgen. Kurzschnittfasern werden durch Schneiden der Rovings produziert, die Einzelfasern haften zu Beginn meist aneinander und lösen sich erst während des Verarbeitungsprozesses im Beton. Die Alkalibeständigkeit der Fasern wird durch einen definierten Zirkongehalt der Glasschmelze erreicht. Ohne diesen Zusatz kommt es durch das alkalische Milieu des Betons zu Korrosionserscheinungen an der Faser. Dadurch entstehende Oberflächenschäden führen schnell zu einem Festigkeitsverlust, da es unter Spannung zu Kerbwirkungen kommt. Oberflächendefekte, die auch durch die Verarbeitung der Fasern im Beton herbeigeführt werden können, wirken auf Grund der Kerbempfindlichkeit und Sprödhheit des Materials festigkeitsmindernd.

Glasfasern verfügen über eine hohe Zugfestigkeit (bis 3700 N/mm<sup>2</sup>), jedoch liegt deren Bruchdehnung im Bereich von 2 % und somit unter der von Stahl. Einzelfasern weisen

einen bis zum Bruch linearen Spannungs – Dehnungsverlauf auf. Bei epoxidharzbeschichteten Rovings kommt es hingegen nach dem Erreichen der Zugfestigkeit zu einem Abflachen der Spannungs- Dehnungskurve und somit nicht zum plötzlichen Versagen, wie dies bei einzelnen Fasern (Einzelfilamenten) in Erscheinung tritt. Der Einsatz solcher Rovings, meist zu textilen Gelegen verarbeitet, führt zu duktilem Verhalten des damit verstärkten UHPC.

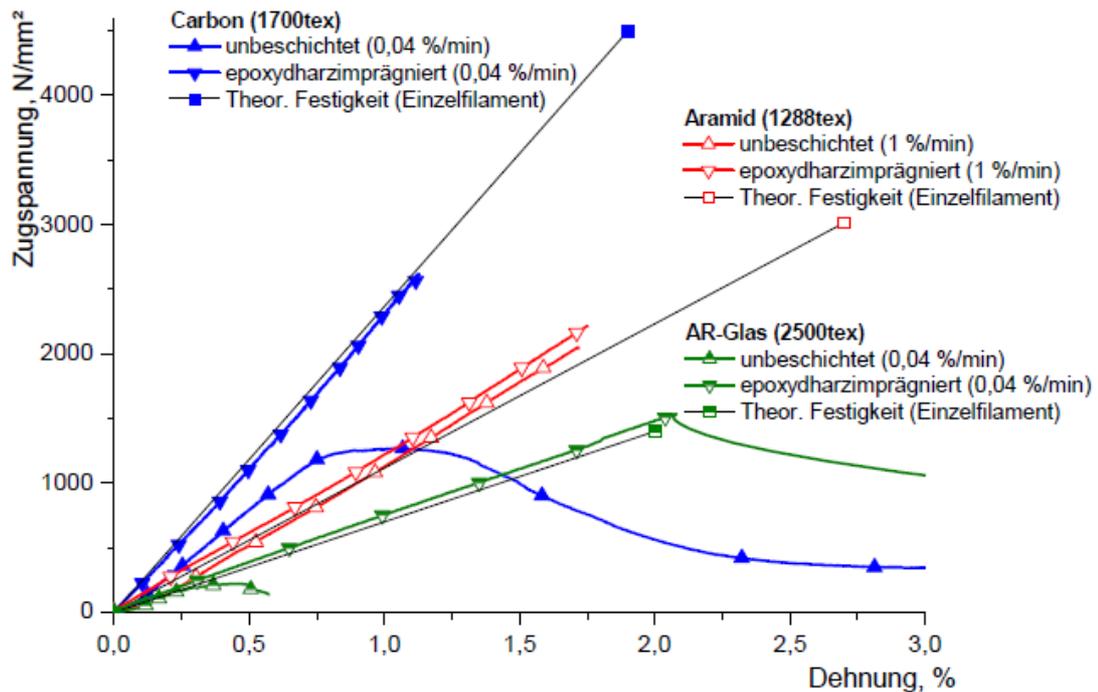


Abbildung 17: Vergleich der Spannungs- Dehnungsbeziehungen unterschiedlicher Faserrovings und Einzelfilamente, [16]

## 2.5.2 Einfluss der AR- Glasfasern auf Beton

Kurzschnitt - AR - Glasfasern kommen im Normalbeton für verschiedene Zwecke zum Einsatz. Ein geringer Fasergehalt kann die Frühhissbildung minimieren, ein höherer Faserzusatz (im Bereich bis etwa 4 Vol. %) führt zu einer Verbesserung der Festigkeit [17].

Untersuchungen von Glasfaser – verstärktem UHPC (Abb. 18, 19) zeigen, dass eine Steigerung der Biegezugfestigkeit durch den Faserzusatz erreicht werden kann, diese jedoch deutlich unter den Ergebnissen von Stahlfaser - verstärktem UHPC liegt [18], [19]. Ein duktiler Versagen ist weit weniger ausgeprägt als beim Zusatz von Stahlfasern. Bei der in Abbildung 18 dargestellten experimentellen Untersuchung konnte kein duktiler Versagen festgestellt werden. Dies könnte sich auf Faserschäden durch langes

Mitmischen der Fasern zurückführen lassen. Für eine festigkeitssteigernde Wirkung ist ein Fasergehalt notwendig, welcher die Verarbeitbarkeit deutlich einschränkt.

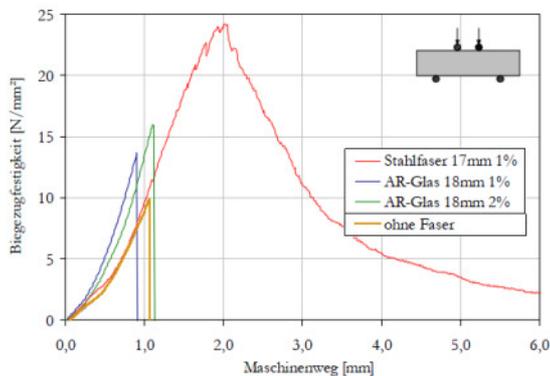


Abbildung 18: Biegezugfestigkeit von UHPC Prismen mit AR- Glasfasern, [18] modifiziert

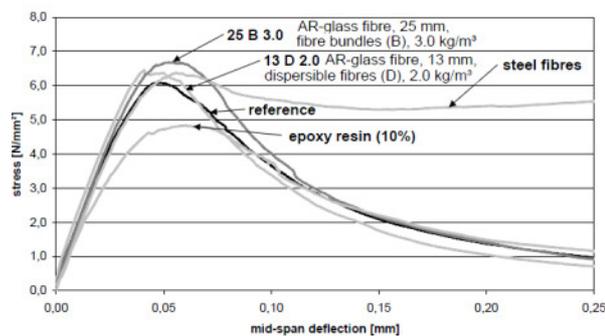


Abbildung 19: Biegezugspannungs- Durchbiegungsbeziehung von faserverstärktem UHPC, [19] modifiziert

### 2.5.3 Anwendungsbeispiele

Zur Verbesserung der Eigenschaften von Normalbeton kommen Glasfasern als Kurzschnittfasern immer wieder zum Einsatz. Deren Einsatz bei Praxisanwendungen aus UHPC ist jedoch beschränkt und betrifft meist Prototypen im kleineren Maßstab, wie Möbel aus UHPC. Im Gegensatz dazu werden die Fasern als textile Gelege bereits bei Objekten mit höheren statischen Anforderungen eingesetzt wie zum Beispiel bei der Fußgängerbrücke in Oschatz, entwickelt an der TU Dresden (s. Abb. 20).



Abbildung 20: Textilbewehrtes Brückenelement, [20]

## 2.6 Kunststofffasern in Zementmatrix

Dieser Abschnitt handelt von Fasern aus synthetischen Polymeren. Fasern aus natürlichen Polymeren werden an dieser Stelle nicht behandelt, da sie für die Anwendung in Beton eine untergeordnete Rolle spielen. Die unterschiedlichen Arten von Kunststofffasern weisen ein weites Spektrum an Materialeigenschaften auf. Um als Kurzschnittfaser die Festigkeit und Duktilität von Zementstein zu verbessern ist neben hoher Zugfestigkeit auch ein entsprechend hoher E-Modul notwendig, der weit über dem der Matrix liegt. Nur weniger Fasern aus synthetischen Polymeren entsprechen diesen Anforderungen. Neben dieser Aufgabe werden geeignete Kunststofffasern auch beigemischt um den Widerstand gegen Brandbeanspruchung zu erhöhen, wie auch die Rissbildung im jungen Beton zu minimieren.

### 2.6.1 Kunststofffasern

Kunststofffasern werden durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition aus Monomeren produziert. Die Fasern werden mit Durchmessern weniger Hundertstel Millimeter und Längen bis etwa 30mm hergestellt. Für die Anwendung im Beton relevante Fasern sind unter anderem Aramid- (aromatisierte Polyamide), Polyvinylalkohol-, Polyvinylnitrit- und Polypropylen- Fasern. Aramid- und Polyvinylalkohalfasern verfügen im Gegensatz zu den anderen Faserarten über eine relativ hohe Festigkeit und einen hohen E- Modul. Erstgenannte Fasern weisen im Zuge ihrer hohen Festigkeit, die im Bereich der von Glasfasern liegt, ein sprödes Verhalten auf. Eine dauerhafte Beständigkeit im alkalischen Milieu des Betons ist noch nicht ausreichend geklärt. [8]

### 2.6.2 Einfluss der Kunststofffasern auf Beton

Je nach Art und Eigenschaften der Kunststofffasern werden sie im Betonbau für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt. Fasern geringerer Festigkeit werden verwendet um eine vermehrte Rissbildung im jungen Beton einzuschränken. Die Fasern ermöglichen auch ein besseres Brandschutzverhalten des Betons. Besonders UHPC mit seinem dichten Gefüge ist bei Brandbelastung gefährdet. Das freie und gebundene Wasser im Zementstein verdampft, kann aber im sehr gefügedichten UHPC nur zu geringen Teilen nach außen dringen. Im weniger erhitzten Inneren kommt es zur Bildung einer Kondensationszone, die bei Sättigung als Dampfsperre wirkt. Der Dampfdruck in der Matrix zwischen Oberfläche und Sättigungszone steigt somit und führt zu Abplatzungen. Die Beimischung von Polypropylenfasern kann diese Auswirkungen stark reduzieren. Die Fasern verschwelen bei einem Temperaturanstieg frühzeitig und hinterlassen Hohl-

räume. Der Wasserdampf kann sich darin ausbreiten und es kommt nicht zu einem entsprechend hohen Dampfdruck der zur Zerstörung des Zementsteines führt [10].

Eine Festigkeits- und Duktilitätssteigerung des UHPC durch gewisse Kunststoffkurzschnittfasern ist möglich, jedoch nicht in dem Umfang wie sie durch Stahlfasern erreicht werden kann. Die Fasern führen zu einer verminderten Fließfähigkeit des Frischbetons.

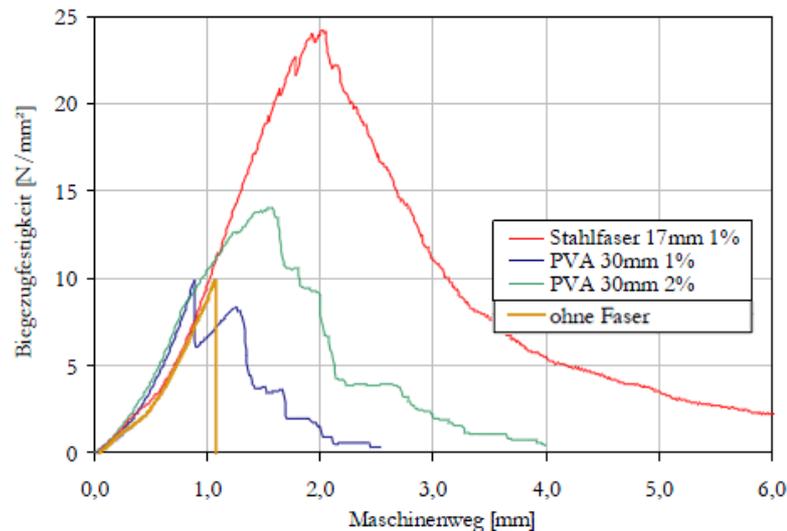


Abbildung 21: Biegezugfestigkeit von UHPC Prismen mit Polyvinylalkohalfasern, [18] modifiziert

### 2.6.3 Anwendungsbeispiele

Die Anwendung von Kunststoffkurzschnittfasern im Betonbau beschränkt sich Großteils darauf, einen höheren Brandwiderstand zu erhalten und die Frührissbildung zu minimieren. Kunststofffasern werden aber auch zur Herstellung flächiger textiler Strukturen verwendet, die bei Textilbeton Anwendung finden.

## 3 Werkstoff

### 3.1 Carbonfasern

Carbonfasern, mit Durchmesser von 7 bis 10  $\mu\text{m}$ , können auf unterschiedliche Arten produziert werden. Eine wirtschaftliche und damit heute häufig zum Einsatz kommende Methode ist die Pyrolyse von organischen Polyacrylnitrilfasern (PAN). Die bei der vorliegenden Arbeit eingesetzten Fasern wurden auf diese Weise produziert. PAN Fasern werden nicht nur zur Produktion von Carbonfasern eingesetzt, sie sind ein weitverbreitetes Material der Textilindustrie. Die Materialkennwerte (Herstellerangaben) der bei den experimentellen Untersuchungen eingesetzten Fasern sind in Tabelle 2 angeführt. Hierbei handelt es sich um Materialkennwerte die in Faserrichtung gültig sind. Quer zur Faserachse treten geringere Festigkeiten auf. Es kann von einer Querdrukempfindlichkeit ausgegangen werden, wie von den Faserherstellern bestätigt wurde, jedoch konnten im Bezug dazu keine Materialkennwerte zur Verfügung gestellt werden.

Tabelle 2: Carbonfaser - Materialkennwerte

<b>SIGRAFIL® C30</b>		
Faserdurchmesser	[ $\mu\text{m}$ ]	7
Zugfestigkeit	[GPa]	4,0
E-Modul	[GPa]	240
Dichte	[ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,80
Bruchdehnung	[%]	1,7
Schlichteanteil	[%]	2 – 4
Schlichtetyp		Glyzerin / Epoxidharz
Faserlänge*	[mm]	3/6

Polyacrylnitrilfasern, welche als Precursor (Ausgangsstoff) für die Carbonfaserherstellung dienen, werden durch Polymerisation des Acrylnitrils erzeugt. Dabei werden neben dem Acrylnitril Comonomere eingesetzt, welche die mechanischen Eigenschaften der PAN Fasern, sowie der daraus erzeugten Carbonfasern, beeinflussen. Durch sie kann auch die Temperatur, die für den Produktionsprozess notwendig ist, herabgesetzt werden. Der Polymerisation, von welcher verschiedene Methoden zur Anwendung kommen können, folgt der Spinnvorgang, bei welchem wiederum unterschiedliche Verfahren zur Auswahl stehen. Es werden sehr feine Fasern mit Durch-

messer unter 10  $\mu\text{m}$  erzeugt, da dies bei der Weiterverarbeitung zur Carbonfaser von Bedeutung ist. Die Faser kann dadurch bei der Oxidation schnell über den gesamten Querschnitt erhitzt werden. [7]

Der Umwandlungsprozess von der Polyacrylnitrilfaser (PAN) zur Carbonfaser gliedert sich in zwei Verfahrensstufen, Stabilisation (Oxidation) und Karbonisation, gefolgt von unterschiedlichen Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung der Faser (Abb. 22).

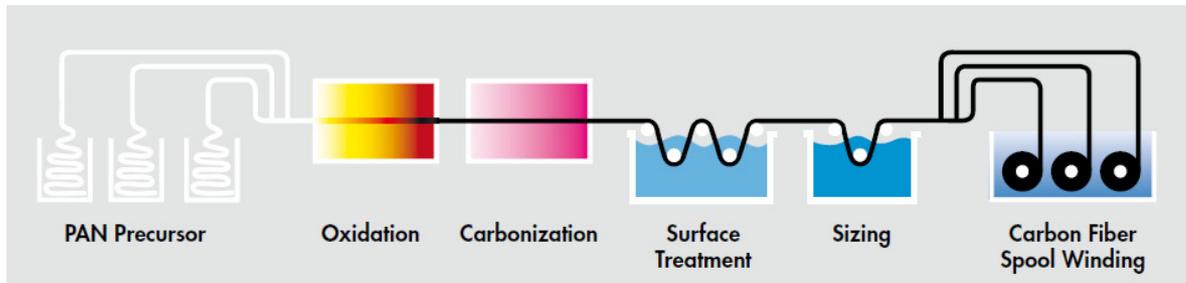


Abbildung 22: Produktionsprozess Carbonfaser, [3]

Der Precursor wird bei Temperaturen zwischen 200°C und 300°C stabilisiert. Durch den Umwandlungsvorgang kann die Faser anschließend bei höheren Temperaturen weiterverarbeitet werden ohne dass sie schmilzt. Es laufen zwei Vorgänge gleichzeitig ab, die Cyclisierung der Nitrilgruppe sowie die Dehydrierung der Kohlenstoffkette durch Luftsauerstoff (Abb. 23). Die Dichte der PAN Faser steigt durch die Stabilisation.

Die Karbonisation folgt der Stabilisation. Sie läuft bei ca. 1300°C im Stickstoffstrom ab. Der Stickstoff geht mit Elementen der Faser unter den herrschenden hohen Temperaturen Verbindungen ein, welche gasförmig entweichen. Zurück bleibt die Carbonfaser mit einem Kohlenstoffanteil von mindestens 95 %. Das Maximum an Faserfestigkeit wird bei 1300°C Verfahrenstemperatur erreicht. Der E - Modul in Längsrichtung der Faser steigt hingegen mit zunehmender Temperatur im Produktionsprozess an. Hochfestigkeitsfasern, HT (High Tensile) - Fasern genannt, werden deshalb bei 1300°C hergestellt, Fasern mit hohem E - Modul (HM-, oder High Modulus - Fasern) durchlaufen einen weiteren Prozessschritt, die Graphitierung. Diese läuft bei entsprechend gesteigerter Temperatur, im Vergleich zur Karbonisation, ab. [6] [7]

Bei den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit werden HT – Fasern eingesetzt.

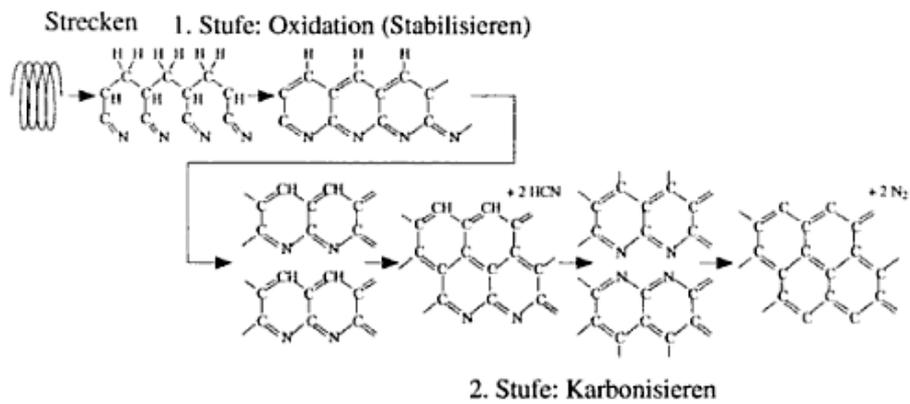


Abbildung 23: Stabilisation und Karbonisation der PAN Faser, [7]

Im Anschluss erfolgt eine zweistufige Oberflächenbehandlung. Die Fasern werden dabei mit einer Schichte überzogen, deren Anteil zwischen 2 und 4 % des Faserquerschnitts beträgt. Die Oberflächenbehandlung soll die Faser vor Beschädigung während der Weiterverarbeitung schützen und die Haftung zwischen Faser und Matrix verbessern [7].

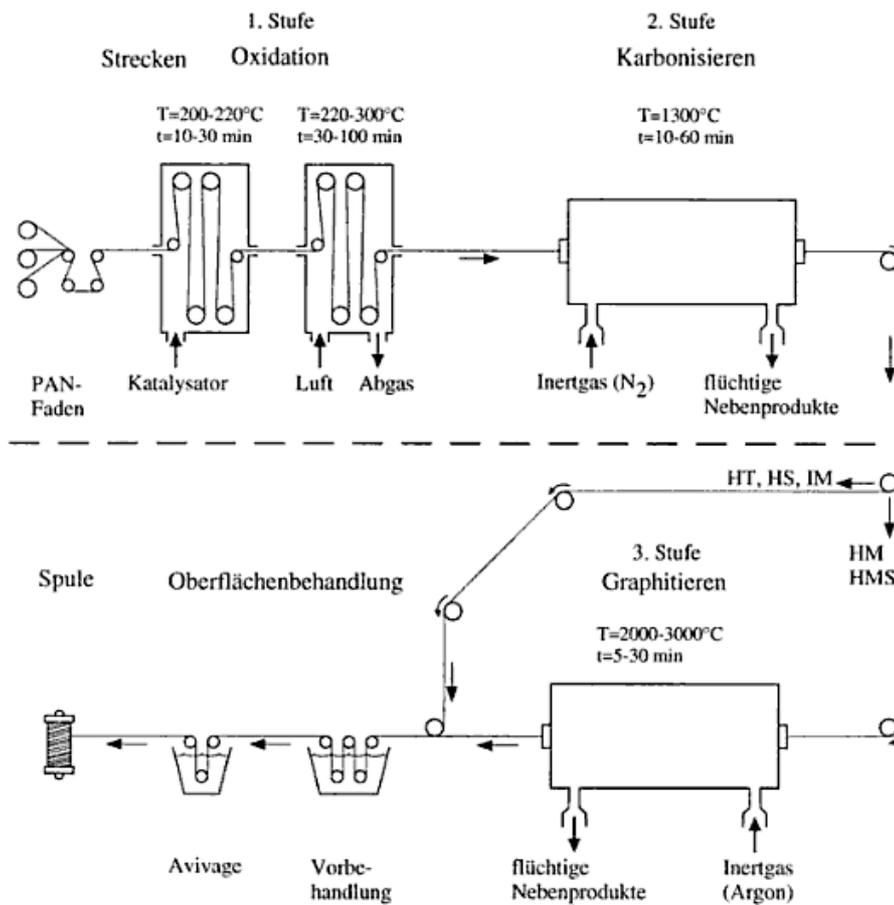


Abbildung 24: Produktionsprozess Carbonfaser, [7]

Der Schlichtetyp der Fasern wird abhängig von der Matrix, welche bei der weiterführenden Verarbeitung zum Einsatz kommen soll, gewählt. Für diese Arbeit wurden Fasern mit zwei unterschiedlichen Schichten zur Verfügung gestellt, zum Einen auf Glycerinbasis, zum Anderen mit einer Epoxidharzschichte. Die Glycerinschichte ist wasserlöslich, die Epoxidharzschichte bleibt auch im Wasser erhalten.

Die beschichteten Fasern werden zu Rovings gewebt. Abbildung 24 veranschaulicht den gesamten Produktionsprozess der Carbonfasern.

Bei der Kurzschnittfaserproduktion folgt anschließend das Schneiden der Rovings auf die gewünschte Länge. Die einzelnen Fasern der auf die gewünschte Länge gekürzten Rovings haften anfänglich meist noch zu Bündeln zusammen (s. Abb. 25), durch die weiterführende Verarbeitung, wie das Einmischen in UHPC lösen sie sich voneinander.



Abbildung 25: Kurzschnitt- Carbonfasern

## 3.2 Ultrahochfester Beton (UHPC)

Der ultrahochfeste Beton, welcher als Ausgangsmaterial des hier untersuchten carbonfaserverstärkten UHPC dient, wurde an der Universität Leipzig am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, unter der Leitung von Univ. Prof. Dr.–Ing. Nguyen Viet Tue, entwickelt. Die fünf Komponenten der UHPC Matrix, Zement, Wasser, Gesteinskörnung, Zusatzstoffe und Zusatzmittel, werden nachfolgend näher beschrieben. Als Zusatzstoffe werden Mikrosilica und Quarzmehl eingesetzt, als Zusatzmittel Fließmittel auf Polycarboxylatether Basis.

### 3.2.1 Zement

Vier Klinkermineralien,  $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$  und  $C_4AF$ , bilden die Hauptbestandteile des hydraulischen Bindemittels Zement. Sie reagieren unterschiedlich mit Wasser, dabei kommt es vorwiegend zur Bildung des festigkeitsbildenden Calciumsilicathydrat (CSH) und Calciumhydroxid ( $CA(OH)_2$ ). Ein wichtiges Kriterium der Wahl des Zementes für die Anwendung in UHPC ist dessen Klinkermineralienzusammensetzung. Meist wird der  $C_3A$  arme Zement CEM I HS verwendet. Durch  $C_3A$  kann es zu sekundärer Ettringitbildung im Beton kommen, diese geht mit einer Volumenzunahme einher und führt so im erhärteten Beton zu Spannungen. Für die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit wurde der Portlandzement CEM I 42,5 R HS gewählt, welcher  $C_3A$  frei ist. Zementkörner weisen in etwa einen mittleren Korndurchmesser von 10  $\mu m$  auf.

### 3.2.2 Mikrosilica

Das Mikrosilica mit einer Korngröße von 0,1 bis 0,3  $\mu m$  stellt die feinste Komponente im UHPC dar. Dadurch wirkt es sich zum Einen positiv auf die Betonfestigkeiten aus, indem es die Packungsdichte erhöht. Es ist feiner als Zement und kann dessen Hohlräume ausfüllen.

Zum Anderen wirkt es durch seine Reaktionsfähigkeit festigkeitssteigernd. Das verwendete Microsilica besteht zu 96% aus amorphem Siliciumdioxid ( $SiO_2$ ). Dieses reagiert puzzolanisch. Puzzolane sind hydraulische Bindemittel die reaktionsfähige Kieselsäure enthalten und mit Kalk und Wasser hydraulisch erhärten [4]. Wie unter 2.1 beschrieben, kommt es bei der Hydratation von Zement unter anderem zur Bildung von Calciumhydroxid ( $CA(OH)_2$ ). Dieses wirkt sich nachteilig auf die erzielbaren Festigkeiten des Festbetons aus. Das amorphe Siliciumdioxid reagiert mit dem

Calciumhydroxid unter der Bildung von CSH – Phasen. Diese entstehen auch bei der Hydratation des Zementes und wirken festigkeitsbildend. Der Einsatz von Microsilika führt zur Senkung des PH – Wertes.

### 3.2.3 Quarzmehl

Das verwendete Quarzmehl besteht zu mindestens 98 % aus kristallinem Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) und wird durch eisenfreie Vermahlung aus Quarzsand hergestellt. Der Korndurchmesser der Partikel liegt zwischen denen von Zement und Microsilica um eine hohe Packungsdichte zu erzielen.

Quarzmehl wird als teilweiser Ersatz des Zements angewendet. Um bei niedrigem Wasser / Zement (W/Z) Wert eine ausreichende Verarbeitung des UHPC zu erreichen, wird ein hoher Leimgehalt benötigt. Aufgrund des geringen W/Z Wertes kommt es nicht zur vollständigen Reaktion aller Zementkörner. Sie hydratisieren nur oberflächlich, dadurch bleiben Zementpartikel innerhalb der Hydratationsprodukte bestehen. Das Volumen des nicht hydratisierten Zements kann bei gleichem Wassergehalt durch Quarzmehl ersetzt werden, ohne die Festigkeit des Betons zu beeinträchtigen, wie in [2] gezeigt wurde. Voraussetzung dafür ist die Verwendung eines entsprechend feinkörnigen Zementes, um eine vollständige Hydratation sicher zu stellen. Bei grobkörnigem Zement kann die Bildung einer ausgeprägten Hydratationsschicht um das Zementkorn das Fortschreiten des chemischen Prozesses ins Korninnere hindern.

### 3.2.4 Fließmittel

Zum Erreichen hoher Festigkeiten wird der W/Z Wert des UHPC im Vergleich zu Normalbeton stark verringert. Um trotzdem fließfähigen Frischbeton zu erhalten wird während des Mischprozesses Fließmittel beigegeben. Aufgrund ihrer guten Wirksamkeit, kommen heute meist Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether zum Einsatz. Bei den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit wurde ein solches eingesetzt.

Der Haupteinfluss dieser Fließmittel liegt in der Absenkung der Fließgrenze bei gleichzeitig nur geringer Veränderung der Viskosität. Aufbau und Wirkungsweise des Polycarboxylatether ist in Abbildung 26 dargestellt. Dessen Moleküle bestehen aus einer Hauptkette mit angeschlossenen kurzen und langen Nebenketten. Die kurzen Nebenketten führen zur Adsorption der Moleküle an den Feststoffen, die Langen richten sich in die Gegenrichtung, den freien Raum, aus. Sie führen zur Gleitschichtbildung um die Partikel. Dies geschieht durch Stauchung der langen Polymerketten, Wasseranlagerung um den Feststoffpartikel und elektrostatische Effekte. Die Gleitschicht wird

erst nach einiger Zeit von den sich bildenden CSH Phasen überlagert und bleibt daher bis zu 90 min wirksam. [5]

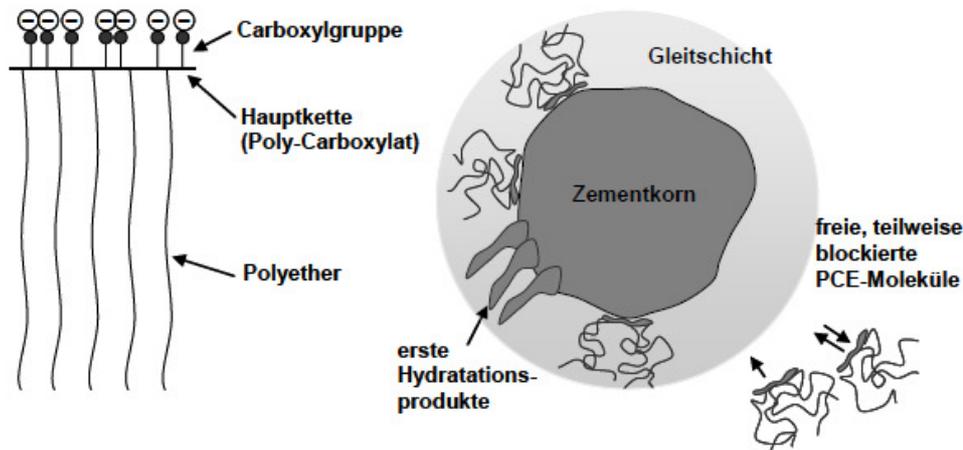


Abbildung 26: Funktionsweise von Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether, [5]

### 3.2.5 Gesteinskörnung

UHPC wird sowohl als Feinkornbeton mit Größtkorn unter einem Millimeter als auch Grobkornbeton mit Größtkorn von einigen Millimetern hergestellt. Bei der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung der Eignung von Carbonkurzschweifasern zur Verstärkung von UHPC kommt Feinkornbeton mit einem Korndurchmesser der Gesteinskörnung von 0,3 bis 0,8mm zum Einsatz. Der Korndurchmesser ist kleiner als die Carbonfaserlänge, welche 3mm bzw. 6mm beträgt.

Als Gesteinskörnung wird Quarzsand, welcher zu 98 % aus kristallinem Siliciumdioxid besteht, verwendet. Die Körner mit einer Kornrohichte von  $2,65 \text{ kg/dm}^3$  weisen eine runde Form auf. In Abbildung 23 sind die weiteren Bestandteile sowie die Kornverteilung dargestellt.

Physikalische Daten	
Feuchtigkeit	< 0,1%
Kornform	Rundkorn
Kornrohichte	ca. $2,65 \text{ g/ml}$
Schüttdichte	ca. $1,4\text{-}1,5 \text{ g/ml}$
Chemische Daten	
SiO <sub>2</sub> (MA.-%)	ca. - 98,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (MA.-%)	ca. 0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (MA.-%)	ca. 0,55
TiO <sub>2</sub> (MA.-%)	ca. 0,04

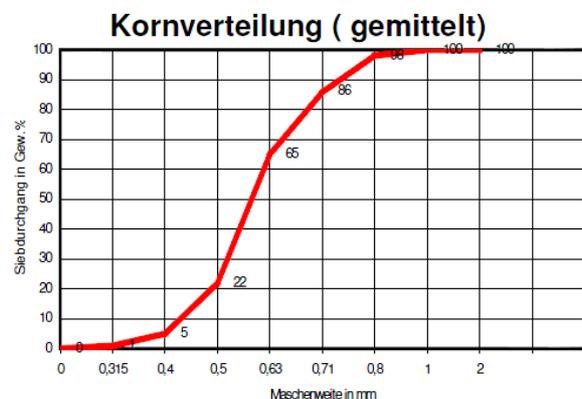


Abbildung 27: Quarzsand - Materialkennwerte und Kornverteilung, [23]

### 3.2.6 UHPC – Rezeptur

Zement, Microsilica und Quarzmehl bilden gemeinsam mit Wasser und Fließmittel den Leim. Dem Leimvolumen werden Gesteinskörnung, in diesem Fall Quarzsand mit Größtkorn 0,8mm, sowie die Carbonfasern beigemischt. Das Leimvolumen der Versuchsreihen wird bei variierender Fasermenge konstant gehalten. Mit steigendem Fasergehalt sinkt die Quarzsandmenge um deren Volumenverhältnis zum Leim beizubehalten.

Nachfolgende Tabelle 3 gibt die Anteile der bei der experimentellen Untersuchung dieser Arbeit verwendeten Komponenten in Abhängigkeit des Carbonfaservolumens an.

Tabelle 3: UHPC Rezeptur

Faservolumen	0,15	0,2	0,3	0,5	1,0	1,5	Vol.%
Zement CEM I 42,5 R HS	725	725	725	725	725	725	kg/m <sup>3</sup>
Microsilica	131	131	131	131	131	131	kg/m <sup>3</sup>
Quarzmehl	391	391	391	391	391	391	kg/m <sup>3</sup>
Wasser	203	203	203	203	203	203	kg/m <sup>3</sup>
Fließmittel Visko Crete 20 Gold	32	32	32	32	32	32	kg/m <sup>3</sup>
Carbonfasern	2,7	3,6	5,4	9	18	27	kg/m <sup>3</sup>
Quarzsand	860	859	857	851	838	825	kg/m <sup>3</sup>
Wasser /Zement Wert	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	-
Wasser /Bindemittel Wert	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237	-

Aufgrund des starken Einflusses der Carbonfasern auf die Rheologie des Frischbetons wurde im Laufe der Versuchsdurchführung der W/Z Wert einiger Versuchsreihen verändert. Des Weiteren wurde versucht durch Variation des Fließmittelgehaltes den Auswirkungen der Fasern auf die verminderte Fließfähigkeit des Frischbetons entgegenzuwirken. In Tab. 4 (Versuchsprogramm) ist dargestellt, dass diese Abweichungen einige Versuchsreihen mit geringem Faseranteil betreffen. Dem bereits bei niederem Fasergehalt deutlich werdenden Einfluss der Carbonfasern auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons wurde auf diese Weise versucht entgegen zu wirken. Es konnten jedoch keine Verbesserungen erzielt werden.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Zielsetzung

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist es, Kenntnis über die Eignung von Carbon- Kurzschnittfasern, der Firma SGL Group, zur Erhöhung der Festigkeit und Duktilität von UHPC zu erlangen. Grundvoraussetzung für die Eignung des mit Fasern verstärkten UHPC ist eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Frischbetons.

In der experimentellen Untersuchung wird der Einfluss des Fasergehaltes auf die Eigenschaften des UHPC ermittelt. Die Untersuchung jeder Rezeptur gliedert sich in Frisch- und Festbetonprüfung. Die Frischbetonprüfung liefert über die Fließfähigkeit der Zementmatrix Aussagen zur Verarbeitbarkeit des Materials. Die Biegezug- und Druckfestigkeit sowie die Versagensart (spröde / duktil) werden im Rahmen der Festbetonprüfung an den erhärteten Betonprobekörpern bestimmt.

### 4.2 Versuchsprogramm

Die Firma SGL Group stellte vier unterschiedliche Fasertypen zur Verfügung, die sich zum Einen in deren Länge (3mm und 6mm) und zum Anderen in deren Schlichte (Epoxidharz und Glycerin) unterscheiden. Der Einfluss aller vier Arten von Fasern auf den Feinkornbeton, abhängig vom beigemengten Volumen, soll untersucht werden.

Zu Beginn der Untersuchungen wurde von einem Volumenbereich der Carbonfasern von 0,3 bis 1 % des Gesamtvolumens ausgegangen. Die Fasern sollten in 0,1 % Abstufungen der UHPC Matrix beigegeben werden. Bei stahlfaserverstärktem UHPC ist ein Volumenprozent Fasern eine übliche Beigabemenge. Da die Zugfestigkeit der Carbonfasern über jener der Stahlfasern liegt und sie außerdem eine weitaus höhere Schlankheit aufweisen, was die Fließfähigkeit des Betons abmindert, wurde ein sinnvolles Beigabevolumen der Carbonfasern von unter einem Volumenprozent erwartet. Es zeigte sich, dass bereits 0,3 Volumenprozent an Fasern zu einem nicht fließfähigen Frischbeton führen. Deshalb wurde das Versuchsprogramm entsprechend abgeändert.

Auf Grund der eingeschränkten Fließfähigkeit des Frischbetons wurden der W/Z – Wert sowie der Fließmittelgehalt als weitere Parameter in das Versuchsprogramm aufgenommen. Als bestimmend für die Eigenschaften des faserverstärkten UHPC ergaben sich auch die Mischdauer und der Zeitpunkt der Faser bzw. Sandzugabe.

---

Für die in Tab.4 dargestellten Versuchsreihen wurden das Ausbreitmaß, die Biegezugfestigkeit, die Druckfestigkeit und das Nachrissverhalten bestimmt. Die Ermittlung des Ausbreitmaßes erfolgte unter Verwendung eines Hägermann- Setztrichters. Die Prüfung der Biegezug- und Druckfestigkeit des carbonfaserverstärkten UHPC wurde in Anlehnung an die Zementprüfung nach DIN EN 196 -1 durchgeführt. Dementsprechend wurden prismenförmige Probekörper mit den Abmessungen 40x40x160 mm hergestellt. Pro Versuchsreihe wurden jeweils drei Probekörper betoniert und geprüft.

Um Aufschluss über das Verbundverhalten der Fasern, deren Versagensmechanismus und deren Verteilung und Orientierung zu bekommen, wurden ausgewählte Proben unter einem Lichtmikroskop sowie unter einem Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 4 dargestellt. Nachfolgende Punkte (4.2.1 – 4.2.5) erläutern dieses.

#### **4.2.1 Versuchsserien**

Neben den in Tabelle 4 angeführten Versuchsserien wurden zu Beginn und im Laufe der experimentellen Untersuchungen noch Vorversuche durchgeführt (Serien Nr. 1-3, 9-12). Diese dienen der weiteren Festlegung der Arbeitsweise und werden für die Darstellung der Ergebnisse nicht benötigt. Sie deuteten bereits darauf hin, dass durch einen niederen Carbonfasergehalt kaum Auswirkungen auf die Eigenschaften von UHPC erzielt werden können.

#### **4.2.2 Probenlagerung**

Die Probekörper der ersten Versuchsserien wurden zwischen dem Ausschalen nach 24h und der Festbetonprüfung an der Luft unter Normklimabedingungen gelagert. Besonders bei kleinformatischen Betonproben wirkt sich das durch Luftlagerung auftretende Austrocknen auf die Festigkeit aus. Es kommt zur Bildung von festigkeitsmindernden Mikrorissen. Aus diesem Grund wurde auf eine Wasserlagerung übergegangen.

#### **4.2.3 Faserzugabe**

Die Faserzugabemenge jeder Faserart wird in Volumenprozent (Vol. %) der Frischbetonmenge angegeben. Da es sich bei den Vorversuchen zeigte, dass ein geringer Fasergehalt nicht merklich zu einer Steigerung der Festigkeit führt, wurden zuerst hohe Fasermengen beigegeben. Bei den verschiedenen angewendeten Mischabläufen kommt es zur Variation der Faserart und Zugabemenge.

---

#### **4.2.4 Wasser/Zement (W/Z) – Wert und Fließmittelgehalt**

Die Carbonfasern im Frischbeton führen zu einer ausgeprägten Beeinflussung des Fließverhaltens des Frischbetons. Durch die Variation des W/Z Wertes und des Fließmittelgehaltes wird versucht dieser Beeinflussung entgegen zu wirken.

#### **4.2.5 Mischdauer – Mischvorgang**

Veränderungen des Mischvorganges führen zu Unterschieden in der Faserverteilung, wie auch zum Bruch oder Erhalt von Fasern. Dies führt zu Auswirkungen auf die Eigenschaften des UHPC. Es werden deshalb zu den unterschiedlichen Mischmethoden jeweils mehrere Versuchsserien erstellt um Aussagen über deren Einfluss treffen zu können.

Serien-Nr.	Probenlagerung		Faserzugabe [Vol%]					W/Z Wert	Fließmittel [% Zementgehalt]	Misch-variante	Zementleim		Mischdauer [s]		Matrix mit Quarzsand		Anmerkung Mischvorgang	REM
	Luft	Wasser	EPY 3	EPY 6	GLY 3	GLY 6	S				Fasern	Quarzsand	Fasern	Quarzsand	Fasern	Quarzsand		
4	x			2				0,25	4,4	1	600	30	240			x		
5	x							0,25	4,4	1	450	240						
6	x				1			0,25	4,4	1	450	30	210					
7	x		1					0,25	4,4	1	510	10	240					
8	x			1				0,25	4,4	1	450	10	240					
13		x						0,27	4,4	1	270	240						
15		x		1,5				0,27	4,4	2	330	210	30			X		
16		x		1				0,27	4,4	2	210	180	30					
17		x		0,3				0,27	4,4	2	330	180	35					
18		x	0,3					0,27	4,4	2	345	180	35					
19		x	0,5					0,30	5,8	2	185	180	35					
20		x		0,5				0,32	6,5	2	160	180	45					
21		x			0,3			0,30	5,4	3	230	180	25			X		
22		x			0,3			0,32	5,6	3	210	180	30					
23		x			0,15			0,27	4,4	3	990	180	45		Fasern gewaschen	X		
24		x	0,15					0,28	4,4	3	270	180	30			X		
25		x	0,2					0,28	4,4	3	210	240	30					
26		x	0,3					0,28	4,4	3	270	180	35					
27		x		0,15				0,28	4,4	3	240	240	30			X		
28		x		0,2				0,28	4,8	3	210	240	35					
29		x		0,3				0,28	5,6	3	270	240	40					
30		x		0,15				0,28	4,4	3	240	180	30					
31		x			0,15			0,28	4,4	3	270	180	30					
32		x		0,2				0,28	7,5	3	210	180	35					
33		x			0,2			0,28	9	3	210	180	35					
34		x		1,5				0,28	5,4	3	300	240	30					
35		x		1				0,28	4,4	3	330	240	35					
36		x				0,33		0,28	4,4	1	300	10	240					
37		x				1,67		0,28	4,4	1	300	10	240					
38		x		1				0,28	4,4	1	300	10	300					
39		x			1			0,28	4,4	1	300	10	300					
40		x						0,28	4,4	1	300	240						

Tabelle 4: Versuchsprogramm

### 4.3 Herstellung der Probekörper

Entsprechend der in Abschnitt 3 vorgestellten Rezeptur, wird der Frischbeton an der Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt (TVFA) der TU Graz aus den Einzelkomponenten gemischt. Es handelt sich um eine Feinkorn- UHPC Mischung mit einem Größtkorn von 0,8mm. Mit einem dreistufigen Horbat Mischer wird zuerst der Zementleim hergestellt, anschließend werden die Fasern und der Quarzsand beigegeben.

Für die Fertigung von drei Probekörpern werden 0,77l und für die Bestimmung des Ausbreitmaßes 0,35l Frischbeton benötigt. Pro Mischvorgang werden 2l Frischbeton hergestellt. Diese Mindestmenge wird für den Betrieb des verwendeten Mörtelmischers benötigt.

Das Mischen gliedert sich in drei Abschnitte, wobei die Dauer und Intensität dieser von den unterschiedlichen Betonrezepturen abhängen.

Begonnen wird mit dem Trochenmischen des Mehlkorns bei mittlerer Intensität. Dieser Vorgang dauert 30 Sekunden. Das Mehlkorn setzt sich aus Zement, Silicastaub und Quarzmehl zusammen, wobei diese drei Komponenten im Verhältnis 5,5:1:3 zueinander stehen.

Der zweite Abschnitt beginnt mit der Zugabe des Wassers und des Fließmittels. Die Flüssigkeiten werden während des Mischens bei mittlerer Stufe zugegeben. Danach wird die Mischintensität auf die dritte und somit höchste Stufe gesteigert. Die Verflüssigung tritt nach drei bis vier Minuten, abhängig vom W/Z Wert, ein.

Der dritte Abschnitt wird im Verlauf der Versuchsphase, entsprechend dem Erkenntnisgewinn, variiert. Zu Beginn der Versuchsreihen wird wie bei der Verwendung von Stahlfasern vorgegangen. Das heißt, es werden dem Leim während des Mischens bei mittlerer Stufe, zuerst der Quarzsand und gleich darauffolgend die Carbonfasern zugegeben. Anschließend folgen vier Minuten Mischen, bevor der Beton in die Schalung gegossen wird. Dieses Vorgehen wird in Folge „Mischvariante 1“ genannt. Da es sich herausstellte, dass die Fasern bei längerem gleichzeitigem Mischen mit dem Quarzsand brechen, wurde nach Alternativen gesucht.

Mit der Zugabe der Carbonfasern wird erst nach dreiminütigem Vermischen von Zementleim und Quarzsand gestartet. Danach werden die Fasern während des Mischens auf Stufe 1 zugegeben. Die Mischdauer mit Fasern beträgt zwischen 30 und 45 Sekunden. Bei dieser Vorgehensweise zeigt sich eine ungleichmäßige Faserverteilung. Dieser

Ablauf wird als „Mischvariante 2“ bezeichnet. Die Bruchflächen der mit diesem Beton hergestellten Proben weisen Bündel von Fasern auf. Die kurze Mischdauer mit Fasern reicht nicht aus, um eine gleichmäßige Verteilung zu erzielen.

Eine weitere Variante des dritten Mischabschnitts, ermöglicht eine gleichmäßige Verteilung der Carbonfasern. Die Fasern werden dem Leim zugegeben. Nach dreiminütigem Mischen bei mittlerer Stufe wird erst der Quarzsand beigemischt. Es folgen 30 Sekunden Mischen auf Stufe 1. Die Bruchfläche der darauffolgend hergestellten Proben, wiesen keine mit freiem Auge erkennbaren Faserbündel auf. Diese Vorgehensweise beim Mischen wird als „Mischvariante 3“ bezeichnet.



Abbildung 28: Horbat Mischer/ dreiteilige Stahlschalung

Der Frischbeton wird in zuvor vorbereiteten Stahlschalungen eingegossen. Als Schalung werden mit Schalöl bestrichene Stahlformen nach DIN EN 196 -1 verwendet. Mit einer Form können jeweils drei Probekörper hergestellt werden. Die Form besteht aus einer Grundplatte, auf welche Stahlplatten als seitliche Schalflächen durch Verschrauben befestigt werden. Da es sich um selbstverdichtenden Beton handelt, werden nach dem Einbringen keine Verdichtungsmaßnahmen durchgeführt.

In Folge werden die mit Folie abgedeckten Schalungen bei Normklima (20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit) für 24 Stunden gelagert. Die ausgeschalteten Probekörper wurden bis zur Prüfung nach sieben Tagen in auf 20°C temperiertem Wasser aufbewahrt.

## 4.4 Versuchsaufbau

### 4.4.1 Frischbetonprüfung

Als Indikator für die Verarbeitbarkeit jeder UHPC – Versuchsreihe wird das Ausbreitmaß des Frischbetons bestimmt. Unmittelbar nach dem Einbringen des UHPC in die Stahlform wird die Ausbreitmaßbestimmung am verbleibenden Beton durchgeführt. Für die Prüfung werden ein Hägermann- Setztrichter sowie ein Ausbreittisch benötigt. Der Setztrichter aus rostfreiem Stahl weist die Form eines Kegelstumpfes mit einer Höhe von 60mm, einem unteren Innendurchmesser von 100mm und einem oberen von 70mm auf. Der Trichter sowie der 70x70 cm messende Ausbreittisch werden vor der Einbringung des UHPC befeuchtet. In den, am eben ausgerichteten Ausbreittisch zentral positionierten Hägermann – Setztrichter wird der UHPC ohne Verdichtung bis zur Oberkante eingebracht. Anschließend wird der Trichter langsam senkrecht nach oben gezogen. Der Frischbeton breitet sich je nach Konsistenz am Ausbreittisch aus. Nach drei Minuten, sobald der Beton nicht mehr fließt, wird das Ausbreitmaß gemessen. Es ergibt sich als mittlerer Durchmesser des UHPC am Ausbreittisch.

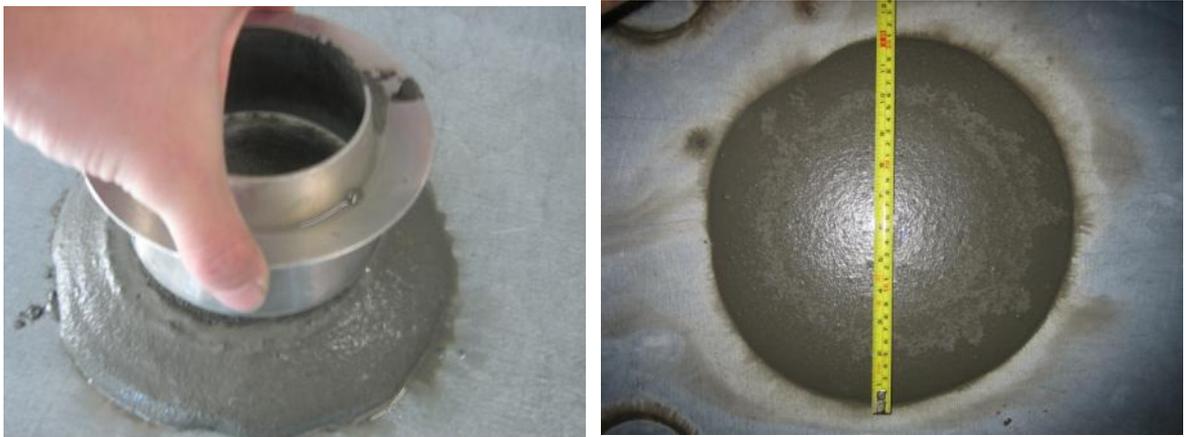


Abbildung 29: Ausbreitversuch mit Hägermann Setztrichter

#### 4.4.2 Festbetonprüfung

Zur Festbetonprüfung zählen die Prüfung der Biegezug- und Druckfestigkeit, sie werden in dieser Reihenfolge durchgeführt. Der Prüfkörper bricht durch die Biegezugprüfung in zwei Hälften, an welchen anschließend die Druckprüfung durchgeführt wird.

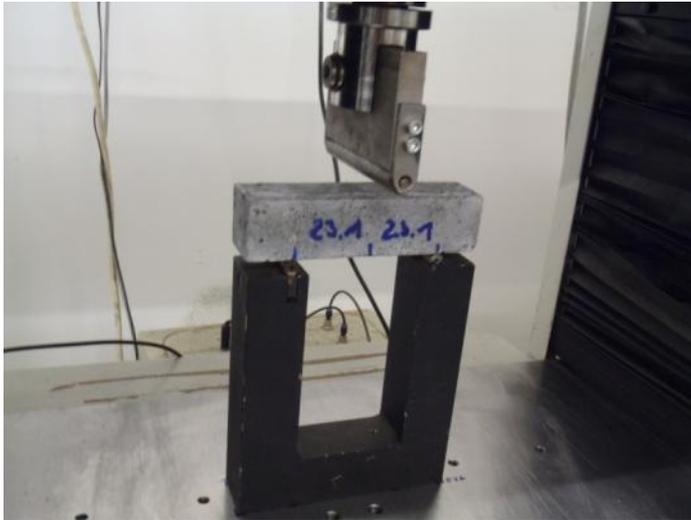


Abbildung 30: Dreipunktbiegezugprüfung



Abbildung 31: Druckprüfung

Die Biegezugprüfung wird als Dreipunktbiegeversuch ausgeführt. Dies geschieht in Anlehnung an die Norm: DIN 196-1 Prüfverfahren für Zement. Durchgeführt wird die Prüfung an einer weggesteuerten Shimadzu 50kNG Prüfanlage.

Die Prüfanlage verfügt über zwei Auflagerstahlrollen im Abstand von 100mm und eine mittige Stahlrolle zum Einbringen der Last. Eine der Auflagerrollen, sowie die Lastschneide sind leicht schwenkbar ausgeführt, um keine Torsionsbeanspruchung einzuleiten. Durch Schwinden des Betons, kann es zu Formänderungen des Prüfkörpers kommen. Um die dadurch entstehenden Abweichungen auszugleichen, ist die Schwenkbarkeit der Stahlrollen gefordert.

Der UHPC Prüfkörper wird mittig auf den zwei Auflagerrollen positioniert, es ergibt sich so ein seitlicher Überstand des Prismas von je 3cm. Die Lasteinleitung erfolgt durch die spindelgetriebene, mittige Stahlrolle mit einer Geschwindigkeit von 0,2 mm/min. Nach einem Lastabfall um 80% der Maximallast, wird die Prüfung beendet. Auf Grund des starken Lastabfalles im Nachrissbereich wurde, bei der Prüfung der Proben 34 und 35, die Schwelle zum Belastungsabbruch verringert um einen breiteren

Aufzeichnungsbereich zu erhalten. Das Prüfgerät zeichnet den Verlauf der Last – Durchbiegungsbeziehung, sowie die maximale Biegezugfestigkeit auf. Aus der aufgebrauchten Last und der Prismengeometrie lässt sie die Biegespannung wie folgt bestimmen.

$$f_{cb} = \frac{M}{W} = \frac{3}{2} * \frac{F * l}{b * h^2} \quad [N/mm^2]$$

mit

M: einwirkendes Moment beim Versagen des Querschnittes

W: Widerstandsmoment des Querschnittes

F: Versagenslast

l: Spannweite zwischen Auflagerpunkten

b: Breite des Prismenquerschnittes

h: Höhe des Prismenquerschnittes

Im Anschluss wird die Druckfestigkeit des faserverstärkten UHPC, an einer Prüfmaschine der Firma Toni Technik mit 300kN Maximallast, ermittelt. Auch diese Prüfung erfolgt nach der Norm: DIN 196-1 Prüfverfahren für Zement. Jede der zwei Hälften, des bei der Biegezugprüfung gebrochenen Prismas, wird mittig auf der 40mm x 40mm großen Aufsatzfläche positioniert. Eine ebenso große Gegenplatte befindet sich an der Oberseite. Durch die beiden Stahlplatten, welche gegeneinander gepresst werden, wird der dazwischen positionierte Prüfkörper auf Druck belastet. Die Maschine ist kraftgesteuert, d.h. die Last wird linear bis zum Bruch gesteigert. Als Ausgabe der Prüfmaschine erhält man die maximale Druckkraft, welche zum Bruch führte, bzw. die Versagenslast. Daraus wird die Druckfestigkeit  $f_c$  wie folgt bestimmt.

$$f_c = \frac{F}{A} = \frac{F}{l * b} \quad [N/mm^2]$$

mit

F: Versagenslast

A: Lasteinleitungsfläche

l: Länge der Lasteinleitungsfläche (40mm)

b: Breite der Lasteinleitungsfläche (40mm)

## 4.5 Ergebnisse

Die Frisch- und Festbetonprüfung sowie die Untersuchungen mit verschiedenen Mikroskopen ermöglichen Aussagen über den Einfluss des Fasergehaltes auf die Eigenschaften des Carbonfaser - verstärkten UHPC. Die Verarbeitbarkeit, die Festigkeit wie auch das Bruchverhalten sind die Eigenschaften des UHPC, die im Zuge der vorliegenden Arbeit untersucht werden. Sie werden neben dem Fasergehalt und der Faserart von verschiedenen Parametern, wie der UHPC Rezeptur, dem W/Z Wert, dem Fließmittelgehalt, dem Mischablauf wie auch der Mischintensität, beeinflusst. Aufgrund des starken Einflusses der Fasern auf die Fließfähigkeit des Betons und der Sprödeheit der Fasern werden die Parameter W/Z Wert, Fließmittelgehalt, Mischablauf und Mischintensität variiert. Sie fließen in die Darstellung der Ergebnisse mit ein.

Neben den Eigenschaften des Carbonfaser- verstärkten UHPC wird in diesem Kapitel auch auf das Verhalten der Fasern beim Bruch eingegangen. Es werden auch Ergebnisse der Untersuchung von Proben mit während des Mischvorganges gebrochenen Carbonfasern dargestellt. Weiters kommt es zur Gegenüberstellung von Carbonfaser- verstärktem UHPC und Stahlfaser- verstärktem UHPC.

Die Ergebnisse werden wie folgend gegliedert:

- Grenze der Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit des Fasergehaltes
- Einfluss des Fasergehaltes auf Biegezug- und Druckfestigkeit
- Einfluss der Faserverteilung auf die Duktilität
- Bruchmechanismus und Verbundverhalten der Fasern
- Festigkeit und Verarbeitbarkeit von UHPC mit gebrochenen Carbonfasern
- Vergleich Carbonfaser - verstärkter UHPC – Stahlfaser - verstärkter UHPC

Nachfolgende Tab. 5 gibt eine Übersicht der Einzelergebnisse des Versuchsprogrammes. Die Versuchsreihen 4 – 8 sind dabei gesondert zu betrachten, da die Probekörper bis zur Prüfung an der Luft und nicht wie die folgenden Versuchsreihen im Wasser gelagert wurden. Alle Ergebnisse sind in Abhängigkeit des W/Z Wertes, des Fließmittelgehalts, der Faserverteilung und dem Fasererhalt beim Mischen zu sehen.

---

Serien Nr.	Prüfdatum	Probenlagerung		Probenalter [d]	Faserart [Vol%]			WZ Wert	Fließmittel [% Zementgehalt]	Dichte	Ausbreitmaß	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	Versagensart spröde duktil	Faserverteilung gleichmäßig idelt	Faserbruch d. Mischen	
		Luft	Wasser		EPY 3	EPY 6	GLY 3										GLY 6
4	23.09.10	x		7		2		0,25	4,4	2,27	13	14,92	128,3	X		X	
5	24.09.10	x		7				0,25	4,4	2,28	30	8,73	112,1	X		X	
6	24.09.10	x		7			1	0,25	4,4	2,26	13	11,79	117,5	X		X	
7	27.09.10	x		7		1		0,25	4,4	2,27	27	10,65	114,6	X		X	
8	27.09.10	x		7		1		0,25	4,4	2,26	23	9,66	110,2	X		X	
13	19.10.10		x	7				0,27	4,4	2,29	30	13,61	114,2	X			
15	21.10.10		x	7		1,5		0,27	4,4	2,29	10	23,13	116,5		X		
16	21.10.10		x	7		1		0,27	4,4	2,25	10	22,21	116,3		X		
17	22.10.10		x	7		0,3		0,27	4,4	2,25	15	14,69	107,0	X			
18	22.10.10		x	7		0,3		0,27	4,4	2,25	16	14,47	106,3	X			
19	27.10.10		x	7		0,5		0,30	5,8	2,22	19	12,62	95,8	X			
20	27.10.10		x	7				0,32	6,5	2,19	23	11,57	86,6	X			
21	29.10.10		x	7			0,3	0,30	5,4	2,18	12	12,44	92,4	X			
22	29.10.10		x	7			0,3	0,32	5,6	2,17	12	11,46	76,4	X			
23	04.11.10		x	7			0,15	0,27	4,4	2,26	25	13,25	97,3	X			
24	09.11.10		x	7		0,15		0,28	4,4	2,28	22	14,64	103,5	X			
25	09.11.10		x	7		0,2		0,28	4,4	2,23	19	13,68	104,8	X			
26	10.11.10		x	7		0,3		0,28	4,4	2,21	13	13,47	107,8	X			
27	10.11.10		x	7			0,15	0,28	4,4	2,24	21	12,65	105,1	X			
28	16.11.10		x	7			0,2	0,28	4,8	2,24	17	12,72	97,5	X			
29	16.11.10		x	7			0,3	0,28	5,6	2,21	12	12,42	92,8	X			
30	17.11.10		x	7		0,15		0,28	4,4	2,26	17	14,45	98,5	X			
31	17.11.10		x	7			0,15	0,28	4,4	2,24	17	12,85	105,0	X			
32	22.11.10		x	7		0,2		0,28	7,5	2,23	16	12,78	94,0	X			
33	22.11.10		x	7			0,2	0,28	9	2,17	13	11,14	79,5	X			
34	23.11.10		x	7		1,5		0,28	5,4	2,21	10	20,52	110,2	X			
35	14.12.10		x	7		1		0,28	4,4	2,26	10	16,80	118,1	X			
36	20.12.10		x	7				0,33	0,28	4,4	2,28	30	13,18	116,3	X		
37	20.12.10		x	7				1,67	0,28	4,4	2,35	30	16,66	127,8	X		
38	17.02.10		x	7		1		0,28	4,4	2,27	28	13,83	113,1	X		X	
39	10.03.11		x	7			1	0,28	4,4	2,29	14	14,95	116,4	X		X	
40	10.03.11		x	7				0,28	4,4	2,28	30	13,51	103,5	X			

Tabelle 5: Übersicht Prüfergebnisse

### 4.5.1 Grenze der Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit des Fasergehaltes

Zum Erreichen hoher Festigkeiten des UHPC ist ein sehr kompaktes Gefüge des Zementsteines erforderlich. Der Frischbeton muss in der Lage sein, auch komplizierte, feine Schalformen hohlraumfrei auszufüllen. Für eine optimale Verarbeitbarkeit muss die UHPC Matrix sehr fließfähig sein. Luftporen im Beton wirken sich negativ auf die Festigkeit des Materials aus. Um diese zu vermeiden muss der Frischbeton gut verdichtbar sein oder selbstverdichtende Eigenschaften aufweisen. Für einen optimalen Einsatz sind selbstverdichtende Eigenschaften von Vorteil. Sie werden auch für die Anwendung des mit Carbonfaser – bewehrten UHPC angestrebt.

Als Maß für die Fließfähigkeit und damit auch für die Verarbeitbarkeit, wird das Ausbreitmaß des Frischbetons im Zuge der Frischbetonprüfung bestimmt. Der Vorgang der Frischbetonprüfung unter der Verwendung des Hägermann – Setztrichters ist in Kapitel 4.4.1 Frischbetonprüfung beschrieben. Das Ausbreitmaß der verwendeten Betonrezeptur ohne Fasern liegt bei 30cm. Mischungen mit Fasern sollten einen Mindestwert von 20cm nicht unterschreiten um die Verarbeitbarkeit des Betons nicht wesentlich negativ zu beeinflussen.

Eine der Hauptkenntnisse der vorliegenden Arbeit ist, dass ein Ausbreitmaß von über 20 cm nur bei einem Fasergehalt bis maximal 0,15 Vol. % möglich ist. Eine positive Auswirkung der beigefügten Fasern auf die mechanischen Eigenschaften des UHPC, bei den eben erwähnten geringen Beimengungen, konnte nicht nachgewiesen werden. Bei einem Faserzusatz über 0,15 Vol. % konnte auch durch eine starke Steigerung des Fließmittelgehaltes keine nennenswerte Steigerung der Fließfähigkeit des Betons erzielt werden.

---



a| ohne Fasern, d=30cm



b| 0,15 Vol % EPY 3 d=22cm



c| 0,2 Vol % EPY 3, d=19cm



d| 0,3 Vol% EPY 3, d=13cm

Abbildung 32: Beeinflussung der Fließfähigkeit des UHPC durch Carbonfasern

Die Bilder in Abbildung 32 verdeutlichen den Einfluss der Carbonfasern auf das Ausbreitmaß des Frischbetons. Das beigemengte Faservolumen wurde schrittweise gesteigert und führte bei den 3mm langen Fasern bereits ab einem Fasergehalt von 0,2 Vol. % zu einem Ausbreitmaß unter 20 cm. Eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Frischbetons ist somit schon bei geringen Fasermengen nicht mehr gegeben.

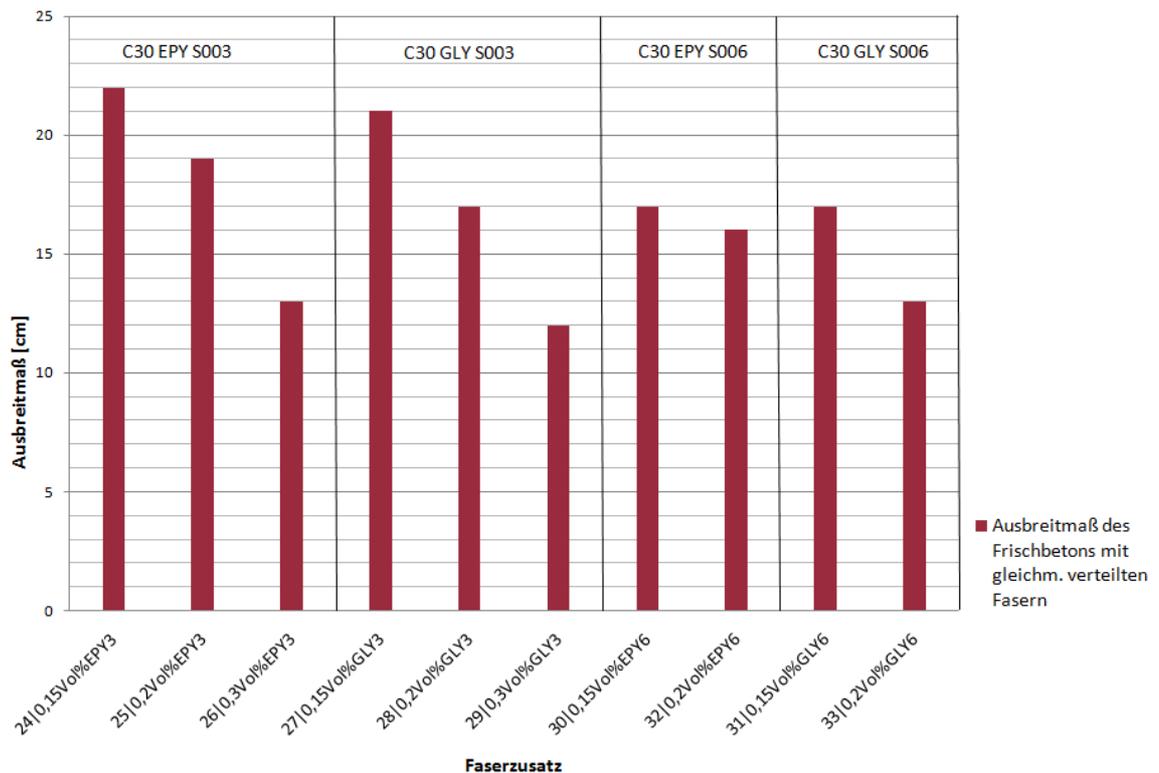


Abbildung 33: Ausbreitmaß in Abhängigkeit vom Faserzusatz

Abbildung 33 zeigt die Verringerung des Ausbreitmaßes durch die Steigerung der Fasermenge im UHPC für alle vier Faserarten. Die Fasern aller dargestellten Versuchsreihen wurden beim Mischen gleichmäßig verteilt und, auf Grund der Quarzsandzugabe gegen Ende der Mischprozedur, Großteils in ihrer Länge erhalten. Wegen der starken Abnahme der Fließfähigkeit der Matrix, wurde das beigemengte Faservolumen für diese Betrachtung nicht über 0,3 Vol. % (3mm Fasern) bzw. 0,2 Vol. % (6mm Fasern) gesteigert, da UHPC mit der dabei auftretenden Konsistenz nicht mehr praxistauglich verarbeitbar ist.

Die feinen Carbonfasern mit einem Durchmesser von 7  $\mu\text{m}$  bilden im verteilten Zustand eine sehr dichte in sich vernetzte Struktur, die den UHPC am Fließen hindert. Abb. 34 soll dies veranschaulichen. Sie zeigt 6mm lange Carbonfasern mit Glycerinschlichte vor und nach dem Einmischen in Wasser. Die anfänglich vom Herstellungsprozess noch aneinander haftenden Fasern bilden nach dem Einmischen in Wasser eine dichte räumliche Struktur, die ein großes Volumen einnimmt. Die sehr schlanken Fasern, damit sind solche mit einem großen Längen- zu Durchmesser- (L/D) Verhältnis gemeint, bilden auch in der Zementmatrix ein dichtes Netzwerk, an dem der Frischbeton anhaftet. Dieses ist so stabil, dass es die Matrix am Fließen hin-

dert. Die 6mm langen Carbonfasern weisen ein L/D Verhältnis von  $\sim 860$  auf, die 3mm langen Fasern einen Wert von  $\sim 430$ . Im Vergleich dazu liegt das L/D Verhältnis von Stahlfasern im Allgemeinen unter 100.

Sechs Millimeter lange Mikrostahtfasern mit einem Durchmesser von 0,175mm, die in dieser Arbeit zum Vergleich mit den Carbonfasern herangezogen werden, weisen ein L/D Verhältnis von 34 auf. Fasern dieser Proportion führen bei üblichen Zugabemengen (1-2 Vol. %) zu keiner merkbaren Reduktion der Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Die gedrungenen Stahlfasern bilden, im Gegensatz zu den schlanken Carbonfasern, während des Einbringens des Betons in die Schalung kein Fasergerüst, welches die Fließfähigkeit einschränkt.

Abbildung 33 zeigt, dass die Verwendung von 6 mm langen Fasern zu einer stärkeren Reduktion der Fließfähigkeit führt als die Zugabe von 3 mm langen Fasern. Ausschlaggebend dafür ist das ungünstigere Längen zu Durchmesser (L/D) Verhältnis der längeren Carbonfasern.

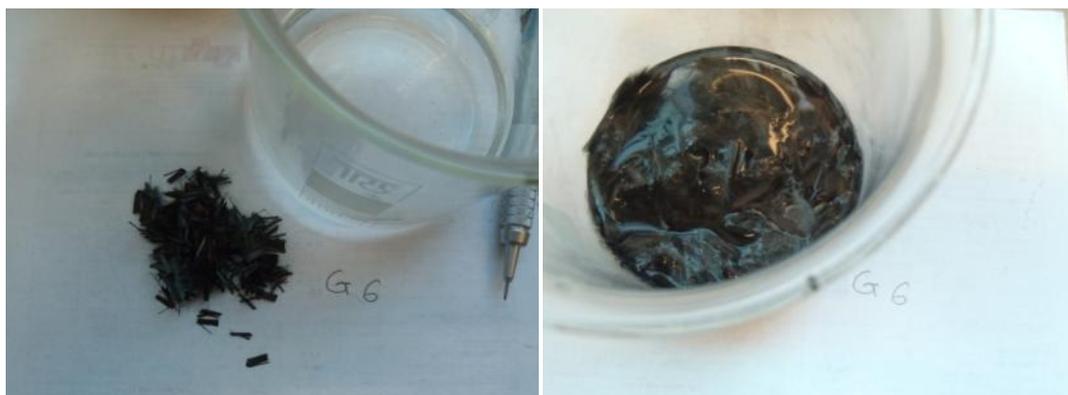


Abbildung 34: Fasern mit Glycerinschlichte vor und nach der Wasserzugabe

Aus Abbildung 33 geht weiter hervor, dass Fasern mit Glycerinschlichte das Ausbreitmaß etwas stärker verringern als Fasern mit Epoxidharzschlichte. Die wasserlösliche Schlichte scheint sich auf die Konsistenz auszuwirken. Da sich das Glycerin im Wasser löst, kommt es sehr rasch zum Auffächern der Faserbündel. Für eine gleichmäßige Verteilung in der Zementmatrix ist aber ein ausreichend langer Mischprozess notwendig. Fasern mit Epoxidharzschlichte lösen sich durch Mischen im Zementleim voneinander, das reine Einstreuen in Wasser führt noch nicht zum Expandieren der Faserbündel. Abbildung 35 zeigt, dass auch die Fasern mit Epoxidharzschlichte nach dem Mischen im Zementleim nicht mehr aneinander haften. Sie werden durch den Mischprozess räumlich verteilt.

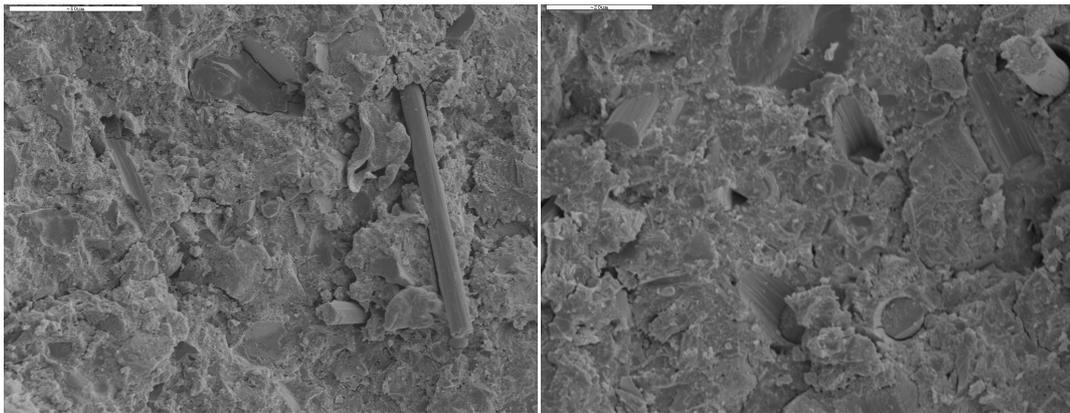


Abbildung 35: Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop:  
0,15 Vol.% Fasern / 2 Vol.% Fasern mit Epoxidharzschlichte

Die Carbonfasern weisen im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Mikrostahtfasern, bei gleichem Volumen, eine 25 – fach größere, zu benetzende Oberfläche auf. Weiters ist der Wassergehalt des UHPC im Vergleich zu Normalbeton gering. Der W/Z Wert des UHPC ist mit 0,28 nur etwa halb so groß wie der des Normalbetons. Die schlechte Verarbeitbarkeit des UHPC mit Carbonfasern lässt sich aber nur in sehr geringem Maße auf deren große Oberfläche zurückführen.

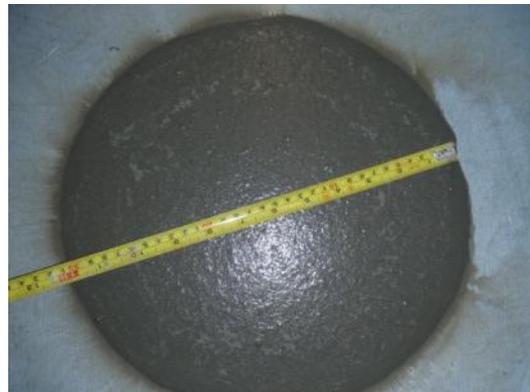


Abbildung 36: Ausbreitmaßmessung bei UHPC mit Stahtfasern

Der Einfluss der Faseroberfläche auf die Fließfähigkeit wird in nachfolgender Tabelle gezeigt. Es werden drei Versuchsserien mit gleich großem Faservolumen und Oberfläche miteinander verglichen. Der Frischbeton mit während des Mischens gebrochenen Carbonfasern mit Epoxidharzschlichte, deren L/D - Verhältnis in Folge in der Größenordnung der Stahtfasern liegt, weist trotz der großen Faseroberfläche gegenüber der Zementmatrix mit Stahtfasern ein nur leicht reduziertes Ausbreitmaß auf (Tab. 6). Den Aussagen zur Länge gebrochener Carbonfasern und damit zu deren L/D Verhältnis liegen visuelle Überprüfungen des Frischbetons zu Grunde. Dieser wurde mit Wasser

vermengt und auf einem Papier ausgebreitet. Bei UHPC mit erhaltenen Fasern waren diese deutlich in ihrer Länge zu erkennen. Gebrochene Fasern konnten bei diesem Vorgehen nicht in der verflüssigten Frischbetonmenge festgestellt werden. Es wird daraus folgernd angenommen, dass die Bruchelemente der Fasern Längen unter 0,7mm aufweisen und damit deren L/D Verhältnis unter 100, also in der Größenordnung der Stahlfasern, liegt. Fasern mit Glycerinschlichte führen zu einer ausgeprägten Verminderung der Fließfähigkeit. Der UHPC mit in der Länge erhaltenen Fasern (Epoxidharzschlichte) ist bei gleichem Faservolumen hingegen nicht mehr fließfähig. Dies zeigt, dass die Fließfähigkeit des Frischbetons mit dem L/D Verhältnis der Fasern in starkem Zusammenhang steht. Die Faseroberfläche hingegen übt darauf einen geringeren Einfluss aus.

Tabelle 6: Beeinflussung des Ausbreitmaßes

Faser	Vol. %	L/D Faser	Oberfläche	Ausbreitmaß
Stahlfaser (l = 6mm, d = 0,175mm)	1	< 100	x	30 cm
Carbonfaser (EPY 6), gebrochen durch Mischvorgang, Epoxidharzschlichte	1	< 100 (visuelle Prüfung)	25x	28 cm
Carbonfaser (GLY 6), gebrochen durch Mischvorgang, Glycerinschlichte	1	< 100 (visuelle Prüfung)	25x	14 cm
Carbonfaser (EPY 6)	1	> 800	25x	10 cm

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Carbonfasern die Verarbeitbarkeit des Frischbetons stark einschränken. Bereits ein Fasergehalt von 0,15 Vol. % führt zu einer deutlichen Reduktion der Fließfähigkeit. Zurückgeführt wird dies auf das hohe L/D-Verhältnis der Carbonfasern, auf Grund dessen sich ein stabiles Fasergerüst in der Matrix bildet. Die Anmerkung in [8], dass Stahlfasern ab einer Schlankheit von 60 zur Igelbildung (Verklumpung von Fasern) neigen, unterstützt diese These. Hingegen kann die Verringerung der Fließfähigkeit nur in geringem Maße auf die große Oberfläche der Carbonfasern zurückgeführt werden.

### 4.5.2 Einfluss des Fasergehaltes auf Biegezug - und Druckfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit wurde an Proben mit niedrigem und hohem Fasergehalt geprüft. Wie im vorhergehenden Kapitel 4.5.1 erläutert, lässt sich UHPC nur mit sehr niedrigem Carbonfasergehalt zufriedenstellend verarbeiten. Festigkeitssteigernder Einfluss der Fasern konnte aber nur bei hohem Fasergehalt festgestellt werden. Die Ergebnisse der Festbetonprüfung von UHPC mit niedrigem und hohem Fasergehalt werden in Folge getrennt betrachtet. Die Prüfung erfolgte nach sieben Tagen.

Es werden die unter 4.3 erläuterten Mischvarianten 2 und 3 angewendet. Bei beiden Varianten wird Faserbruch während des Mischens weitestgehend vermieden. Bei Variante 2 werden die Fasern gegen Ende des Mischvorganges beigemischt, bei Variante 3 wird der Quarzsand, der den Faserbruch verursacht, erst gegen Ende des Mischens beigegeben.

- **Untersuchung der Versuchsreihen mit niedrigen Fasergehalten**

Die Biegezugfestigkeit der Proben mit einem Fasergehalt bis 0,5 Vol. % ist in Abbildung 37 dargestellt. Sie liegt im Bereich der Biegezugfestigkeit des UHPC ohne Fasern. Das widerspricht der Erwartung, dass die Biegezugfestigkeit bereits bei geringem Fasergehalt, auf Grund der hohen Zugfestigkeit der Carbonfasern im Vergleich zu Stahlfasern, zunimmt. Dies wird auf einen Unterschied der Versagensmechanismen von mit Carbonfasern bewehrten und den mit Stahlfasern bewehrten UHPC Prismen zurückgeführt.

Eine Erhöhung des W/Z Wertes bzw. des Fließmittelgehaltes zur Steigerung des beimgemengbaren Anteils an Fasern wirkte sich teilweise so negativ auf die Biegezug- und Druckfestigkeit aus, dass der dadurch verursachte Verlust an Festigkeit nicht durch einen entsprechend höheren Fasergehalt kompensiert werden konnte. Eine ausreichende Fließfähigkeit konnte anhand dieser Maßnahme nicht erzielt werden.

Die Druckfestigkeit der Probenserien mit niedrigem Carbonfasergehalt liegt leicht unter der Druckfestigkeit jener ohne Fasern. Die UHPC Mischungen mit Carbonfasern und einem gesteigerten W/Z Wert bzw. Fließmittelgehalt ergaben Druckfestigkeiten, die deutlich unter jener der Versuchsreihe ohne Fasern lagen.

---

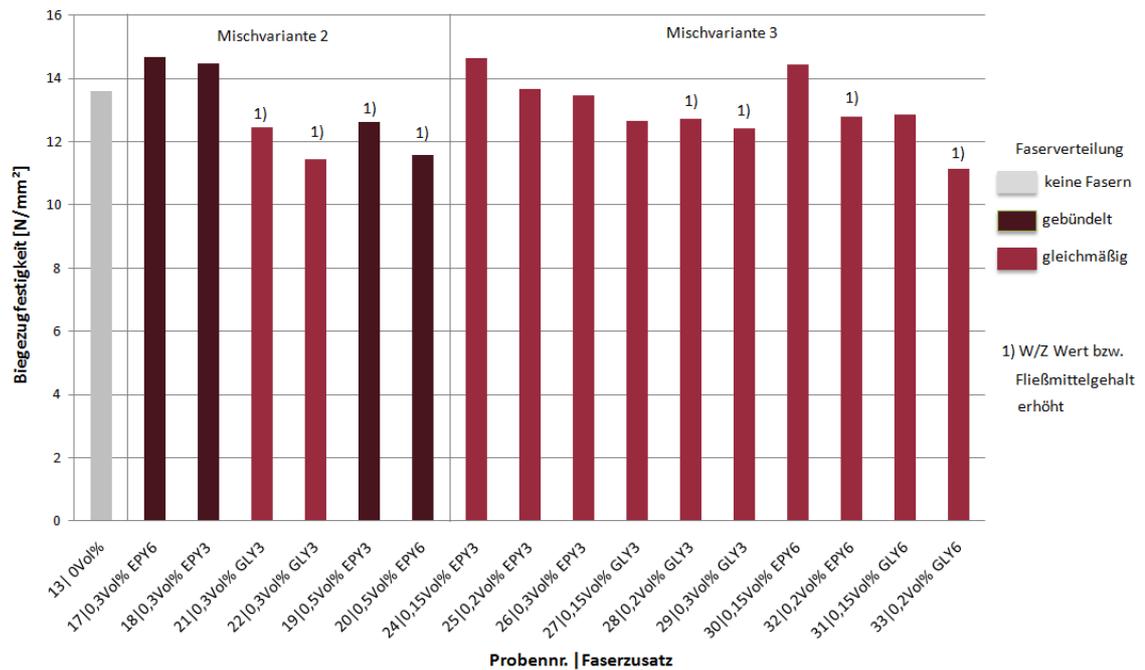


Abbildung 37: Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit des Faserzusatzes, niedriger Fasergehalt

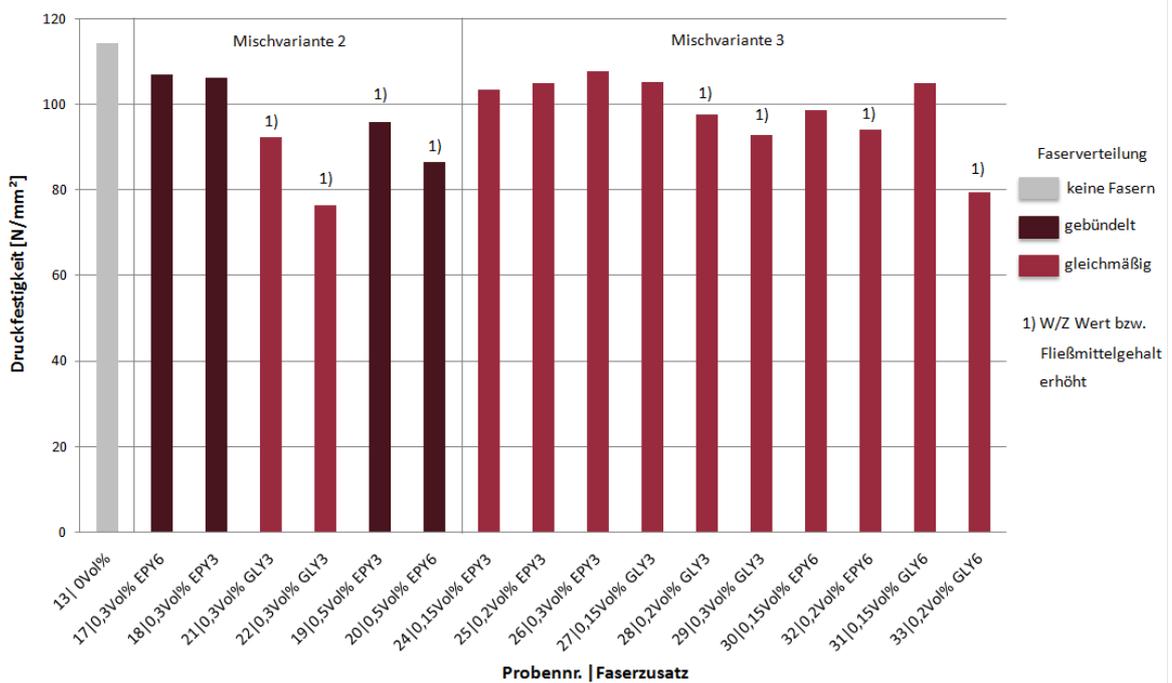


Abbildung 38: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Faserzusatzes, niedriger Fasergehalt

- **Untersuchung der Versuchsreihen mit hohen Fasergehalten**

UHPC mit einem hohen Fasergehalt - es werden Mischungen mit 1 Vol. % und 1,5 Vol. % Carbonfasern hergestellt - ist nicht fließfähig (s. Abb. 39). UHPC mit hohem Fasergehalt ist bei Praxisanwendungen nicht verarbeitbar. Die im Frischbeton eingeschlossene Luftmenge kann auch durch Verdichtungsmaßnahmen nicht reduziert werden.



Abbildung 39: Ausbreitmaßmessung von UHPC mit 1,5 Vol.% Carbonfasern

Ein hoher Fasergehalt führt jedoch zu einer Steigerung der Biegezugfestigkeit, wie in Abbildung 40 dargestellt. Durch den Zusatz von 1 Vol. % gleichmäßig verteilter Fasern (Mischvariante 3) kann die Biegezugfestigkeit durchschnittlich um 23% gesteigert werden. Die Beigabe von 1 Vol. % teilweise noch gebündelter Fasern (Mischvariante 2) ergibt eine Steigerung der Biegezugfestigkeit von durchschnittlich 63%. Diese ist jedoch mit großen Streuungen behaftet (Abb. 44). Die Druckfestigkeit wird durch die Faserzugabe in nur sehr geringem Maße beeinflusst.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Zugabe von 1 Vol. % Carbonfasern zu einer Zunahme der Biegezugfestigkeit von UHPC führt, jedoch ist der Frischbeton in diesem Fall nicht fließfähig und verdichtbar. Fasern in gebündelter Form erhöhen die Biegezugfestigkeit deutlich ausgeprägter als der gleiche Faseranteil bei gleichmäßiger Verteilung. Einzelfasern eines Faserbündels liegen nahe aneinander und sind deshalb nicht vollflächig in den Zementstein eingebunden (s. Kapitel 4.5.4). Der Beitrag solch einer Faser zur Steigerung der Biegezugfestigkeit liegt deshalb unter dem theoretisch Möglichen einer rundum in Zementstein eingebundenen Faser. Wird hierbei der Erhöhungsfaktor (1,63) berücksichtigt, so kann festgestellt werden, dass UHPC mit Carbonfasern sehr großes Potential besitzt. Dieses Potential kann aber nur ausgenutzt

werden, wenn zum Einen der große Einfluss der Fasern auf die Verarbeitbarkeit des Betons durch Modifikation der Fasergeometrie vermindert wird. Zum Anderen ist auch die Empfindlichkeit der Fasern gegen Querbeanspruchung zu reduzieren. Bei gleichmäßiger Verteilung der Fasern, wie es bei anderen Faserarten angestrebt wird, kommt es bei UHPC mit Carbonfasern auf Grund des Versagens quer zur Faserrichtung zu geringeren Festigkeiten als durch das Auftreten von Faserbündeln in der Zementmatrix erzielt werden können. Die Zugspannungen in den verteilten Einzelfasern sind demnach geringer als die in den Fasern der Bündel. Die hohe Zugfestigkeit der einzelnen verteilten Carbonfasern wird daraus folgernd nur in sehr geringem Maße ausgenutzt. Es kommt weit vor dem Erreichen der Faserzugfestigkeit zum Versagen der Fasern.

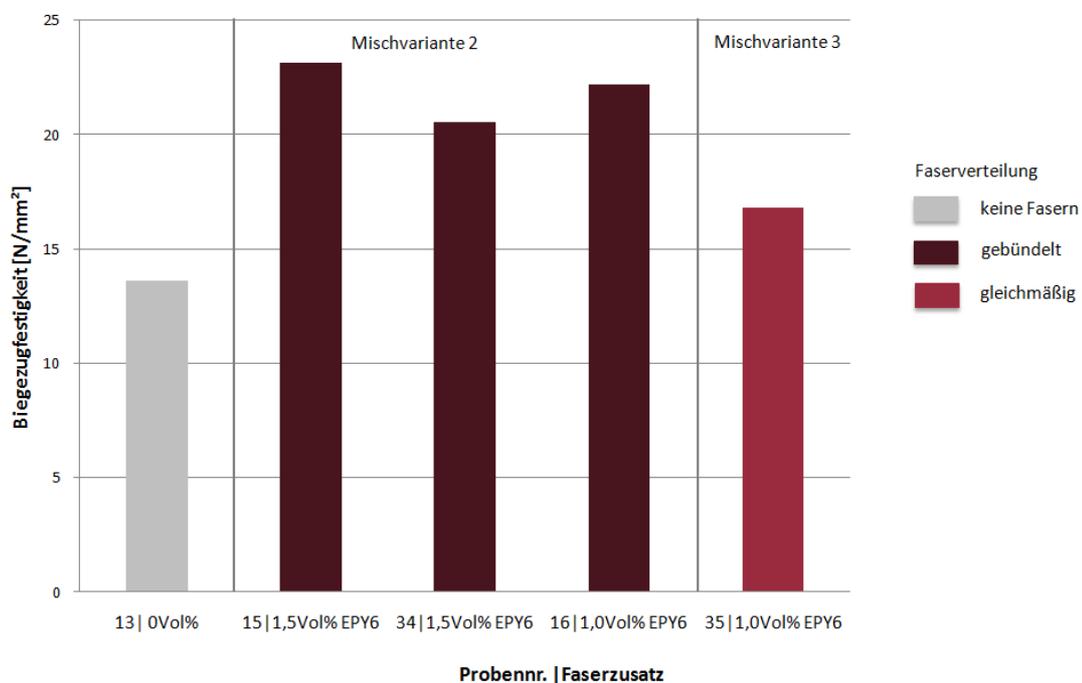


Abbildung 40: Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit des Faserzusatzes, hoher Fasergehalt

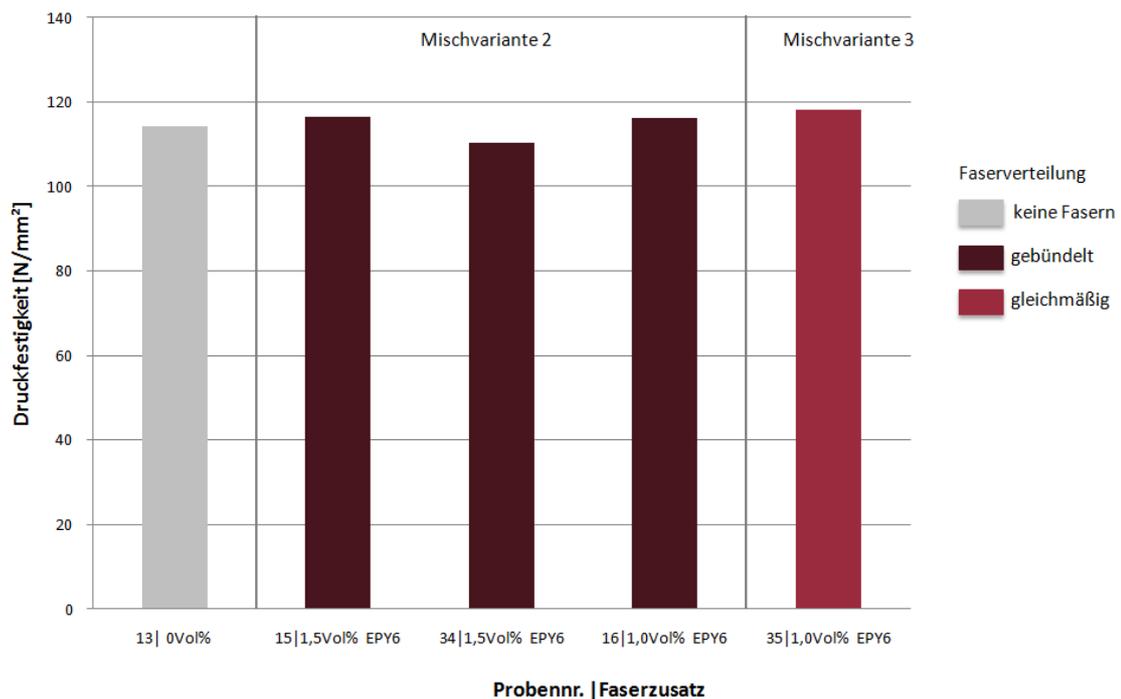


Abbildung 41: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Faserzusatzes, hoher Fasergehalt

### 4.5.3 Einfluss der Faserverteilung auf die Duktilität

Die Zugabe von Fasern in die UHPC Matrix soll zu einem duktilen Versagensmechanismus des Betons führen. Sie verhindern einen spröden explosionsartigen Bruch beim Erreichen der Materialfestigkeit. Dies ist aber bei der Verwendung von Carbonfasern nur in sehr begrenztem Umfang gegeben.

Es werden in Folge Spannungs- Verschiebungsverläufe der Biegezugprüfung von Versuchsreihen mit niederem Fasergehalt (< 0,5 Vol. %) und hohem Fasergehalt (1 Vol. %) dargestellt. Es kommt jeweils zum Vergleich von Mischvariante 2 und 3. Im Zementstein der Proben der Variante 2 sind durch die kurze Einmischzeit der Carbonfasern teilweise Faserbündel vorhanden. Deren Dimension und Anzahl wird durch den Mischprozess und die Dauer des gemeinsamen Mischens mit der Matrix bestimmt, die Eigenschaften der Faserbündel einzelner Versuchsserien unterliegen deshalb großen Schwankungen. Die Fasern der Proben der Mischvariante 3 sind soweit beurteilbar gleichmäßig verteilt und in deren Ausgangslänge vorhanden. Teilweiser Faserbruch ist aber nicht auszuschließen. Diese Faktoren wie auch die limitierte Anzahl an Prüfungen, die im Rahmen dieser Untersuchung möglich waren, sind bei der Betrachtung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Weiters soll in diesem Zusammenhang berücksichtigt wer-

den, dass die verwendete Prüfmaschine nur eine eingeschränkte Steifigkeit besitzt. Dies beeinflusst die Abbildung des Nachrissverhaltens negativ.

Bei einem niederen Fasergehalt führte ein unterschiedlicher Verteilungszustand der Fasern zum gleichen Bruchverhalten der Proben. Es trat bei Proben mit gleichmäßig verteilten Fasern und bei Prüfkörpern mit teilweise gebündelten Fasern ein Sprödbbruch auf. Nach dem Erreichen der Biegezugfestigkeit kann keine Last mehr übertragen werden, wie in Abbildung 42 dargestellt. Es kommt zum identem Bruchverhalten von UHPC mit niederm Fasergehalt und faserlosem UHPC.

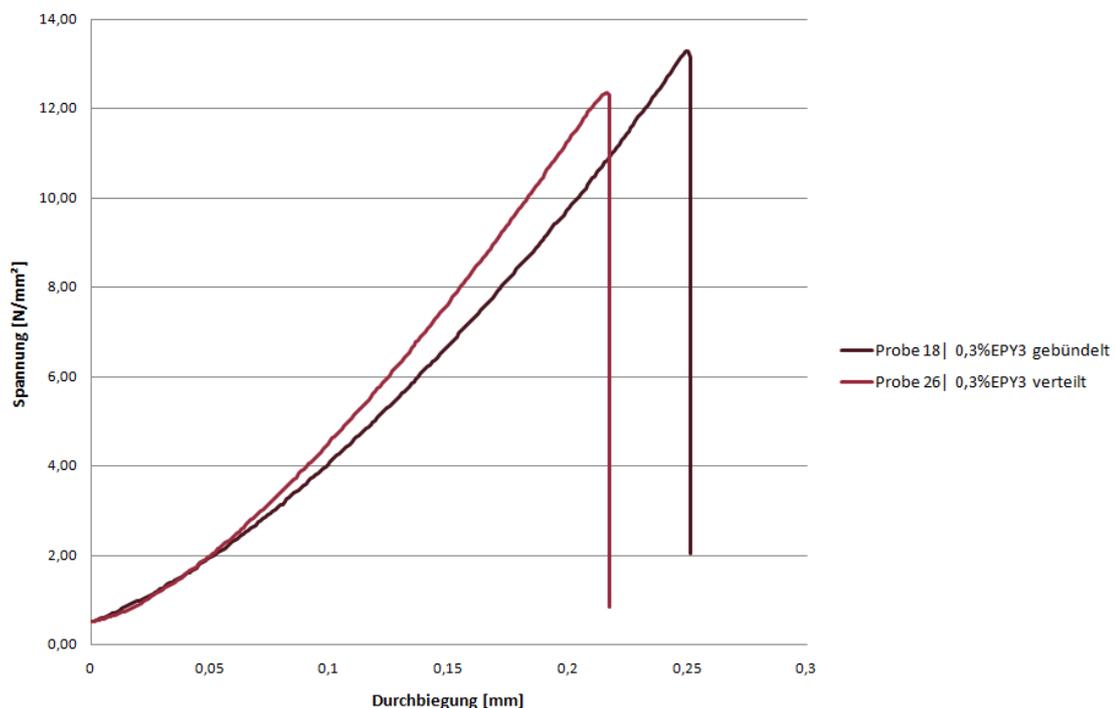


Abbildung 42: Biegeversuch - Spannungs- Durchbiegungsbeziehung abhängig von der Faserverteilung, niederer Fasergehalt

Bei hohem Fasergehalt kommt es abhängig von der Faserverteilung zu unterschiedlichem Bruchverhalten des UHPC (Abb. 43). Proben mit gleichmäßig verteilten Carbonfasern brechen spröde, wie es bei niederm Fasergehalt beobachtet wird. Bei den Versuchsreihen der Mischvariante 2, bei welchen Faserbündel in der Matrix auftreten, kann ein Nachrissverhalten beobachtet werden. Dieses wird stark von der Größe, der Verteilung und Ausrichtung der Bündel beeinflusst und unterliegt deshalb großen Schwankungen, wie in Abbildung 44 ersichtlich. Nach dem Auftreten des Risses kommt es meist zu einem starken Abfall der übertragbaren Spannung, jedoch ist mit zunehmender Dehnung die Übertragung einer reduzierten Spannung weiterhin möglich.

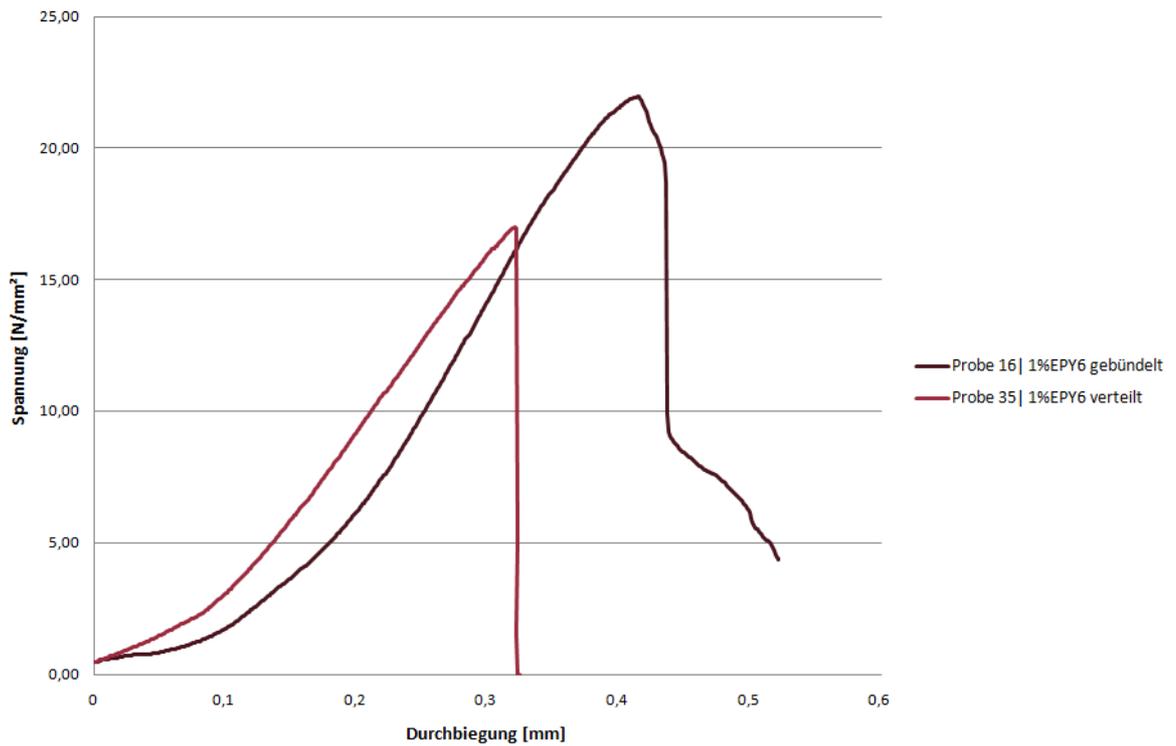


Abbildung 43: Biegeversuch - Spannungs- Durchbiegungsbeziehung abhängig von der Faserverteilung, hoher Fasergehalt

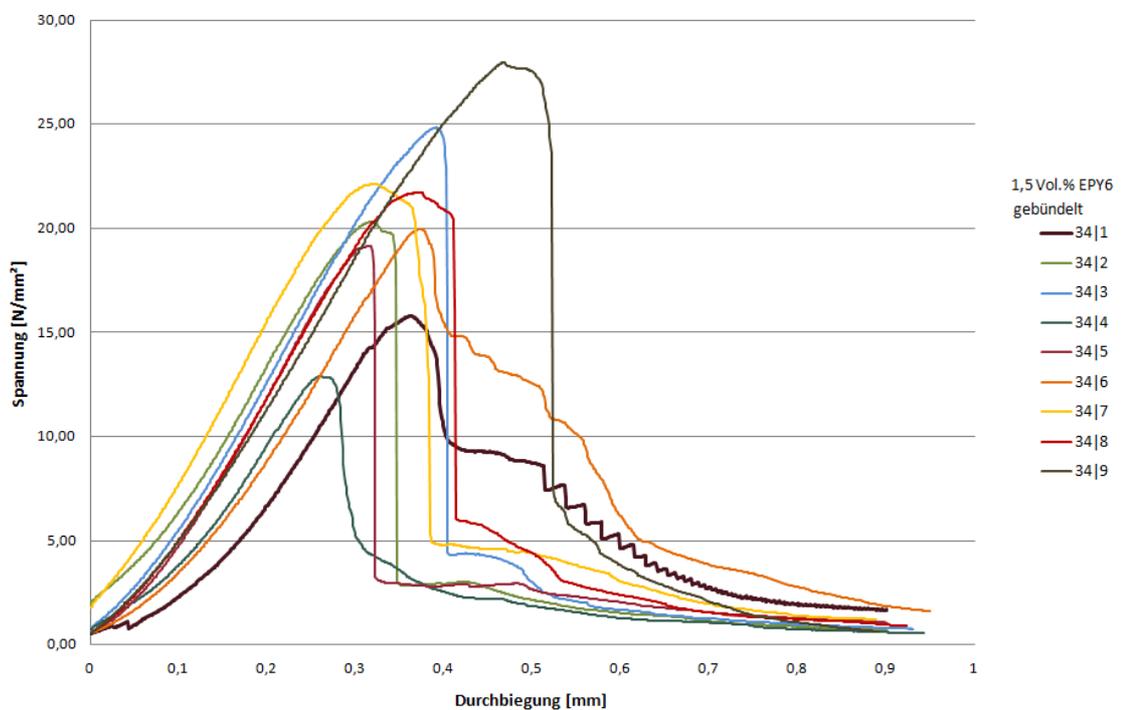


Abbildung 44: Biegeversuch - Streuung des Nachrissverhaltens von UHPC mit 1,5 Vol.% gebündelter Fasern

#### 4.5.4 Bruchmechanismus und Verbundverhalten der Fasern

- **Untersuchung von UHPC Proben mit gleichmäßig verteilten Fasern unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM)**

Die Bruchflächen ausgewählter Proben wurden unter einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Es konnte beobachtet werden, dass bei den Proben mit einzelnen gleichmäßig verteilten Fasern kein Pull-out Verhalten der Carbonfasern auftritt, d.h. die einzelnen Fasern werden nicht aus der Betonmatrix herausgezogen sondern brechen direkt an bzw. nahe der Versagensfläche (Abb.45).

Weiters ist zu erkennen, dass der Negativabdruck der gebrochenen Faser in der Betonmatrix weitgehend unversehrt ist und keine Beanspruchungsspuren aufweist. Dies zeigt, dass sich beim Bruch, Fasern und Zementstein voneinander lösen, ohne dass Teile der Fasern am Beton haften bleiben und umgekehrt. Augenscheinlich ist keine chemische Bindung der Fasern an die Matrix zu erkennen.

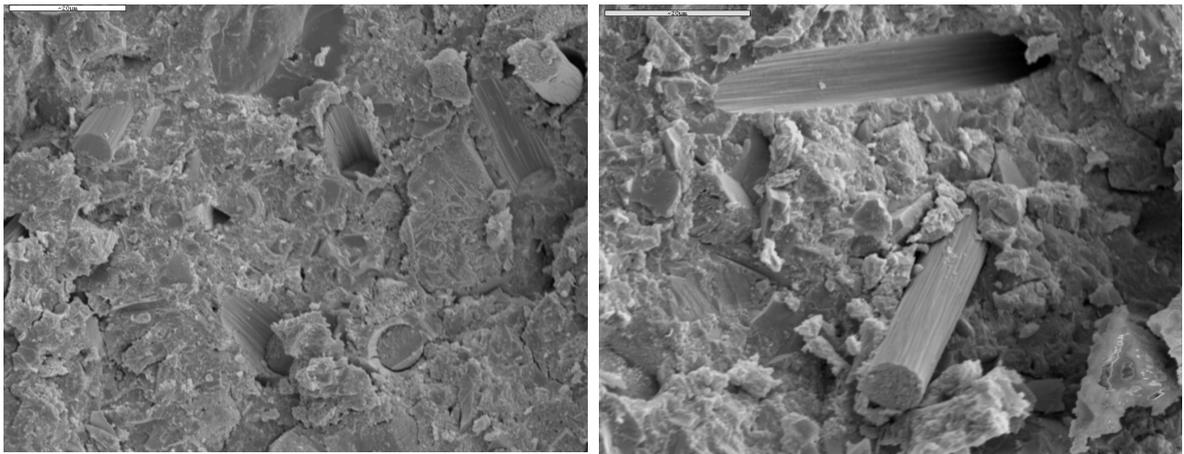


Abbildung 45: Einzelfasern unter dem Rasterelektronenmikroskop

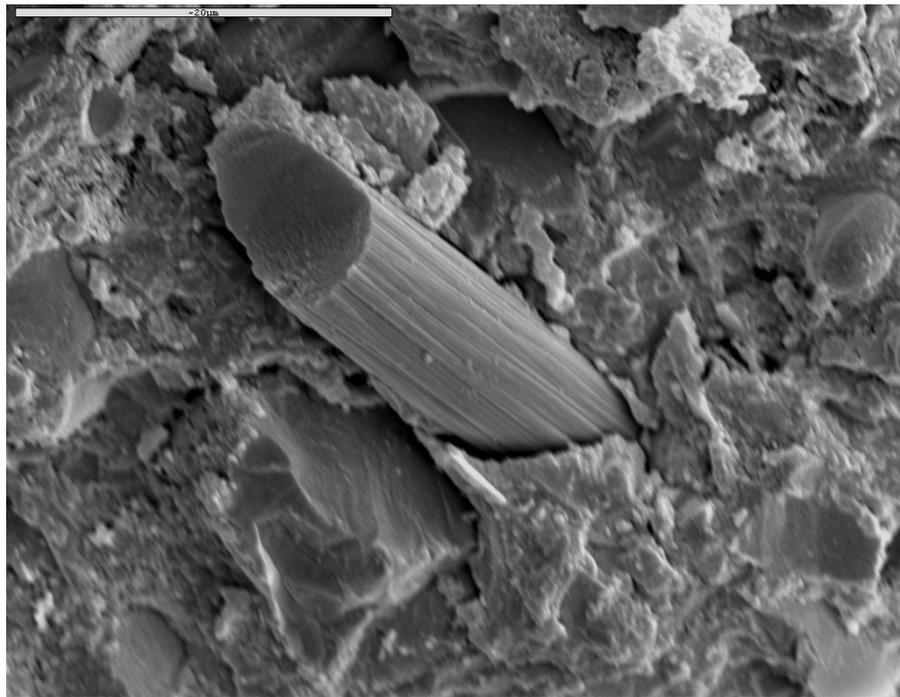


Abbildung 46: Detailbetrachtung einer Faser unter dem Rasterelektronenmikroskop

Ob es sich beim Versagen der Carbonfasern hauptsächlich um Zugversagen oder um Scherbruch handelt, kann aus den Bildern nicht abgeleitet werden. Da es in der Bruchebene des UHPC zur Faserumlenkung und somit zur Querbeanspruchung der Fasern kommt (Abb. 47) und diese empfindlich auf Querdruck und Scherbeanspruchung reagieren – wie auch der Faserbruch durch das gemeinsame Mischen mit Quarzsand zeigte – ist Querdruckversagen naheliegend. Die Lage der Bruchstelle der Faser in der Bruchebene des Betons deutet zusätzlich auf diesen Umstand hin. Des Weiteren lässt die geringe Steigerung der Biegezugfestigkeit von UHPC durch einzeln verteilte Fasern darauf schließen, dass viele der hoch zugbeanspruchbaren Einzelfasern nicht durch Zugkräfte versagen, wie in Kapitel 4.5.2 erläutert wird.

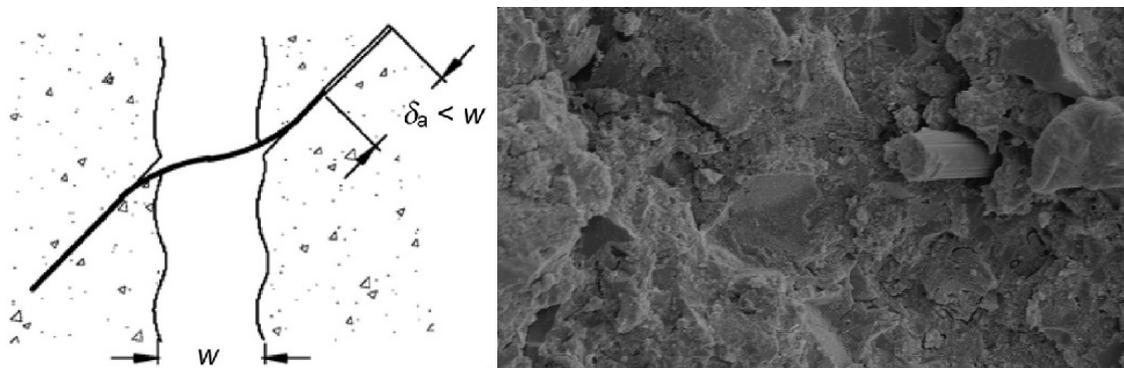


Abbildung 47: Querbeanspruchung der Faser in der Bruchebene des UHPC [9]/ Faserbruch in UHPC Bruchebene

- **Untersuchung von UHPC Proben mit gebündelten Fasern unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM)**

Die Bilder des Rasterelektronenmikroskops (Abb. 48, 49) zeigen, dass die Einzelfasern der Bündel, die vor dem Einmischen aneinander haften (Abb. 25), im UHPC durch eine ungleichmäßige, dünne Mörtelschicht voneinander getrennt sind. Das kurzzeitige Einmischen (Mischvariante 2) der Fasern mit Epoxidharzschlichte in die Zementmatrix führt bereits zum Auftreten geringer Abstände der Fasern zueinander, in die die Matrix teilweise eindringt und die Fasern umhüllt. Bei Abständen unter einem Faserdurchmesser, also in etwa  $7\ \mu\text{m}$ , bleiben die Zwischenräume unausgefüllt. Die Bruchflächen der Fasern innerhalb solcher Bündel lagen nur zum Teil in der Versagensfläche, der Großteil dieser Fasern ragte aus der Fläche. Es kam somit zum Pull-out Verhalten einer Mehrzahl von Fasern innerhalb der Bündel. Dies äußerte sich im duktilen Versagen der Probekörper (siehe Kapitel 4.5.3). Nach dem Auftreten des ersten Risses im UHPC versagten die Prismen nicht spröde. Während des Öffnens des Risses, wurden die Fasern der Bündel aus den Rissufern gezogen. Somit war gegenüber der maximalen Prüflast weiterhin eine verringerte Resttragfähigkeit gegeben.

Weiter ist zu beobachten, dass Zonen hoher Faserkonzentration zu Störungen in der Betonmatrix führen und daher als potentielle Bruchzonen angesehen werden können.

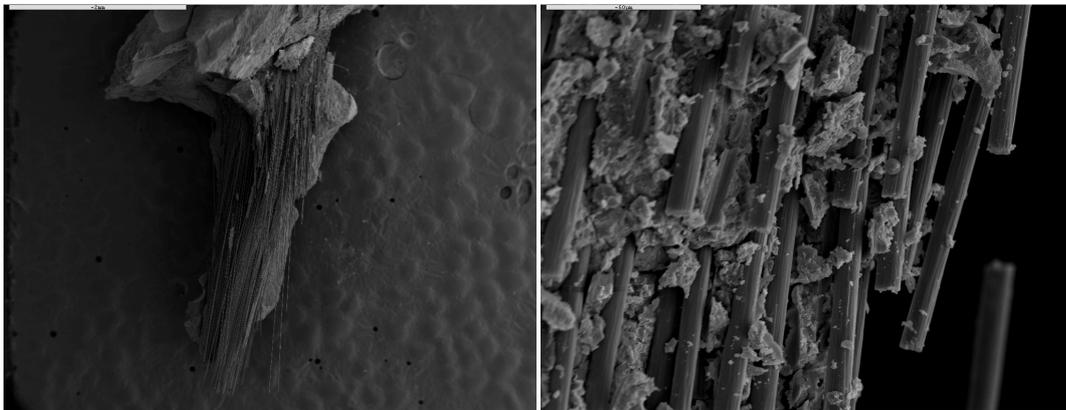


Abbildung 48: REM: Faserbündel / Detail Faserbündel

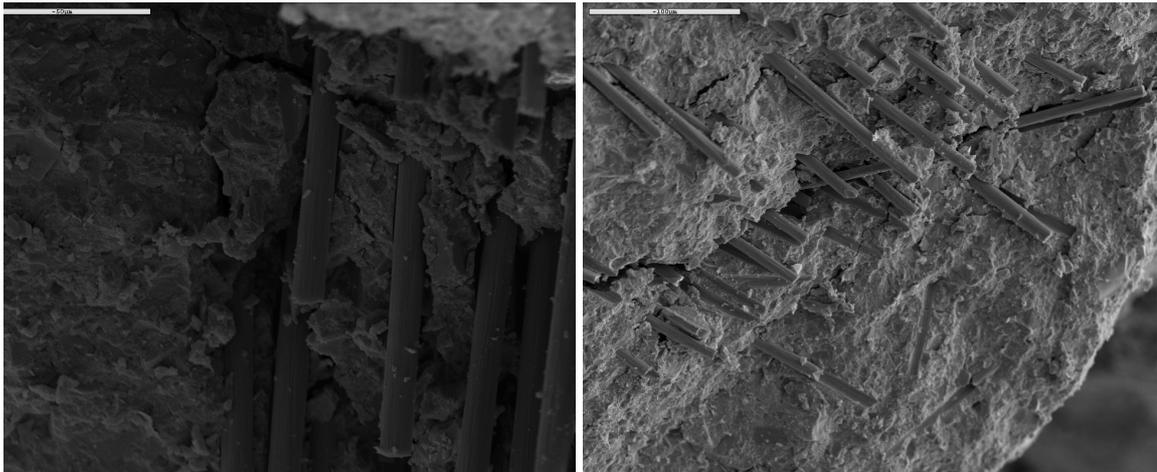


Abbildung 49: REM: Störung der Betonmatrix

- **Untersuchung von Faserbündeln unter dem Lichtmikroskop (LM)**

Um das Versagen eines Faserbündels zu simulieren und daraus seinen Bruchmechanismus sowie seine Biegefähigkeit abzuleiten, wurde eine zufällige Menge an Fasern auf die Oberfläche einer Glasplatte geklebt und unter dem Lichtmikroskop mittels einer Metallplatte einer Druck- sowie einer Scherbeanspruchung ausgesetzt. Der Versuch sollte eine rein qualitative Aussage liefern, um das Verständnis für das Faserverhalten zu erhöhen. Auffällig war dabei das hohe Biegevermögen der einzelnen Fasern. Das Verschieben einer Platte entgegen der Achsrichtung des fixierten Faserbündels führte zu einem Ausweichen der Fasern und damit zu ausgeprägter Biegung dieser, wie in Zeile 1 der Abbildung 50 dargestellt. Wiederholtes Verschieben der Platte auf beschriebene Weise führte nur vereinzelt zum Bruch von Fasern. Wurde das Faserbündel durch die Metallplatte einer zusammengesetzten Beanspruchung aus Druck in und normal zur Bündelachse ausgesetzt, kam es zum einseitigen Versagen von in etwa 15 % aller Fasern (siehe Abb. 50, Zeile 2 und 3). Der Grund dafür könnte in einer höheren Sensibilität der Fasern auf Abscheren / Querdruck zu finden sein. Bei Wiederholung der einseitigen Biegung in die entgegengesetzte Richtung konnte das Versagen einer größeren Anzahl von Fasern jedoch nicht noch einmal wiederholt werden. Mithilfe der angewandten Untersuchungsmethoden war der Bruchmechanismus der Fasern nicht vollständig zu erfassen, da ein dynamischer Versuch mit einer ausreichenden Vergrößerung (Simulation des Versagens unter dem Elektronenrastermikroskop) nicht möglich ist. Die entstandenen Bilder deuten jedoch stark darauf hin, dass die Einzelfaser bei guter Verteilung in der Betonmatrix früh auf Grund von Querbeanspruchung versagt. Faserbündeln wird unterstellt, dass sie aufgrund des sich ergebenden größeren Biegeradius der Fasern

im Inneren des Bündels - durch den porösen Zementstein in diesem Bereich - nicht gänzlich auf Querdruck versagen und damit zu einer Resttragfähigkeit der Versuchskörper beitragen.

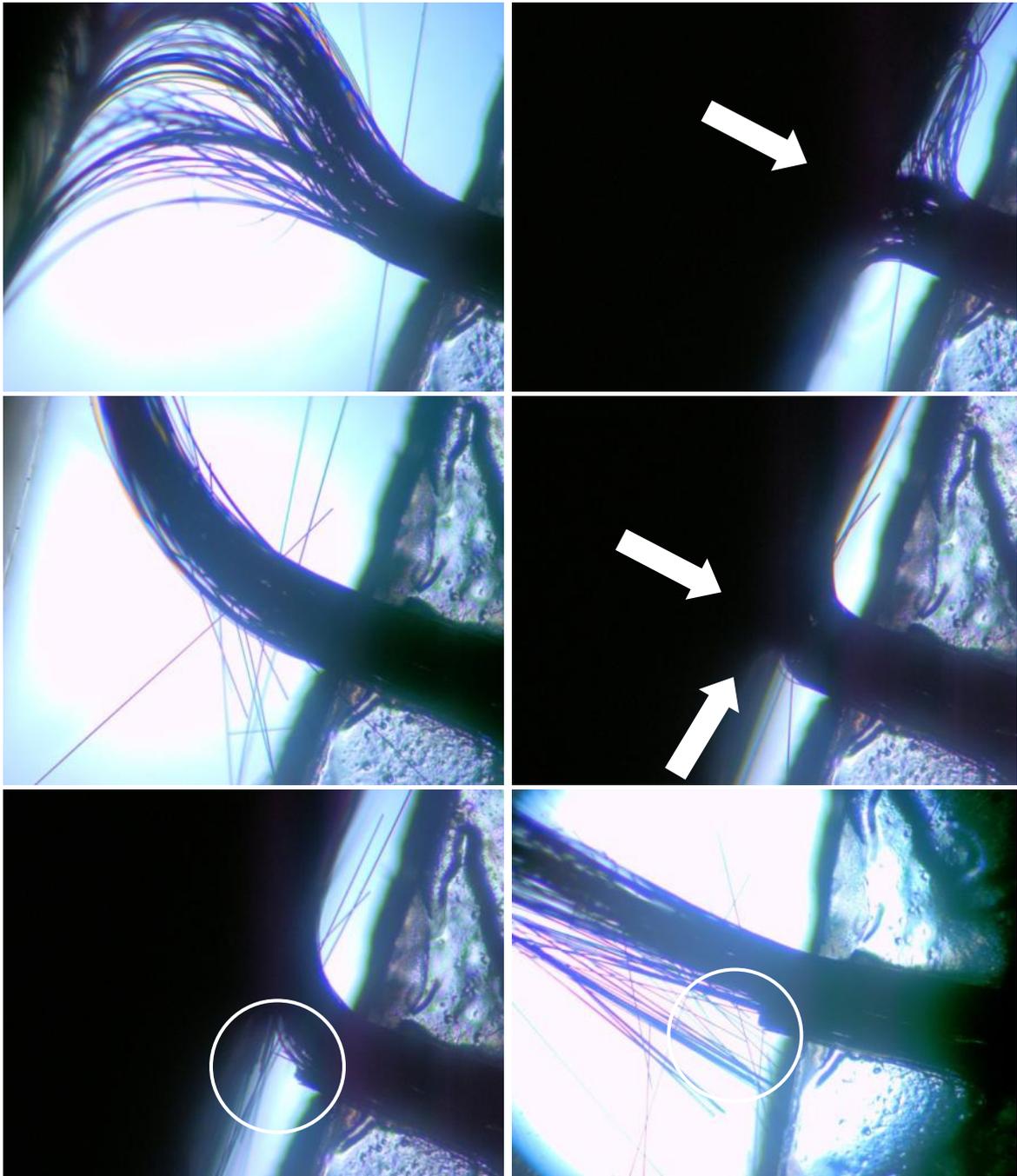


Abbildung 50: Belastung eines Faserbündels auf Normaldruck und Abscheren

### 4.5.5 Festigkeit und Verarbeitbarkeit von UHPC mit gebrochenen Carbonfasern

Grundsätzlich werden bei Faserbeton eine möglichst gleichmäßige Verteilung sowie eine vollflächige Benetzung der Fasern und aller Zuschläge angestrebt. Um das zu erreichen ist ein gemeinsames Mischen von Fasern und Matrix für einige Minuten notwendig. Dies wird auch im Rahmen dieser experimentellen Untersuchungen durchgeführt und als Mischvariante 1 bezeichnet. Dadurch kommt es zum Bruch der spröden Carbonfasern. Dies wird durch einen visuellen Vergleich des auf diese Weise hergestellten Frischbetons mit dem der Mischvarianten 2 und 3 erkennbar.

Die Verarbeitbarkeit des UHPC wird durch gebrochene Fasern deutlich geringer beeinträchtigt, als durch in der Länge erhaltene Fasern. Wird 1 Vol. % der 6mm langen Carbonfasern mit Epoxidharzschlichte fünf Minuten mit der Matrix inklusive Quarzsand vermischt, brechen die Fasern in entsprechend kurze Teilelemente, die das Ausbreitmaß des UHPC nur um 2cm, von 30cm auf 28cm, reduzieren. Kürzere Mischzeiten, wie bei Versuchsreihen 4 bis 8 verringern das Ausbreitmaß entsprechend stärker, jedoch nicht in dem Ausmaß erhaltener Fasern nach Mischvariante 2 oder 3.

Bei dem Vergleich der erzielten Festigkeiten von UHPC mit gebrochenen Fasern (Mischvariante 1) mit denen von UHPC mit erhaltenen Fasern ist zu berücksichtigen, dass die Versuchsreihen 4 bis 8 nicht direkt mit den weiteren Ergebnissen vergleichbar sind. Sie wurden nach dem Ausschalen an der Luft gelagert. Nur Versuchsreihe 38 und 39 kann direkt mit den Versuchsreihen mit in der Länge erhaltenen Fasern verglichen werden, da die hergestellten Probekörper wie die den weiteren Versuchsreihen unter Wasser gelagert wurden.

Abbildung 51 zeigt, dass im Wasser gelagerter UHPC mit 1 Vol. % 6mm langer Carbonfasern mit Epoxidharzschlichte, die durch den Mischvorgang gebrochen sind, weder zu einer Steigerung der Biegezugfestigkeit, noch zu einer Steigerung der Druckfestigkeit führen. Gebrochene Fasern mit Glycerinschlichte führen zu einer geringen Erhöhung der Biegezugfestigkeit, diese liegt aber im Bereich der Streuungen der Ergebnisse. Ein entsprechender Faserzusatz mit in der Länge erhaltenen Fasern erhöht die Festigkeit deutlicher.

Bei an der Luft gelagerten Prüfkörpern führen gebrochene Fasern zu einer erkennbaren Verbesserung der Biegezugfestigkeit gegenüber Probekörpern ohne Fasern. Hier scheint ein positiver Einfluss auch von gebrochenen Fasern auf die durch Austrocknung vermehrte Mikrorissbildung des UHPC aufzutreten.

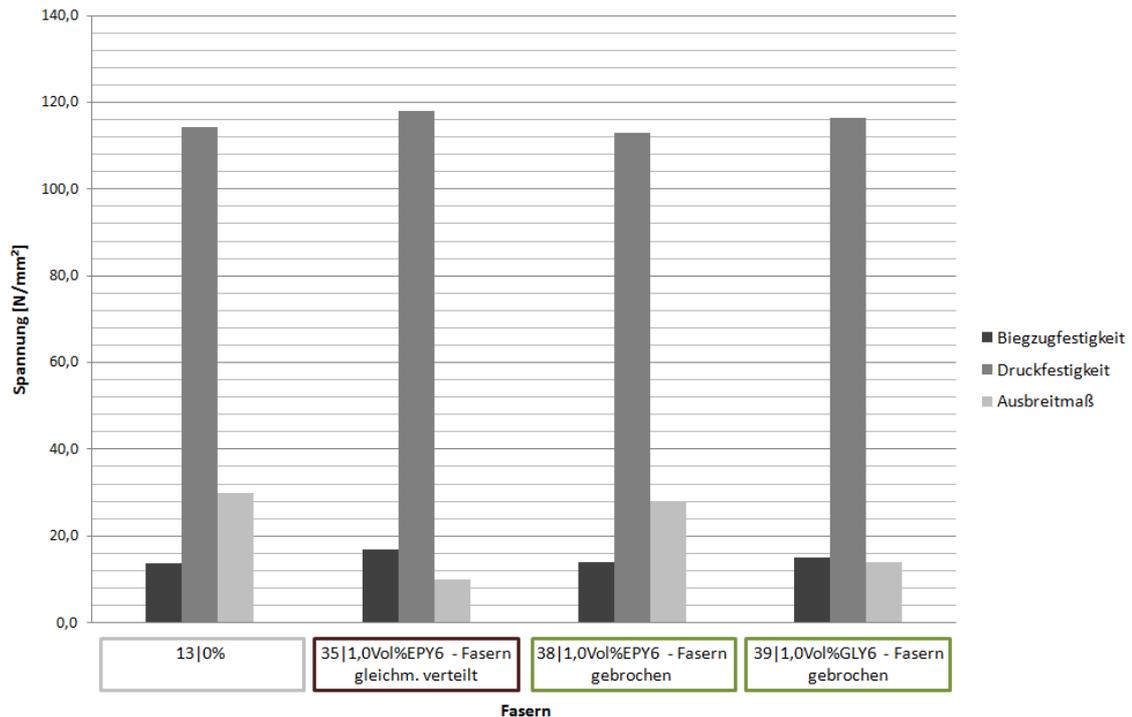


Abbildung 51: Vergleich gebrochene Fasern

#### 4.5.6 Vergleich Carbonfaser - verstärkter UHPC - Stahlfaser - verstärkter UHPC

Der Vergleich der Betoneigenschaften von carbonfaserverstärktem UHPC mit stahlfaserverstärktem UHPC wurde über die Gleichsetzung der Gesamtzugfestigkeit der beiden Faserarten im Probevolumen geführt. Hierbei wurden die aufsummierten Querschnitte (d.h. das Volumen) der Carbonfasern multipliziert mit ihrer Zugfestigkeit den aufsummierten Querschnitten der Stahlfasern multipliziert mit der Zugfestigkeit der Stahlfasern gleichgesetzt.

Bei einer Zugfestigkeit der Carbonfaser von 4,0 GPa und der Stahlfaser von 2,4 GPa ergibt sich so für 1 Vol. % Carbonfasern ein äquivalenter Volumenanteil von 1,67 Vol. % Stahlfasern.

In Abbildung 52 ist dargestellt, dass das zugspannungsäquivalente Stahlfaservolumen kaum einen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des UHPC hat. Im Gegensatz dazu ist beim Zusatz von 1 Vol. % Carbonfasern eine Verarbeitbarkeit nicht mehr gegeben.

Die Biegezugfestigkeit nach sieben Tagen lag bei mit Stahlfasern bewehrten Proben im Bereich der Proben mit gleichmäßig verteilten Carbonfasern, die Druckfestigkeit der Proben mit Stahlfasern war jedoch um durchschnittlich 8% höher als bei mit

Carbonfasern bewehrtem UHPC, was noch im Streuungsbereich liegt. Der Einfluss unterschiedlicher Fasertypen auf die Druckfestigkeit ist vernachlässigbar. Die Biegezugfestigkeit der Proben mit gebündelten Fasern lag um durchschnittlich 34 % höher als jene der Proben mit Stahlfasern.

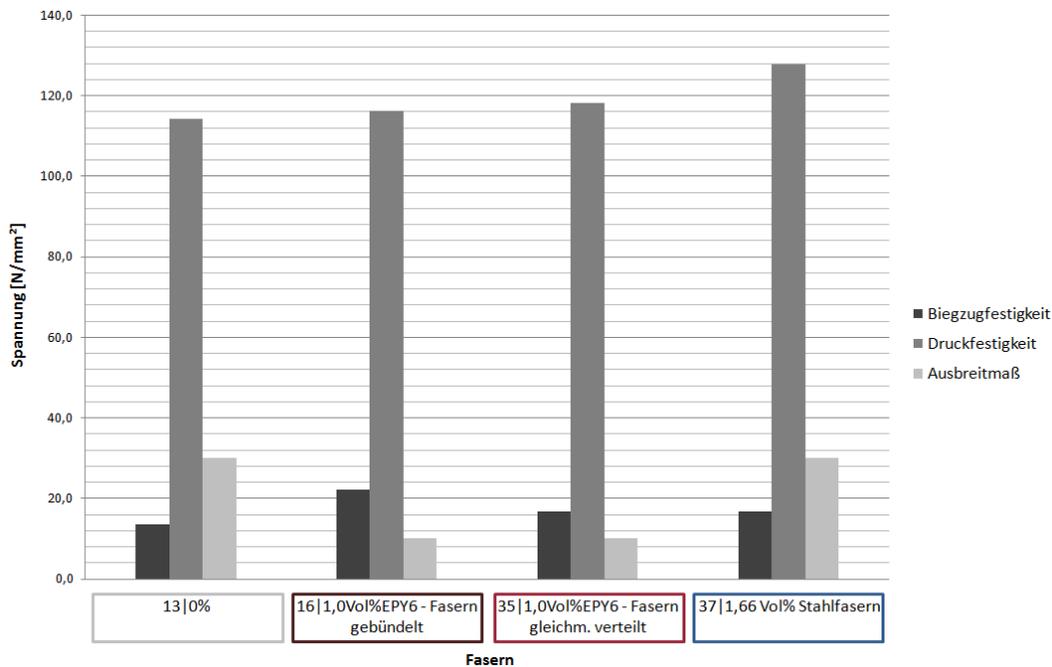


Abbildung 52: Vergleich von faserfreiem, Carbonfaser- verstärktem und Stahlfaser- verstärktem UHPC

Abbildung 53 zeigt die Spannungs- Verformungs-Beziehung von mit Carbonfasern und Stahlfasern verstärktem UHPC bei einem Prüfalter von sieben Tagen. Es ist zu erkennen, dass die Tragfähigkeit des mit Stahlfasern bewehrten UHPC nach dem Auftreten des ersten Risses zuerst abnimmt, daraufhin aber auf ein noch höheres Spannungsniveau ansteigt. Mit zunehmender Verformung kann die Last über die Erstrisslast gesteigert werden. Das Material verhält sich duktil.

Proben mit gebündelten Fasern weisen eine geringe Ausrundung der Kurve an der Stelle der Maximalspannung auf. Das Nachrissverhalten dieser Proben kann stark variieren, wie unter Kapitel 4.5.3 dargestellt. Die UHPC Proben spannungsäquivalenten Carbonfaservolumens mit gleichmäßig verteilten Fasern verhielten sich dagegen ausgesprochen spröde.

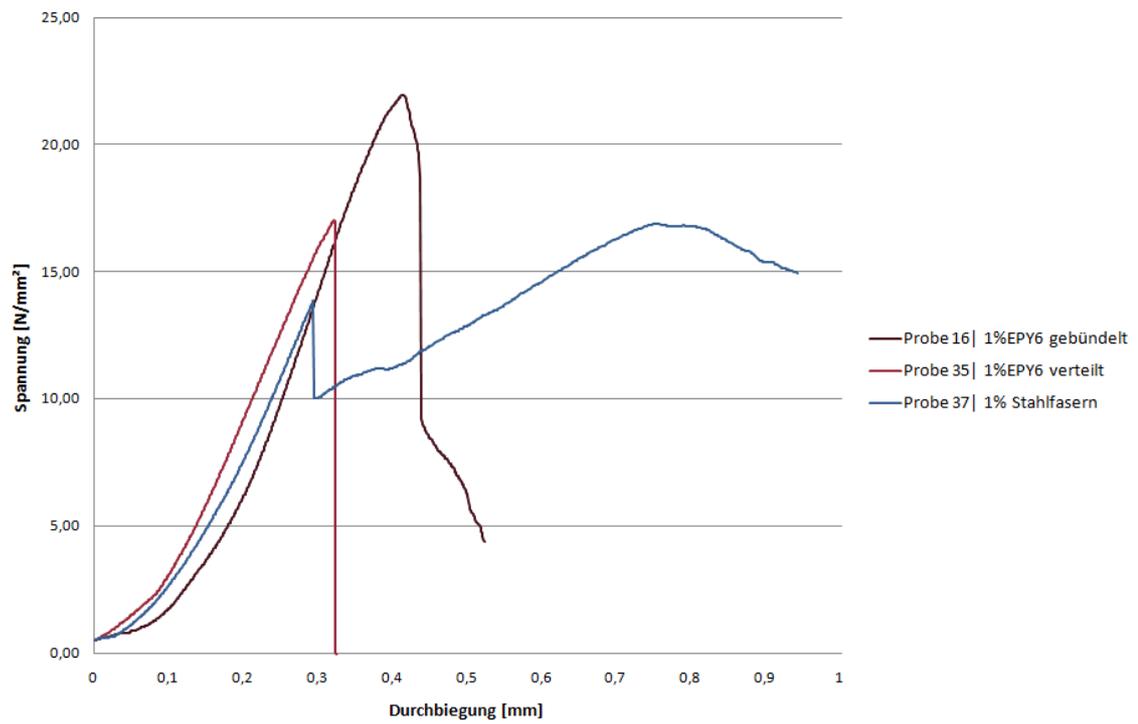


Abbildung 53: Biegeversuch: Vergleich der Spannungs- Durchbiegungsbeziehung von UHPC mit Stahl- und Carbonfasern

## 5 Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

In der vorliegenden Masterarbeit wird der Einfluss des Fasergehaltes auf die Eigenschaften von Carbonfaser – verstärktem UHPC untersucht. Zu diesem Zweck werden UHPC Probekörper unterschiedlichen Fasergehaltes hergestellt und einer Frisch – sowie Festbetonprüfung nach DIN EN 196 -1 unterzogen. Anhand der Kriterien Verarbeitbarkeit, Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Duktilität wird der Einfluss der Carbonfasern aufgezeigt.

Ein grundsätzliches Kriterium für die Eignung von Carbonfasern zur Anwendung in UHPC ist die Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Dazu zählen die Einmischbarkeit der Fasern sowie die Fließfähigkeit des UHPC. Die 7 $\mu$ m dicken, spröden Carbonfasern brechen beim Mischen in der UHPC Matrix durch den Kontakt mit dem Quarzsand. Durch Quarzsandzugabe gegen Ende des Mischvorganges kann dem entgegen gewirkt werden, jedoch ist längeres Mischen aller Komponenten zum Erreichen einer homogenen Matrix anzustreben. Diese Ziele stehen im starken Widerstand zueinander.

Des Weiteren reduzieren die Fasern schon in sehr geringen Beigabemengen die Fließfähigkeit des Betons. Ein Fasergehalt von 0,2 Vol. % verringert das Ausbreitmaß um mehr als ein Drittel des erzielten Wertes von Beton ohne Fasern. UHPC mit einem Faseranteil von 1 Vol. % ist nicht mehr fließfähig, jedoch ist diese Menge an Fasern nötig, um eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des UHPC zu erzielen.

Die ausgeprägte Reduktion der Fließfähigkeit des UHPC mit Carbonfasern gegenüber faserfreiem UHPC wird auf das große Länge zu Durchmesser (L/D) Verhältnis der Fasern zurückgeführt. Dieses beträgt bei den in dieser Arbeit verwendeten Fasern ~ 430 bzw. ~ 860 und liegt damit weit über dem Wert der bei UHPC üblicherweise eingesetzten Stahlfasern. Diese weisen ein L/D Verhältnis von unter 100 auf und vermindern die Fließfähigkeit nur geringfügig. Die sehr schlanken Carbonfasern hingegen bilden im UHPC eine dicht vernetzte Struktur und hindern ihn auf diese Weise am Fließen. Die große Oberfläche der Carbonfasern wird hingegen nur als in geringem Maße an der Fließfähigkeitsminderung beteiligt angesehen.

---

Durch die Beigabe der Carbonfasern wird eine Steigerung der Festigkeit des UHPC erwartet. Ein Fasergehalt von bis zu 0,5 Vol. % führt zu keiner positiven Beeinflussung der Biegezug- sowie Druckfestigkeit des Betons. Die Fasern bewirken jedoch eine deutliche Abnahme der Fließfähigkeit, die durch eine Erhöhung des W/Z Wertes bzw. des Fließmittelgehaltes nicht kompensiert werden kann. Ein erhöhter Fasergehalt von einem Prozent führt zu einer Steigerung der Biegezugfestigkeit des UHPC. Abhängig vom Zustand der Faserverteilung ist diese mehr oder weniger stark ausgeprägt. Faserbündel im UHPC bewirken eine Erhöhung der Biegezugfestigkeit gegenüber faserfreiem UHPC von über 60 %, gleichmäßig verteilten Fasern erhöhen die Biegefestigkeit um lediglich ~ 23 %.

Die geringere Leistungsfähigkeit von Einzelfasern wird auf ein vorzeitiges Querdruckversagen dieser zurückgeführt. Die dreidimensional orientierten Fasern verlaufen zum Großteil in einem Winkel zur Zugspannungsrichtung im Zementstein und werden aus diesem Grund in Faserachse sowie normal dazu beansprucht. Die anisotropen Carbonfasern weisen jedoch in Längs- und Querrichtung unterschiedliche Materialeigenschaften auf. In Längsrichtung können sie großen Zugbeanspruchungen standhalten, in Querrichtung sind die Zug- und Druckbeständigkeit weitaus geringer. Dies wurde auch vom Faserhersteller bestätigt, Kennwerte konnten hingegen nicht zur Verfügung gestellt werden. Die Empfindlichkeit der Fasern auf diese Querbeanspruchung wird durch den Faserbruch beim Mischen verdeutlicht. Die Lage der Bruchstellen der Fasern in der Bruchfläche des Zementsteins deutet auf Querdruckversagen der Einzelfasern.

Die Querdruckbeanspruchung der Fasern innerhalb von Bündeln, dessen Hohlräume nicht zur Gänze von Zementstein ausgefüllt sind, scheint geringer zu sein. Es kommt meist zum Pull – out Verhalten und nicht zum Bruch der Fasern in der Bruchfläche der Matrix. Damit ergibt sich bei Biegebeanspruchung von UHPC mit gebündelten Fasern ein duktiler Bruchverhalten. Dies kann mit einzeln verteilten Carbonfasern nicht erreicht werden.

Bei spannungsäquivalentem Carbonfaservolumen ist die Biegezugfestigkeit von mit gebündelten Carbonfasern bewehrtem UHPC höher als jene von Stahlfaserbewehrtem. Jedoch verringern Stahlfasern die Fließfähigkeit des Frischbetons nur in geringem Maße, hingegen ist UHPC mit dem bei diesem Vergleich beigegebenen Carbonfaservolumen nicht verarbeitbar.

---

Es ergeben sich daraus Folgernd zwei Faktoren, welche den Einsatz der Carbonfasern in UHPC schwierig gestalten:

- Das große Längen- zu Durchmesser- Verhältnis, der im Vergleich zu den Stahlfasern sehr schlanken Carbonfasern, welches sich negativ auf die Verarbeitbarkeit auswirkt.
- Der geringe Widerstand der Fasern gegen Querdruck welcher verhindert, dass die hohe Zugfestigkeit der Fasern zur Wirkung kommt. Er führt auch zu Faserbruch bei längerem Mischen aller Komponenten, längeres Mischen wird aber angestrebt um eine homogene Masse zu erzeugen.

Die Verwendung der in dieser Arbeit eingesetzten Carbonfasern zur Verstärkung von UHPC wird auf Grund der zwei zuvor genannten Problempunkte nicht empfohlen. Ein entsprechend hoher Fasergehalt führt zwar zu einer Festigkeitssteigerung des UHPC, er hemmt jedoch auch die Fließfähigkeit und lässt dadurch keinen Einsatz bei Praxisanwendungen zu.

## 5.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass grundsätzlich eine Steigerung der Festigkeit und Duktilität von UHPC durch Carbonfasern möglich ist. Mit den Fasern, wie sie für die Anwendung in dieser Arbeit vorliegen, können jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden.

Um ein Fließen des Frischbetons zu erreichen, was als Grundvoraussetzung für eine Anwendung gesehen wird, ist eine Reduktion des Längen- zu Durchmesser- Verhältnisses der Fasern erforderlich. Da längere Fasern positiv für ein duktiles Versagen sind und ein Kürzen der Fasern nicht sinnvoll erscheint, ist ein größerer Faserdurchmesser nötig um das L/D Verhältnis zu erhöhen. Es wird angenommen, dass sich ein Wert bis 60 günstig auf die Verarbeitbarkeit auswirken würde. Stahlfasern bis zu dieser Schlankheit erfüllen die Voraussetzungen für eine gute Verarbeitbarkeit. Ein Durchmesser von mindestens 100µm ist bei einer Faserlänge von 6mm erforderlich, um nicht über dem genannten Wert zu liegen. Der Carbonfaserdurchmesser ist durch den Herstellungsprozess limitiert. Um einen größeren Durchmesser zu schaffen, müssten mehrere Einzelfasern zu einer Faser zusammengefasst werden. Die Kopplung der Einzelfasern zu einem Multifilament könnte durch einen geeigneten Kunststoff erreicht werden.

---

Diese Faserbündelung könnte neben der Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons auch zu einem verminderten Versagen der Einzelfasern eines Bündels durch Querdruck führen, wie dies bei Proben der Mischvariante 2 der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit beobachtet wurde. Der Kunststoff müsste auch für eine bessere Beständigkeit der Fasern beim Mischvorgang sorgen und somit dem vermehrten Faserbruch während des Herstellungsprozesses des UHPC entgegenwirken. Die Rauigkeit des Bündels sollte für die Verbundwirkung ausreichen, da dies auch bei den glatten Mikrostauffasern mit ähnlichen Proportionen der Fall ist.

Eine Forschungsarbeit die sich zum Teil auch mit diesem Ansatz beschäftigt [18] konnte jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen. In diesem Fall wurden Rovings aus AR Glas und Basaltfasern jeweils mit Kunststoffen auf Basis von Thermoplasten, Duroplasten wie auch Elastomeren getränkt und in Folge zu Kurzschnittrovings verarbeitet.

Dies zeigt dass der Wahl des Kunststoffes und des Verarbeitungsprozesses der Einzelfaser zu Bündeln große Bedeutung zukommen muss um Verbesserungen zu erzielen. Es wäre möglich, dass ein anderer Kunststoff sehr wohl zu besseren Ergebnissen führt.

Eventuell wäre im Gegensatz zu einem vollständigen Tränken der Rovings in Kunststoff ein abstandsweises Fixieren der Einzelfasern zu Bündeln zielführender. Zwischen den Fixierungsquerschnitten könnte die Zementmatrix teilweise in die Bündel eindringen und somit einen verbesserten Verbund bewirken. Die Fasern im Inneren wären nicht vollständig in die Zement- bzw. Kunststoffmatrix eingebettet und wären in Folge dessen nicht in dem Maße querdruckgefährdet, wie dies bei den dünnen Einzelfasern der Fall ist. Dies hat sich auch bei Proben der Mischvariante 2 dieser Arbeit als günstig erwiesen. Ob damit auch die Bruchgefahr beim Mischprozess verringert werden würde, kann nicht gesagt werden. Vielleicht könnte ein Besprühen der Kurzschnittrovings mit Kunststoff zu Verbesserungen führen. Einzelne feine Tropfen die an der Oberfläche haften könnten den Aufprall des Quarzsandes an den Fasern dämpfen.

Es wären viele Möglichkeiten der Fasermodifizierung vorstellbar, um hinsichtlich der Prüfergebnisse von Carbonfaser – verstärktem UHPC Verbesserungen zu erzielen. Im Vordergrund aller Überlegungen muss die Verarbeitbarkeit des Frischbetons stehen, da diese die Grundvoraussetzung für jede Anwendung bildet.

---

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Qualitativer Vergleich der Druckspannungs – Dehnungslinien von Beton, [8]	5
Abbildung 2: Qualitative Verläufe der Spannungs- Durchbiegungsbeziehung von UHPC unter Biegezugbelastung	7
Abbildung 3: Makroriss mit rissüberbrückenden Stahlfasern	8
Abbildung 4: Umlenkung einer nicht normal zur Bruchebene verlaufenden Faser, [9]	8
Abbildung 5: Mikrostahtfasern, [11]	11
Abbildung 6: Spannungs- Dehnungslinie eines UHPC Probekörpers ohne Fasern, [10]	12
Abbildung 7: Spannungs- Dehnungslinien von UHPC Probekörpern mit 2,5Vol.% Stahlfasern, [10]	12
Abbildung 8: Biegezugspannung - Maschinenweg – Verlauf von UHPC Prismen mit Stahlfasern, [10]	12
Abbildung 9: Sherbrook Fußgängerbrücke, [13]	13
Abbildung 10: Sakata - Mirai Fußgängerbrücke, [14]	13
Abbildung 11: Montage Sakata - Mirai Fußgängerbrücke, [15]	13
Abbildung 12: Last- Verformungsbeziehung eines Zementsteines mit Carbonfasern und Quarzsand unter Biegung, [7]	14
Abbildung 13: Last- Verformungsbeziehung eines Zementsteines mit Carbonfasern ohne Quarzsand unter Biegung, [7]	14
Abbildung 14: Einteilung der Carbonfasern nach Zugfestigkeit und E – Modul, [3]	15
Abbildung 15: Biegezugfestigkeit von UHPC Prismen mit Carbonfasern, [18] modifiziert	17

---

---

Abbildung 16: Verbundspannungs- Schlupf- Beziehung von Carbon- und Glas-Einzelfasern in Zementstein, [22] modifiziert	17
Abbildung 17: Vergleich der Spannungs- Dehnungsbeziehungen unterschiedlicher Faserrovings und Einzelfilamente, [16]	20
Abbildung 18: Biegezugfestigkeit von UHPC Prismen mit AR- Glasfasern, [18] modifiziert	21
Abbildung 19: Biegezugspannungs- Durchbiegungsbeziehung von faserverstärktem UHPC, [19] modifiziert	21
Abbildung 20: Textilbewehrtes Brückenelement, [20]	21
Abbildung 21: Biegezugfestigkeit von UHPC Prismen mit Polyvinylalkohalfasern, [18] modifiziert	23
Abbildung 22: Produktionsprozess Carbonfaser, [3]	25
Abbildung 23: Stabilisation und Karbonisation der PAN Faser, [7]	26
Abbildung 24: Produktionsprozess Carbonfaser, [7]	26
Abbildung 25: Querschnitt- Carbonfasern	27
Abbildung 26: Funktionsweise von Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether, [5]	30
Abbildung 27: Quarzsand - Materialkennwerte und Kornverteilung, [23]	30
Abbildung 28: Horbat Mischer/ dreiteilige Stahlschalung	37
Abbildung 29: Ausbreitversuch mit Hägermann Setztrichter	38
Abbildung 30: Dreipunktbiegezugprüfung	39
Abbildung 31: Druckprüfung	39
Abbildung 32: Beeinflussung der Fließfähigkeit des UHPC durch Carbonfasern	44
Abbildung 33: Ausbreitmaß in Abhängigkeit vom Faserzusatz	45
Abbildung 34: Fasern mit Glycerinschichte vor und nach der Wasserzugabe	46
Abbildung 35: Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop: 0,15 Vol.% Fasern / 2 Vol.% Fasern mit Epoxidharzschichte	47

---

---

Abbildung 36: Ausbreitmaßmessung bei UHPC mit Stahlfasern	47
Abbildung 37: Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit des Faserzusatzes, niederer Fasergehalt	50
Abbildung 38: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Faserzusatzes, niederer Fasergehalt	50
Abbildung 39: Ausbreitmaßmessung von UHPC mit 1,5 Vol.% Carbonfasern	51
Abbildung 40: Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit des Faserzusatzes, hoher Fasergehalt	52
Abbildung 41: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Faserzusatzes, hoher Fasergehalt	53
Abbildung 42: Biegeversuch - Spannungs- Durchbiegungsbeziehung abhängig von der Faserverteilung, niederer Fasergehalt	54
Abbildung 43: Biegeversuch - Spannungs- Durchbiegungsbeziehung abhängig von der Faserverteilung, hoher Fasergehalt	55
Abbildung 44: Biegeversuch - Streuung des Nachrissverhaltens von UHPC mit 1,5 Vol.% gebündelter Fasern	55
Abbildung 45: Einzelfasern unter dem Rasterelektronenmikroskop	56
Abbildung 46: Detailbetrachtung einer Faser unter dem Rasterelektronenmikroskop	57
Abbildung 47: Querbeanspruchung der Faser in der Bruchebene des UHPC [9]/ Faserbruch in UHPC Bruchebene	57
Abbildung 48: REM: Faserbündel / Detail Faserbündel	58
Abbildung 49: REM: Störung der Betonmatrix	59
Abbildung 50: Belastung eines Faserbündels auf Normaldruck und Abscheren	60
Abbildung 51: Vergleich gebrochene Fasern	62
Abbildung 52: Vergleich von faserfreiem, Carbonfaser- verstärktem und Stahlfaser- verstärktem UHPC	63
Abbildung 53: Biegeversuch: Vergleich der Spannungs- Durchbiegungsbeziehung von UHPC mit Stahl- und Carbonfasern	64

---

## 6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gebräuchliche Faserarten, [8]	6
Tabelle 2: Carbonfaser - Materialkennwerte	24
Tabelle 3: UHPC Rezeptur	31
Tabelle 4: Versuchsprogramm	35
Tabelle 5: Übersicht Prüfergebnisse	42
Tabelle 6: Beeinflussung des Ausbreitmaßes	48

## 6.3 Quellen

- [1] Ausschreibung DFB Schwerpunktprogramm: *Nachhaltiges Bauen mit Ultra – hochfestem Beton zur Laststeigerung, Umweltentlastung und Kostensenkung im Betonbau*. Kassel, 2004
- [2] Ma Jianxin: *Faserfreier ultrahochfester Beton – Entwicklung und Materialeigenschaften*. Dissertation. Universität Leipzig, 2010
- [3] SGL Group – The Carbon Company: *Carbonfasern – Herstellung, Produkte, Anwendung*. Seminarunterlagen. Meitingen, 2010
- [4] Maydl P., Tritthart J.: *Baustofflehre GL Vorlesung*. Skriptum. Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie. Technische Universität Graz, 2006
- [5] Höveling Holger: *Robustheit von Selbstverdichtendem Beton*. Dissertation. Universität Hannover, 2010, S.36-39
- [6] Flemming M., Ziegmann G., Roth S.: *Faserverbundbauweisen – Fasern und Matrices*. Berlin, Heidelberg, 1995, S. 9-10, 17
- [7] Morgan Peter: *Carbon Fibers and their Composites*. Boca Raton, USA, 2005, S.121-130, 194-204, 585-591
- [8] Leutbecher Torsten: *Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC)*. Dissertation. Universität Kassel, 2007, S. 4, 49-53
-

- [9] Heinzle G., Freytag B., Linder J.: *Rissbildung von Biegebeanspruchten Bauteilen aus Ultrahochfestem Faserbeton*. Beton- und Stahlbetonbau 104, Heft 9, 2009
- [10] Fehling E., Schmidt M., Teichmann T., Bunje K., Bornemann R., Middendorf B.: *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)*. Forschungsbericht DFG FE 497/1-1. Universität Kassel, 2005, S. 5, 39, 40-41, 96-99
- [11] Breyer Christoph: *Faserverteilung im ultrahochfesten Beton*. Diplomarbeit. Institut für Betonbau, TU Graz, 2008, S.14
- [12] Durukal A., Batoz J.-F.: *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Footbridges*. In *Ultra – Hochfester Beton. Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa*. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau. Heft 2. Universität Kassel. 2003, S. 62, 65-66
- [13] <http://www.ductal-lafarge.com/wps/wcm/connect/f770200043271c5488a6b9c3768b571f/Sherbrooke1.DR.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=f770200043271c5488a6b9c3768b571f>, 05.02.2011
- [14] <http://www.ductal-lafarge.com/wps/wcm/connect/6d41a800432746568991b9c3768b571f/8987870.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=6d41a800432746568991b9c3768b571f>, 05.02.2011
- [15] [http://www.ductal-lafarge.com/wps/wcm/connect/6e72d500432746568993b9c3768b571f/1L2L-5\\_26.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=6e72d500432746568993b9c3768b571f](http://www.ductal-lafarge.com/wps/wcm/connect/6e72d500432746568993b9c3768b571f/1L2L-5_26.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=6e72d500432746568993b9c3768b571f), 05.02.2011
- [16] Krüger Markus: *Vorgespannter textildbewehrter Beton*, Dissertation. Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2004, S. 15-19, 36
- [17] Hardmeier S.: *AR Glasfasern als Mikrobewehrung zur Rissbreitenbeschränkung und Festigkeitssteigerung von Estrich und Beton*. Vortrag der Novacret AG Zürich. Proceedings of the Asia-Pacific Speciality Conference on Fibre Reinforced Concrete. Singapore, 1997
- [18] Kavelin A., Wolf G.: *Entwurf und parametrisierte Berechnung von Fußgängerbrücken aus mit korrosionsbeständigen Fasern verstärktem Ultra – Hochfesten Beton (UHPC)*. Diplomarbeit. Universität Kassel, 2005, S. 13-20, 28-33
- [19] Anders S., Lohaus L.: *Effects of polymer- and fibre modifications on the ductility, fracture properties and microcrack development of ultrahigh performance concrete*. In: Ultra High
-

Performance Concrete (UHPC). Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, 2004, S. 625-636

[20] <http://www.tu->

[dresden.de/biw/bilderservice/textilbruecke/thumbs/th\\_crw\\_6259.jpg](http://www.tu-dresden.de/biw/bilderservice/textilbruecke/thumbs/th_crw_6259.jpg), 18.02.2011

[21] Reda M., Shrive N., Gillot J.: *Microstructural investigation of innovative UHPC*. In: Cement and Concrete Research 29, 1999, S. 323-329

[22] Voss Stefan: *Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. Dissertation technische Hochschule Aachen, 2008, S. 23-24

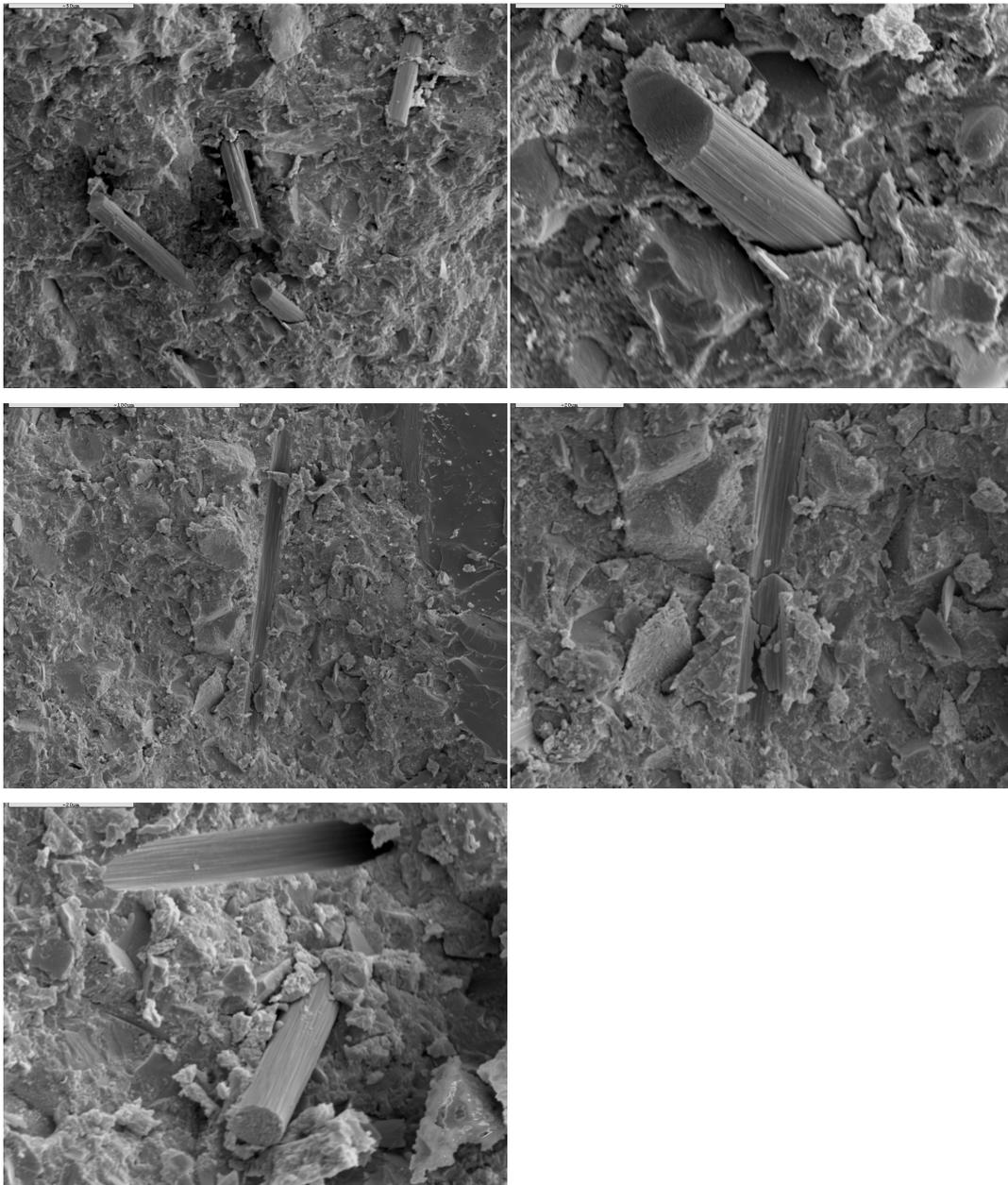
[23] [http://www.quarzsande.at/quarzsande/download/dorsilit/Dorsilit\\_Nr8.pdf](http://www.quarzsande.at/quarzsande/download/dorsilit/Dorsilit_Nr8.pdf), 09.03.2011

---

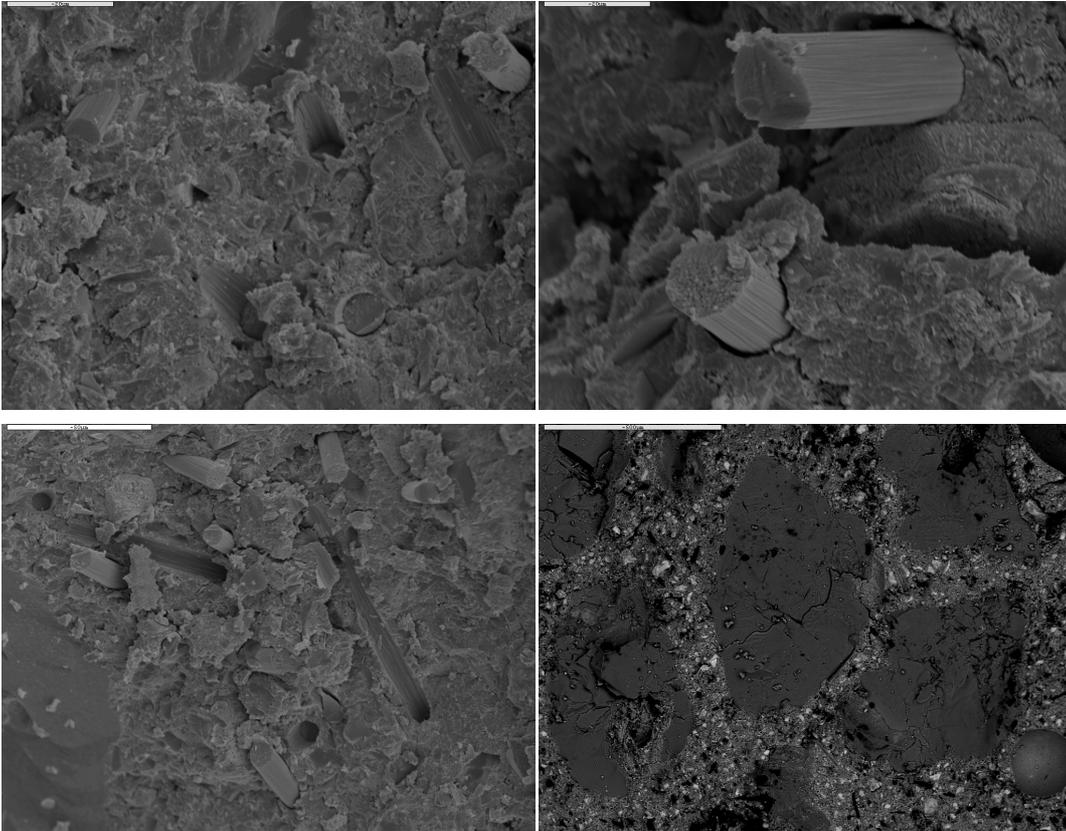
## A Anhang

Es folgt eine Zusammenstellung der im Rahmen dieser Masterarbeit hergestellten Raster-  
elektronenmikroskop - Aufnahmen von gebrochenen, mit Carbonfasern verstärkten  
UHPC Prüfkörpern wie auch von Ausgangsfasern.

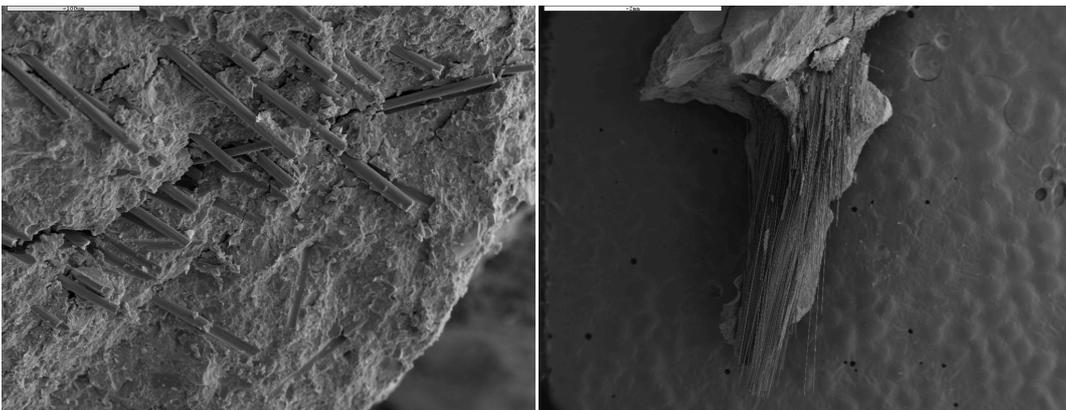
- Probe Serien Nr. 2

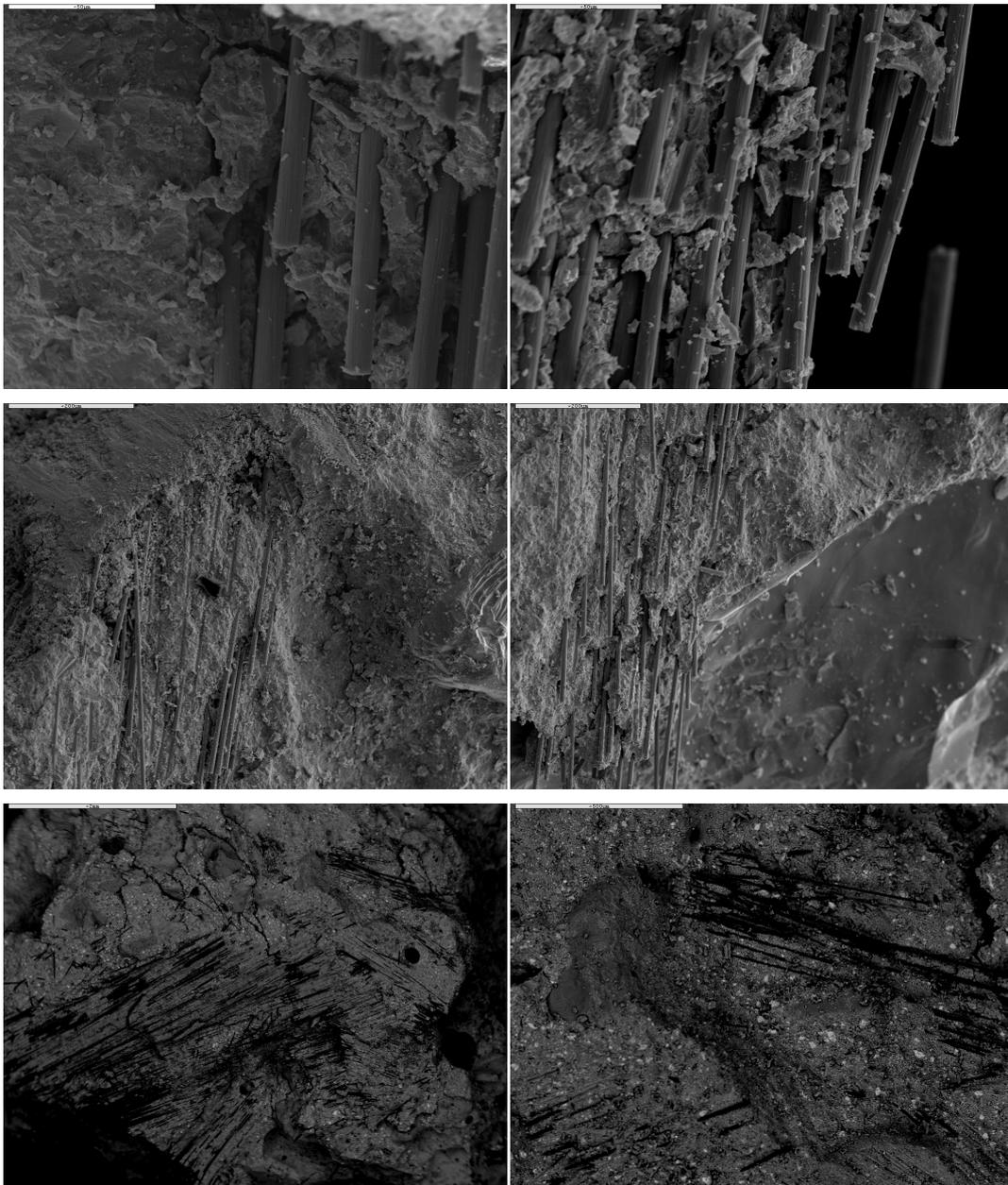


- Probe Serien Nr. 4

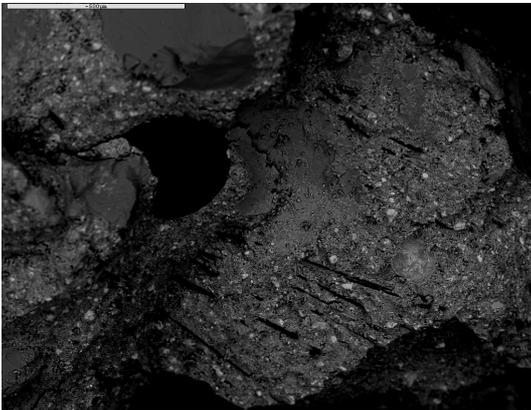
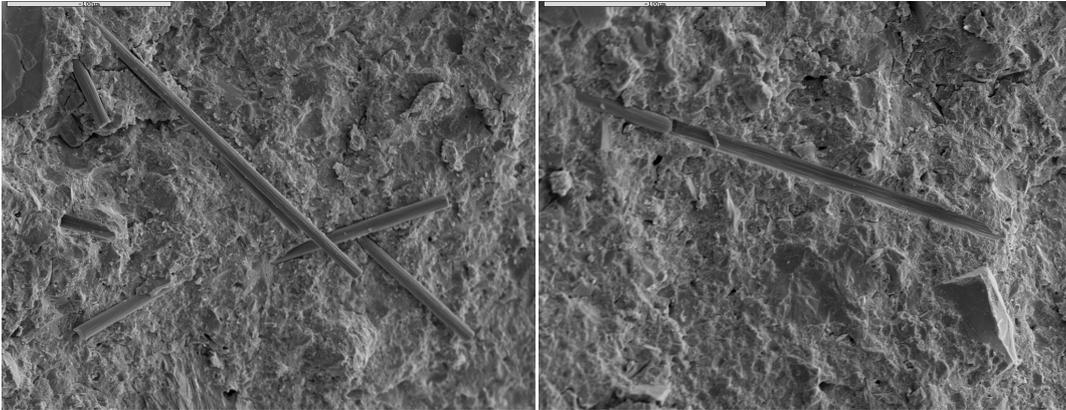


- Probe Serien Nr. 15

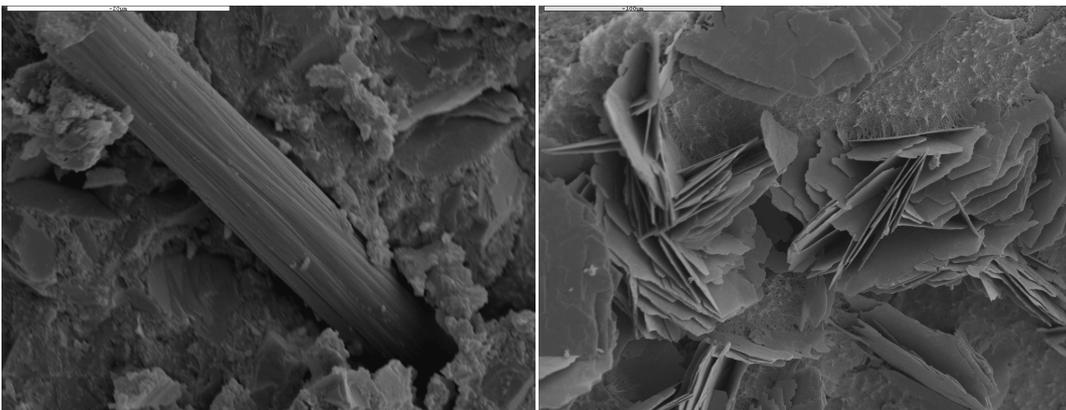




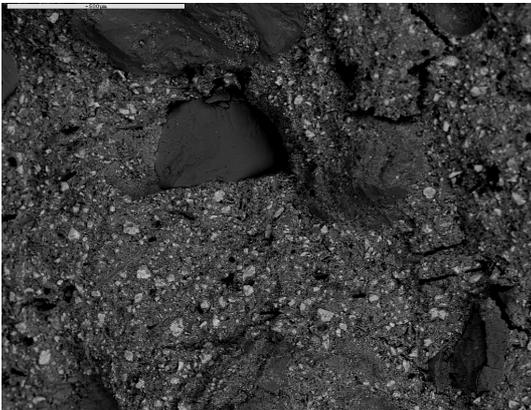
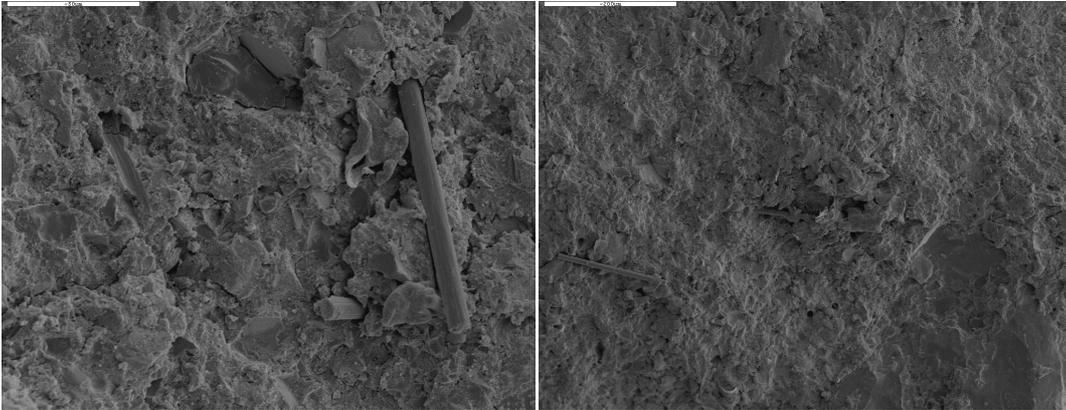
- Probe Serien Nr. 21



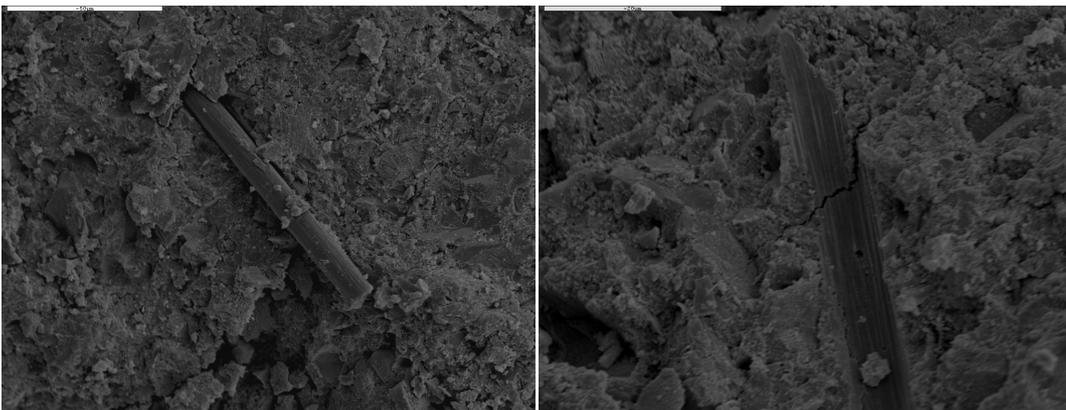
- Probe Serien Nr. 23



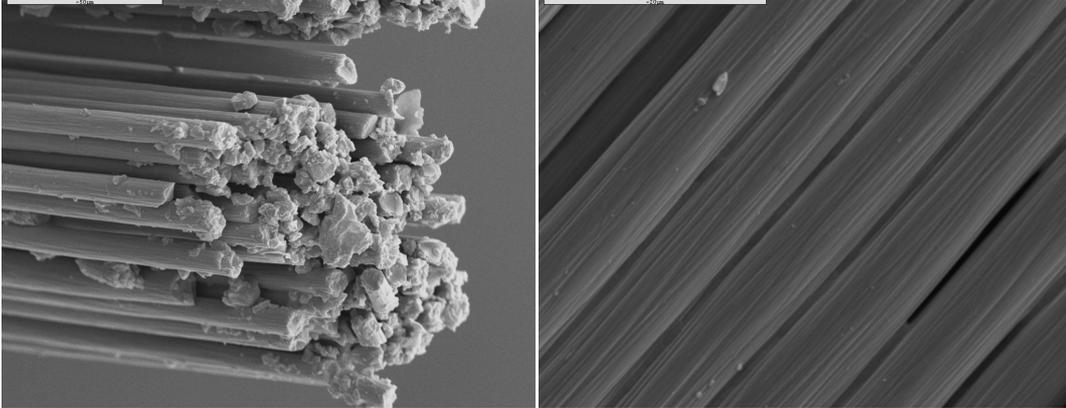
- Probe Serien Nr. 24



- Probe Serien Nr. 27



- Carbonfasern mit Epoxidharzschlichte



- Carbonfasern mit Glycerinschlichte

