

# BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR

## FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

F. A. FINGER-INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE  
PROFESSUR WERKSTOFFE DES BAUENS

### M a s t e r a r b e i t

Thema: Vergleichende Untersuchungen zur mechanischen  
Aufbereitung von Carbonbeton

Bearbeiter: Verena Horstmann

Matrikel-Nr.: 117059

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Elske Linß

Betreuer: Dr.-Ing. Elske Linß

Ausgabedatum: 01.06.2018

Abgabedatum: 31.10.2018

Reg.-Nr.: BWM/2018/4

Prof. Dr. G. Morgenthal

Vorsitzender des Prüfungsausschusses

## **Aufgabenstellung**

### **Problemstellung**

Carbonbeton ist ein relativ neues Verbundmaterial, welches derzeit sehr intensiv beforscht wird. Bei der Entwicklung eines neuen Baumaterials sind im Vorfeld Betrachtungen bezüglich des gesamten Lebenszykluses durchzuführen. Zum Verhalten von Carbonbeton beim Rückbau und der Aufbereitung gibt es zur Zeit nur einige wenige Untersuchungen. Die Schwierigkeit besteht in der möglichst kompletten Trennung der Feinbetonmatrix von der Verstärkung durch Carbonfasertextilien. Die separierten Materialien müssen bestimmten bzw. noch zu definierenden Qualitätskriterien entsprechen, welche für eine Verwertung einzuhalten sind. Das Verhalten von Carbonbeton bei mechanischer und Mikrowellenbeanspruchung ist derzeit nicht hinreichend bekannt und soll im Labormaßstab untersucht werden.

Im Rahmen der Masterarbeit soll das Aufschlussverhalten des Verbundmaterials Carbonbeton eingehend untersucht werden. Dabei soll sich hauptsächlich auf mechanische Zerkleinerungsverfahren und die Anwendung von Mikrowellen zur Schwächung des Verbundes im Vorfeld einer mechanischen Beanspruchung konzentriert werden. Die enthaltenen Carbonfasern könnten aufgrund ihrer Zusammensetzung als Suszeptor für die aufgebrachten Mikrowellen wirken. Es ist zu untersuchen, ob sich der Aufschlussgrad dadurch erhöhen lässt.

Es ist eine Auswahl geeigneter Aufbereitungstechnologien bestehend aus verschiedenen Verfahrensschritten zu treffen. Die ausgewählten Aufbereitungsschritte sind jeweils mit einer entsprechenden begleitenden Analytik der baustoff- und umwelttechnischen Kennwerte durchzuführen. Anhand der durchgeführten Versuche soll eine Bewertung der verschiedenen Aufbereitungstechnologien für Carbonbeton vorgenommen werden. Zudem sollen die im Prozess freigesetzten Stäube hinsichtlich des Faseranteils charakterisiert werden.

#### **1. Schwerpunkt:**

Im ersten Schritt ist eine Literaturrecherche zu den Schwerpunkten Herstellung und baustofftechnische Eigenschaften von Carbonbeton, Recycling von Carbon- und Textilbeton, traditionelle und innovative Zerkleinerungs- und Aufbereitungsverfahren für Altbetone, Staub- und Faseranalytik anzufertigen.

#### **2. Schwerpunkt:**

Im zweiten Schritt sind entsprechende Probekörper für die Zerkleinerungsversuche herzustellen. Für die Untersuchungen soll sich auf Feinbetone mit engmaschigen Carbonfasertextilien bezogen werden, wie sie in der Praxis hauptsächlich für Instandsetzung- und Ausbesserungsarbeiten eingesetzt werden.

**3. Schwerpunkt:**

Weiterhin sind geeignete Aufbereitungsverfahren auszuwählen und im Aufbereitungstechnikum durchzuführen. Die Versuche sind umfassend zu dokumentieren sowie die anfallenden Stäube und Massenströme aufzunehmen.

**4. Schwerpunkt:**

Von den aufbereiteten Materialien sind typische bau- und umwelttechnische Kennwerte wie beispielweise Reindichte, Rohdichte, Wasseraufnahme, Auslaugverhalten zu bestimmen. Während der einzelnen Aufbereitungsschritte soll die Aerosolkonzentration der PM10- und PM2,5-Fraktion gemessen und dokumentiert werden.

**Hinweise und Festlegungen**

Die abzugebende Dokumentation umfasst:

- Masterarbeit in 3facher Ausfertigung
- Thesen zur Masterarbeit in 3facher Ausfertigung
- Digitale Version der Arbeit als pdf auf Datenträger

Weimar, den 22.03.2018

## Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Stand des Wissens</b> .....	<b>2</b>
2.1 Carbonbeton .....	2
2.1.1 Herstellung .....	3
2.1.2 Baustofftechnische Eigenschaften und Anwendungsgebiete .....	6
2.2 Recycling von Carbonbeton .....	8
2.2.1 Aufbereitungsverfahren .....	8
2.2.1.1 Traditionelle Zerkleinerungsverfahren für Altbetone .....	9
2.2.1.2 Innovative Zerkleinerungsverfahren für Altbetone .....	11
2.2.1.3 Sortierverfahren für Altbetone .....	16
2.2.1.4 Aufbereitungsverfahren für rezyklierte Carbonfasern .....	21
2.2.2 Verwertungsmöglichkeiten .....	23
2.2.2.1 Verwertung rezyklierter Gesteinskörnung .....	23
2.2.2.2 Verwertung rezyklierter Carbonfasern .....	24
2.3 Stäube bei der Bearbeitung von Carbonbeton .....	26
<b>3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton</b> .....	<b>28</b>
3.1 Versuchsplanung .....	28
3.1.1 Analysemethoden zur Bestimmung der Aufbereitungsqualität des Rezyklats .....	30
3.1.2 Analysemethoden zur Bestimmung des Aufschlussgrades des Rezyklats .....	32
3.1.3 Analysemethoden zur Bestimmung des Fasergehaltes im Rezyklat .....	32
3.1.4 Analysemethoden zur Bestimmung der Staubentwicklung .....	36
3.2 Vorbereitende Maßnahmen .....	38
3.2.1 Herstellung der Probekörper .....	38
3.2.2 Baustofftechnische Kennwerte der Probekörper .....	40
3.3 Durchführung der mechanischen Zerkleinerungsversuche .....	41
3.3.1 Mechanische Zerkleinerung ohne Vorbehandlung .....	41
3.3.2 Mechanische Zerkleinerung mit thermischer Vorbehandlung .....	42
3.3.3 Mechanische Zerkleinerung mit Mikrowellen-Vorbehandlung .....	42
3.3.4 Staubmessungen bei der mechanischen Zerkleinerung ohne Vorbehandlung .....	46

3.4 Versuchsergebnisse .....	47
3.4.1 Versuchsergebnisse zur Aufbereitungsqualität des Rezyklats .....	48
3.4.2 Versuchsergebnisse zum Aufschlussgrad des Rezyklats .....	55
3.4.3 Versuchsergebnisse zum Fasergehalt im Rezyklat.....	55
3.4.4 Versuchsergebnisse der Staubmessungen .....	58
3.5 Auswertung der Versuchsergebnisse .....	63
3.5.1 Vergleich der Zerkleinerung von Carbon- und Normalbeton .....	63
3.5.2 Einfluss der Vorbehandlung auf die Aufbereitungsqualität des Rezyklats .....	68
3.5.3 Einfluss der Vorbehandlung auf den Aufschlussgrad des Rezyklats .....	73
3.5.4 Einfluss der Vorbehandlung auf den Fasergehalt im Rezyklat .....	76
3.5.5 Auswertung der Staubmessungen.....	77
3.5.6 Fehlerbetrachtung .....	83
<b>4. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>84</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>87</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>95</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>103</b>
Anhang 1.....	104
Anhang 2.....	107
Anhang 3.....	108
Anhang 4.....	110
Anhang 5.....	115
Anhang 6.....	126
<b>Erklärung .....</b>	<b>134</b>

## Abkürzungsverzeichnis

A	Carbongelege A – SITgrid 040
A-Fraktion	alveolengängige Fraktion
AR	alkaliresistent
B	Carbongelege B – SITgrid 040 mit Beschichtung CHT 80°-Chemie
BB	Backenbrecher
CF	Carbonfaser
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
DSC	Differential Scanning Calorimetry
E-Fraktion	einatembare Fraktion
GK	Gesteinskörnung
HF	hochfest
MFGPA	Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
MW	Mikrowellen
NF	normalfest
PAN	Polyacrylnitril
PB	Prallbrecher
PM	Particulate Matter
RC	Recycling
REM	Rasterelektronenmikroskop
TC	Total Carbon
TG	Thermogravimetrie
TIC	Total Inorganic Carbon
TOC	Total Organic Carbon
VB	Vorbehandlung
WHO	World Health Organization

### 1. Einleitung

Carbonbeton ist ein modernes Verbundmaterial, das derzeit intensiv beforscht wird. Um es fest im Markt zu etablieren, wird die Untersuchung von Carbonbeton im Rahmen des Förderprogrammes „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ als eines von zehn Projekten vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Im Zuge dieses Projektes haben sich Hochschulen – darunter auch die Bauhaus-Universität Weimar – und Unternehmen über den Verein C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V. vernetzt. Sie wollen bis 2030 Voraussetzungen dafür schaffen, dass mindestens 20 % der üblichen Stahlbewehrung durch Carbonbewehrung ersetzt werden kann [1].

Bei der Entwicklung eines neuen Baumaterials sind im Vorfeld Betrachtungen bezüglich des gesamten Lebenszyklusses durchzuführen. Das Verhalten von Carbonbeton beim Rückbau und der Aufbereitung ist zur Zeit noch nicht hinreichend erforscht. Aus diesem Grund führt die Bauhaus-Universität im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes eine Machbarkeitsstudie für neuartige Aufbereitungstechnologien für das Carbonbetonrecycling durch. Bestandteil der Studie ist diese Masterarbeit. Sie befasst sich mit dem Aufschlussverhalten des Verbundmaterials für verschiedene mechanische Zerkleinerungsverfahren und Vorbehandlungsarten. Dabei wird die mechanische Zerkleinerung des Carbonbetons mit dem Prall- und Backenbrecher durchgeführt und der Einfluss thermischer und mikrowelleninduzierender Vorbehandlung untersucht. Des Weiteren werden die im Prozess freigesetzten Stäube charakterisiert. Ziel der Masterarbeit ist die Beurteilung der ausgewählten Aufbereitungstechnologien hinsichtlich der Eignung für Carbonbeton.

Der aktuelle Stand des Wissens über Carbonbeton und dessen Recycling wird in Kapitel 2 dieser Arbeit aufgeführt. Dabei wird auf die Herstellung des Verbundmaterials sowie die baustofftechnischen Eigenschaften und Anwendungsgebiete eingegangen. Auf Grundlage aktueller Forschungsergebnisse werden Aufbereitungsverfahren für Altbetone vorgestellt, die auch für Carbon-Altbetone verwendet werden können. Des Weiteren werden Verwertungsmöglichkeiten für die Carbonbeton-Rezyklate genannt und die Staubentwicklung bei der Bearbeitung von Carbonbeton betrachtet.

In Kapitel 3, dem experimentellen Teil, werden zu Beginn die Versuchsplanung und Analysemethoden der Carbonbeton-Rezyklate und -Stäube erläutert sowie die vorbereitenden Maßnahmen für die Untersuchungen. Anschließend wird die Durchführung der Zerkleinerungsversuche sowie Vorbehandlungsverfahren beschrieben und die Versuchsergebnisse aufgeführt. Daran schließt sich die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie eine zusammenfassende Fehlerbetrachtung der Analysemethoden an.

Abschließend fasst das letzte Kapitel die gewonnenen Erkenntnisse aus den ausgewerteten Untersuchungen zusammen.

### **2. Stand des Wissens**

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand des Wissens über das Recycling von Altbeton und Carbonbeton dargestellt. Dabei werden sowohl traditionelle als auch innovative Zerkleinerungs- und Aufbereitungsverfahren von Altbetonen vorgestellt. Danach wird ein Einblick in die Problematik der Sortierung von zerkleinerten Altbetonen und Carbon-Altbetonen gegeben sowie aufgeführt, welche Trennverfahren für die Sortierung der rezyklierten Gesteinskörnung und Carbonfasern in Frage kommen. Ferner werden Aufbereitungsmöglichkeiten für die rezyklierten Carbonfasern erläutert und Verwertungsmöglichkeiten für die rezyklierte Gesteinskörnung und die Carbonfasern diskutiert.

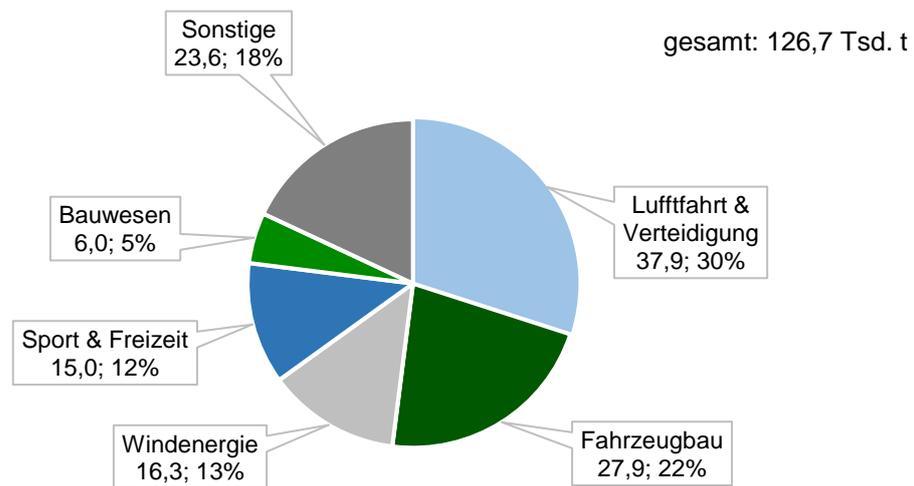
Zuletzt werden in diesem Kapitel die bei der Bearbeitung von Carbonbeton entstehenden Stäube näher betrachtet und es wird geklärt, welchen Effekt diese auf die menschliche Gesundheit haben.

Um zunächst eine Diskussionsgrundlage zu schaffen, wird im folgenden Kapitel der Baustoff Carbonbeton an sich betrachtet.

#### **2.1 Carbonbeton**

Carbonbeton ist eine Untergruppe der Textilbetone. Textilbeton ist ein Verbundwerkstoff, der ähnlich wie der Stahlbeton, aus den zwei Komponenten Beton und Bewehrung besteht. Anders als beim Stahlbeton ist die Bewehrung jedoch nicht aus Stahl, sondern aus technischen Textilien. Die technischen Textilien können aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas), Basalt oder auch Carbon hergestellt werden. Wird ein Beton mit Carbonfasern bewehrt, spricht man folglich von Carbonbeton [1].

Die Grundlagen für Carbonbetone schafften Forschungen von 1999 bis 2011 an der Technischen Universität Dresden und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, die sich mit der Substitution des Bewehrungsstahls durch technische Textilien beschäftigten. Der gegenwärtige Forschungsstand und die Erfahrungen aus der Praxis bestätigen, dass Carbonbeton eine adäquate Alternative zu Stahlbeton darstellen kann. So belegen mittlerweile zahlreiche Referenzobjekte die positiven Leistungsmerkmale des Verbundwerkstoffes (Kapitel 2.1.2). Derzeit wird daran gearbeitet den Verbundwerkstoff Carbonbeton fest im Markt zu etablieren [C1]. 2016 wurden weltweit bereits 6,0 Tsd. t Carbonfasern im Bauwesen weiterverarbeitet. Das entspricht 5 % des weltweiten Bedarfes an Carbonfasern, die zu Verbundwerkstoffen verarbeitet werden [K8]. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über den weltweiten Carbonfaser-Bedarf für Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit von den jeweiligen Anwendungsgebieten.



**Abbildung 1:** Weltweiter Carbonfaser- Bedarf für Verbundwerkstoffe in Tsd. Tonnen nach Anwendungsgebieten (Stand: 09/2017) [K8]

Wie Carbonbeton hergestellt wird, wird im nachfolgenden Kapitel näher betrachtet. Dabei wird explizit auf die Herstellung der Carbonbewehrung eingegangen sowie auf die Besonderheiten des zu verwendeten Betons. In den darauf folgenden Kapiteln werden die baustofftechnischen Eigenschaften des innovativen Verbundwerkstoffes vorgestellt sowie die daraus resultierenden Vorteile und Anwendungsgebiete.

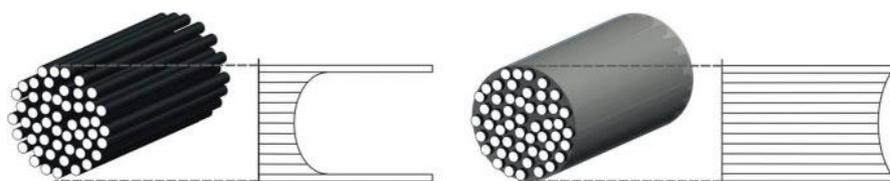
### 2.1.1 Herstellung

Der Herstellungsprozess von Carbonfasern ist im Vergleich zu Stahl mit einem 4 bis 5 mal höheren Energieaufwand verbunden [L4], da dieser äußerst komplex ist. Aus diesem Grund wird er weltweit auch nur von wenigen Unternehmen beherrscht. Um den Ansprüchen einer Hochleistungsfaser Rechnung zu tragen, muss eine Carbonfaser zu mindestens 90 % aus Kohlenstoff bestehen. Hierfür werden die Carbonfasern mittels kontrollierter Pyrolyse aus geeigneten Ausgangsmaterialien wie Polyacrylnitril (PAN), Pech oder Viskose hergestellt. Bei der Pyrolyse wird durch hohe Temperaturen ein Bindungsbruch innerhalb der Moleküle der Ausgangsmaterialien bewirkt. Polyacrylnitril ist dabei der bevorzugte Ausgangswerkstoff für viele Applikationen, da aus diesem qualitativ hochwertige Carbonfasern kostengünstig herstellbar sind. Die anderen Ausgangsmaterialien werden aufgrund äußerst hoher Herstellungskosten nur für einige spezielle Einsatzgebiete verwendet [K2].

Die Herstellung von Carbonfasern aus Polyacrylnitril erfolgt in einem kontinuierlichen Prozess und in der Regel in mehreren Ofenkammern. Zunächst wird aus dem Polyacrylnitril durch ein Nassspinnverfahren ein Vorläufermaterial hergestellt. Hierbei handelt es sich um ein PAN-Filamentgarn, also um Endlosfasern aus Polyacrylnitril. Anschließend wird das Vorläufermaterial durch Stabilisierung, Carbonisierung und Graphitisierung zu Carbonfasern verarbeitet. Die thermische Stabilisierung des PAN-Filamentgarns erfolgt durch

einen Oxidationsprozess bei Temperaturen von 250 bis 300 °C. Dabei werden die linearen Polymerketten zu einer thermisch stabileren hexagonalen Ringstruktur umgewandelt. Darauf folgt die Carbonisierung, die sich in mehrere Teilprozesse gliedert. Zunächst wird das Vorläufermaterial bei Temperaturen von bis zu 700 °C behandelt, was zu einer Dehydrierung der stabilisierten PAN-Ringe führt. Im weiteren Prozessablauf erfolgt die Überführung in eine an Fremdatomen arme Kohlenstoffstruktur durch die Abspaltung des Stickstoffs im Temperaturbereich von 700 bis 1200 °C. Zur Carbonisierung muss anschließend das vorbehandelte Fasermaterial in einer sauerstoffreichen Umgebung auf mehr als 1400°C erhitzt werden, damit die Ausbildung einer fremdatomfreien, möglichst reinen Kohlenstoffstruktur stattfinden kann. Zuletzt folgt die Graphitisierung der Carbonfasern bei Temperaturen über 2400 °C, wobei sich die Struktur der Carbonfasern durch Verstreckung an das Graphit-Gitter annähert. Durch die Graphitisierung kommt es zu einer signifikanten Steigerung des E-Moduls, wenngleich die Zugfestigkeit sinkt [K2].

Nach dem Herstellungsprozess müssen die Oberflächen der Carbonfasern behandelt werden, da sie aufgrund ihres molekularen Aufbaus ausgesprochen energiearm sind. Dies bedeutet, dass die Phasengrenzfläche nur sehr schwach ausgeprägte Wechselwirkungskräfte für den Verbund mit anderen Materialien ausbilden kann. Eine anforderungsgerechte Haftung zum jeweiligen Matrixsystem (hier zur Betonmatrix) ist für einen kraftschlüssigen Verbund allerdings zwingend notwendig [K2]. Aus diesem Grund werden die Filamente mit einer Schlichte und die Garne bzw. Gelege mit einer Beschichtung versehen (Vollimprägnierung). Durch den Beschichtungsprozess werden die einzelnen Filamente der Garne miteinander verbunden. Dadurch wird die mechanische Widerstandsfähigkeit erhöht, die Verarbeitbarkeit verbessert und das Zusammenwirken der Randfasern, die direkten Verbund zur mineralischen Matrix haben, und der im Garn innen liegenden Kernfasern gewährleistet (siehe Abbildung 2) [S1].

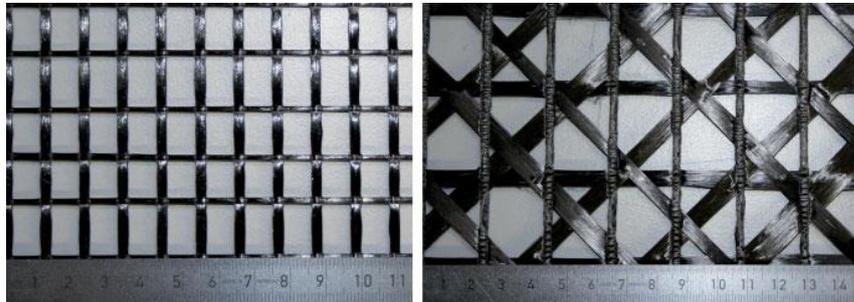


**Abbildung 2:** Spannungsverteilung im Filamentgarn, links ohne Imprägnierung, rechts vollständige Beschichtungs- und Imprägnierung [Y2]

Für den Textil-Beton-Verbund haben sich Beschichtungsmittel auf Basis filmbildender Polymerdispersionen als geeignet erwiesen [Y2].

Die Carbonendlosfasern werden schlussendlich zu Garnen (Rovings) verarbeitet, wobei die Anzahl der einzelnen Filamente je Roving in einem weiten Bereich zwischen Hunderten und Tausenden variieren kann. Die Rovings werden zu Stäben und textilen Gelegen weiterverarbeitet, die dann als Bewehrung im Beton Anwendung finden. Die textilen Gele-

ge werden auf Textilmaschinen unter zu Hilfenahme von Bindfäden hergestellt. In Abhängigkeit vom beabsichtigten Einsatzzweck können Garnstärke und -abstände sowie die Anzahl der Lagen und ihre Orientierung variiert werden, sodass man für verschiedene Beanspruchungen optimale Gelege erhält [S1]. Abbildung 3 zeigt beispielhaft ein bi- und multiaxiales Bewehrungsgelege aus Carbon.



**Abbildung 3:** Bi- (links) und multiaxiales (rechts) Bewehrungsgelege aus Carbon [Y2]

Der Einbau der Textilien im Beton erfordert im Gegensatz zur konventionellen Stahlbetonbauweise speziell angepasste Feinbetonrezepturen, da die Gitterabstände der textilen Bewehrung in der Regel nur ca. 1 bis 2 cm betragen [Y2]. Daher ist eine spezielle Kornzusammensetzung mit einem definierten maximalen Größtkorn der zementösen Matrix notwendig, um eine qualitativ gute Durchdringung der Gelege und die Realisierung eines tragfähigen Verbundes zwischen mehreren Textilbetonschichten gewährleisten zu können. Bisher erprobte Betonrezepturen beinhalten Gesteinskörnungen mit 1 – 8 mm Größtkorndurchmesser. Die Kornabstufung ist u. a. abhängig von der Geometrie des Geleges und dem Anwendungsgebiet [S1]. Weitere feste Bestandteile des Feinbetons sind in der Regel Zement, Silikastaub, Flugasche, Wasser und Fließmittel. Je nach Mischungszusammensetzung können die Feinbetone sowohl normalfest als auch hochfest hergestellt werden [S1]. Die Betonrezepturen werden dann entsprechend des Anwendungsgebiets und der damit einhergehenden Anforderungen entworfen [L2].

Die Herstellung von Carbonbeton erfolgt entweder durch lagenweises Laminieren, Spritzen oder im Gießverfahren mit Abstandhaltern. Da eine wesentliche Funktion der Betondeckung bei Stahlbeton – der Korrosionsschutz für die Bewehrung – entfällt (siehe Kapitel 2.1.2), richtet sich die Dicke der einzelnen Betonschichten nach den Mindestanforderungen zur Sicherstellung des Verbundes und somit nach der Dicke der Garne. Im Allgemeinen liegt sie im Millimeterbereich, sodass die tragfähigen Carbonbetonschichten entsprechend dünn ausgeführt werden können [S1].

### 2.1.2 Baustofftechnische Eigenschaften und Anwendungsgebiete

Carbonfasern weisen im Vergleich zu den in Tabelle 1 aufgeführten Textilien und Baustahl die besten mechanischen Eigenschaften auf.

**Tabelle 1:** Vergleich textilphysikalischer Eigenschaften von Baustahl, AR-Glas-, Basalt- und Carbonfasern [1, K2]

Parameter	Baustahl	AR-Glasfasern	Basaltfasern	Carbonfasern
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	7,9	2,75 – 2,80	2,70 – 2,80	1,75 – 1,82
E-Modul [10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> ]	210	70 – 75	80 – 85	180 – 260
Zugfestigkeit [10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> ]	0,3 – 0,6	2,0 – 2,2	2,0 – 2,6	3,2 – 4,6
Korrosionsbeständigkeit	-	+	-	++

Die Carbonfasern haben nicht nur eine höhere Zugfestigkeit und einen höheren E-Modul, sie sind durch die geringere Dichte zudem auch noch leichter als die anderen Materialien. Außerdem werden sie nicht vom im Beton herrschenden alkalischen Milieu angegriffen und behalten trotz Alterung ihre Festigkeit [1]. Zusätzlich besitzen Carbonfasern eine gute chemische Beständigkeit gegenüber den meisten Säuren, Alkalien und Lösemitteln. Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$  von Carbonfasern ist mit  $-1,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  vor allem im Vergleich zu Baustahl sehr gering. Ab einer Temperatur von ca. 400 °C treten Oxidationseffekte auf, die zur Entstehung von Kohlendioxid und Kohlenmonoxiden führen, welche die Faserstruktur verändern und eine Festigkeitsreduzierung hervorrufen können. Werden die CF-Garne mit entsprechenden hochtemperaturbeständigen Beschichtungen ausgerüstet, bieten sie jedoch ideale Voraussetzungen, um auch unter Brandschutzanforderungen als wirkungsvolle Betonbewehrung eingesetzt werden zu können [K2].

Der für Carbonbeton eingesetzte Feinkornbeton hat übliche Druckfestigkeiten von 65 bis 90 N/mm<sup>2</sup>, der E-Modul beträgt in der Regel 25000 bis 30000 N/mm<sup>2</sup> [S1]. Im Verbund mit Carbonfasern entsteht ein äußerst leistungsfähiger Baustoff, der viele Vorteile gegenüber dem klassischen Stahlbeton aufweist.

Darunter fällt vor allem die Korrosionsbeständigkeit der Carbonfasern, wodurch mit sehr viel geringeren Betondeckungen gearbeitet werden kann. Zudem hat Carbon eine deutlich höhere Zugfestigkeit als Stahl bei gleichzeitig geringerer Dichte. Das Zusammenwirken dieser Eigenschaften erlaubt schlanke Bauteile mit geringem Eigengewicht und hoher Tragfähigkeit, wodurch sich Carbonbeton perfekt für Schalentragwerke und filigrane Bauteile eignet [1]. Außerdem ist die textile Bewehrung sehr flexibel und leicht zuzuschneiden, wodurch das Bauen von Freiformgeometrien ermöglicht wird [S1].

Durch die Beständigkeit gegenüber Korrosion, Temperatur und die meisten Chemikalien hat Carbonbeton auch bei extremen Umgebungsbedingungen eine hohe Dauerhaftigkeit. Die filigrane Bewehrung wirkt sich ebenfalls positiv auf die Dauerhaftigkeit von Carbonbetonbauteilen aus. Die feinen Gitteröffnungen der Gelege bewirken eine bessere Rissver-

teilung bei geringeren Rissbreiten als bei Stahlbeton und schaffen damit eine qualitativ höhere Betonoberfläche [I, K2].

Durch die Verringerung der Bauteildicke und die erhöhte Dauerhaftigkeit der Bauteile beim Einsatz von Carbon- anstatt Stahlbewehrung, kann so viel Material eingespart werden, dass der hohe Energieaufwand für die Herstellung der Carbonfasern (Kapitel 2.1.1) ausgeglichen werden kann [L4]. Da durch den geringen Baustoffbedarf natürliche Ressourcen geschont und Emissionen bei der Baustoffherstellung verringert werden [I, K2]. Des Weiteren wird massenmäßig sehr wenig Carbonfasertextil je kg bzw. m<sup>3</sup> Beton eingesetzt, weshalb sich weitere Einsparungen ergeben [L4].

Ferner sind Carbonfasern im Bauwesen bereits seit einiger Zeit sehr erfolgreich im Einsatz, wenn es darum geht, bestehende Konstruktionen in statisch sensiblen Bereichen zu verstärken. Sie gewährleisten ein Höchstmaß an Tragfähigkeit und gleichzeitig ein Minimum an zusätzlich aufgebracht Bausubstanz und zusätzlichem Gewicht [K2].

Daher findet der Verbundwerkstoff derzeit hauptsächlich Anwendung im Brückenbau, im Bau von Schalen für Dächer, bei der Herstellung von Fassadenelementen und bei der Instandsetzung. Beispiele hierfür sind u. a. die Fußgänger- und Radwegbrücke in Albstadt-Ebingen, die ausschließlich mit Carbon bewehrt ist, und die Instandsetzung des Aachener Doms mit carbonbewehrten Mörtelbandagen [I].

Die Anwendung von Bauteilen aus Carbonbeton für tragende Bauteile ist mit einer Zustimmung im Einzelfall oder allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen möglich [I].

### 2.2 Recycling von Carbonbeton

Das Recycling von Carbonbeton ist sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht sehr wichtig. Ökologisch betrachtet ermöglicht die Verwendung von carbonbewehrtem Beton zwar das Bauen schlanker dauerhafter Bauteile, die einen Beitrag zum nachhaltigen Bauen leisten, jedoch ist die Herstellung von Carbonfasern sehr energieintensiv. Durch das Recycling der Carbonfasern kann die Gesamtenergiebilanz des Baustoffes verbessert werden. Zusätzlich würde eine Ressourcenschonung bei gleichzeitiger Abfallverringerung erreicht und damit eine Entlastung der Umwelt gewährleistet werden. Ein wesentlicher ökonomischer Punkt für das Recycling von Carbonbeton ist der Austausch der teuren neuen Carbonfasern gegen die günstigeren recycelten Carbonfasern. Außerdem wird beim Einsatz von Recycling-Carbonfasern von einer Reduktion der Entsorgungskosten ausgegangen und es besteht die Möglichkeit der Bildung eines neuen Marktes durch den Verkauf von recycelten Carbonfasern [M2].

Allerdings ist Carbonbeton ein bisher wenig bekanntes Material hinsichtlich seines Verhaltens beim Rückbau und der Aufbereitung. Als modernes Verbundmaterial unterscheidet sich Carbonbeton im Aufschlussverhalten von Normal- und Stahlbeton. Die Schwierigkeit besteht in der möglichst kompletten Trennung der Betonmatrix von der Carbon-Bewehrung. Um eine Weiterverarbeitung der separierten Materialien ermöglichen zu können, müssen diese bestimmte bzw. noch zu definierende Qualitätskriterien einhalten. Das Potential für ein mögliches Recycling ist derzeit also unbekannt [L10], weshalb die Aufbereitung von Carbonbeton im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird. Dafür werden in diesem Kapitel zunächst verschiedene Aufbereitungsverfahren für Altbeton bzw. Carbon-Altbeton vorgestellt und anschließend Verwertungsmöglichkeiten für die Rezyklate aufgeführt.

#### 2.2.1 Aufbereitungsverfahren

Nach einer gewissen Lebensdauer wird ein Bauobjekt zu Bauabfall demontiert. Um die Stoffkreisläufe zu schließen und die Bauabfälle wieder verwenden zu können, müssen diese aufbereitet werden [S7]. Die Aufbereitung für mineralische Bauabfälle gliedert sich in die Teilprozesse Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung. Die Zerkleinerungsverfahren haben im Recyclingprozess wichtige Aufgaben zu erfüllen. Sie müssen vorliegende Werkstoffverbindungen durch eine Zerstörung dieser Verbindungen aufschließen sowie bestimmte Stückgrößen und -formen herstellen, die für die nachfolgende Sortierung erforderlich und für die weitere Verwendung optimal sind. Der Aufschluss ist dann optimal (100 % Aufschlussgrad), wenn ein Bruch bzw. eine Trennung des Verbundmaterials an den Grenzflächen der einzelnen Werkstoffe erfolgt [M1]. Im Falle von Carbon-Altbeton ist der Aufschluss also dann perfekt, wenn der Zementstein bzw. Mörtel von der ursprünglichen Gesteinskörnung und Bewehrung vollständig entfernt ist [S7]. Nach der Zerkleinerung

rung findet die Klassierung der zerkleinerten Bauabfälle statt, bei der ein körniges Haufwerk nach geometrischen Abmessungen – durch beispielsweise Siebung – in verschiedene Korngrößenklassen aufgeteilt wird. Daran schließt sich die Sortierung der aufgeschlossenen und klassierten Bau- und Abbruchabfälle in recyclingverträgliche Werkstoffgruppen oder sortenreine Werkstofftypen an. Die Sortierung ist folglich die entscheidende Prozessstufe für die meisten Verfahren des Werkstoffrecyclings [M1].

Die Aufbereitung von Carbonbeton unterscheidet sich von Normal- bzw. Stahlbeton in den Bereichen der Zerkleinerung und Sortierung. Bei der Zerkleinerung besteht die besondere Anforderung in der Trennung von Betonmatrix und Carbonbewehrung, während bei der Sortierung die Schwierigkeit in der Sortenreinheit der Rezyklate liegt.

Für das Recycling von Altbeton kommen nach dem derzeitigen Stand hauptsächlich mechanische Zerkleinerungsverfahren zum Einsatz. Seit einigen Jahren gibt es jedoch intensive Forschungen zu alternativen Verfahren [S7]. In den zwei nachfolgenden Kapiteln werden sowohl die traditionellen als auch die innovativen Zerkleinerungsverfahren für Altbetone vorgestellt, die für den Aufschluss von Carbon-Altbeton interessant sind. Daraufhin wird auf die Problematik der Sortierung von zerkleinerten Carbon-Altbetonen eingegangen und es werden Sortierverfahren vorgestellt, die für den Sortierprozess geeignet wären. Anschließend werden mögliche Verfahren für die Aufbereitung der wiedergewonnenen Carbonfasern aufgeführt.

### **2.2.1.1 Traditionelle Zerkleinerungsverfahren für Altbetone**

Für das Betonrecycling ist die Zerkleinerung ein wichtiger Schritt. Hierfür kommen, wie bereits erwähnt, hauptsächlich mechanische Verfahren zum Einsatz, bei denen durch Druck- oder Schlag-/Prallbeanspruchung eine Grobzerkleinerung des Altbetons stattfindet. Die gegenwärtig gebräuchlichsten Zerkleinerungsgeräte für mineralische Bau- und Abbruchabfälle sind der Backen- und Prallbrecher, weshalb sie auch für den Aufschluss von Carbon-Altbeton in Frage kommen. Das Hauptresultat der beiden Zerkleinerungsgeräte ist die Korngrößenreduktion. Darüber hinaus beeinflussen die unterschiedlichen Zerkleinerungsverfahren auch andere physikalische Produkteigenschaften wie Kornform, Wasseraufnahme oder Rohdichte. Unterschiede finden sich zum einen in unterschiedlichen Zementsteingehalten der rezyklierten Gesteinskörnung. Zum anderen können auch Mikrorissbildungen in der rezyklierten Gesteinskörnung Unterschiede bewirken [S7]. Nachfolgend werden der Backen- und Prallbrecher vergleichend vorgestellt.

#### *Backenbrecher*

Beim Backenbrecher wird das zu verarbeitende Material von oben zwischen eine schwingende und eine feststehende Brechbacke gegeben. Durch die Bewegung der Schwingbacke wird das Aufgabegut eingezogen und gebrochen [B1]. Dementsprechend findet die

Zerkleinerung im Backenbrecher über eine Druckbeanspruchung mit Scherkomponente statt [S7]. Abbildung 4 verdeutlicht das Funktionsprinzip des Backenbrechers.



**Abbildung 4:** Funktionsprinzip eines Backenbrechers [II]

Mit dem Backenbrecher kann eine Grob- und Mittelzerkleinerung von harten bis mittelharten Materialien wie Zementklinker, Basalt, Bauschutt und Kalkstein durchgeführt werden. Je nach gewünschter Endkörnung können die Abstände zwischen den Backen gewählt werden [B1], wobei das Endprodukt jedoch meistens gröber bleibt als das des Prallbrechers [S7]. Die Kornform der Endprodukte ist eher kantig. In der Kornformverteilung weisen ca. 30 % der Partikel eine ungünstige Form (Länge/Breite > 3) auf. Der Anteil zementsteinfreier Partikel liegt unter 15 % [L5]. Die Wasseraufnahme der Partikel ist daher höher als die der mittels Prallbrecher hergestellten Partikel [S7].

In dem Forschungsprojekt „Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite“ wurde ein mobiler Backenbrecher zur Zerkleinerung von Carbonbeton an der Technischen Universität Dresden bereits getestet. Der Aufschluss der stabförmigen Carbonbewehrung von der Betonmatrix verlief problemlos. Lediglich ein Massenanteil von < 1 % der Gesamtmasse blieb unaufgeschlossen [K3].

### Prallbrecher

Im Prallbrecher wird das Material durch eine Prallbeanspruchung zerkleinert. Der Prallbrecher wird von oben über Einfülltrichter und Beschickungsbänder mit dem zu brechenden Gut beaufschlagt. Das Material wird im Innenraum des Prallbrechers von den Schlagleisten des Rotors erfasst und mit hoher kinetischer Energie gegen die oberhalb des Rotors liegenden Prallplatten geschleudert. Die Prallplatten sind so angeordnet, dass das Brechgut in den Schlagkreis zurückgeschleudert wird. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis das Gut ausreichend zerkleinert ist und den Spalt zwischen Rotor und Prallplatten passieren kann [B1]. In Abbildung 5 ist die Funktionsweise des Prallbrechers veranschaulichend dargestellt.



**Abbildung 5:** Funktionsprinzip eines Prallbrechers [II]

Mit dem Prallbrecher kann eine Mittelzerkleinerung von mittelharten bis weichen, spröden Materialien wie Kalkstein und Bauschutt durchgeführt werden. Der Zerkleinerungsgrad ist in der Regel höher als bei Backenbrechern [S7] und die Kornform der Endprodukte günstiger. Die Partikel weisen gerundete Formen auf und der Anteil ungünstig geformter Partikel liegt bei nur etwa 10 % [L5]. Der Anteil zementsteinfreier Partikel liegt zwischen 17 bis 30 % [J1], weshalb die Wasseraufnahme geringer ist als von den Endprodukten des Backenbrechers [S7].

Die Produkteigenschaften des Rezyklats können durch einen zweistufigen Zerkleinerungsprozess noch verbessert werden. Dabei wird der Prallbrecher dem Backenbrecher nachgeschaltet [S7]. Die Kombination von Backen- und Prallbrecher wurde auch im Forschungsprojekt „Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite“ von der Technischen Universität Dresden erprobt und verlief für Carbonbeton mit stabförmiger Carbonbewehrung ebenfalls problemlos [K4].

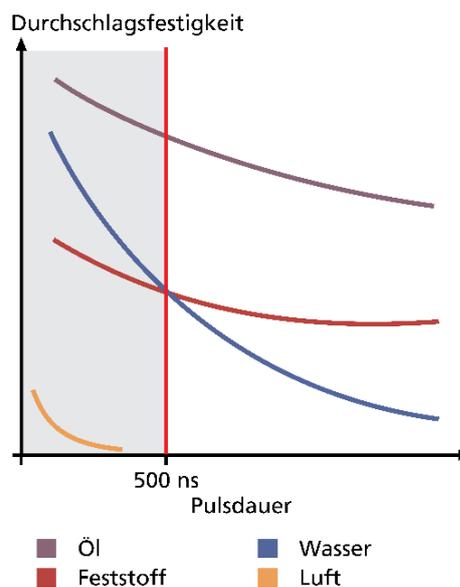
### **2.2.1.2 Innovative Zerkleinerungsverfahren für Altbetone**

Seit einigen Jahren gibt es intensive Forschungen zu innovativen Zerkleinerungsverfahren, die eine Alternative für die mechanische Zerkleinerung darstellen. Um qualitativ hochwertigere Rezyklate zu erzeugen, ist das Ziel dieser Verfahren den Aufschluss von Altbetonen zu verbessern. Zu den neueren Zerkleinerungsverfahren gehört das Hochspannungsimpulsverfahren, die thermisch-mechanische Zerkleinerung sowie der mikrowelleninduzierte Aufschluss. Sie sind auch für den Aufschluss von Carbon-Altbeton interessant und werden deshalb im Folgenden vorgestellt.

#### Hochspannungsimpulsverfahren

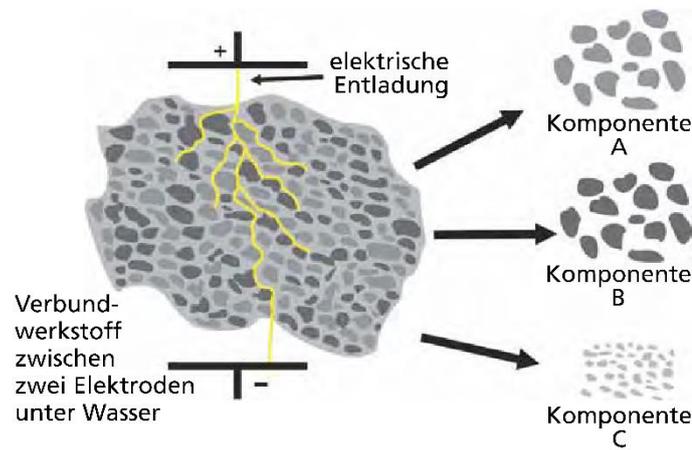
Seit einigen Jahren gibt es intensive Forschungen zu Hochspannungsimpulsverfahren. Bei diesen Verfahren werden mittels elektrischer Entladung Hochspannungsimpulse erzeugt, welche elektrodynamische oder -hydraulische Effekte hervorrufen und den Beton

zerkleinern [S7]. Die Hochspannungsimpulsverfahren beruhen auf der Erkenntnis, dass die elektrische Durchschlagfestigkeit eines Materials keine physikalische Konstante ist. Die Durchschlagfestigkeit kennzeichnet den Widerstand von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen gegen elektrische Spannung und ist abhängig von der Pulsdauer des elektrischen Schlages (siehe Abbildung 6). Auf Basis dieses physikalischen Effektes ist es möglich, einen elektrischen Impuls kontrolliert für die Zerkleinerung eines festen Materials einzusetzen. Dafür wird der zu behandelnde Festkörper unter Wasser zwischen zwei Elektroden platziert und eine Entladung mit einer gewissen Pulsdauer abgegeben. Die Pulsdauer des elektrischen Schlages entscheidet dabei, welcher Effekt eintritt [S4].



**Abbildung 6:** Elektrische Durchschlagfestigkeit von verschiedenen Materialien in Abhängigkeit von der Pulsdauer der Entladung [S4]

Bei Pulsdauern unterhalb von 500 ns ist die Durchschlagfestigkeit von Wasser höher als die des Betons, wie in Abbildung 6 zu erkennen. Deshalb erfolgt die Entladung des elektrischen Schlages durch den Beton und es tritt der elektrodynamische Effekt auf [L8]. Die Impulsentladung durchläuft den Beton entlang der Korngrenzen (siehe Abbildung 7), da diese den Weg des geringsten Widerstandes darstellen. Die Ursache dafür sind die verschiedenen dielektrischen Eigenschaften der unterschiedlichen Komponenten im Verbundmaterial. Bei der Entladung kommt es zur Ausbildung eines Plasmakanals, dessen Ausdehnung im Festkörper eine Elektroexplosion mit einer Druckwelle erzeugt. Durch Abgabe von mehreren dieser gepulsten elektrischen Entladungen kann der Beton entlang seiner Korngrenzen selektiv aufgeschlossen werden [S4].



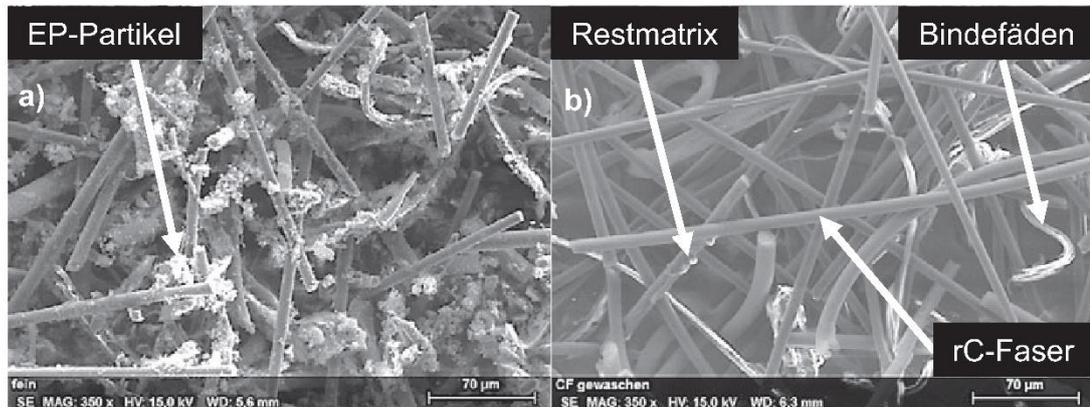
**Abbildung 7:** Prinzip der elektro-dynamischen Fragmentierung eines Verbundwerkstoffes [S4]

Bei Pulsdauern oberhalb von 500 ns ist die Durchschlagfestigkeit von Wasser geringer als die des Betons (siehe Abbildung 6). Hier erfolgt die Entladung des elektrischen Schlags durch das Wasser und der elektrohydraulische Effekt tritt auf, bei dem das Betongefüge durch Kompression zerstört wird [L8]. Durch die Unterwasserentladung der elektrischen Energie zwischen den Elektroden entsteht eine Druckwelle. Die Druckwelle durchläuft den Beton und wird an den Korngrenzen reflektiert, gebeugt und transmittiert. Die daraus resultierenden Druck- und Zugspannungen überschreiten die Bindungskräfte im Beton und führen so zur Zerkleinerung und zum Aufschluss des Gefüges entlang der Korngrenzen [L8].

Der entscheidende Vorteil der Hochspannungsimpulsverfahren gegenüber der traditionellen mechanischen Zerkleinerung von Verbundwerkstoffen in Brechern ist die phasenreine Trennung. Während mechanische Verfahren die Kräfte im gesamten Material verteilen, bringen die elektrischen Impulse die Trennenergie an den Korn- und Phasengrenzen auf. Im Ergebnis liegen die Komponenten des Verbundwerkstoffes getrennt voneinander vor ohne Anhaftung von Nebenbestandteilen [S4], sodass der Anteil an zementsteinfreien Partikeln zwischen 40 bis 70 % liegt [S7]. Die Hochspannungsimpulsverfahren ermöglichen folglich die Rückgewinnung hochwertiger Gesteinskörnung aus Altbeton [S4].

Besonders interessant sind die Hochspannungsimpulsverfahren für den Aufschluss von Carbonbeton, da sowohl die elektro-dynamische als auch -hydraulische Zerkleinerung bereits erfolgreich an carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) im kleintechnischen Maßstab getestet wurde. Genau wie anorganische Verbundmaterialien können auch CFK's mit diesem Verfahren wieder aufgespalten werden. Die im Prozess erzeugten elektrischen Impulse trennen die Carbonfasern von der Polymermatrix vor allem entlang der Phasengrenzen. Die Fasern werden dadurch aus dem umgebenden Polymer herausgetrennt und somit wiedergewonnen. Die Oberfläche der recycelten Carbonfasern beider Verfahren weisen bei rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen kaum Beschädigungen auf [S4, O1]. Störende Polymerpartikel und kleinere Carbonfaserfragmente konnten durch

das Spülen mit Leitungswasser und anschließendem Trocknen weitestgehend entfernt werden. Als Störstoffe waren jedoch Bindfäden, die dem Zusammenhalt der Gelege dienten (Kapitel 2.1.1), und vereinzelte Restmatrixanhaftungen an den Carbonfasern vorhanden [O1]. Die nachstehenden REM-Aufnahmen bilden den Zustand der rezyklierten Carbonfasern vor und nach dem Spülen mit Leitungswasser vergleichend ab.



**Abbildung 8:** REM-Aufnahmen der getrockneten (a) bzw. mit Leitungswasser gespülten (b) freien Komponenten [O1]

Die herausgelösten Fasern dürfen dem Hochspannungsimpulsverfahren allerdings nicht zu lang ausgesetzt werden, da sie sonst immer weiter zerkleinert und letztendlich zu Carbonstaub zerfallen [S4]. Ob die freigelegten Carbonfasern hinsichtlich ihrer mittleren Längenverteilung und Verunreinigungen eine hinreichende Qualität aufweisen, um sie als recycelten Sekundärrohstoff anzubieten, ist noch durch weiterführende Versuche zu klären [O1].

Letztlich ist die elektrodynamische und -hydraulische Zerkleinerung eine vielversprechende Möglichkeit für den Aufschluss von Carbonbeton.

### Thermische Vorbehandlung

Durch verschiedene Forschungsarbeiten [S5, S7] konnte festgestellt werden, dass sich die thermische Behandlung eines Altbetons vor der mechanischen Zerkleinerung positiv auf die Qualität des Rezyklats auswirkt. Mit steigender Behandlungstemperatur kommt die Qualität des Betonrezyklats der von natürlichen Gesteinen näher. Die Rohdichte der Produkte steigt an und die Wasseraufnahme nimmt ab. Grund hierfür sind Entwässerungs-, Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen im Altbeton bei hohen Temperaturen. Die Reaktionen betreffen in erster Linie den Zementstein. Bei den Gesteinskörnungen treten Umwandlungen nur in geringem Umfang bzw. überhaupt nicht auf [S7]. Welche Reaktionen im Einzelnen bei welchen Temperaturen ablaufen, verdeutlicht die Tabelle 2.

**Tabelle 2:** Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von Beton bei der thermischen Behandlung [S7]

Temperatur	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktionen
30 – 120 °C	Verdunstung bzw. Verdampfung von freiem und physikalisch gebundenem Wasser
100 – 300 °C	Gelabbau, Dehydrationsbeginn (Beginn der Entwässerung des Portlandits und der CSH-Phasen)
250 – 600 °C	Abgabe des chemisch gebundenen Wassers
450 – 550 °C	Zersetzung von Portlandit
573 °C	Nur bei Quarzzuschlägen: Quarzumwandlung $\alpha \rightarrow \beta$ SiO <sub>2</sub>
600 – 700 °C	Beginn der Zersetzung der CSH-Phase; Modifikation des C <sub>2</sub> S von $\alpha \rightarrow \beta$
600 – 900 °C	Nur bei Kalksteinzuschlägen: Entsäuerung
1200 – 1300 °C	Beginn des Schmelzens von Zementstein
≥ 1400 °C	Zementstein liegt als Schmelze vor

Die thermisch induzierten Veränderungen verursachen die Entfestigung des Betons. Aus diesem Grund ist der Zerkleinerungsgrad von Altbeton, der vor der mechanischen Aufbereitung thermisch behandelt wurde, höher als von Altbeton ohne Vorbehandlung. Außerdem tritt im Beton eine Strukturänderung infolge thermisch bedingter Volumenänderung auf. Mit steigender Temperatur nimmt die Porosität im Zementstein und vor allem in der Verbundzone Zementstein-Gesteinskörnung zu. Bis zu einer Temperatur von ca. 200 °C sind die Unterschiede zwischen der thermischen Dehnung des Zementsteins und der Gesteinskörnung gering. Oberhalb 200 °C stehen sich die thermische Ausdehnung der Gesteinskörnung und die Volumenabnahme des Zementsteins gegenüber. Diese gegensätzlichen Volumenänderungen verursachen eine Inkompatibilität untereinander, welche die Struktur besonders in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung zerstören kann. Eine starke Zunahme der Porosität in der Verbundzone ist die Folge, wodurch der Aufschlussgrad bei der Zerkleinerung erhöht werden kann. Bei der thermischen Behandlung von Beton kommt es ebenfalls zu einer Zugbeanspruchung innerhalb des Gefüges durch das verdampfende Wasser in den Poren des Zementsteins. Der entstehende Wasserdampfdruck ist dabei abhängig von der Aufheizgeschwindigkeit, der Art der Aufheizung und der Feuchtigkeit des Betons und kann zu Rissbildungen im Betongefüge führen [S7].

### Mikrowelleninduzierter Aufschluss

Wie einige Forschungen belegen, kann auch das Einbringen von Mikrowellen zum Aufschluss von Verbundbaustoffen eingesetzt werden [B2]. Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen, die von dem Material, mit dem sie interagieren, reflektiert, durchgelassen oder absorbiert werden können. Mikrowellenabsorbierende Materialien können aufgrund

ihres molekularen Aufbaus mit Mikrowellen erwärmt werden [III]. Polare Moleküle, wie z. B. Wasser, lassen sich wegen der räumlichen Trennung ihrer Ladungsbereiche gut mit Mikrowellen erwärmen. Das polare Molekül wird hierbei durch das hochfrequente Wechselfeld der Mikrowellen in Schwingung versetzt und wandelt dabei die elektromagnetische Energie in Wärme um [D1]. Wie gut ein Material von Mikrowellen erwärmt werden kann, gibt der Dielektrizitätskoeffizient an [III]. Der Aufschluss durch eine Mikrowellenbehandlung beruht auf der unterschiedlichen Einkopplung der Mikrowellen in die Materialien. Dadurch entstehen hohe Temperaturgradienten, die zu Spannungen an den Grenzschichten von den Verbundmaterialien und letztlich zum Aufschluss dieser führen [B2].

Die bisherigen Forschungen zur mikrowelleninduzierten Trennung von Verbundbaustoffen setzten verschiedene Schwerpunkte. Zum einen gab es Versuche, Betonschichten mittels Mikrowellen abzutragen [Y1, K1]. Dabei bildet sich durch die Mikrowellenbehandlung in den Poren des Betons Wasserdampf, woraus Zugspannungen resultieren, die eine Schädigung des Betongefüges bis hin zu Abplatzungen bewirken. Zum anderen gab es Untersuchungen zur Mikrowellenbehandlung von Betonen mit eingebrachten Suszeptoren [N1]. Dabei handelt es sich um eine Oberflächenbeschichtung der Gesteinskörnung aus einem dielektrischen Material (z. B.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), das Mikrowellen absorbieren kann. Dadurch kommt es zu einer gezielten Wärmeentwicklung an der Grenzfläche, wodurch der Beton an der Kontaktzone Zementsteinmatrix-Gesteinskörnung getrennt werden kann. An der Bauhaus-Universität Weimar wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes [B2] ebenfalls untersucht, welche Einflussfaktoren es bei der Mikrowellenbehandlung von Altbeton gibt. Dabei wurde der Einfluss von in den Beton gebrachten Suszeptoren und der Einfluss der Betonfeuchtigkeit betrachtet. Das Ergebnis der Versuche war, dass der Aufschluss von Beton mittels Mikrowellen durch die Erzeugung hoher thermischer Spannungen prinzipiell möglich ist, aber noch weiterer Forschungsbedarf besteht. Die Art des Suszeptors hatte nur geringen Einfluss auf den Aufschluss. Den größten Einfluss hatte der Feuchtegehalt des Betons, wobei die Untersuchungsergebnisse widersprüchlich waren. Einige Altbetone reagierten nach 24 Stunden Wasserlagerung nicht auf die Mikrowellenbehandlung, während einige andere in normaler Umgebungsfeuchte gelagerte Altbetone deutliche Abplatzungen zeigten. Im trockenen Zustand kam es bei allen Betonen zu keinen Abplatzungen oder ähnlichem [B2].

### 2.2.1.3 Sortierverfahren für Altbetone

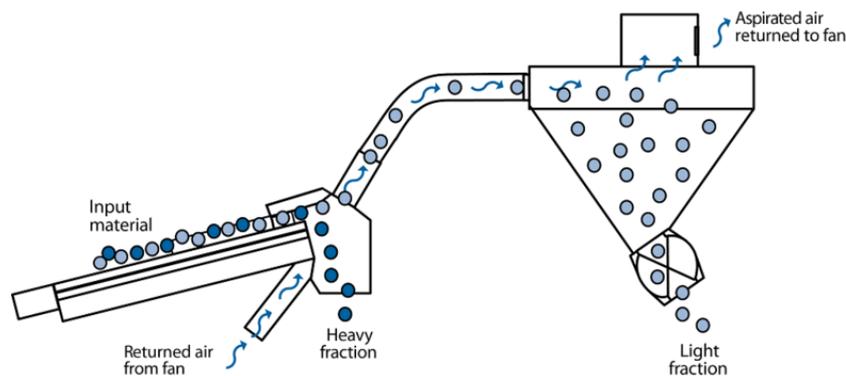
Im Aufbereitungsprozess von Bauschutt folgt nach der Zerkleinerung und Klassierung die Sortierung der Bauabfälle in recyclingverträgliche Werkstoffgruppen oder sortenreine Werkstofftypen. Sortierprozesse für Altbetone trennen das zerkleinerte Materialgemisch nach Stoffarten unter Nutzung physikalischer Merkmale [W1]. In Bezug auf die Aufbereitung von Carbon-Altbeton besteht bei der Sortierung die Schwierigkeit in der vollständigen

Separation der Carbonbewehrung von der rezyklierten Gesteinskörnung. Die Sortierverfahren, die für diese Aufgabe in Frage kommen, können in trockene und nasse Sortierverfahren unterteilt werden. Sie werden im Folgenden vorgestellt und der aktuelle Forschungsstand in Bezug auf die Sortierung von Carbon-Altbeton diskutiert.

### Trockene Sortierverfahren

In der industriellen Bauschutttaufbereitung werden als Sortierstufen in der Regel trocken arbeitende Technologien angewandt, da die für den Betrieb einer Nassaufbereitung erforderliche Führung eines Wasserkreislaufes vielen Betreibern als zu aufwendig gilt [W1]. Die trockenen Sortierverfahren, die für die Aufbereitung von Carbon-Altbeton geeignet sind, sind die Windsichter und die sensorgestützte Sortierung. Die beiden Sortierprozesse werden nachfolgend erklärt.

Zur Sortierung von aufgeschlossenem Carbon-Altbeton können Aerosortierungen eingesetzt werden, die auf dem Einsatz von Luft als Fluid für die Trennung basieren. Üblich sind Windsichter in unterschiedlichen Ausführungen, bei denen eine Trennung aufgrund von Dichteunterschieden stattfindet. In der Regel dienen sie der Entfernung von leichten Störstoffen wie z. B. Holz, Styropor oder Kunststofffasern [W1]. Das Wirkprinzip eines Windsichters ist in der nachfolgenden Abbildung 9 verdeutlicht.



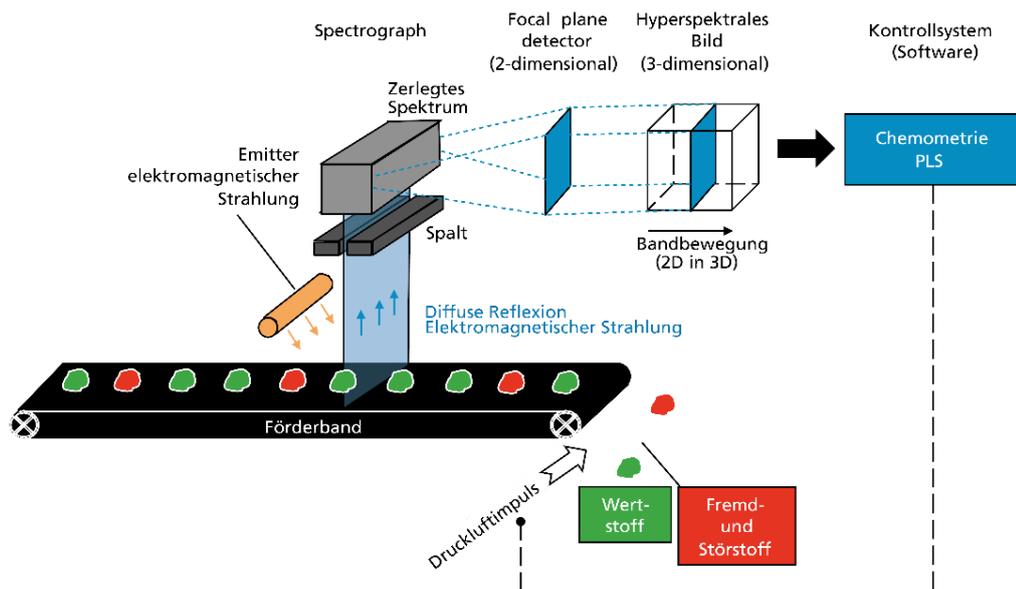
**Abbildung 9:** Funktionsweise eines Windsichters in diagonaler Bauweise [VI]

Durch den Dichteunterschied zwischen Carbonbewehrung und Gesteinskörnung, könnte dieses Verfahren prinzipiell auch für die Trennung des aufgeschlossenen Carbon-Altbetons in Frage kommen. Zu beachten ist, dass das Sortiergut eng klassiert sein muss für die Sortierung mittels Windsichter, da sonst Klassierungseffekte die Dichtesortierung überlagern können. Nachteil dieser Verfahren ist, dass feine Fraktionen wie z. B. Betonbrechsand nicht sortiert werden können [W1].

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite“ wurde an der Technischen Universität Dresden ein Windsichter (Querstromsichter, Modell: CityEquip AirMaster 1200) zum Separieren bereits getestet und erwies sich als un-

vorteilhaft. Nur etwa 10 % des eingesetzten stabförmigen Bewehrungsmaterials konnten in diesem Verfahrensschritt wiedergewonnen werden [K5]. Allerdings wurde das aufgeschlossene Abbruchmaterial der Korngröße 0/56 mm vor der Windsichtung nicht in engere Kornfraktionen klassiert, weshalb eine Überlagerung der Dichtesortierung durch Klassierungseffekte nicht ausgeschlossen werden kann.

Die sensorgestützte Sortierung kann ebenfalls zur Trennung eines aufgeschlossenen Carbon-Altbetons eingesetzt werden. Durch das sensorgestützte Sortierverfahren ist es möglich, Materialgemische in sortenreine Fraktionen zu überführen. Dabei dienen die Sensoren der automatischen Erkennung und Abtrennung unerwünschter Fremdstoffe. Bei der sensorgestützten Sortierung werden bei einzelnen Partikeln zunächst Materialeigenschaften mittels berührungsloser Sensoren gemessen. Nach anschließender Auswertung der Messsignale werden die betreffenden Partikel durch gezieltes Aufbringen einer externen Kraft, meist ein Druckluftstoß, aus dem Materialstrom abgetrennt [B3]. Das Funktionsprinzip ist in der folgenden Abbildung 10 veranschaulicht.



**Abbildung 10:** Funktionsweise der sensorgestützten Sortierung am Beispiel der Einzelkornsortierung mittels nahinfraroter Sensorik [L1]

Dieses Sortierverfahren ermöglicht auch das gleichzeitige Messen mehrerer Materialeigenschaften und durch geeignete Sensoren sowie Filter- und Auswerteprogramme kann die Klassifizierung der abzutrennenden Partikel nahezu beliebig vorgenommen werden. Es gibt eine breite Palette von Sensoren, die zur Erfassung der Trennmerkmale eingesetzt werden können. Beispielhafte Trennmerkmale sind die Form, die Reflexion im sichtbaren oder infraroten Spektralbereich sowie die Röntgenstrahlabsorption. Von Nachteil ist bei der optischen Sortierung, dass Partikelgrößen nur bis 4 mm sortierbar sind [B3].

Das Forschungsprojekt „Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite“ hat mit einer stationären kameragestützten Sortieranlage bereits Trennversuche für aufgeschlossenen Carbon-Altbeton durchgeführt. Das Sortierergebnis für die stabförmige Carbonbewehrung lag bei einem Massenanteil von ca. 97%, bei einem Durchsatz von 6 Tonnen/Stunde. Die Sortierversuche erzielten folglich sehr gute Ergebnisse, wobei weitere Anpassungen der Anlage geplant sind [K4]. Genauere Angaben zur Sensorik der Sortieranlage und zum Sortierergebnis wurden bisher nicht veröffentlicht.

### Nasse Sortierverfahren

Ein großer Vorteil von Nassaufbereitungsverfahren zur Sortierung ist die gleichzeitige Entfernung von auswaschbaren Schad- oder Störstoffen und die vergleichsweise geringe Staubentwicklung während des Aufbereitungsprozesses. Außerdem ist keine so enge Klassierung des Ausgangsmaterials erforderlich und auch Sandfraktionen können mit einem Nassverfahren aufbereitet werden [W1]. Die geringe Staubentwicklung der nassen Sortierverfahren ist, unter Beachtung der gesundheitlichen Folgen von Carbonstäuben (Kapitel 2.3), für die Aufbereitung von Carbonbeton von besonderer Bedeutung.

Die Wirkprinzipien der meisten Nasssortierverfahren basieren auf der unterschiedlichen Dichte der zu trennenden Materialien. Die als Wertstoff auszubringenden mineralischen Sekundärrohstoffe haben eine höhere Dichte als die auszusortierenden Fremdstoffe, wie in diesem Fall die Carbonbewehrung. Nassverfahren zur Dichtentrennung weisen gegenüber trockenen Sortierverfahren eine weitaus höhere Trennschärfe auf, sodass qualitativ höherwertige Produkte hergestellt werden können. Die Effektivität der jeweiligen Verfahren ist dabei abhängig von der Korngrößenverteilung und der Dichte des zu trennenden Körnerkollektivs [W1].

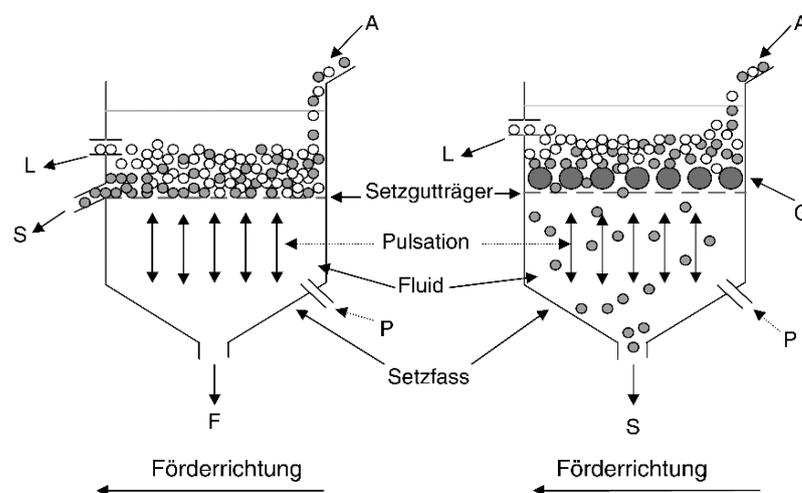
Die am häufigsten in der Bauschuttaufbereitung eingesetzten nassen Sortierverfahren, die auch für die Aufbereitung von Carbon-Altbeton interessant sind, sind die Schwimm-Sink-Sortierung und die Setzmaschinenteknik. Sie werden im Folgenden näher erläutert.

Für die Trennung eines aufgeschlossenen Carbon-Altbetons kann die Schwimm-Sink-Sortierung eingesetzt werden. Bei der Schwimm-Sink-Sortierung wird das zu trennende Gut in ein Trennmedium gegeben, dessen Dichte zwischen den leichtesten und den schwersten Bestandteilen des Aufgabematerials liegt. Das Trennmedium wird in Abhängigkeit des Aufbereitungsziel festgelegt und ist in der Regel Wasser oder eine wässrige Suspension. Entsprechend der eingestellten Dichte des Trennmediums sinken die spezifisch schwereren Körner nach unten, spezifisch leichtere Körner schwimmen auf dem Trennmedium. Auf diese Weise kann das Schwergut vom Leichtgut separiert werden, im Falle von Carbonbeton also die schwere Gesteinskörnung von der leichten Carbonbewehrung [W1].

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite“ wurden bereits Separationsversuche mit der Schwimm-Sink-Sortierung durchgeführt. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse blieb bisher allerdings aus [K4].

Ein vielfach angewendetes Sortierverfahren ist die Dichtentrennung von körnigen Stoffgemischen mittels Setztechnik. Das Verfahren ist für die Aufbereitung von Carbon-Altbeton besonders interessant, weil Untersuchungen gezeigt haben, dass mittels Setztechnik auch für Betonbrechsande im Korngrößenspektrum von 100 µm bis 4 mm Qualitätsverbesserungen des Rezyklats möglich sind [W1].

Der Grundaufbau einer Nasssetzmaschine ist in der Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11:** Grundaufbau einer Setzmaschine ohne (links) und mit Graupenbett ,G' (rechts) [W1]

Setzmaschinen bestehen aus einem Setzfass, in dem sich ein Setzgutträger befindet, einer Einrichtung zur Pulsation des Fluids sowie Austragsvorrichtungen für die Produkte Schwergut, Leichtgut und gegebenenfalls das Fassgut. Das zu sortierende Gut wird auf einen Setzgutträger aufgegeben, der sich in einem Setzfass befindet. Der Setzgutträger ist mit Öffnungen versehen, durch die ein Fluid pulsiert auf und ab strömt. Die Bewegung des Fluids kann mechanisch oder pneumatisch erzeugt werden oder durch die Bewegung des Setzgutträgers. Das Körnergemisch, das sich durch die Pulsation während des Anlagendurchlaufs geschichtet hat, tritt nach Durchlaufen der Setzmaschine durch die Austragsvorrichtungen aus der Anlage aus. Infolge seiner geringeren Dichte ist für den Austrag des in der oberen Schicht des Setzbettes angereicherten Leichtgutes oftmals eine Überlaufeinrichtung vorgesehen [W1].

### 2.2.1.4 Aufbereitungsverfahren für rezyklierte Carbonfasern

Für das Carbonfaserrecycling wurden im Bereich der carbonfaserverstärkten Kunststoffe (CFK) bereits Recyclingverfahren entwickelt. Das am häufigsten eingesetzte und wirtschaftlichste Verfahren zum Aufschluss von Carbonfasern und Polymermatrix ist die Pyrolyse. Weitere Aufbereitungsverfahren wie die Solvolyse oder die elektrodynamische/-hydraulische Fragmentierung sind noch im Forschungsstadium [H2]. Da bisher nicht bekannt ist, ob die polymere Beschichtung der wiedergewonnenen Carbonbewehrung aus Carbon-Altbeton für eine weitere Verwertung der Carbonfasern entfernt werden muss, wird im Folgenden nicht weiter auf diese Verfahren eingegangen. Falls sich in kommenden Forschungsvorhaben rausstellt, dass dies der Fall ist, kommen die oben genannten Aufbereitungsverfahren für den Aufschluss jedoch in Frage.

Neben den Aufschlussverfahren wurden auch weitergehende Aufbereitungsverfahren für die wiedergewonnenen Carbonfasern entwickelt. Sie sind nicht nur für das Recycling von CFK's von Bedeutung sondern auch für die rezyklierten Carbonfasern aus Carbon-Altbeton. Aus diesem Grund werden sie nachfolgend näher betrachtet.

Bei dem Recyclingverfahren der CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG liegen die Carbonfasern nach dem Pyrolyseprozess als locker verknüpfte, flächige Bündel vor [M3]. Anschließend wird die Faseroberfläche durch eine Schlichte veredelt und die Fasern werden je nach Anwendung des Endverbrauchers auf eine mittlere Länge von 0,2 bis 0,5 mm gemahlen [IV, M2]. Problematisch ist bei diesem Verfahren die Mahlung von größere Faserlängen, da die Fasern in einem vorgeschalteten Schredder sehr stark beansprucht werden. Dadurch platzt zum Teil die Schlichte ab und Fasern, die länger als 1 mm sind, können sich verknoten [M2]. Da das recycelte Material aus dem Mahlprozess zu enormer Staubentwicklung neigt und nur bedingt rieselfähig ist, werden die Fasern anschließend zu kleinen Kügelchen, den sogenannten Fiberballs kompaktiert. Die Fiberballs sind rieselfähig und lassen sich staubfrei in neue Anwendungen überführen [M3]. Abbildung 12 veranschaulicht den Unterschied zwischen den als locker verknüpfte, flächige Bündel vorliegenden und den zu Fiberballs gepressten rezyklierten Carbonfasern.

Die Verarbeitung zu Faservliesen ist eine Aufbereitungsmethode, mit der nicht nur kurze sondern auch lange Carbonfasern nach der Pyrolyse recycelt werden können (siehe Abbildung 13) [M2].



**Abbildung 12:** Rezyklierte Carbonfasern nach dem Pyrolyseprozess (links) [K6], Fiberballs (rechts) [M3]

Eine Möglichkeit Carbonlangfasern aus Faser- bzw. Gelegeverschnitten zu recyceln ist die Herstellung von Organofolien. Dabei werden vor allem aus trockenem Faserverschnitt einzelne Faserabschnitte gerichtet auf eine PET-Folie aufgebracht. In dem Aufbereitungsprozess werden die Faser- bzw. Gelegereste zunächst durch eine Schnittwalze auf eine für die Folgeprozesse geeignete Größe zugeschnitten. Kleinere Abschnitte fallen durch ein Sieb und können anderen Anwendungen zugeführt werden, wie beispielsweise der Herstellung von Fiberballs. Durch Vibrationstechnik werden die Gelegezuschnitte zu einzelnen Rovings aufgelöst. Die Fasern werden durch die Vibration einheitlich ausgerichtet und einer extrudierten, noch nicht erstarrten Polymerfolie zugeführt. Die Folie wird unmittelbar nach der Düse mit den einheitlichen ausgerichteten Langfasern belegt und durchläuft zur vollständigen Imprägnierung eine Doppelbandpresse. Die so entstandene Organofolie kann anschließend weiterverarbeitet werden [M2].

Des Weiteren gab es positive Ergebnisse bei Untersuchungen zur Überführung von recycelten Carbonlangfasern in ein Spinnfasergarn (siehe Abbildung 13). Dabei konnte eine Mischung aus recycelten Carbonfasern und Polyamidfasern mit Faserlängen von je 40 mm zu Garnen gesponnen werden. Die Polyamidfasern wirken dabei als Trägerfasern, die aufgrund ihrer Kräuselung und Dehnbarkeit zu einem Vernetzen der Fasern untereinander führen. Dadurch kann ein Faserband hergestellt werden, das letztlich zu Garnen gesponnen und weiterverarbeitet werden kann [W2].



**Abbildung 13:** Faservlies (links) [L3], Garn aus recycelten Carbonfasern und Polyamidfasern (rechts) [G1]

Die Verwertungsmöglichkeiten der aufbereiteten rezyklierten Carbonfaserprodukte werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

### 2.2.2 Verwertungsmöglichkeiten

Nach der Aufbereitung von Carbon-Altbeton ist eine Wiederverwendung der Rezyklatprodukte anzustreben, da weder für die rezyklierte Gesteinskörnung noch für die rezyklierten Carbonfasern eine Entsorgung vertretbar ist.

Für die Entsorgung der rezyklierten Gesteinskörnung werden die Deponiekapazitäten in absehbarer Zeit knapp, zumal primäre Rohstoffe schwinden und durch sekundäre ersetzt werden sollten [D2].

Die Entsorgung von rezyklierten Carbonfasern, die in eine Polymermatrix eingeschlossen sind, ist ebenfalls schwierig. Eine ordnungsgemäße Deponierung ist nach der Deponieverordnung – DepV seit 2005 ohne Vorbehandlung nicht mehr möglich [01], weshalb die Deponierung aus wirtschaftlicher Sicht nicht mehr vertretbar ist. Die thermische Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen ist prinzipiell möglich, aber auch mit Schwierigkeiten verbunden. Bei der Verbrennung bilden sich Aschen und Stäube mit Carbonfaserpartikeln mit einer Länge von weniger als 3 µm. Diese Fragmente verstopfen dann Gewebefilteranlagen und verursachen durch ihre Leitfähigkeit Kurzschlüsse, Stromausfälle oder sogar Brände in elektrostatischen Abscheidern. Der Partikelstaub aus mikroskopisch kleinen Carbonfasern, kann ebenfalls ungehindert die Atemwege passieren. Dies hat negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, welche in Kapitel 2.3 näher erläutert werden. Die thermische Entsorgung der Carbonfasern ist aus diesen Gründen sehr aufwändig und geht mit hohen Kosten einher [L3].

Folglich bleibt aus ökologischer und ökonomischer Sicht nur die Rückgewinnung und Wiederverwertung als möglicher Entsorgungsweg für Abbruchmaterialien aus Carbon-Altbeton. Die Aufbereitungsmöglichkeiten solcher Bauabfälle wurden bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, während die Verwertungsmöglichkeiten im Folgenden zunächst für die rezyklierte Gesteinskörnung und anschließend für die rezyklierten Carbonfasern besprochen werden.

#### 2.2.2.1 Verwertung rezyklierter Gesteinskörnung

Rezyklierte Gesteinskörnung wird hauptsächlich für Fundamente mit niedrigen Anforderungen, im Straßenbau und als Füllmaterial im Erdbau verwendet, was auch als Downcycling verstanden werden kann. Eine höherwertige Rückführung der rezyklierten Gesteinskörnung in den Hochbau in Form von Recycling-Beton findet derzeit nur in geringem Maße statt [D2].

Dies wird durch zwei Faktoren wesentlich erschwert. Zum einen nimmt der Einsatz von mineralischen Materialverbänden und Gipsbaustoffen in der Bauindustrie in den letzten Jahrzehnten stark zu [L7]. Zum anderen sind die derzeitigen mechanischen Zerkleinerungs- und Sortierverfahren technisch begrenzt [L6], wodurch die Recyclingprodukte aus

den Bau- und Abbruchabfällen auch nach der Aufbereitung in ihrer Zusammensetzung häufig noch heterogen vorliegen [L7]. Für die Akzeptanz rezyklierter Gesteinskörnung beim Einsatz in hochwertigen RC-Betonen ist eine gleichbleibend hohe Qualität allerdings unbedingt erforderlich. Aus diesem Grund wird die Optimierung der Aufschluss- und Sortiertechniken immer mehr Bedeutung erlangen [L6].

Die Verwendungsmöglichkeiten der Recycling-Gesteinskörnung hängen von den bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften sowie der stofflichen Zusammensetzung ab [K7]. Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz ist dabei immer die qualitativ hochwertigste Verwertung anzustreben [06]. Die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung zur Herstellung von Recycling-Beton richten sich nach DIN 4226-101 [02], DIN EN 12620 [03] sowie DIN 1045-2 [04] und der DAfStb-Richtlinie für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung [05]. Brechsande < 2 mm sind jedoch von der Verwendung in Recycling-Beton ausgeschlossen [05]. Tabelle 3 fasst die Regelanforderungen für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Beton zusammen.

**Tabelle 3:** Regelanforderungen für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Beton [04]

Eigenschaften		Kategorie der Gesteinskörnung	
		Typ 1	Typ 2
Kornzusammensetzung	Grobe Gesteinskörnungen mit $D/d \leq 2$ oder $D \leq 11,2$	$G_{C85/20}$	$G_{C80/20}$
	Korngemisch	$G_{A90}$	$G_{A85}$
Kornform		FI <sub>50</sub> oder SI <sub>55</sub>	
Feinanteile	Grobe Gesteinskörnung	$f_4$	
Kornrohddichte		$\geq 2000 \text{ kg/m}^3$	
Schwankungsbreite Mittelwert Kornrohddichte		$\pm 150 \text{ kg/m}^3$	
Frost-Tau-Widerstand		$F_4$	
Säurelösliches Chlorid		$\leq 0,04 \text{ M.-%}$	
Säurelösliches Sulfat		AS <sub>0,8</sub>	
Gesamtschwefel (außer Hochofenstückasche)		$\leq 1 \text{ M.-%}$	
Organische Verunreinigungen von Gesteinskörnungen		$\leq 0,1 \text{ M.-%}$	
Max. Wasseraufnahme nach 10 min bei Gesteinskörnungen > 2 mm		10 M.-%	15 M.-%

### 2.2.2.2 Verwertung rezyklierter Carbonfasern

Rezyklierte Carbonfasern können, wie in Kapitel 2.2.1.4 bereits beschrieben, zu Fiberballs, Faservliesen, Organofolien oder Spinnfasergarn aufbereitet werden. Diese Aufbereitungsprodukte können weiterverarbeitet werden, wodurch der Stoffkreislauf geschlossen werden kann. Sie können Carbonneufasern in verschiedenen Bereichen der CFK's ersetzen. Verwertungsmöglichkeiten in der Baubranche wurden bisher noch nicht in Forschungsprojekten untersucht. Die Recyclingmöglichkeiten für rezyklierte Carbonfasern werden folgend aufgelistet.

Recycelte Carbonkurzfasern können zum einen als Graphit in Energiespeichern wie Batterien bzw. Akkumulatoren eingesetzt werden [O1]. Zum anderen lassen die zu Fiberballs gepressten Carbonkurzfasern sich ohne Probleme in neue Compounds überführen, das heißt zu faserverstärkten Kunststoffen verarbeiten. Die so hergestellten Compounds können sowohl im Spritzgieß- als auch im Extrusionsverfahren weiterverarbeitet werden. Durch den Einsatz von Haftvermittlern, wie Polypropylen und Polyamid, kann die Verbindung zwischen den recycelten Carbonfasern und dem Kunststoff verbessert werden, wodurch Materialkennwerte erzielt werden können, die im Bereich von Neuware liegen [M3].

Die Herstellung von Carbonfaservlies ist eine alternative Methode mit der nicht nur kurze sondern auch lange Carbonfasern recycelt werden können. Die Carbonfaservliese weisen zwar keine vergleichbaren mechanischen Eigenschaften im Verbund auf wie neue Wirrfasermatten, trotzdem können sie zur Verbesserung der Oberflächenqualität in gewebeverstärkten CFK-Bauteilen oder Verkleidungselementen eingesetzt werden [M2].

Eine weitere Recyclingmöglichkeit von Carbonlangfasern ist die Organofolie. Die Organofolie kann beispielsweise im Thermoformprozess zu neuen Bauteilstrukturen verarbeitet werden. So konnte z. B. als Technologiedemonstrator ein PKW-Kotflügel realisiert werden [M2].

Ferner kann das Spinnfasergarn aus recycelten Carbonfasern Primär-Filamentgarne ersetzen, wie z. B. bei der Herstellung von textilen Gelegen [W2], die dann im Thermoformprozess ebenfalls zu neuen lasttragenden CFK-Bauteilen geformt werden können [H2, G1].

### 2.3 Stäube bei der Bearbeitung von Carbonbeton

Feinstaub ist ein komplexes Gemisch aus Gasen – insbesondere Luft – und festen oder flüssigen Stoffen in feinstverteilter Form. Der Feinstaub wird abhängig vom aerodynamischen Durchmesser der Partikel in unterschiedliche Fraktionen eingeteilt. Unterschieden wird in inhalierbarer Feinstaub ( $PM_{10} < 10 \mu m$ ), lungengangiger Feinstaub ( $PM_{2,5} < 2,5 \mu m$ ) und ultrafeine Partikel ( $< 0,1 \mu m$ ). Unter dem Begriff Feinstaub werden der primär emittierte und sekundär gebildete Feinstaub zusammengefasst. Primärer Feinstaub wird unmittelbar an der Quelle freigesetzt, zum Beispiel bei Verbrennungsprozessen. Sekundärer Feinstaub bezeichnet Partikel, die durch gasförmige Vorläufersubstanzen wie Schwefel- und Stickoxide und Ammoniak entstehen. Je nach Größe und Eindringtiefe der Teilchen sind die gesundheitlichen Wirkungen von Feinstaub verschieden [V]. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit wurden in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 900) [09] Arbeitsplatzgrenzwerte für Feinstaub festgelegt. In diesen wird der Feinstaub in eine einatembare (E) und eine alveolengängige (A) Fraktion unterschieden. Der einatembare Feinstaub (E) entspricht ungefähr der  $PM_{10}$ -Fraktion und der alveolengängige Feinstaub der  $PM_{2,5}$ -Fraktion. Die allgemeinen Arbeitsplatzgrenzwerte für Stäube liegen für die E-Fraktion bei  $10 \text{ mg/m}^3$  und für die A-Fraktion bei  $1,25 \text{ mg/m}^3$  [09].

Die Wirkung von luftgetragenen Staubpartikeln auf die menschliche Gesundheit hängt nicht nur von der Größe der Partikel ab, sondern auch von der chemischen Zusammensetzung. Die Spannweite reicht dabei von der kurativen Wirkung von marinen Salzpartikeln bis hin zu karzinogenen Effekten von Asbestfasern. Partikel, die größer als  $3 \mu m$  sind, können in den oberen Atemwegen abgeschieden werden. Fasern mit einem Durchmesser von  $< 3 \mu m$ , einer Länge von  $< 5 \mu m$  und einem Verhältnis von Länge zu Durchmesser  $> 3$  (sogenannte WHO-Fasern) können die Atemwege jedoch passieren [H2]. Sie gelten aufgrund ihrer verstärkten Lungengangigkeit als besonders bedenklich, da sie bis zu den Lungenbläschen vordringen können, in denen der Austausch zwischen Luft und Blut erfolgt [S6]. Insbesondere Asbestfasern sind aufgrund ihrer Geometrie in der Lage das Lungengewebe zu penetrieren, bis zum Bauchraum zu wandern und dort das Wachstum eines bösartigen Tumors auszulösen [H2].

Sowohl bei der mechanischen als auch thermischen Bearbeitung von Carbonbeton entsteht ebenfalls primärer Feinstaub, der aufgrund des eingesetzten Bewehrungsmaterials Zerkleinerungsprodukte des Fasermaterials enthält [H2]. Bei den verschiedenen Prozessen von der Herstellung bis zum Abbruch und der Entsorgung von Carbonbeton ist folglich mit einer Freisetzung von partikulären Carbonfasern zu rechnen. Für freigesetzte Carbonfaserpartikel sind die genauen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit noch nicht hinreichend erforscht [S6].

Bei Untersuchungen zur thermischen Entsorgung von Carbonfasern wurden Carbonfaserpartikel  $< 3 \mu m$  in der Asche einer Müllverbrennungsanlage gefunden. Sie wurden in

einer ersten Gefährdungseinstufung der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie gemäß der technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 905 als krebserregend eingestuft [Q1, 07]. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite“ der TU Dresden widersprechen zum Teil dieser Einstufung. Zwar wiesen Stäube, die bei mechanischer Bearbeitung von Carbonbeton entstanden sind, Anteile von lungengängigen Fasern auf, die auch entsprechend negative Reaktionen bei exponierten Zellen hervorrufen, allerdings kann in den Daten kein signifikanter Unterschied zwischen Stäuben von Normal- und Carbonbeton ausgemacht werden. Insbesondere die Analyse der freigesetzten auf PAN basierten Carbonfasern ergab keine Hinweise auf gesundheitliche relevante Faserdimensionen im Sinne der Empfehlung der WHO [H2]. Ebenso wurden in diesem Vorhaben die freigesetzten Aerosole physikalisch-chemisch analysiert. Dabei zeigte sich, dass bei Verwendung von Carbonbeton aromatische Schadstoffe (vor allem Styrol) entstehen, die bei herkömmlichem Beton nicht auftreten. Die Konzentrationen sind jedoch relativ gering und liegen unter den maximal zulässigen Arbeitsplatzkonzentrationen [S6]. Es werden derzeit weitere Untersuchungen durchgeführt, um eine sichere Einschätzung der gesundheitlichen Auswirkungen von Carbonmaterialien vornehmen zu können [H2].

### **3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton**

Im Rahmen dieser Arbeit soll nun über den aktuellen Forschungsstand hinaus, das Aufschlussverhalten von Carbonbeton untersucht werden. Dieses Kapitel beschäftigt sich folglich mit den experimentellen Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung des Verbundmaterials und der Bewertung der verschiedenen Aufbereitungstechnologien.

Die Untersuchungen umfassen mechanische Zerkleinerungsversuche mit dem Prall- und Backenbrecher an selbst hergestellten Carbonbetonen. Dabei werden zum einen der Einfluss verschiedener Carbonbetonsorten und Vorbehandlungsarten auf das Aufschlussverhalten untersucht und zum anderen die im Prozess freigesetzten Stäube analysiert.

In Kapitel 3.1 wird zunächst erläutert, welche Versuche geplant wurden, um darauffolgend in Kapitel 3.2 die vorbereitenden Maßnahmen für die Zerkleinerungsversuche vorzustellen. Anschließend werden die Versuchsdurchführungen in Kapitel 3.3 und die daraus gewonnenen Prüfergebnisse in Kapitel 3.4 aufgeführt. Zuletzt werden die Ergebnisse in Kapitel 3.5 ausgewertet und interpretiert sowie eine Fehlerbetrachtung vorgenommen.

#### **3.1 Versuchsplanung**

Das Zerkleinerungs- und Aufschlussverhalten sollte im Rahmen dieser Arbeit an selbst hergestellten Probekörpern für verschiedene Carbonbeton-Varianten ermittelt und verglichen werden. Es wurden insgesamt zwei Betonrezepturen (normal- und hochfest) sowie zwei Carbonfasergelege der Firma V.Fraas Solutions in Textile GmbH (SITgrid 040 und SITgrid 040 mit Beschichtung CHT 80°-Chemie) ausgewählt und diese miteinander kombiniert. Dabei wurde sich auf Carbonbetone mit engmaschigen Carbonfasergelegen, wie sie im Sanierungs- und Instandsetzungsbereich zum Einsatz kommen, konzentriert. Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen den Carbonfasertextilien und der Betonmatrix [L9] haben gezeigt, dass der Verbund noch nicht optimal ist, weshalb derzeit intensiv zu diesem Thema geforscht wird. Die Optimierungsversuche waren jedoch zum Zeitpunkt der Bearbeitung dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen, weshalb zwei Gelege ausgewählt wurden, deren Verbundverhalten zum einen im Normalbereich (SITgrid 040) und zum anderen weit über dem angestrebten Verbundverhalten (SITgrid 040 mit Beschichtung CHT 80°-Chemie) lagen. Durch die Zerkleinerungsversuche werden diese beiden Extrema miteinander verglichen, da das für die Praxis angestrebte Aufschlussverhalten zukünftig genau zwischen diesen beiden Varianten liegen wird [L4].

Die nachstehende Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die hergestellten Carbonbeton-Varianten und deren Bezeichnung. Auf die Herstellung der Carbonbetone wird in Kapitel 3.2.1 näher eingegangen.

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

**Tabelle 4:** Übersicht über die hergestellten Carbonbeton-Varianten und deren Bezeichnung

<b>Bezeichnung (Beton/Gelege)</b>	<b>verwendetes Carbonfasergelege</b>	<b>verwendete Betonbasisrezeptur</b>
NF/A	SITgrid 040	normalfest: C3-B2-NF-1-150-8
NF/B	SITgrid 040 mit Beschichtung CHT 80°-Chemie	normalfest: C3-B2-NF-1-150-8
HF/A	SITgrid 040	hochfest: C3-B2-HF-2-145-5
HF/B	SITgrid 040 mit Beschichtung CHT 80°-Chemie	hochfest: C3-B2-HF-2-145-5

Bei den Zerkleinerungsversuchen sollte nicht nur das Aufschlussverhalten der verschiedenen Carbonbeton-Varianten untersucht werden, sondern auch wie sich unterschiedliche Vorbehandlungsarten auf das Aufschlussverhalten der Carbonbetone auswirken. Dafür wurden die Carbonbetone zunächst ohne Vorbehandlung im Prall- (PB) und Backenbrecher (BB) mit einer Doppelbestimmung zerkleinert. Anschließend wurde wegen der begrenzten Probekörpermenge, auf Grundlage der Versuchsergebnisse in Kapitel 3.4 und 3.5, ein Brechertyp ausgewählt, mit dem die weiteren Zerkleinerungsversuche für den vorbehandelten Carbonbeton durchzuführen waren. Vor der Zerkleinerung wurden die Carbonbetone einer thermischen sowie einer Mikrowellen-Vorbehandlung unterzogen. Da die Ergebnisse der an der Bauhaus-Universität durchgeführten Forschungen zum Einfluss des Feuchtegehaltes bei mikrowelleninduzierter Trennung von Verbundmaterialien nicht eindeutig sind [B2], wurden sowohl umgebungsfeuchte als auch trockene Probekörper mit Mikrowellen vorbehandelt. Die Zerkleinerungsversuche der vorbehandelten Carbonbetone wurden, aufgrund der begrenzten Probekörpermenge, nicht doppelt bestimmt.

Um die Staubentwicklung beim Prozess zu beurteilen, sollte exemplarisch bei den mechanischen Zerkleinerungsversuchen ohne Vorbehandlung die Aerosolkonzentration der PM10- und PM2,5-Fraktion gemessen werden. Ebenfalls wurden bei diesen Versuchen Proben von den freigesetzten Stäuben genommen, um den Faseranteil dieser zu charakterisieren.

Der Umfang aller Versuche ist in Tabelle 5 nochmal veranschaulichend dargestellt.

**Tabelle 5:** Versuchsplan

Vorbehandlungsart	Beton/Gelege	Zerkleinerungsart	Versuchsanzahl	Messung Aerosolkonzentration
Ohne Vorbehandlung	NF/A	Backenbrecher (BB)	2	PM10 und PM2,5
	NF/B		2	
	HF/A		2	
	HF/B		2	
	NF/A	Prallbrecher (PB)	2	
	NF/B		2	
	HF/A		2	
	HF/B		2	
Thermische Vorbehandlung	NF/A	Backenbrecher (BB)	1	-
	NF/B		1	
	HF/A		1	
	HF/B		1	
Mikrowellen Vorbehandlung -umgebungsfeucht-	NF/A	Backenbrecher (BB)	1	-
	NF/B		1	
	HF/A		1	
	HF/B		1	
Mikrowellen Vorbehandlung -trocken-	NF/A	Backenbrecher (BB)	1	-
	NF/B		1	
	HF/A		1	
	HF/B		1	

Zur Beurteilung des Aufschlussverhaltens von Carbonbeton sollten Analysen zu der Aufbereitungsqualität und dem Aufschlussgrad des Rezyklats sowie zum Fasergehalt im Rezyklat durchgeführt werden. Welche Versuche für diese Analysen im Einzelnen durchgeführt und welche Analysemethoden zur Beurteilung der Staubentwicklung angewandt wurden, wird in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

### 3.1.1 Analysemethoden zur Bestimmung der Aufbereitungsqualität des Rezyklats

Die Aufbereitungsqualität der Carbonbetonrezyklate wird anhand der Rohdichte, Wasseraufnahme, Korngrößenverteilung, Kornform und Massenströme beurteilt.

Die Rohdichte ist die Kenngröße eines Materials für die volumenbezogene Masse. Für die rezyklierte Gesteinskörnung wird die Rohdichte mittels Feststoffpyknometer GeoPyc 1360 für die Fraktion 8/16 mm gemessen. Hierbei wird das Kornvolumen durch Verdrängung eines flüssigkeitsähnlichen Messpulvers (DryFlo) und die Masse des Feststoffes über Wägung bestimmt. Aus den Ergebnissen wird anschließend nach Formel 1 die Rohdichte ermittelt.

**Formel 1:** Bestimmung der Rohdichte mit dem Feststoffpyknometer

$$\text{Rohdichte } \rho = \frac{\text{Masse}_{GK}}{(\text{Volumen}_{\text{DryFlo}+GK} - \text{Volumen}_{\text{DryFlo}})} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Die Wasseraufnahme bezeichnet die Massezunahme einer ofengetrockneten Gesteinskörnung infolge Eindringens von Wasser in zugängliche Hohlräume und wird nach DIN 1097-6 [10] bestimmt. Zur Ermittlung der Wasseraufnahme wird die Fraktion 8/16 mm der rezyklierten Gesteinskörnung bis zur Massekonstanz im Ofen bei 105 °C getrocknet. Anschließend wird die rezyklierte Gesteinskörnung unter Wasser gelagert und nach 10 Minuten die Masseänderung bestimmt. Die Wasseraufnahme berechnet sich dann nach Formel 2.

**Formel 2:** Berechnung der Wasseraufnahme

$$\text{Wasseraufnahme } WA = \frac{(\text{Masse}_{GK,feucht} - \text{Masse}_{GK,trocken})}{\text{Masse}_{GK,trocken}} \cdot 100 [\%]$$

Die Korngrößenverteilung wird mittels Siebanalyse nach DIN 18123 [11] ermittelt. Dabei wird das Rezyklat durch einen Siebsatz mit abgestuften Maschenweiten gerüttelt und die Rückstände auf den einzelnen Sieben gewogen. Die Rückstände werden dann in Prozent zur Gesamtmasse umgerechnet (Formel 3) und aufsummiert als Durchgangskennlinie gezeichnet. Nach der Siebanalyse liegt das grobdisperse Rezyklat in Fraktionen von 0 bis 31,5 mm vor.

**Formel 3:** Berechnung der Rückstände in Prozent

$$\text{Rückstand } p_3 = \frac{\text{Masse}_{\text{Rückstand}}}{\text{Masse}_{\text{gesamt}}} \cdot 100 [\%]$$

Die Kornform des Rezyklats wird mit dem optischen Messgerät HAVER CPA 4 der Firma Haver & Boecker bestimmt. Das Messverfahren basiert auf der digitalen Bildverarbeitung. Eine Zeilenkamera nimmt die Partikel > 0,125 mm im freien Fall auf, während die Messdaten parallel zum Messvorgang in Echtzeit ausgewertet werden. Die Kornform wird dann anhand der Zirkularität und dem Seitenverhältnis Länge/Breite bewertet, wobei die Zirkularität ein Maß für die Rundheit der Partikel ist. In dieser Arbeit werden das Seitenverhältnis und die Zirkularität für die Korngrößen > 2 mm bestimmt und als gemittelte Werte für alle Fraktionen angegeben.

Die Massenströme geben letztlich für jedes Aufbereitungsverfahren an, welche Mengen nach der Zerkleinerung des zu brechenden Guts für eine Wiederverwendung gewonnen werden können. Sie bilden folglich den Massendurchsatz des jeweiligen Aufbereitungsverfahrens ab und werden aus der Masse des Aufgabeguts und Rezyklats ermittelt.

#### 3.1.2 Analysemethoden zur Bestimmung des Aufschlussgrades des Rezyklats

Für Carbonbeton ist der Aufschluss optimal (100 % Aufschlussgrad), wenn der Zementstein von der ursprünglichen Gesteinskörnung und Bewehrung vollständig entfernt ist, also wenn ein Bruch bzw. eine Trennung des Verbundmaterials an den Grenzflächen der einzelnen Werkstoffe erfolgt. Um den Aufschlussgrad für Carbonbeton bewerten zu können, muss der Aufschluss der Gesteinskörnung und der Carbonbewehrung getrennt betrachtet werden.

Die Trennung des Zementsteins von der Gesteinskörnung wird durch händisches Sortieren einer repräsentativen Probe beurteilt. Dabei wird die Probe in die drei Kategorien 0 %, 50 % und 100 % Aufschlussgrad eingeteilt (Abbildung 14) und anschließend der Massenanteil der einzelnen Kategorien ermittelt.



**Abbildung 14:** Einstufung rezyklierter Gesteinskörnung in 0 %, 50 % und 100 % Aufschlussgrad (von links nach rechts)

Der Aufschlussgrad der Carbonbewehrung wird rein visuell anhand einer Bilderreihe diskutiert. In die Diskussion fließt neben dem Aufschluss der Bewehrung auch die Länge und Qualität der Fasern mit ein. Die Faserlänge wird vor dem Hintergrund der Probekörperabmessungen betrachtet, während bei der Qualität darauf geachtet wird, ob die Fasern gebündelt oder zerfranst vorliegen.

#### 3.1.3 Analysemethoden zur Bestimmung des Fasergehaltes im Rezyklat

Zur Bestimmung des Carbonfaseranteils im Rezyklat gibt es bisher noch keine festgelegten Prüfverfahren. Im Rahmen dieser Arbeit sollten für die Fraktion 0/1 mm verschiedene Verfahren getestet werden. Für die Fraktion > 1 mm sollten die Fasern im Rezyklat visuell in der unter Kapitel 3.1.2 erwähnten Bilderreihe festgehalten werden. Die Analysemethoden für die jeweilige Fraktion werden nachfolgend erläutert.

#### Fraktion 0/1 mm

Der Fasergehalt der Fraktion 0/1 mm sollte mit dem Glühverlust, der Thermoanalyse, dem TOC-Gehalt und dem Morphologi G3 vergleichend ermittelt werden. Die ersten drei Verfahren beruhen auf dem Prinzip, dass sich die aus Kohlenstoff bestehenden Carbonfasern unter hohen Temperaturen in Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) umwandeln und das Ergebnis dieses Prozesses auf verschiedene Weise gemessen werden kann. Das letzte Verfahren beruht auf der statischen Bildanalyse mit dem Morphologi G3-System der Firma Malvern Panalytical GmbH.

Um die Eignung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Fasergehalte beurteilen zu können, wurden vor den eigentlichen Versuchen Tastversuche durchgeführt. Die verschiedenen Verfahren sowie die Ergebnisse der Tastversuche werden im Folgenden vorgestellt.

Unter dem Glühverlust versteht man den Anteil an organischer Substanz in einer Probe. Um ihn zu bestimmen, wird die Probe bei hohen Temperaturen so lange geglüht, bis keine Gewichtsabnahme mehr festzustellen ist. Die Differenz zwischen der aufgegebenen Gesamtmasse und dem Glührückstand bildet den Glühverlust. Im Falle des Carbonbetons soll die Gewichtsreduzierung, durch das Verbrennen der Fasern in der Probe, Aufschluss über den Fasergehalt geben. In Tastversuchen wurde zunächst erprobt, ob das Verfahren zum Verglühen der Carbonfasern geeignet ist. Dafür wurden vereinzelt Carbonfasern beider Gelege A (SITgrid 040) und B (SITgrid 040 mit Beschichtung CHT 80°-Chemie) bei 1000 °C für 10 und 30 min in einen Muffelofen gestellt. Der Glühvorgang wurde sowohl ohne als auch mit Sauerstoffzufuhr durchgeführt. Die Carbonfasern des Geleges A verfärbten sich durch den Glühvorgang weiß und zerfielen teilweise zu Asche. Die Carbonfasern des Geleges B blieben schwarz und ließen sich nach dem Glühvorgang lediglich zu locker verknüpften Bündeln auseinander ziehen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich hauptsächlich die Beschichtung der Carbonbewehrung B aufgelöst hat. Folglich ist die Bestimmung des Fasergehalts über den Glühverlust nicht möglich, da die Carbonfasern des Geleges B im Muffelofen nicht verglühen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Ergebnis der Glühverlust-Versuche (30 min bei 1000 °C ohne Sauerstoffzufuhr) für beide Carbonbewehrungen.



**Abbildung 15:** Carbonbewehrung A vor (links) und nach (rechts) dem Glühverlust-Versuch



**Abbildung 16:** Carbonbewehrung B vor (links) und nach (rechts) dem Glühverlust-Versuch

Die Thermoanalyse wurde mit dem TG-MS-PulseTA durchgeführt. Es kombiniert die Thermogravimetrie (TG) und die Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC). Die TG erfasst die Masseänderung einer Probe, die einem definierten Temperaturprogramm in vorgegebener Atmosphäre unterworfen wird. Die DSC bezeichnet die Messung kalorischer Größen, z. B. spezifischer Wärmen, sowie daraus abgeleiteter Größen an einer Probe im Vergleich zu einer inerten Substanz, die beide demselben Temperaturprogramm unterworfen werden. Im Falle des Carbonbetons, sollte mit dieser Methode der durch die Faserzersetzung entstehende Kohlenstoffdioxid gemessen werden und den Fasergehalt in der Probe widerspiegeln. Mit diesem Verfahren wurden ebenfalls Tastversuche durchgeführt, um die Eignung beurteilen zu können. Auch hier waren die Ergebnisse unzureichend. Es gelang zwar die Fasern bei einer Temperatur von 880 °C zu verbrennen. Jedoch konnte in weiterführenden Messungen an einer Betonprobe mit Carbonfasern sowohl unter synthetischer Luft (80% Argon, 20 % Sauerstoff) als auch unter reinem Argon nur eine geringe Menge an residualem Kohlenstoff festgestellt werden. Der Grund hierfür ist unter anderem, dass der CO<sub>2</sub>-Peak der Decarbonatisierung des Betons das CO<sub>2</sub>-Signal der Faserzersetzung überlagert, welches der hohen Verbrennungstemperatur der Fasern geschuldet ist. Die genauen Ergebnisse sind dem Versuchsbericht in Anhang

1 zu entnehmen. Folglich kann auch die Thermoanalyse nicht für die Bestimmung des Fasergehaltes eingesetzt werden.

Der TOC-Gehalt ist das Maß für den organischen Kohlenstoffgehalt in einer Probe und schließt damit anorganisch gebundenen Kohlenstoff, wie zum Beispiel Carbonate im Beton, aus. Dieser wurde an der MFPA in Weimar mit dem Makro-Elementaranalysator multi EA 4000 und dem indirekten Verfahren nach DIN EN 15936 [08] ermittelt. Dabei wird der gesamte (TC) sowie anorganische (TIC) Kohlenstoffgehalt der Probe bestimmt und aus der Differenz dieser Werte der TOC-Gehalt berechnet. Für die Bestimmung des TC-Gehalts werden ca. 70 mg der Probe bei Temperaturen von 1100°C in einem sauerstoffhaltigen Trägerstrom verbrannt. Das bei der Analyse freigesetzte Kohlenstoffdioxid wird mit einem geeigneten Detektionsverfahren (hier Infrarotspektrometrie) gemessen und als Kohlenstoffgehalt angegeben. Für die Ermittlung des TIC-Gehalts werden zu weiteren 70 mg der Probe Phosphorsäure zugefügt, wodurch sich die vorhandenen Carbonate zersetzen. Anschließend wird das entstandene Kohlenstoffdioxid durch Rühren ausgetrieben und vom Trägergas zum Detektor transportiert. Die Tastversuche für dieses Verfahren verliefen positiv und bestätigten die Eignung des Verfahrens zur Bestimmung des Fasergehalts von Carbonbeton-Rezyklaten. Es konnte festgestellt werden, dass die Carbonfasern vollständig verbrennen und fast ausschließlich aus Kohlenstoff (A: 95 %, B: 92 %) bestehen. Da Normalbetone bereits einen TOC-Gehalt besitzen, der aus Betonzusatzmitteln und weiteren Ausgangsstoffen resultiert, musste vor der Bestimmung des TOC-Gehalts des Carbonbeton-Rezyklats, der TOC-Hintergrund der verwendeten Betone bestimmt werden. Aus der Differenz des TOC-Gehalts des Carbonbeton-Rezyklats und des TOC-Hintergrundes des verwendeten Betons kann anschließend der Fasergehalt der Probe bestimmt werden. Im Rahmen der Tastversuche konnte sowohl für einen normalfesten Beton ohne Fasern als auch für einen mit Fasern der TOC-Gehalt bestimmt und anschließend ein Fasergehalt berechnet werden. Die genauen Ergebnisse des Tastversuches sind dem Anhang 2 zu entnehmen. In diesem sind auch die berechneten Standardabweichungen für die Bestimmung des TC- und TIC-Gehalts der Carbonbetonprobe ohne Fasern aufgeführt. Für den TC-Gehalt beträgt die Standardabweichung 0,01 und für den TIC-Gehalt 0,05. Allgemein wird die Präzision des multi EA 4000 mit einer relativen Standardabweichung von weniger als 2 % bei 12 % Kohlenstoff angegeben [VII]. Die Messung des TOC-Gehalts wurde im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Analysemethode zur Bestimmung der Fasergehalte angewandt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.4 aufgeführt.

Als letzte Methode zur Bestimmung des Fasergehaltes sollte eine statische Bildanalyse mit dem Morphologi G3-Messgerät der Firma Malvern Panalytical GmbH durchgeführt

werden. Das Morphologi G3 kann Partikel durch Messung der Partikelgröße und -form im Größenbereich von 0,5 µm bis ca. 3 mm charakterisieren. Dies kann für die Erkennung der Faserpartikel im Carbonbeton-Rezyklat genutzt werden, da die Carbonfasern prinzipiell eine längliche Form und das Beton-Rezyklat eine gerundete Form aufweisen. Mit einer geeigneten Analyseverfahren des G3-Systems können die Morphologi-Aufnahmen hinsichtlich dieses Merkmals ausgewertet werden, sodass sich anhand der Partikelform der Fasergehalt bestimmen lässt. Durch die Tastversuche konnten Fasergehalte in Carbonbeton-Rezyklaten bestimmt werden. Allerdings waren die Tastversuche mit großen Unsicherheiten verbunden, weil nicht alle länglichen Partikel eindeutig als Carbonfasern identifiziert werden konnten. So kann es vorkommen, dass auch längliche Staubpartikel oder die Bindfäden der Carbonbewehrung zum Fasergehalt hinzu gerechnet werden. Eine weitere Unsicherheit besteht darin, dass die Carbonfasern in den Brechern auch so stark zerkleinert werden können, dass diese keine längliche sondern eher eine quadratische Form aufweisen. Aufgrund dieser Unsicherheiten wird die Methode in dieser Arbeit nur exemplarisch für das Carbonbeton-Rezyklat „HF/B ohne Vorbehandlung im BB“ angewandt, um den ermittelten Fasergehalt durch das Morphologi G3-System mit dem Fasergehalt, der über den TOC-Gehalt bestimmt worden ist, zu vergleichen. Die Ergebnisse der Vergleiche werden in Kapitel 3.4 diskutiert.

#### Fraktion > 1 mm

Für die Fraktion > 1 mm konnte der Fasergehalt nicht mit den oben genannten Analysemethoden bestimmt werden, da die repräsentative Probennahme bei dieser Fraktion problematisch ist. Während die Fasern in der Fraktion 0/1 mm weitestgehend gleichmäßig verteilt sind, was eine repräsentative Probennahme erleichtert, liegen die Fasern in den gröberen Fraktionen durch ihre elektrostatische Aufladung meist in Form von Faserbündeln vor. Des Weiteren sind die Fasern in den gröberen Fraktionen häufig nicht aufgeschlossen und müssten für die oben genannten Untersuchungen auf eine Korngröße  $\leq 125 \mu\text{m}$  gemahlen werden. Hier besteht zum einen das Problem, dass eine vereinzelt gemahlene Probe das Verhältnis von Fasern zu Gesteinskörnung der gesamten Probe nicht repräsentieren kann. Zum anderen bleiben die fein gemahlene Carbonfasern durch die elektrostatische Aufladung an der Wandung der Mühle haften, wodurch der Fasergehalt verfälscht wird. Aus diesem Grund werden die vorhandenen Fasern im Rezyklat nur in den unter Kapitel 3.4 zu findenden Bilderreihen visuell festgehalten.

#### **3.1.4 Analysemethoden zur Bestimmung der Staubentwicklung**

Die Staubentwicklung beim Zerkleinerungsprozess sollte durch Messung der Aerosolkonzentration der PM10- und PM2,5-Fraktion beurteilt werden. Die Messungen wurden mit dem mobilen Staubmessgerät DUSTTRACK II der Firma TSI durchgeführt. Das Staub-

messgerät zieht über einen festzulegenden Messzeitraum Luft aus der Umgebung ein und misst dabei in Echtzeit die Aerosolmassen. Die zu messenden Aerosolfractionen können mit entsprechenden Messaufsätzen (hier 10  $\mu\text{m}$  und 2,5  $\mu\text{m}$ ) eingegrenzt werden.

Die Proben der freigesetzten Stäube sollten anschließend mit dem Stereo- und Polarisationsmikroskop untersucht werden. Es galt herauszufinden, ob in den Stäuben Fasern vorhanden sind. Für diesen Fall sollte ebenfalls geklärt werden, ob die Fasern im Backen- und Prallbrecher unterschiedlich zerkleinert werden.

Außerdem sollte exemplarisch für einige Stäube der Fasergehalt ermittelt werden. Die Fasergehalte sollten durch den TOC-Gehalt und das Morphologi G3 vergleichend bestimmt werden.

Die Ergebnisse der Staubanalysen sind in Kapitel 3.4.4 aufgeführt.

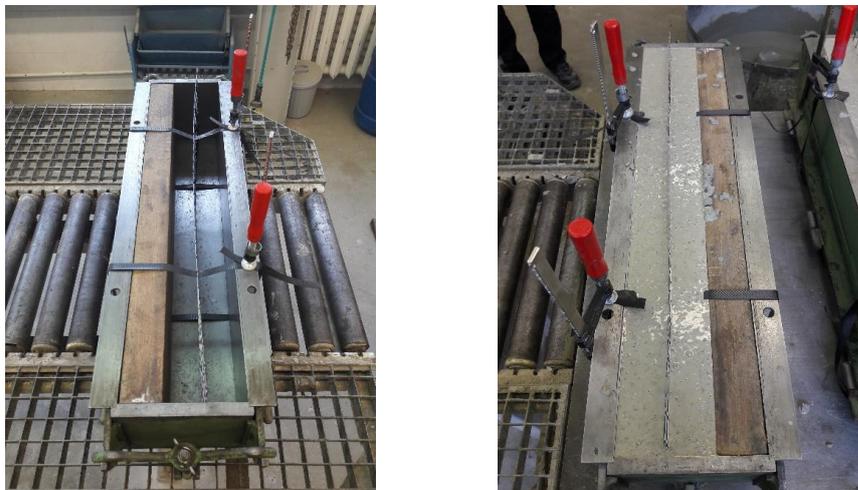
#### 3.2 Vorbereitende Maßnahmen

Vor den eigentlichen Aufbereitungsversuchen mussten zunächst Carbonbeton-Probekörper im Betonlabor der Bauhaus-Universität Weimar hergestellt und auf ihre baustofftechnischen Kennwerte hin untersucht werden.

Die Herstellung der Probekörper einschließlich der verwendeten Materialien sowie eingesetzten Betonrezeptur wird im nachfolgenden Kapitel erläutert. Anschließend werden die baustofftechnischen Kennwerte der hergestellten Carbonbetone aufgeführt.

##### 3.2.1 Herstellung der Probekörper

Für die Versuche mussten Probekörper in den vier Carbonbeton-Varianten NF/A, NF/B, HF/A und HF/B (Tabelle 4) hergestellt werden. Dafür wurden zunächst Carbonbetonbalken der Abmessung  $70 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$  hergestellt, die nach 7 Tagen Wasserlagerung und 21 Tagen Lagerung im Normklima ausgeschalt und zu kleineren Quadern ( $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$ ) gesägt wurden. Nach dem Sägen wurden die Probekörper nochmals 7 Tage im Normklima und dann bis zur Zerkleinerung im Aufbereitungstechnikum der Bauhaus-Universität Weimar gelagert. Der Herstellungsprozess ist in den nachfolgenden Bildern verdeutlicht.

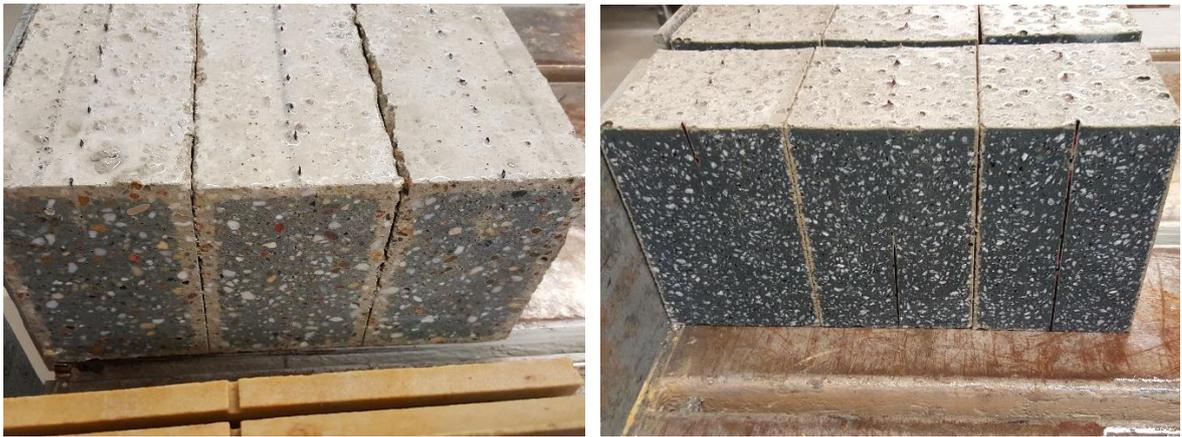


**Abbildung 17:** Leere Balkenschalung mit mittig eingebrachter Carbonbewehrung (links), mit normalfestem Beton gefüllte Balkenschalung (rechts)



**Abbildung 18:** Ausgeschalteter normalfester Carbonbetonbalken

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton



**Abbildung 19:** Lage der Carbonbewehrung in den gesägten Probekörpern (links: normalfester Carbonbeton, rechts: hochfester Carbonbeton)

Die Betonrezepturen richten sich nach den Rezepturempfehlungen des Basisvorhabens B2 „Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft“ [S2, S3] im Forschungsprojekt „Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite“. Der normalfeste Beton wird mit einem Größtkorn von 8 mm und einem Wasser/Zement-Wert von 0,43 hergestellt, während der hochfeste Beton ein Größtkorn von 5 mm und einen Wasser/Zement-Wert von 0,23 hat. Die Zusammensetzung des normal- und hochfesten Betons ist in Tabelle 6 und 7 zusammengefasst.

**Tabelle 6:** Verwendete Ausgangsmaterialien und Rezeptur der normalfesten Carbonbeton-Variante C3-B2-NF-1-150-8 [S2]

Rohstoff	Rohstoffbezeichnung	Bezugsquelle	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Einwaage [kg/m <sup>3</sup> ]
Zement	CEM II/C-M (S-LL)	Opterra	2,98	353
Kalksteinmehl	Easyflow_IIa	SH-Minerals	2,60	172
Gesteinskörnung	BCS 0,06/0,2	Strobel	2,65	175
	Sand Ottendorf 0/2	KBO	2,65	625
	Kies Ottendorf 2/8		2,65	900
Fließmittel	MC-VP-15-0414-01	MC	1,07	8 bis 9
Wasser	-	-	1,00	150

**Tabelle 7:** Verwendete Ausgangsmaterialien und Rezeptur der hochfesten Carbonbeton-Variante C3-B2-HF-2-145-5 [S3]

Rohstoff	Rohstoffbezeichnung	Bezugsquelle	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Einwaage [kg/m <sup>3</sup> ]
Zement	BMK-D5-1	Deuna	2,93	621
Gesteinskörnung	BCS 0,06/0,2	Strobel	2,65	250
	Sand Ottendorf 0/2	KBO	2,65	530
	Granit-Splitt 2/5	ABC	2,65	837
Fließmittel	MC-VP-16-0205-02	MC	1,07	16
Wasser	-	-	1,00	145

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

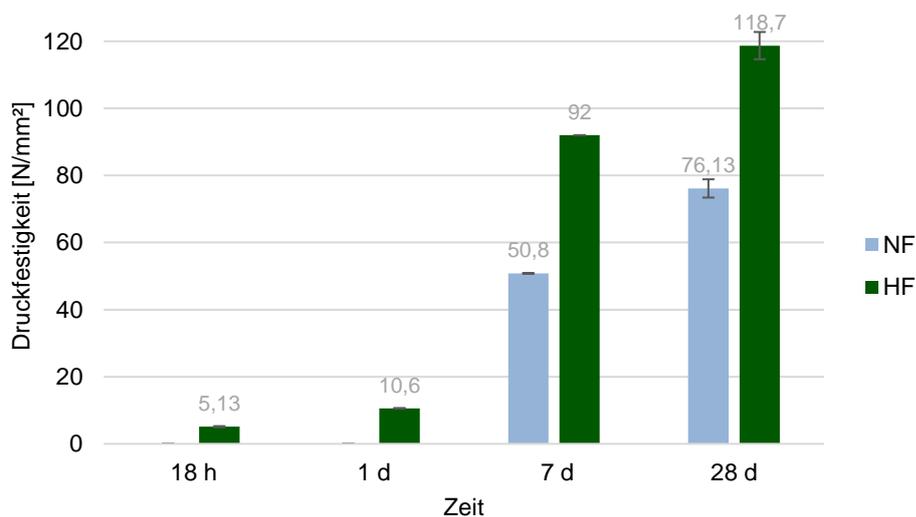
Für die Carbonbetone wurden Gittergelege aus Carbonfasern der Firma V.Fraas Solutions in Textile GmbH verwendet. Dabei handelt es sich um die Carbonbewehrungen SITgrid 040 (A) und SITgrid 040 mit Beschichtung CHT 80°-Chemie (B). Die Gittergelege bestehen in Kettrichtung (längs) aus Carbon 3200 tex und in Schussrichtung (quer) aus Carbon 800 tex [V2]. Die Einheit Tex bezeichnet die Feinheit der Fasern, wobei 1 tex 1 g pro 1000 m entspricht. Je höher die Tex-Nummer, desto größer ist folglich das Garn bzw. die Faser [M4]. Die Dichte des Materials beträgt 1,77 g/cm<sup>3</sup>. In Kettrichtung beträgt die Gitteröffnung 9 mm und in Schussrichtung 14 mm [V2].

#### 3.2.2 Baustofftechnische Kennwerte der Probekörper

Die Frisch- und Festbetoneigenschaften der hergestellten Carbonbetone sind in der nachfolgenden Tabelle 8 und Abbildung 20 zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 8:** Frisch- und Festbetoneigenschaften der hergestellten Carbonbeton-Varianten

Beton	Setzfließmaß nach 1 min [mm]	Frischbetonroh-dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Festbetonroh-dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] nach			
					18 h	1 d	7 d	28 d
NF	665	2,38	2,39	2,69	n. b.	n. b.	50,8	76,1
HF	755	2,42	2,45	2,71	5,1	10,6	92,0	118,7



**Abbildung 20:** Druckfestigkeitsentwicklung der beiden Carbonbeton-Varianten

#### 3.3 Durchführung der mechanischen Zerkleinerungsversuche

In diesem Kapitel werden die Durchführung der Zerkleinerungsversuche mit den selbst hergestellten Carbonbeton-Probekörpern und die Staubmessungen beschrieben. Dabei wird zunächst die Durchführung der mechanischen Zerkleinerung ohne Vorbehandlung betrachtet und anschließend die der thermischen sowie mikrowelleninduzierten Vorbehandlung. Danach wird auf die Staubmessungen eingegangen, die bei der mechanischen Zerkleinerung ohne Vorbehandlung durchgeführt wurden. Die einzelnen Versuche können dem Versuchsplan in Tabelle 5 entnommen werden.

Nach der Durchführung der Aufbereitungsversuche wurden die entstandenen Rezyklate mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen Methoden analysiert. Die Ergebnisse dieser Analysen sind im nachfolgenden Kapitel 3.4 aufgeführt.

##### 3.3.1 Mechanische Zerkleinerung ohne Vorbehandlung

Die unbehandelten Carbonbetone wurden, wie bereits erwähnt, im Aufbereitungstechnikum der Bauhaus-Universität Weimar mit dem Prall- und Backenbrecher zerkleinert. Die Zerkleinerungsversuche der unbehandelten Carbonbetone wurden doppelt durchgeführt, sodass jeweils 2 x 3 Probekörper von jeder Carbonbeton-Variante aufbereitet wurden.

Der Prallbrecher hat eine Nennleistung von 15 kW und arbeitet mit einer Drehzahl von 1400 U/min. Die Brechmaulabmessung beträgt 500 x 300 mm<sup>2</sup>, der Rotordurchmesser 400 mm und die Spaltweite 30 mm.

Der Backenbrecher hat eine Nennleistung von 7 kW. Die Brechmaulbreite beträgt 250 mm und die Brechmaulweite 200 mm. Die Backen sind 250 mm breit und der Spalt ca. 30 mm weit.

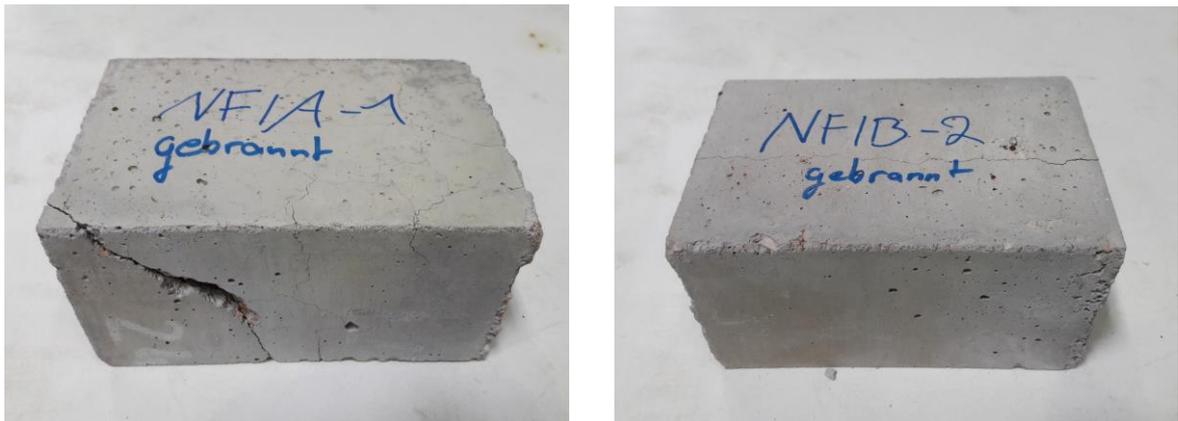
Die Endprodukte der Zerkleinerung durch den Prall- und Backenbrecher sind in der nachfolgenden Abbildung 21 beispielhaft für die Carbonbeton-Variante HF/B abgebildet.



Abbildung 21: HF/B-Rezyklat aus dem Prall- (links) und Backenbrecher (rechts)

#### 3.3.2 Mechanische Zerkleinerung mit thermischer Vorbehandlung

Bei der thermischen Vorbehandlung wurde für jede Carbonbeton-Variante ein Probekörper 5 Stunden mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 2 K/min auf 600 °C erwärmt. Diese Temperatur wurde anschließend 1 Stunde konstant gehalten, bevor der Probekörper zum Abkühlen aus dem Ofen genommen wurde. Die Probekörper aller Carbonbeton-Varianten wiesen nach der thermischen Vorbehandlung deutliche Rissbildungen auf. Sie sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Anschließend wurden die thermisch behandelten Carbonbetone im Backenbrecher zerkleinert.



**Abbildung 22:** Rissbildung an den thermisch vorbehandelten Probekörpern NF/A (links) und NF/B (rechts)



**Abbildung 23:** Rissbildung an den thermisch vorbehandelten Probekörpern HF/A (links) und HF/B (rechts)

#### 3.3.3 Mechanische Zerkleinerung mit Mikrowellen-Vorbehandlung

Die Mikrowellen-Vorbehandlung wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Linn High Therm GmbH durchgeführt. Die Versuche wurden für jede Carbonbeton-Variante im trockenen und umgebungsfeuchten Zustand an jeweils 2 Probekörpern durchgeführt. Der trockene Zustand wurde erreicht, indem die Probekörper 48 Stunden bei 105°C getrocknet und anschließend luftdicht gelagert wurden.

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Für die Vorbehandlung wurde der Mikrowellenkammerofen-Hochtemperatur MKH 7,2/ 540/ 750 verwendet. Die Mikrowellenleistung beträgt 7,2 kW und die Maße der Kammer betragen 540 x 750 mm<sup>2</sup>. Der Kammerofen ermöglicht ein gezieltes Einbringen der Mikrowellen in den Probekörper, wodurch dieser innerhalb weniger Minuten stark erwärmt werden kann. Der Mikrowellenkammerofen und der Versuchsaufbau innerhalb der Kammer ist in der Abbildung 24 dargestellt.



**Abbildung 24:** Mikrowellenkammerofen (links), Versuchsaufbau innerhalb des Kammerofens (rechts)

Die Temperaturen der Probekörper wurden mit einer Wärmebildkamera gemessen. Sie betragen bei einer Behandlungszeit von 5 min durchschnittlich 126 °C im trockenen und 137 °C im umgebungsfeuchten Zustand. Die umgebungsfeuchten Carbonbetone erreichten höhere Temperaturen als die trockenen, da in diesen Wasser vorhanden ist, das sich gut durch Mikrowellen erwärmen lässt (Kapitel 2.2.1.2). Die erreichten Temperaturen sind in Tabelle 9 für jeden Probekörper aufgelistet. Die Behandlungszeit wurde anhand eines Tastversuches mit dem Probekörper NF/A\*-umgebungsfeucht bestimmt. Dabei wurde der Probekörper solange mittels Mikrowellen erwärmt, bis dieser explodiert ist (Abbildung 25). Auf Grundlage dieses Versuches wurde die Behandlungsdauer von 5 min festgelegt.



**Abbildung 25:** Nach Mikrowellen-Vorbehandlung explodierter Probekörper NF/A\*-umgebungsfeucht

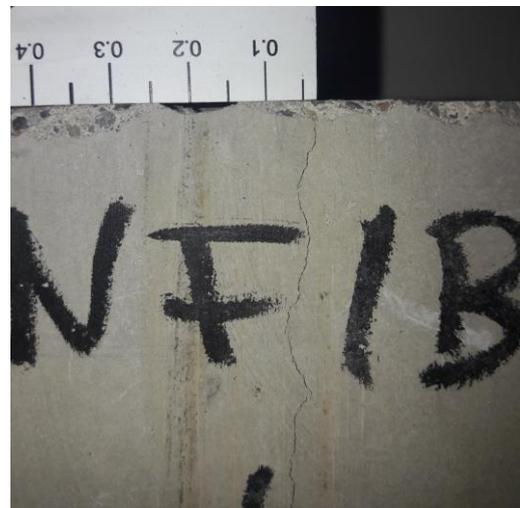
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

**Tabelle 9:** Übersicht über die erreichten Temperaturen der Probekörper bei der Mikrowellen-Vorbehandlung

Zustand	Beton/Gelege	Behandlungszeit [min]	Temperatur [°C]
trocken	NF/A	5	124
		5	123
	NF/B	5	130
		5	128
	HF/A	5	118
		5	119
	HF/B	5	141
		5	125
umgebungsfeucht	NF/A	7:45*	178
		5	123
	NF/B	5	117
		5	117
	HF/A	5	160
		5	135
	HF/B	5	136
		5	128

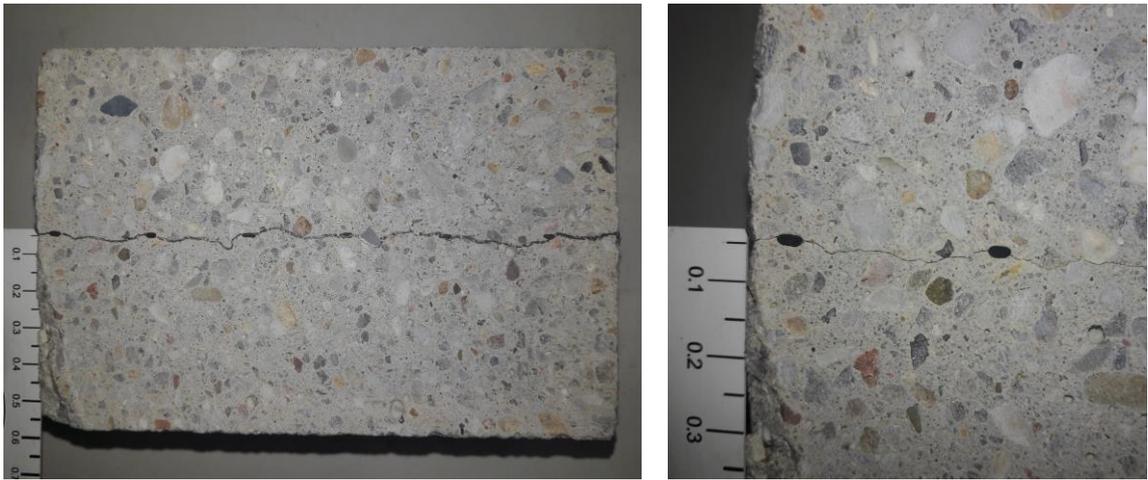
\*dieser Probekörper wurde bis zur Explosion erwärmt

Die normal- und hochfesten Probekörper wiesen nach der Mikrowellen-Vorbehandlung sowohl im trockenen als auch im umgebungsfeuchten Zustand Risse auf. Die Risse aller Carbonbeton-Varianten verliefen dabei vorwiegend entlang der Carbongelege. Der Grund hierfür kann entweder darin liegen, dass das Carbongelege wie eine Sollbruchstelle im Probekörper wirkt, wenn der durch die Mikrowellenerwärmung entstehende Wasserdampf die Zugfestigkeit des Betons übersteigt. Oder darin, dass sich die Carbonfasern und der Beton unterschiedlich stark aufheizen und es zu unterschiedlichen Volumenänderungen kommt. Die Rissverläufe sind nachfolgend beispielhaft für die Carbonbeton-Varianten NF/B im umgebungsfeuchten Zustand (Abbildung 26 und 27) und HF/A im trockenen Zustand (Abbildung 28 und 29) abgebildet.

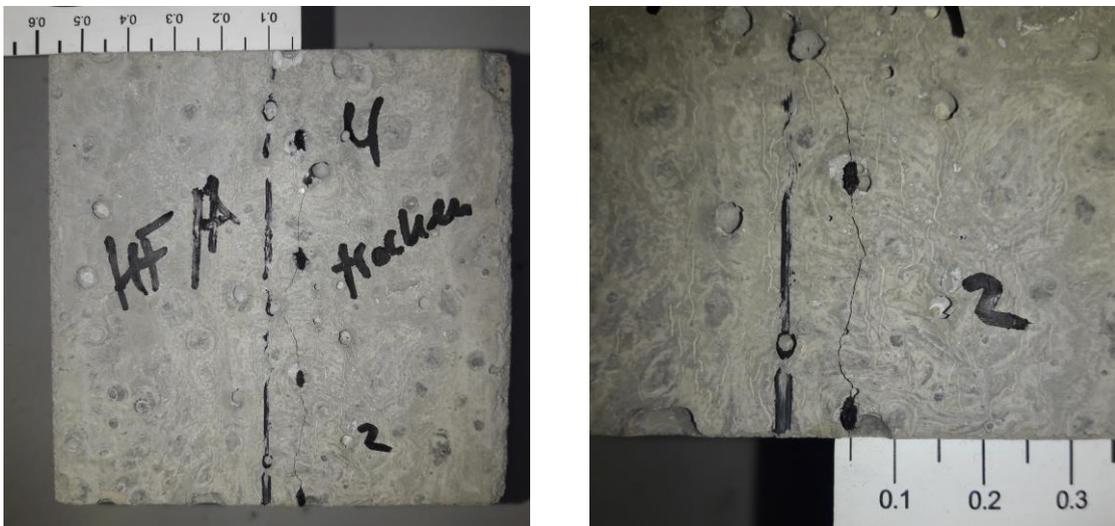


**Abbildung 26:** Rissverlauf der quadratischen Seitenfläche des Probekörpers NF/B - umgebungsfeucht (links) und als Nahaufnahme (rechts)

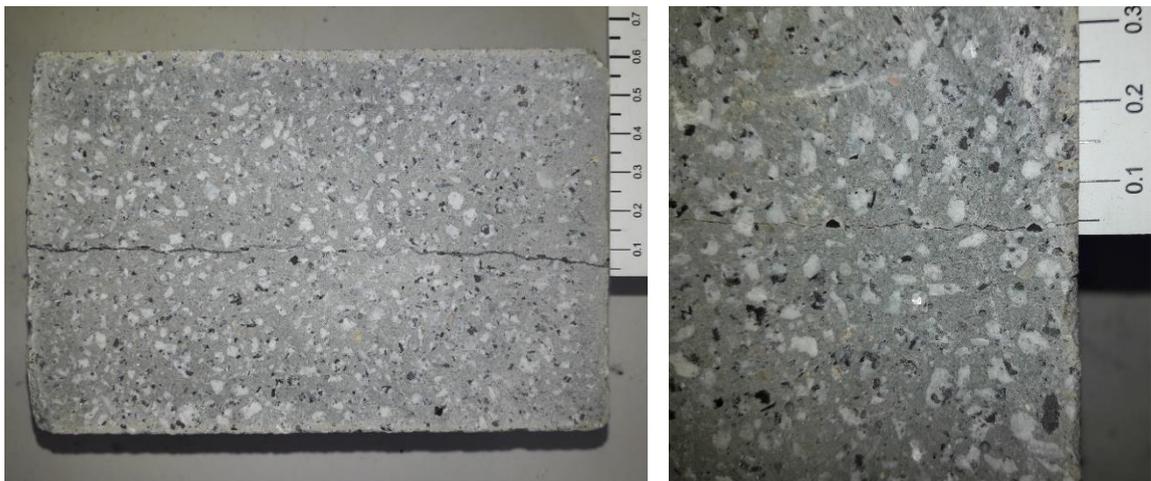
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton



**Abbildung 27:** Rissverlauf der rechteckigen Seitenfläche des Probekörpers NF/B - umgebungsfeucht (links) und als Nahaufnahme (rechts)



**Abbildung 28:** Rissverlauf der quadratischen Seitenfläche des Probekörpers HF/A - trocken (links) und als Nahaufnahme (rechts)



**Abbildung 29:** Rissverlauf der rechteckigen Seitenfläche des Probekörpers HF/A - trocken (links) und als Nahaufnahme (rechts)

Nach der Mikrowellen-Vorbehandlung wurden die Proben im Backenbrecher zerkleinert.

#### 3.3.4 Staubmessungen bei der mechanischen Zerkleinerung ohne Vorbehandlung

Die Messungen der Aerosolkonzentration der PM10- und PM2,5-Fraktion zur Beurteilung der Staubentwicklung, wurden mit dem mobilen Staubmessgerät DUSTTRACK II der Firma TSI durchgeführt. Die Messungen wurden während der Zerkleinerungsversuche 1 Minute lang im Abstand von 3 Sekunden durchgeführt. Für die Messungen wurde das Staubmessgerät neben dem Prall- und Backenbrecher platziert, so wie in Abbildung 30 zu erkennen.



**Abbildung 30:** Position des mobilen Staubmessgerätes am Prall- (links) und Backenbrecher (rechts)

Nach jedem Zerkleinerungsversuch wurden Proben von dem Staub genommen, der sich im direkten Umfeld der Brecher abgesetzt hatte. Dieser wurde anschließend nach den in Kapitel 3.1.4 aufgeführten Methoden analysiert.

### 3.4 Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel sind die Versuchsergebnisse der Zerkleinerungsversuche sowohl ohne als auch mit thermischer und mikrowelleninduzierender Vorbehandlung aufgeführt sowie die Untersuchungsergebnisse der Staubmessungen. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind nach den Analysebereichen, die in Kapitel 3.1 vorgestellt wurden, gegliedert angegeben. Die Gliederung aller Ergebnisse ist in Tabelle 10 dargestellt.

**Tabelle 10:** Gliederung der Versuchsergebnisse

<b>Aufbereitungsqualität des Rezyklats</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Rohdichte</li><li>- Wasseraufnahme</li><li>- Korngrößenverteilung</li><li>- Kornform</li><li>- Massenströme</li></ul>
<b>Aufschlussgrad des Rezyklats</b>
<i>Gesteinskörnung</i> <ul style="list-style-type: none"><li>- Aufschlussgrad</li></ul> <i>Carbonbewehrung</i> <ul style="list-style-type: none"><li>- Diskussion anhand einer Bilderreihe</li></ul>
<b>Fasergehalt im Rezyklat</b>
<i>Fraktion 0/1 mm</i> <ul style="list-style-type: none"><li>- TOC-Gehalt</li><li>- teilweise Vergleich mit Morphologi G3</li></ul> <i>Fraktion &gt; 1 mm</i> <ul style="list-style-type: none"><li>- Bilderreihe (s.o.)</li></ul>
<b>Staubmessungen</b>
<i>Aerosolkonzentration</i> <ul style="list-style-type: none"><li>- PM10</li><li>- PM2,5</li></ul> <i>Fasergehalt</i> <ul style="list-style-type: none"><li>- Stereo- und Polarisationsmikroskop</li><li>- TOC-Gehalt und Morphologi G3</li></ul>

Die Versuchsergebnisse werden größtenteils tabellarisch dargestellt. Sie werden anschließend kurz erläutert, wobei auf den Unterschied der Carbonbetonsorten für die jeweiligen Zerkleinerungsversuche eingegangen wird.

Der Vergleich der Vorbehandlungsarten und die Beurteilung der Eignung der Aufbereitungsverfahren wird dann in Kapitel 3.5 anhand von veranschaulichenden Diagrammen erörtert. Des Weiteren wird in Kapitel 3.5 die Zerkleinerung der Carbonbetone ohne Vorbehandlung mit der Zerkleinerung von Normalbetonen verglichen.

### 3.4.1 Versuchsergebnisse zur Aufbereitungsqualität des Rezyklats

Die Rohdichten und Wasseraufnahmen der durch die Zerkleinerungsversuche gewonnenen Carbonbeton-Rezyklate sind in Tabelle 11 aufgelistet.

**Tabelle 11:** Rohdichten und Wasseraufnahmen der Carbonbeton-Rezyklate

Vorbehandlung -Brechertyp-	Beton/Gelege	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Wasseraufnahme [M.-%]
keine -PB-	NF/A	2,50	4,90
	NF/B	2,48	4,88
	HF/A	2,57	4,04
	HF/B	2,59	4,23
keine -BB-	NF/A	2,46	4,89
	NF/B	2,46	4,80
	HF/A	2,53	4,18
	HF/B	2,54	4,01
thermische -BB-	NF/A	2,38	6,38
	NF/B	2,35	6,16
	HF/A	2,28	6,07
	HF/B	2,31	5,98
trockene MW -BB-	NF/A	2,29	4,97
	NF/B	2,31	4,77
	HF/A	2,45	3,99
	HF/B	2,43	3,91
umgebungsfeuchte MW -BB-	NF/A*	2,40	4,59
	NF/A	2,39	4,41
	NF/B	2,36	4,28
	HF/A	2,39	3,71
	HF/B	2,45	3,52

\*Probekörper wurde bis zur Explosion erwärmt

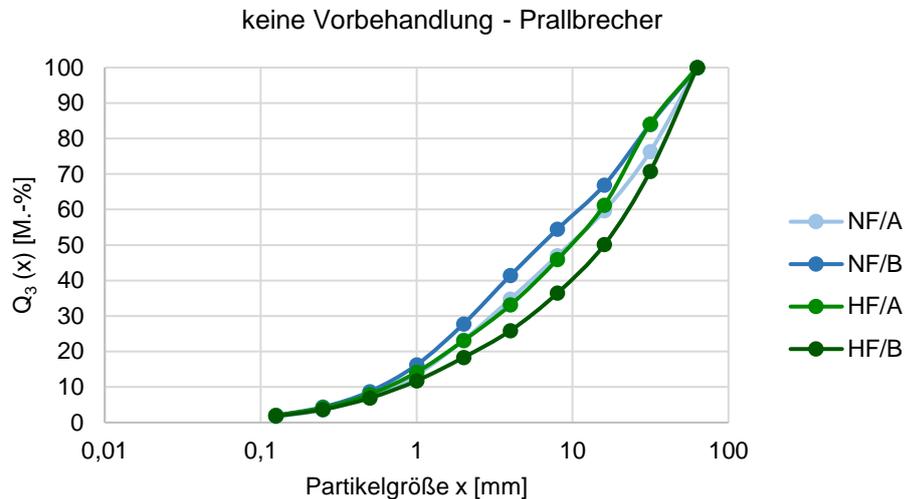
Die Rohdichten der hochfesten Carbonbeton-Rezyklate sind höher als die der normalfesten. Außer bei der thermischen Vorbehandlung. Hier sind die Rohdichten der hochfesten Carbonbeton-Rezyklate geringer als die der normalfesten. Der Grund hierfür ist, dass im hochfesten Carbonbeton knapp doppelt so viel Zement ist wie im normalfesten (vergleiche Tabelle 6 und 7). Bei thermischer Beanspruchung schwindet der Zementstein, wodurch die Porosität in diesem zunimmt und die Rohdichte sinkt (Kapitel 2.2.1.2). Je mehr Zementstein also im Carbonbeton ist, desto höher wird die Porosität nach thermischer Beanspruchung.

Die Wasseraufnahmen der hoch- und normalfesten Carbonbeton-Rezyklate haben entgegengesetzte Tendenzen, da Betone mit hohen Rohdichten weniger Wasser aufnehmen können.

Die Korngrößenverteilungen der einzelnen Versuche sind in den nachfolgenden Diagrammen für jede Vorbehandlungs- und Zerkleinerungsart dargestellt.

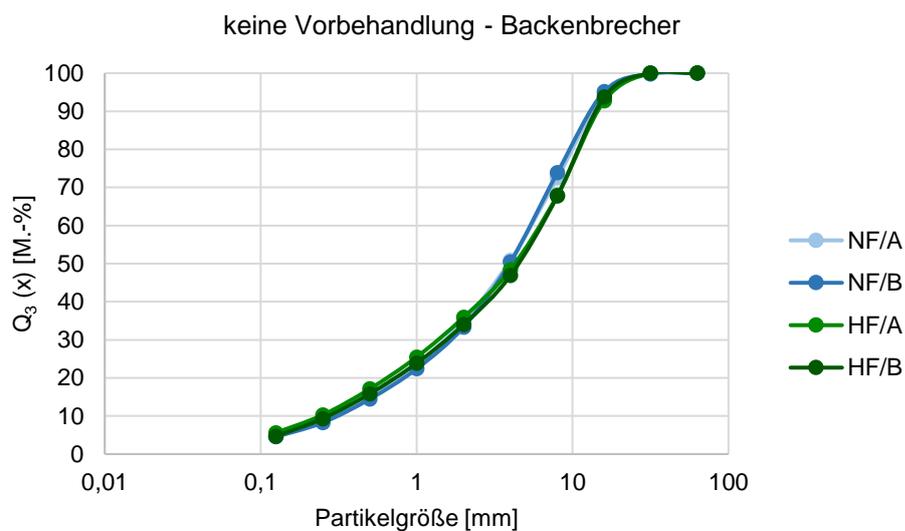
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Für die Zerkleinerung der Carbonbetone ohne Vorbehandlung im Prallbrecher (Abbildung 31) sind die Korngrößenverteilungen der Rezyklate mit dem Gelege A im normal- und hochfesten Zustand größtenteils ähnlich. Die Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate mit dem Gelege B unterscheiden sich hingegen deutlich. Der Carbonbeton NF/B wurde durch den Prallbrecher feiner gebrochen als der HF/B, wie in Abbildung 31 zu erkennen ist.



**Abbildung 31:** Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Prallbrecher ohne Vorbehandlung

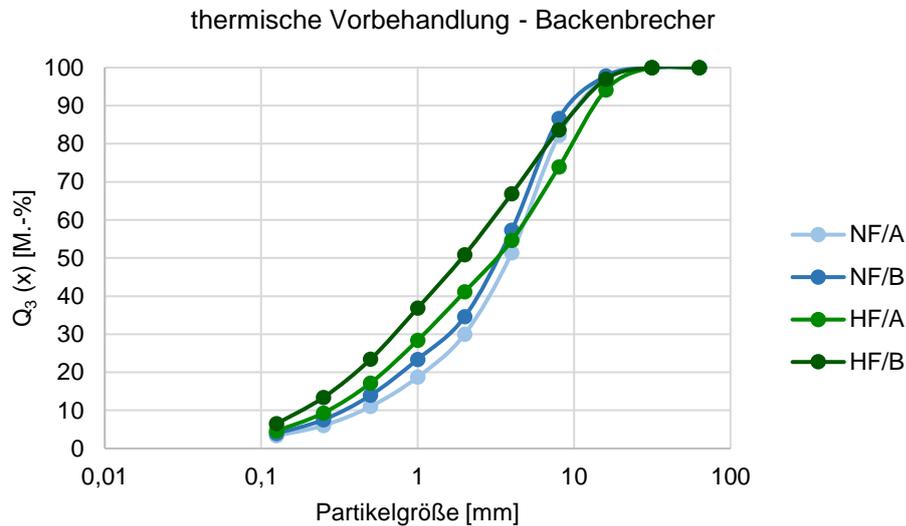
Die Korngrößenverteilungen der im Backenbrecher zerkleinerten Carbonbeton-Rezyklate (Abbildung 32) unterscheiden sich trotz unterschiedlicher Festigkeiten und Carbongelegen kaum.



**Abbildung 32:** Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Backenbrecher ohne Vorbehandlung

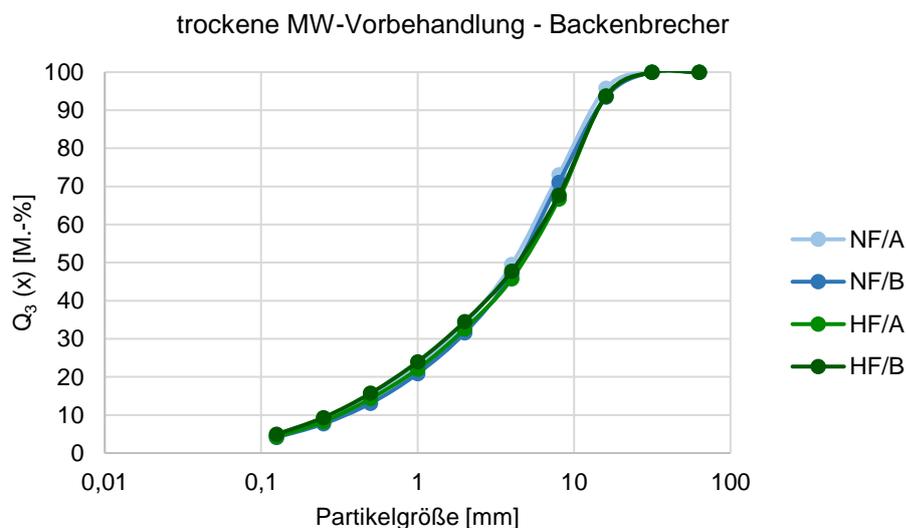
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Durch die thermische Vorbehandlung ändert sich die Korngrößenverteilung der Rezyklate, wie in Abbildung 33 zu erkennen ist. Die hochfesten Carbonbeton-Rezyklate sind feiner gebrochen als die normalfesten. Innerhalb der Festigkeitsklassen NF und HF haben die Carbonbeton-Rezyklate mit dem Gelege B feinere Korngrößenverteilungen als die mit dem Gelege A.



**Abbildung 33:** Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Backenbrecher mit thermischer Vorbehandlung

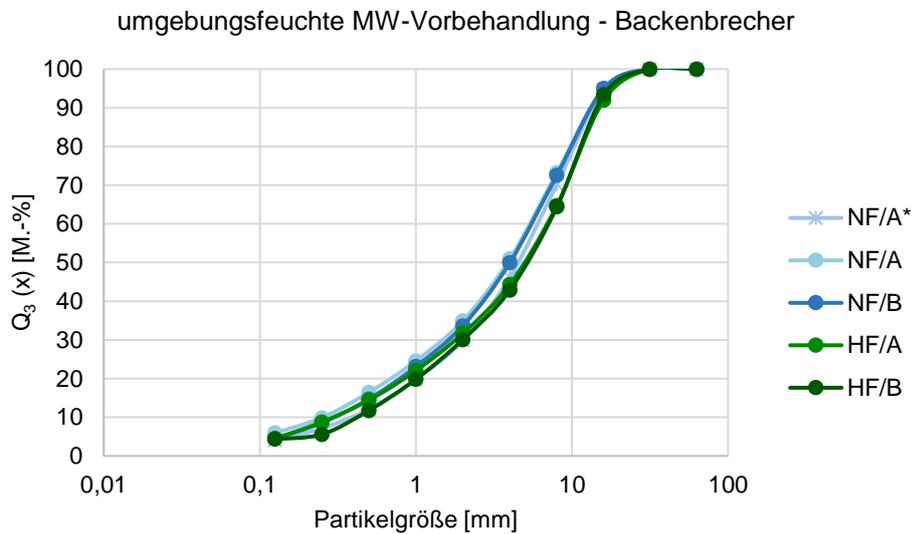
Die Korngrößenverteilungen der mit Mikrowellen vorbehandelten und im Backenbrecher zerkleinerten trockenen Carbonbeton-Rezyklate weisen untereinander kaum Unterschiede auf (Abbildung 34).



**Abbildung 34:** Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Backenbrecher mit trockener Mikrowellen-Vorbehandlung

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Die umgebungsfeuchten Carbonbeton-Rezyklate (Abbildung 35), die ebenfalls mit Mikrowellen vorbehandelt und im Backenbrecher zerkleinert wurden, weisen ähnliche Korngrößenverteilungen auf wie die trockenen. Hier sind die Korngrößenverteilungen der hochfesten Carbonbeton-Rezyklate geringfügig gröber als die der normalfesten.



**Abbildung 35:** Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A\*, NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Backenbrecher mit umgebungsfeuchter Mikrowellen-Vorbehandlung

Die Kornform der Carbonbeton-Rezyklate wurde anhand des mittleren Seitenverhältnisses (Länge/ Breite) und der mittleren Zirkularität für die Partikel > 2 mm beurteilt. In Tabelle 12 sind exemplarisch Kornformkennwerte gezeigt.

**Tabelle 12:** Beschreibung der Kornform durch das Seitenverhältnis und die Zirkularität

Seitenverhältnis		Zirkularität	
3,0	1,0	0,7	0,92

Je näher der Mittelwert des Seitenverhältnisses und der Zirkularität gegen 1,0 geht, desto runder sind die Partikel.

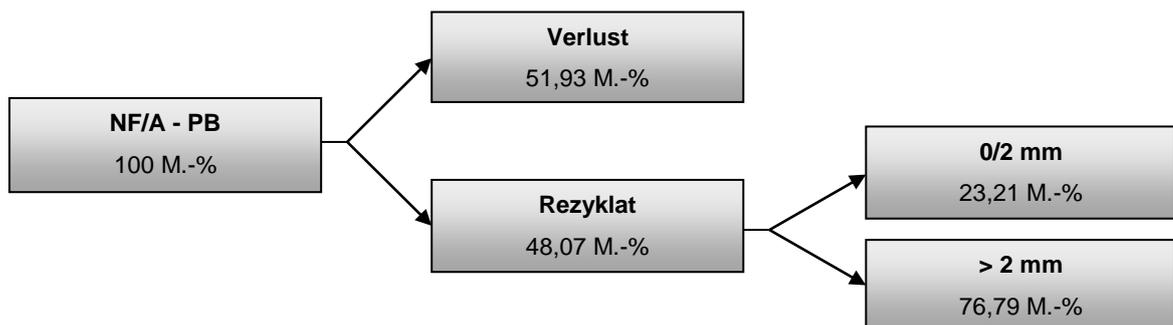
Die Ergebnisse der Kornform-Messungen sind dem Anhang 3 zu entnehmen. In der nachfolgenden Tabelle 13 wurden die einzelnen Ergebnisse jeder Fraktion zu Mittelwerten zusammengefasst. Aus ihnen wird ersichtlich, dass es keine deutlichen Unterschiede in den Kornformen der normal- und hochfesten Carbonbeton-Rezyklate gibt. Das mittlere Seitenverhältnis schwankt dabei unabhängig von der Vorbehandlungsart mit Werten zwischen 1,85 und 2,49 stärker, als die mittlere Zirkularität mit Werten von 0,77 bis 0,81.

**Tabelle 13:** Mittleres Seitenverhältnis und mittlere Zirkularität der Carbonbeton-Rezyklate

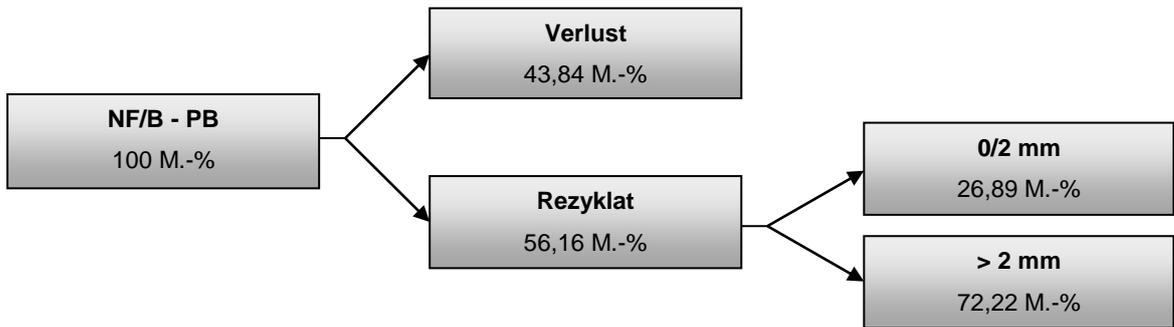
Vorbehandlung -Brechertyp-	Beton/Gelege	mittleres Seitenverhältnis [-]	mittlere Zirkularität [-]
keine -PB-	NF/A	2,13	0,78
	NF/B	2,00	0,80
	HF/A	2,05	0,79
	HF/B	2,13	0,79
keine -BB-	NF/A	2,13	0,79
	NF/B	2,22	0,79
	HF/A	2,22	0,78
	HF/B	2,47	0,77
thermische -BB-	NF/A	2,01	0,80
	NF/B	2,21	0,80
	HF/A	1,94	0,80
	HF/B	2,05	0,80
trockene MW -BB-	NF/A	2,19	0,78
	NF/B	2,06	0,79
	HF/A	2,49	0,77
	HF/B	2,13	0,79
umgebungsfeuchte MW -BB-	NF/A*	1,88	0,81
	NF/A	2,13	0,79
	NF/B	1,85	0,81
	HF/A	2,19	0,77
	HF/B	2,16	0,79

\*Probekörper wurde bis zur Explosion erwärmt

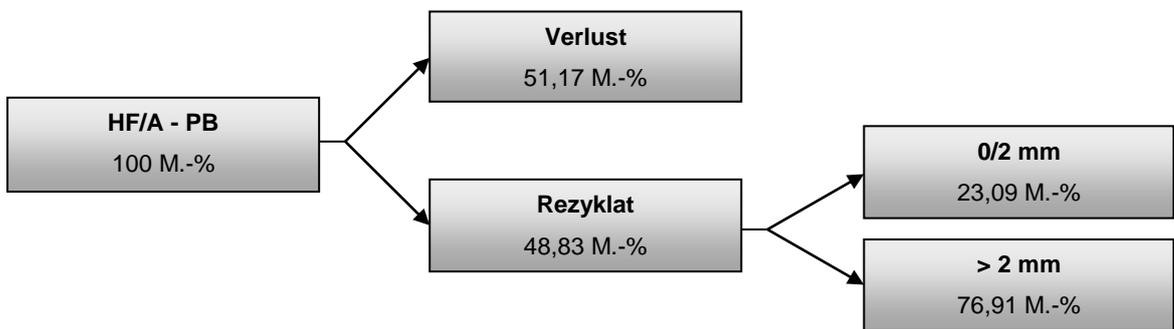
Für die Zerkleinerungsversuche ohne Vorbehandlung mit dem Prall- und Backenbrecher wurden die Massenströme berechnet, die nachfolgend dargestellt werden. Dabei wird angegeben wieviel Rezyklat aus dem Aufgabegut gewonnen werden kann und wieviel Aufgabegut während des Zerkleinerungsprozesses verloren geht. Der Verlust kann aus dem Nicht-Austrag des Aufgabeguts aus den Brechern und aus Verlusten an der Austragsvorrichtung der Brecher resultieren. Des Weiteren wird in den Massenströmen veranschaulicht, wieviel Rezyklat für eine Wiederverwendung weiterverarbeitet (Fraktion > 2 mm) und wieviel nicht wiederverwendet werden darf (Fraktion 0/2 mm), da Betonbrechsand < 2 mm von einer Wiederverwendung in RC-Beton ausgeschlossen ist. Zunächst werden die Massenströme für den Prall- (Abbildung 36 – 39) und anschließend für den Backenbrecher (Abbildung 40 – 43) angegeben.



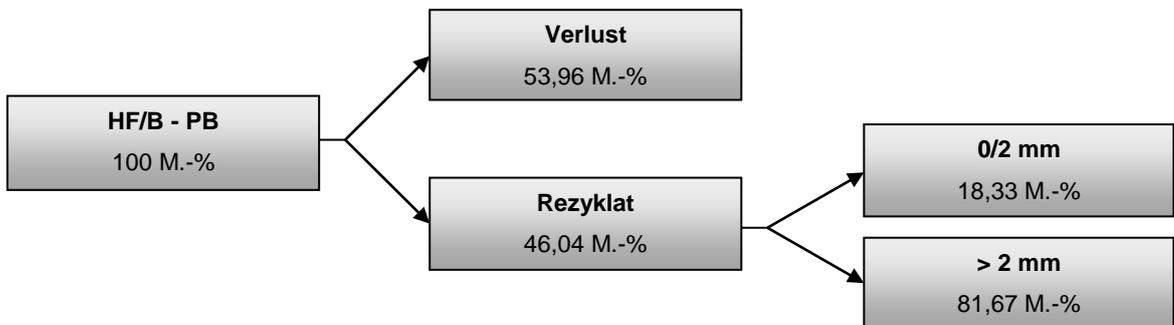
**Abbildung 36:** Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/A mit dem Prallbrecher



**Abbildung 37:** Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/B mit dem Prallbrecher



**Abbildung 38:** Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/A mit dem Prallbrecher



**Abbildung 39:** Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/B mit dem Prallbrecher

Bei der Zerkleinerung mit dem Prallbrecher wird unabhängig von der Carbonbetonsorte ca. die Hälfte des Aufgabeguts nicht ausgetragen. Es verbleibt somit im Brechraum und kann nicht recycelt werden. Der große Verlust liegt vermutlich am alten Prallbrecher-Aggregat des Aufbereitungstechnikums der Bauhaus-Universität Weimar. Bei optimierten Prallbrechern ist so ein hoher Verlust in der Regel nicht zu verzeichnen.

Für die Carbonbetonsorten NF/A und HF/A können 77 M.-% des aus dem Aufgabegut gewonnenen Rezyklats wiederverwendet werden. Von dem Carbonbeton NF/B können 72 M.-% für eine Wiederverwendung gewonnen werden und für HF/B 82 M.-%.

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

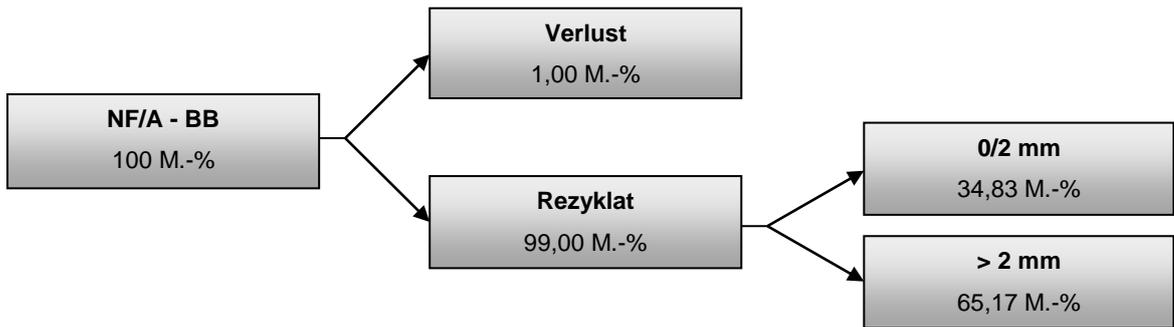


Abbildung 40: Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/A mit dem Backenbrecher

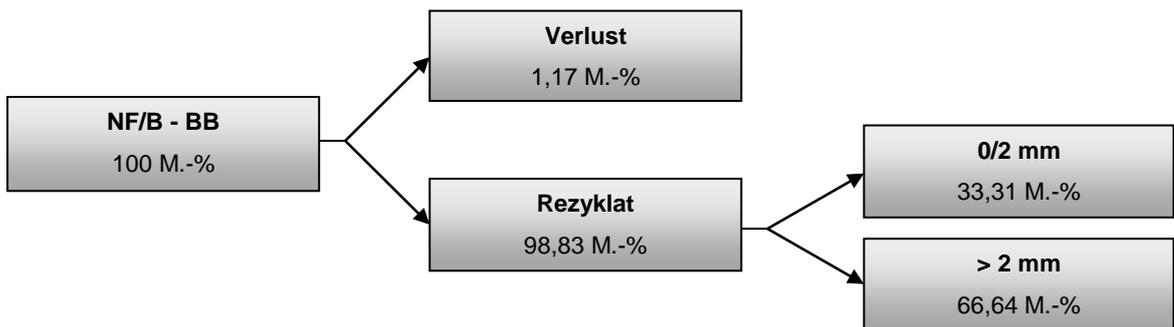


Abbildung 41: Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/B mit dem Backenbrecher

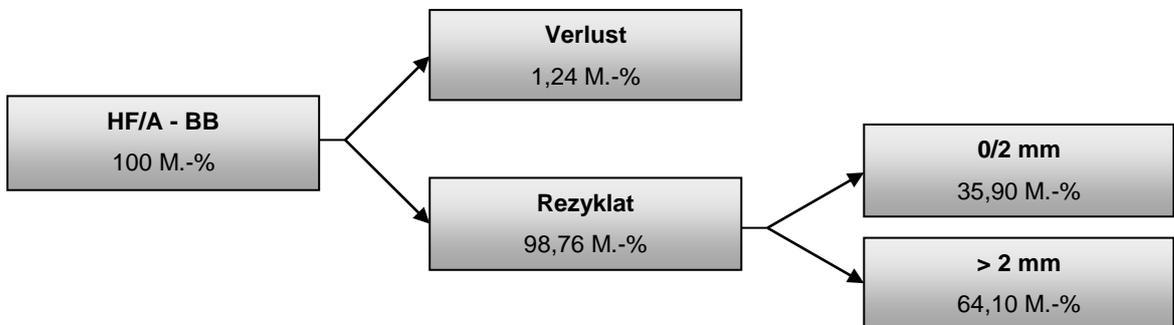


Abbildung 42: Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/A mit dem Backenbrecher

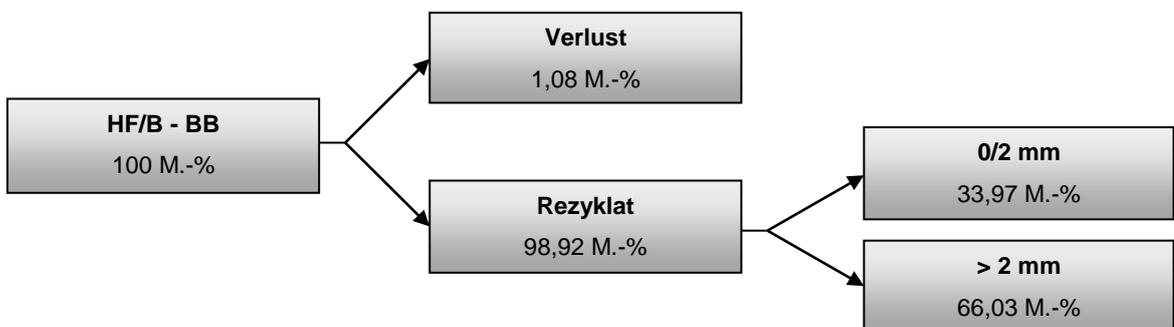


Abbildung 43: Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/B mit dem Backenbrecher

Bei der Zerkleinerung mit dem Backenbrecher ist unabhängig von der Carbonbetonsorte ein Verlust des Aufgabeguts von ca. 1 M.-% zu verzeichnen. Für eine Wiederverwendung können durchschnittlich 65,5 M.-% der Carbonbeton-Rezyklate weiterverarbeitet werden. Die Rezyklat-Mengen, die wiederverwendet werden können, fallen mit dem Backenbrecher geringer aus als mit dem Prallbrecher, jedoch ist beim Prallbrecher der Verlust des Aufgabeguts deutlich höher.

#### **3.4.2 Versuchsergebnisse zum Aufschlussgrad des Rezyklats**

Der Aufschlussgrad der Carbonbeton-Rezyklate wird getrennt für den Aufschluss der Gesteinskörnung und der Carbonbewehrung betrachtet. Zur Beurteilung des Aufschlusses der Gesteinskörnung wurden repräsentative Proben der Carbonbeton-Rezyklate in die Kategorien 0 %, 50 % und 100 % Aufschlussgrad sortiert. Für die normalfesten Carbonbetone wurden die Fraktionen 2/4 mm, 4/8 mm und 8/16 mm untersucht, da die Betone ein Größtkorn von 8 mm haben. Die hochfesten Carbonbetone haben ein Größtkorn von 5 mm, weshalb für diese nur die Fraktionen 2/4 mm und 4/8 mm sortiert wurden. Der Aufschluss der Carbonbewehrung wurde anhand einer Bilderreihe festgehalten.

Aufgrund des großen Umfangs dieser Analysemethoden sind die vollständigen Ergebnisse zum Aufschlussgrad der Rezyklate im Anhang aufgeführt. Der Aufschluss der Gesteinskörnung ist dem Anhang 4 und der Carbonbewehrung dem Anhang 5 zu entnehmen. Aus diesen ist grundsätzlich ersichtlich, dass die normalfesten Carbonbetone besser aufgeschlossen werden konnten als die hochfesten, welches der geringeren Festigkeit zuzuschreiben ist.

In Kapitel 3.5 werden die Ergebnisse für den hundertprozentigen Aufschlussgrad der Gesteinskörnung untereinander verglichen und der Aufschluss der Carbonbewehrung für die verschiedenen Zerkleinerungs- und Vorbehandlungsarten diskutiert.

#### **3.4.3 Versuchsergebnisse zum Fasergehalt im Rezyklat**

Die Kohlenstoff- und daraus bestimmten Fasergehalte für die Fraktion 0/1 mm sind in Tabelle 14 aufgeführt. Sie wurden für die Zerkleinerungsversuche mit dem Backenbrecher durchgeführt, um die Vorbehandlungsarten miteinander vergleichen zu können (Kapitel 3.5). Dabei wurde die umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung nicht untersucht, da der Aufschluss der Gesteinskörnung und Carbonbewehrung schlechter war als von der trockenen Mikrowellen-Vorbehandlung. Dasselbe gilt für die Zerkleinerung mit dem Prallbrecher ohne Vorbehandlung, hier war der Aufschluss schlechter als beim Backenbrecher ohne Vorbehandlung. Ausführliche Erläuterungen hierzu folgen in Kapitel 3.5.

Die Ergebnisse in Tabelle 14 sind jedoch kritisch zu betrachten, da die zwei rot markierten Werte Unstimmigkeiten im Vergleich zu den restlichen Werten zeigen.

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Zum einen ist der TOC-Gehalt des Referenz-Carbonbetons NF/A mit 0,36 % mehr als doppelt so hoch wie der vergleichbare Referenz-Wert von NF/B mit 0,13 %. Diese Differenz in den TOC-Gehalten dürfte nicht so hoch sein, da an den Referenzproben der TOC-Hintergrund des Betons gemessen wurde und dieser für die normalfesten Carbonbetone theoretisch gleich sein müsste. Die Ursache für die hohe Differenz der TOC-Gehalte könnte in Mess- und Probenahme Fehlern liegen sowie im Einfluss unterschiedlicher Laboranten/innen auf die Messung. Ein Messfehler könnte beispielsweise bei der Bestimmung des TIC-Gehalts entstanden sein, bei der sich die Probe möglicherweise nicht komplett in der Phosphorsäure aufgelöst hat und somit nicht der gesamte TIC-Gehalt detektiert werden konnte. Der Einfluss unterschiedlicher Laboranten/innen auf die Messung kommt ebenfalls in Frage, da die Messungen der Kohlenstoffgehalte für die Referenzproben NF/A und NF/B nicht am selben Tag durchgeführt wurden. Zu beachten ist ebenfalls, dass der vermeintlich fehlerhafte TOC-Gehalt der Referenzprobe NF/A Auswirkung auf alle Fasergehalte der NF/A-Rezyklate hat, da die Fasergehalte über den TOC-Hintergrund der Referenzprobe berechnet werden.

Zum anderen ist der Fasergehalt des thermisch vorbehandelten Carbonbeton-Rezyklats NF/A mit -0,31 % offensichtlich nicht korrekt, da Fasergehalte keine negativen Werte annehmen können. Die Unstimmigkeit kann ein Resultat aus dem obig beschriebenen fehlerhaften Referenzwert und einem Fehler bei der Probenahme sein. Hier muss folglich davon ausgegangen werden, dass sich in der Probe des Rezyklats keine oder nur sehr wenige Fasern befinden.

**Tabelle 14:** Kohlenstoff- und Fasergehalte der Carbonbeton-Rezyklate aus dem Backenbrecher

Vorbehandlung -Brechertyp-	Beton/Gelege	TC [%]	TIC [%]	TOC [%]	Fasergehalt [%]
Referenz	NF/A	1,43	1,07	0,36	-
	NF/B	1,46	1,33	0,13	-
	HF/A	0,72	0,54	0,18	-
	HF/B	1,16	1,01	0,15	-
keine -BB-	NF/A	2,16	1,06	1,10	0,74
	NF/B	1,90	0,78	1,12	0,99
	HF/A	0,84	0,47	0,37	0,19
	HF/B	0,84	0,55	0,29	0,14
thermische -BB-	NF/A	2,47	2,42	0,05	-0,31
	NF/B	2,49	2,32	0,17	0,04
	HF/A	0,92	0,64	0,28	0,10
	HF/B	1,08	0,69	0,39	0,24
trockene MW -BB-	NF/A	1,79	1,09	0,70	0,34
	NF/B	1,80	0,89	0,91	0,78
	HF/A	0,83	0,56	0,27	0,09
	HF/B	0,86	0,51	0,35	0,20

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Die Messung der Kohlenstoffgehalte hat gezeigt, dass in allen Carbonbeton-Rezyklaten Fasern vorzufinden sind. Dabei sind die Fasergehalte der normalfesten Carbonbeton-Rezyklate, außer bei der thermischen Vorbehandlung, höher als die der hochfesten. Für das im Backenbrecher zerkleinerte Carbonbeton-Rezyklat HF/B ohne Vorbehandlung wurde der Fasergehalt auch mit dem Morphologi G3-Messgerät bestimmt. Der Vergleich der beiden Ergebnisse ist in der nachfolgenden Tabelle 15 veranschaulicht.

**Tabelle 15:** Vergleich der Fasergehalte (TOC und Morphologi G3) des Carbonbeton-Rezyklats HF/B - keine VB - BB

Probe	Fasergehalt [%] bestimmt über	
	TOC-Gehalt	Morphologi G3
HF/B – keine VB – BB	0,14	0,28

Der Fasergehalt, der mit dem Morphologi-G3 System ermittelt wurde, fällt mit 0,28 % doppelt so hoch aus wie der über den TOC-Gehalt ermittelte. Dies war zu erwarten, da mit der statischen Bildanalyse des Morphologi G3-Systems nicht nur die länglichen Carbonfaserpartikel im Rezyklat erfasst werden, sondern auch andere längliche Staubpartikel.

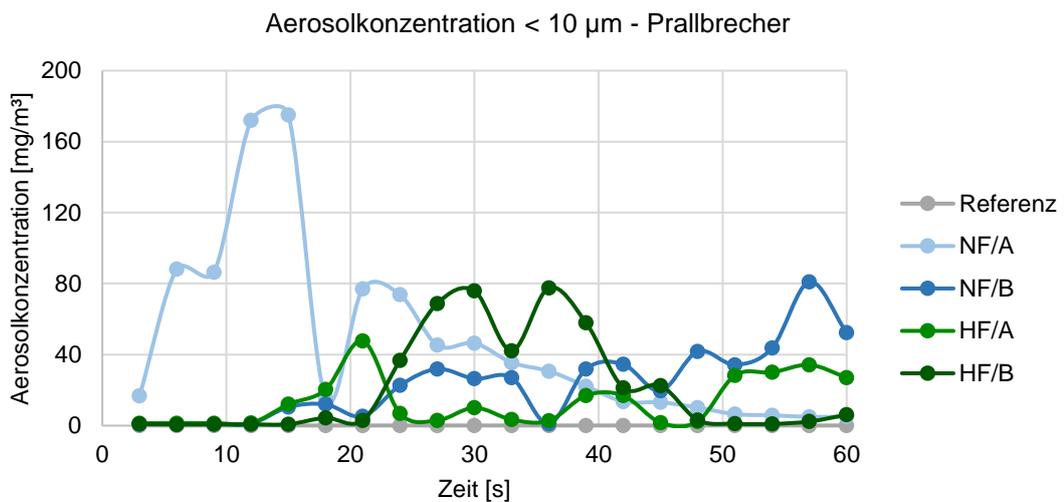
Die Fasern in den Carbonbeton-Rezyklaten der Fraktion > 1 mm wurden, wie bereits erwähnt, in einer Bilderreihe festgehalten. Diese ist dem Anhang 5 zu entnehmen. Durch die Bilderreihe konnte nachgewiesen werden, dass in allen Fraktionen der Rezyklate Fasern vorhanden sind. Abbildung 44 zeigt dies beispielhaft für den im Backenbrecher zerkleinerten, nicht vorbehandelten Carbonbeton HF/B an der Fraktion 1/2 mm, 2/4 mm und 16/31,5 mm.



**Abbildung 44:** Fasern im nicht vorbehandelten Carbonbeton-Rezyklat HF/B-BB der Fraktion 1/2 mm (links), 2/4 mm (mittig) und 16/31,5 mm (rechts)

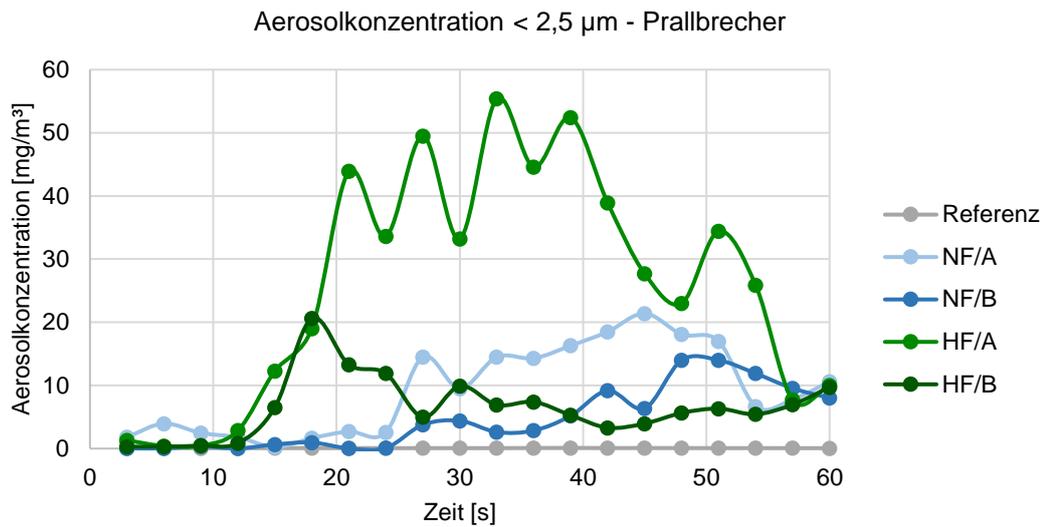
#### 3.4.4 Versuchsergebnisse der Staubmessungen

Um die Staubentwicklung bei der Zerkleinerung von Carbonbeton beurteilen zu können, wurden bei der Zerkleinerung der Carbonbetone ohne Vorbehandlung mit dem Prall- und Backenbrecher die Aerosolkonzentrationen der PM10- und PM2,5-Fraktion gemessen. Vor den Zerkleinerungsversuchen wurden die Aerosolkonzentrationen der Raumluft im Aufbereitungstechnikum als Referenzwerte erfasst. Die Ergebnisse der Staubmessungen sind in den nachfolgenden Diagrammen zunächst für den Prall- (Abbildung 45 – 46) und anschließend für den Backenbrecher (Abbildung 47 – 48) veranschaulicht.



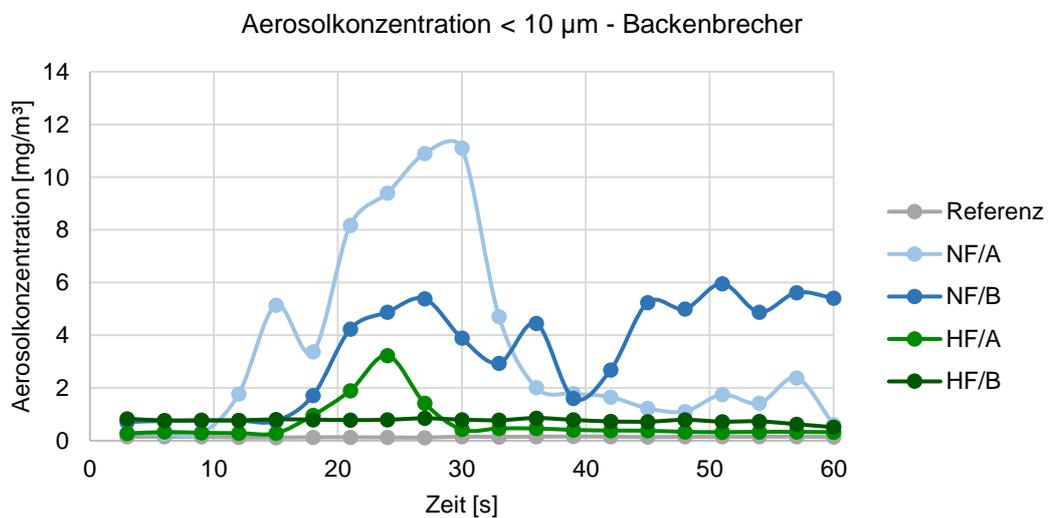
**Abbildung 45:** PM10-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Prallbrecher

Die Abbildung 45 zeigt, dass für die Versuche mit dem Prallbrecher die höchsten PM10-Konzentrationen bei der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/A gemessen wurden. Hier betrug die maximale Aerosolkonzentration 175 mg/m<sup>3</sup>. Die Staubentwicklung bei der Zerkleinerung von NF/B und HF/B ist mit Maximalwerten um 80 mg/m<sup>3</sup> ähnlich ausgefallen. Am wenigsten Staub ist bei der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/A entstanden.



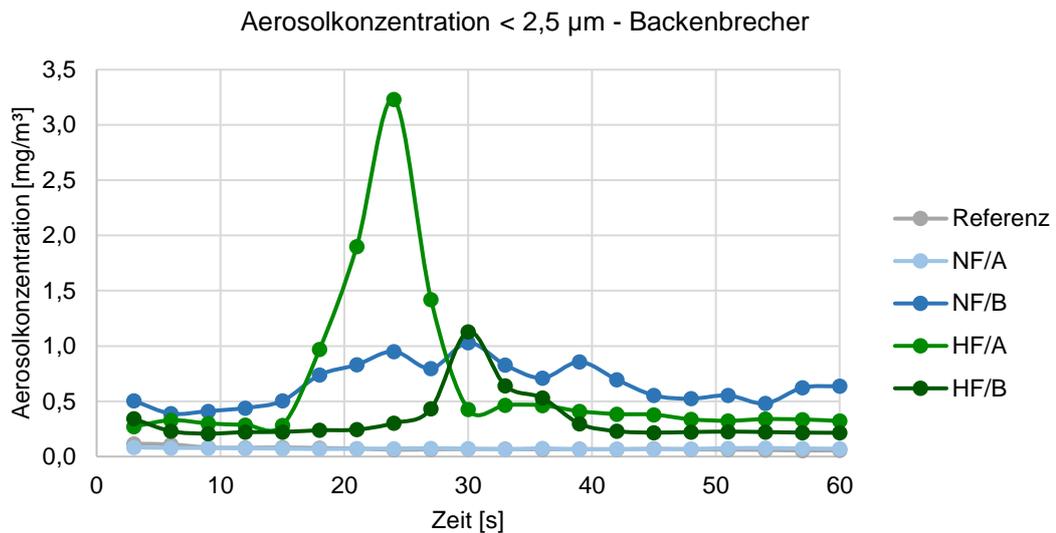
**Abbildung 46:** PM<sub>2,5</sub>-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Prallbrecher

Bei der Zerkleinerung mit dem Prallbrecher hat der Carbonbeton HF/A die meisten Staubpartikel < 2,5 µm freigesetzt, wie in Abbildung 46 zu erkennen ist. Hier lag die Aerosolkonzentration bei ca. 55 mg/m<sup>3</sup>. Die Carbonbetone HF/B und NF/A haben maximale PM<sub>2,5</sub>-Werte um 21 mg/m<sup>3</sup>, während der des NF/B-Carbonbetons bei 15 mg/m<sup>3</sup> liegt.



**Abbildung 47:** PM<sub>10</sub>-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Backenbrecher

Die Messungen der PM<sub>10</sub>-Konzentration bei den Versuchen mit dem Backenbrecher haben ergeben, dass bei der Zerkleinerung der normalfesten Carbonbetone mehr Staub < 10 µm entstanden ist als bei den hochfesten. Vor allem der Carbonbeton HF/B hat kaum Staubpartikel freigesetzt (Abbildung 47).



**Abbildung 48:** PM<sub>2,5</sub>-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Backenbrecher

Bei der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/A im Backenbrecher wurde, gegensätzlich zur PM<sub>10</sub>-Konzentration, kaum Staub < 2,5 µm freigesetzt (Abbildung 48). Die höchsten PM<sub>2,5</sub>-Werte wurden mit 3,2 mg/m<sup>3</sup> bei der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/A gemessen. Die Maximalwerte der Carbonbetone NF/B und HF/B befinden sich bei ca. 1,1 mg/m<sup>3</sup>.

Die maximalen, minimalen und durchschnittlichen Aerosolkonzentrationen der einzelnen Staubmessungen sind in den Tabellen 16 und 17 zusammengefasst. Sie werden in Kapitel 3.5 miteinander verglichen, um die Staubentwicklung der Brechertypen beurteilen zu können. Dabei werden die PM<sub>10</sub>- und PM<sub>2,5</sub>-Werte auch mit Aerosolkonzentrationen verglichen, die bei der Zerkleinerung eines Normalbetons gemessen wurden.

**Tabelle 16:** PM<sub>10</sub>-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung der Carbonbetone im Prall- und Backenbrecher

Vorbehandlung -Brechertyp-	Beton/Gelege	Aerosolkonzentration < 10 µm [mg/m <sup>3</sup> ]		
		Maximum	Minimum	Durchschnitt
keine -PB-	Technikum	0,086	0,054	0,065
	NF/A	175,000	4,890	47,200
	NF/B	81,000	0,775	24,000
	HF/A	47,700	1,350	13,500
	HF/B	77,600	0,663	21,400
keine -BB-	Technikum	0,160	0,119	0,142
	NF/A	11,100	0,261	3,470
	NF/B	5,960	0,710	3,380
	HF/A	7,640	0,718	3,420
	HF/B	0,860	0,511	0,763

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

**Tabelle 17:** PM<sub>2,5</sub>-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Prall- und Backenbrecher

Vorbehandlung -Brechertyp-	Beton/Gelege	Aerosolkonzentration < 2,5 µm [mg/m <sup>3</sup> ]		
		Maximum	Minimum	Durchschnitt
keine -PB-	Technikum	0,107	0,057	0,077
	NF/A	21,400	0,242	9,320
	NF/B	14,000	0,024	4,700
	HF/A	55,400	0,414	25,800
	HF/B	20,600	0,304	6,500
keine -BB-	Technikum	0,116	0,055	0,073
	NF/A	0,083	0,065	0,073
	NF/B	1,030	0,389	0,653
	HF/A	3,230	0,271	0,659
	HF/B	1,130	0,208	0,330

Nach den Zerkleinerungsversuchen wurden Proben vom Staub genommen, der sich im direkten Umfeld der Brecher abgesetzt hatte. Schon mit bloßem Auge war dabei zu erkennen, dass sich in den Proben aller Stäube Carbonfaserpartikel befanden. Um herauszufinden, ob die Carbonfasern durch den Prall- und Backenbrecher unterschiedlich beansprucht werden und ob es Unterschiede bei der Zerkleinerung der Carbongelege A und B gibt, wurden die Stäube der normalfesten Carbonbetone mit dem Stereo- und Polarisationsmikroskop untersucht.

Die Aufnahmen mit dem Stereo- und Polarisationsmikroskop sind dem Anhang 6 zu entnehmen. Sie belegen, dass bei der Zerkleinerung von Carbonbeton Faserpartikel freigesetzt werden, da in allen Staubproben Carbonfaserpartikel nachgewiesen werden konnten. Neben den Carbonfaserpartikeln konnten mit dem Stereomikroskop auch Fasern der Bindfäden der Carbongelege in den Stäuben detektiert werden (Abbildung 49).



**Abbildung 49:** Carbonfasern (links) und Bindfäden (rechts) im Carbonbetonstaub NF/B-BB-keine VB

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Die Carbonfaserpartikel konnten durch die Aufnahmen mit dem Polarisationsmikroskop vermessen werden. Sie waren zwischen 6,0 und 8,5  $\mu\text{m}$  breit und wiesen Längen von 15,9 bis 1464,9  $\mu\text{m}$  auf. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass sich auch noch kleinere Faserpartikel in den Stäuben befinden, da der Faktor Probenahmefehler nicht außer Acht gelassen werden kann.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Brechertypen und Carbongeleugen werden in Kapitel 3.5 diskutiert.

Die Fasergehalte wurden für die Stäube ermittelt, die bei der Zerkleinerung der Carbonbetone NF/A und NF/B ohne Vorbehandlung mit dem Backenbrecher entstanden sind. Sie wurden über den TOC-Gehalt und das Morphologi G3-System bestimmt und sind in der Tabelle 18 vergleichend abgebildet.

**Tabelle 18:** Fasergehalte der Carbonbeton-Stäube NF/A - und NF/B – keine VB - BB

Beton/Gelege	Referenz		Keine Vorbehandlung -Backenbrecher-	
	NF/A	NF/B	NF/A	NF/B
TC [%]	1,43	1,46	1,32	1,53
TIC [%]	1,07	1,33	1,25	1,11
TOC [%]	0,36	0,13	0,07	0,42
Fasergehalt [%] -TOC-	-	-	-0,29	0,29
Fasergehalt [%] -Morphologi-	-	-	0,43	0,22

Der fehlerhafte Fasergehalt der Staubprobe NF/A mit -0,29 % kann, wie im vorherigen Kapitel 3.4.3 beschrieben, ein Resultat aus dem unstimmgigen TOC-Hintergrund des Carbonbetons NF/A und einem Fehler bei der Probenahme sein. Prinzipiell kann auch bei der Staubprobe NF/B von ungleichen Probenahmen ausgegangen werden, da der Fasergehalt des Morphologis, wie bereits erklärt, höher sein müsste als der des TOC-Gehalts.

### 3.5 Auswertung der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse anhand von Diagrammen veranschaulichend dargestellt und diskutiert.

Zunächst werden die Ergebnisse der Carbonbeton-Zerkleinerung ohne Vorbehandlung im Prall- und Backenbrecher mit der Zerkleinerung von Normalbeton verglichen. Anschließend wird der Einfluss der Vorbehandlungsart untersucht. Dafür werden die Versuchsergebnisse gegliedert nach den verschiedenen Analysebereichen, so wie im vorherigen Kapitel, ausgewertet. Bei der Auswertung der Ergebnisse steht die Eignung der Aufbereitungsverfahren im Vordergrund.

Zuletzt werden mögliche Fehlerursachen bei den Zerkleinerungsversuchen und Analysemethoden erörtert und darauf eingegangen, welchen Einfluss diese auf die Ergebnisse haben könnten.

#### 3.5.1 Vergleich der Zerkleinerung von Carbon- und Normalbeton

Der Zerkleinerungsgrad von Prallbrechern ist für Normalbeton in der Regel höher als bei Backenbrechern [S7]. Für Carbonbeton ist dies nicht der Fall, wie die Korngrößenverteilungen in Abbildung 50 zeigt. Die Carbonbetone werden im Backenbrecher feiner gebrochen als im Prallbrecher. Grund dafür könnte die Carbonbewehrung sein, die die bei der Prallbeanspruchung entstehenden Zugkräfte aufnimmt und dadurch der Zerkleinerung des Betons entgegenwirkt, oder die höhere Festigkeit des Carbonbetons ( $NF = 76,1 \text{ N/mm}^2$ ;  $HF = 118,7 \text{ N/mm}^2$ ) im Vergleich zu Normalbeton ( $f_{ck,cube} \leq 60 \text{ N/mm}^2$ ).

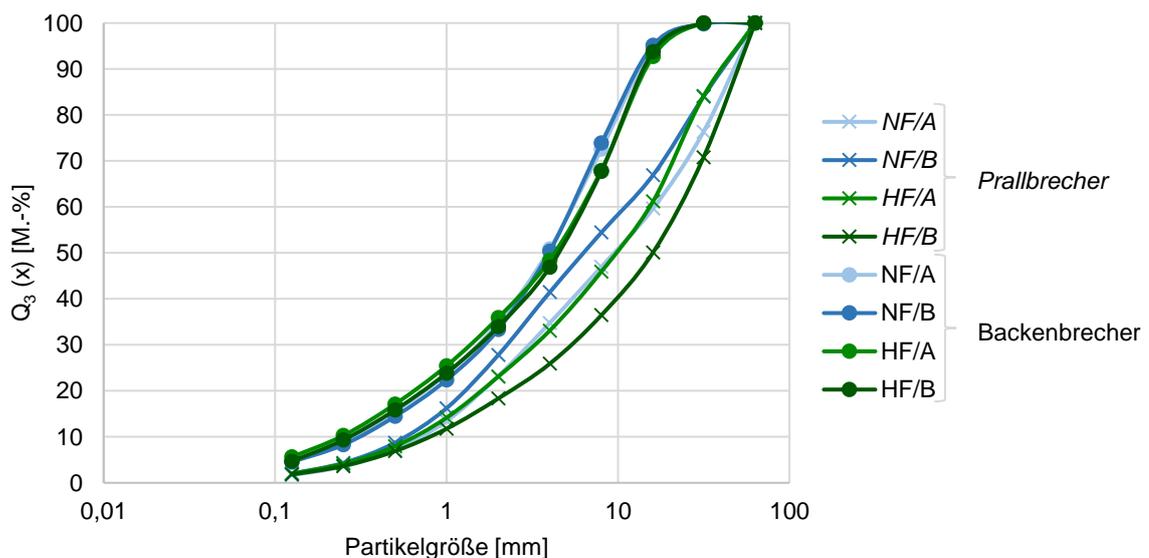


Abbildung 50: Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers

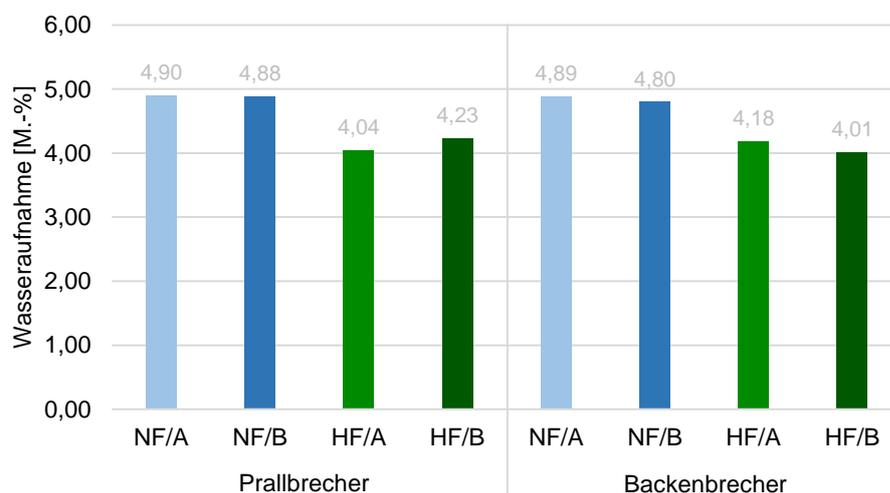
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Auch die Massenströme unter Kapitel 3.4.1 zeigen, dass der Prallbrecher weniger Rezyklat < 2 mm erzeugt als der Backenbrecher. Um dies zu verdeutlichen, werden die Massenanteile < 2 mm in Tabelle 19 verglichen. Sie liegen für den Backenbrecher im Durchschnitt 12 M.-% höher als bei denen des Prallbrechers.

**Tabelle 19:** Vergleich der Massenanteile der Carbonbeton-Rezyklate 0/2 mm ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers

Beton/Gelege	Gesteinskörnung 0/2 mm [M.-%]	
	Prallbrecher	Backenbrecher
NF/A	23,21	34,83
NF/B	26,89	33,31
HF/A	23,09	35,90
HF/B	18,33	33,97

Die Wasseraufnahme der Normalbeton-Rezyklate, die durch den Backenbrecher zerkleinert wurden, ist höher als die der mittels Prallbrecher hergestellten Rezyklate, da der Anteil zementsteinfreier Partikel bei diesen geringer ist [J1, L5, S7]. Für die untersuchten Carbonbetone ist diese Tendenz jedoch nur für den Carbonbeton HF/A zu erkennen, wie der Abbildung 51 zu entnehmen ist. Die Wasseraufnahmen des Rezyklats NF/A unterscheiden sich für die beiden Brechertypen kaum. Für die Carbonbetone NF/B und HF/B ist die Wasseraufnahme der mit dem Prallbrecher hergestellten Rezyklate höher als die der Rezyklate aus dem Backenbrecher, welches gegensätzlich zu den Wasseraufnahmen der Normalbeton-Rezyklate ist.

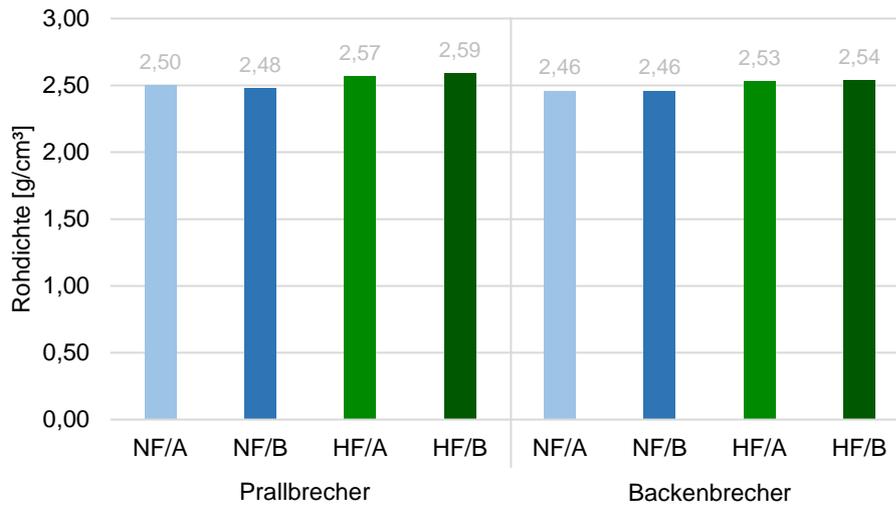


**Abbildung 51:** Wasseraufnahme der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers

Entsprechend der Wasseraufnahmen sind die Rohdichten von Normalbeton-Rezyklaten aus dem Prallbrecher in der Regel höher als bei denen aus dem Backenbrecher. Für die Carbonbeton-Rezyklate konnte dieselbe Tendenz festgestellt werden, wie in Abbildung 52

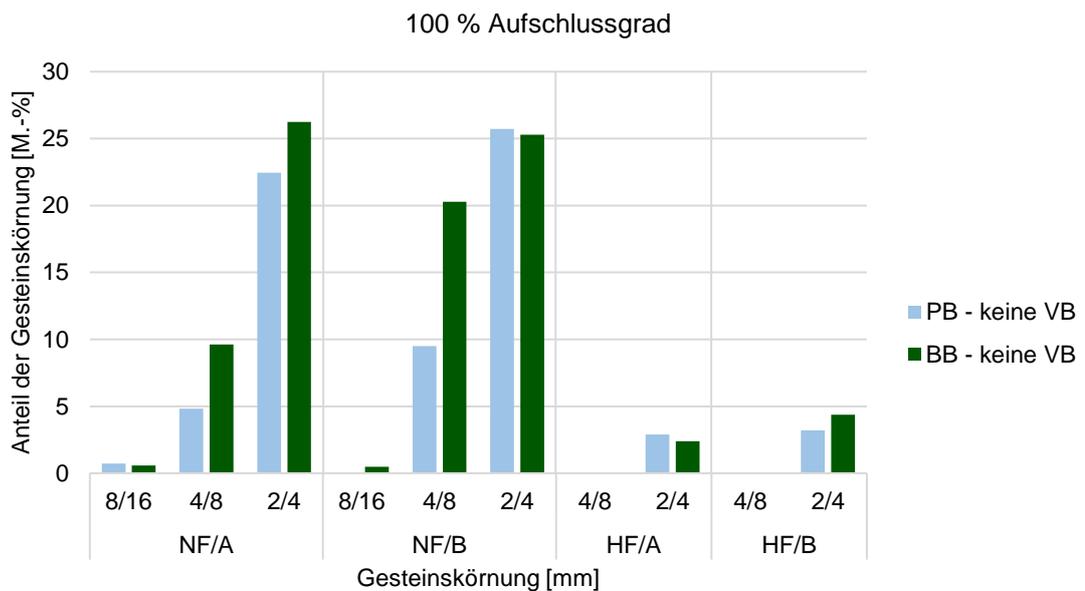
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

zu erkennen ist. Die Unterschiede in den Rohdichten der Rezyklate sind jedoch sehr gering.



**Abbildung 52:** Rohdichte der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers

Wie bereits erwähnt, ist der Anteil zementsteinfreier Partikel bei Normalbeton-Rezyklaten des Prallbrechers höher als bei denen des Backenbrechers. In Abbildung 53 ist zu erkennen, dass dies für Carbonbeton umgekehrt ist, außer bei der 2/4 mm Gesteinskörnung der Carbonbeton-Rezyklate NF/B und HF/A. Dafür ist der höhere Zerkleinerungsgrad des Carbonbetons mit dem Backenbrecher ursächlich.



**Abbildung 53:** Anteil zementsteinfreier Partikel in den Carbonbeton-Rezyklaten ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

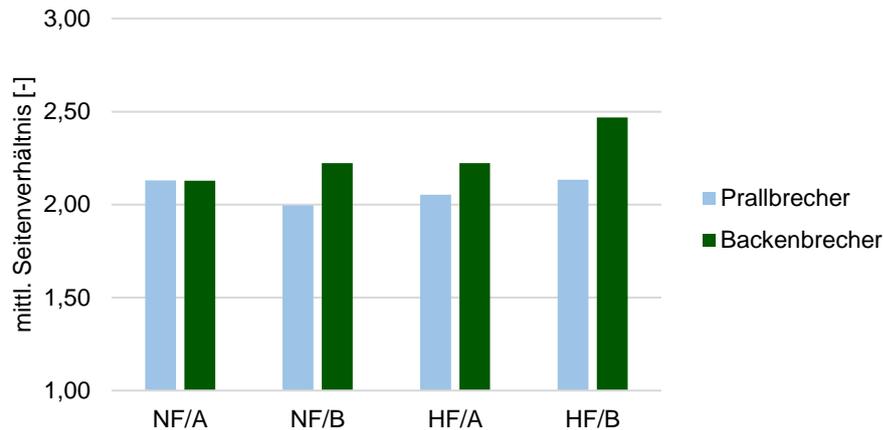
Der höhere Zerkleinerungsgrad des Carbonbetons mit dem Backenbrecher trägt auch zum besseren Aufschluss der Carbonbewehrung bei. Aus der Bilderreihe in Anhang 5 wird ersichtlich, dass die Carbonbewehrung aller Carbonbeton-Varianten mit dem Prallbrecher nicht hundertprozentig aufgeschlossen werden kann. In mehreren Kornfraktionen hat der Prallbrecher die Carbonbewehrung nicht freigelegt. Bei der Zerkleinerung mit dem Backenbrecher bleiben hingegen nur vereinzelt in der Kornfraktion 16/31,5 mm Agglomerate aus Beton und Carbonbewehrung übrig. Um dies zu verdeutlichen wird in der nachfolgenden Abbildung 54 der Aufschluss der Carbonbewehrung durch den Prall- und Backenbrecher am Beispiel des HF/B-Rezyklats vergleichend dargestellt.



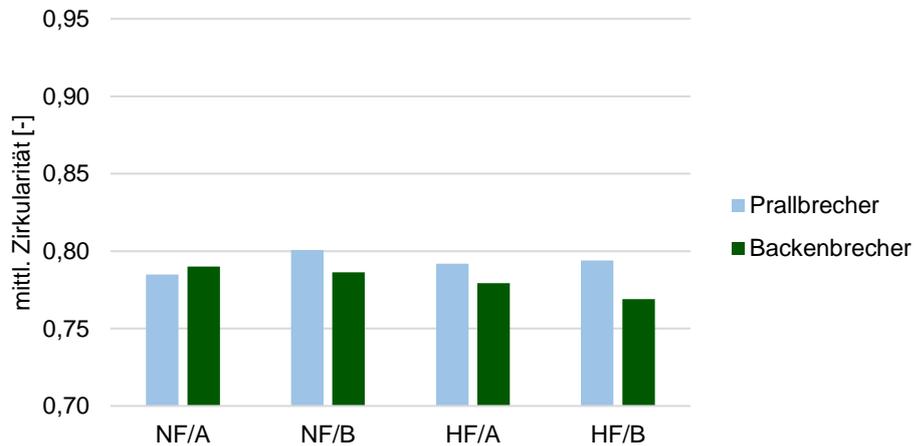
**Abbildung 54:** Aufschluss der Carbonbewehrung der Fraktion 16/31,5 mm des Carbonbetons HF/B ohne Vorbehandlung mit dem Prall- (links) und Backenbrecher (rechts)

Unterschiede zwischen den beiden Brechertypen sind bezüglich der Faserlänge und -qualität nicht zu verzeichnen. Die Carbonfasern beider Gelege sind nach der Zerkleinerung größtenteils länger als 2 cm. Die Qualität der Fasern ist nach der Zerkleinerung gut, da die Fasern noch eng gebündelt sind. Allerdings wird das Gelege B durch beide Brechertypen an den Faserenden zerfranst.

Die Kornform von Normalbeton-Rezyklaten des Prallbrechers ist günstiger als die des Backenbrechers. Das bedeutet, dass die Partikel aus dem Prallbrecher gerundete Formen aufweisen, während die Endprodukte des Backenbrechers eher kantig sind. Durch die Kornformanalyse der Carbonbeton-Rezyklate (Abbildung 55 und 56) kann dies prinzipiell auch auf Carbonbeton übertragen werden. Leichte Abweichungen von dieser Tendenz zeigt nur das Rezyklat NF/A. Grundsätzlich fallen die Kornformen der Carbonbeton-Rezyklate mit dem Prall- und Backenbrecher sehr ähnlich aus und die Unterschiede des Seitenverhältnisses und der Zirkularität sind gering. Die Kornform der Partikel ist eher gerundet als länglich.



**Abbildung 55:** Mittleres Seitenverhältnis der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers



**Abbildung 56:** Mittlere Zirkularität der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers

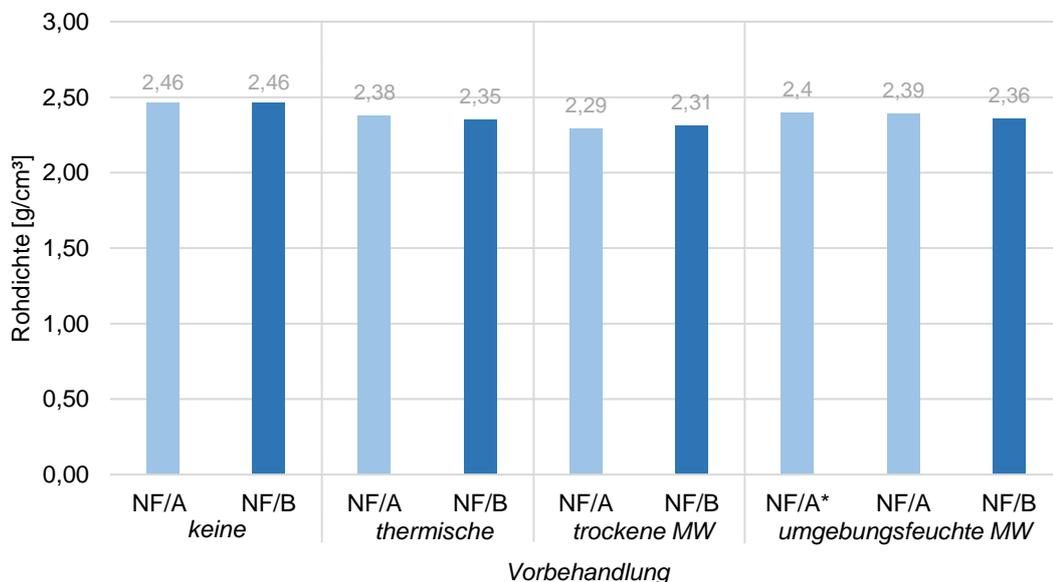
Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass die Zerkleinerung von Carbonbeton mit dem Backenbrecher hochwertigere Rezyklate erzeugt als die mit dem Prallbrecher, aufgrund des besseren Aufschlusses der Gesteinskörnung und der Carbonbewehrung. Dies ist konträr zum Zerkleinerungsverhalten von Normalbeton. Aus diesem Grund wurden die weiteren Zerkleinerungsversuche mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten im Backenbrecher durchgeführt.

Jedoch konnten die Carbonbeton-Rezyklate beider Brechertypen die Anforderungen an die Rohdichte ( $\geq 2000 \text{ kg/m}^3$ ) und die maximale Wasseraufnahme (10 M.-%) aus der DIN 1045-2 [04] für die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen in Beton erfüllen (Tabelle 3).

### 3.5.2 Einfluss der Vorbehandlung auf die Aufbereitungsqualität des Rezyklats

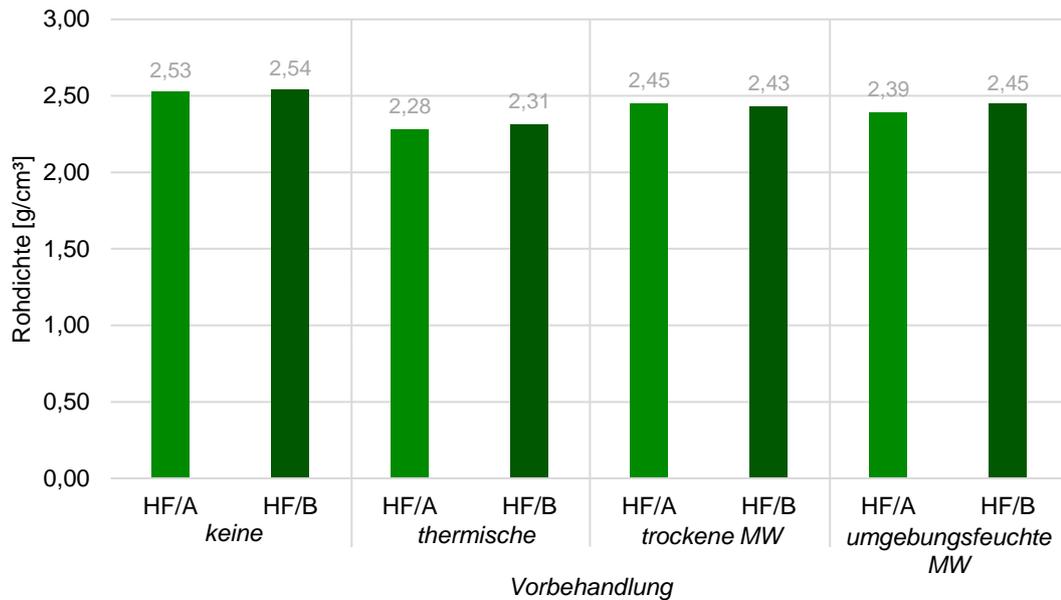
In diesem Kapitel wird der Einfluss unterschiedlicher Vorbehandlungsarten auf die Aufbereitungsqualität der Rezyklate erörtert und die Eignung der Aufbereitungsverfahren beurteilt. Dabei wird die Zerkleinerung der Carbonbetone ohne Vorbehandlung im Backenbrecher mit der thermischen und mikrowelleninduzierenden Vorbehandlung verglichen.

Beim Vergleich der Rohdichten in den Abbildungen 57 und 58 wird deutlich, dass sich sowohl für die Zerkleinerung der normalfesten als auch der hochfesten Carbonbeton-Rezyklate im Backenbrecher ohne Vorbehandlung die höchsten Rohdichten ergeben. Ein Grund hierfür könnte sein, dass bei den anderen Vorbehandlungsarten die Beanspruchung durch hohe Temperaturen eine Strukturänderung im Zementstein hervorruft, wie in Kapitel 2.2.1.2 beschrieben. Dadurch erhöht sich die Porosität im Zementstein und die Rohdichte sinkt. In Kapitel 2.2.1.2 wurde nicht nur die Strukturänderung des Zementsteines bei thermischer Beanspruchung beschrieben, sondern auch die Verbesserung des Aufschlusses der Gesteinskörnung. Der hohe Aufschlussgrad trägt dann eigentlich dazu bei, dass sich die Rohdichten der Rezyklate an die Rohdichten der natürlichen Gesteinskörnung annähern. Dies ist hier nicht der Fall, da die Rohdichten der Rezyklate für die Fraktion 8/16 mm bestimmt wurden und die normalfesten Carbonbetone ein Größtkorn von 8 mm und die hochfesten eines von 5 mm haben. Folglich befindet sich in der normalfesten Fraktion 8/16 mm kaum und in der hochfesten keine freigelegte Gesteinskörnung, sondern nur Agglomerate aus Zementstein und Gesteinskörnung.



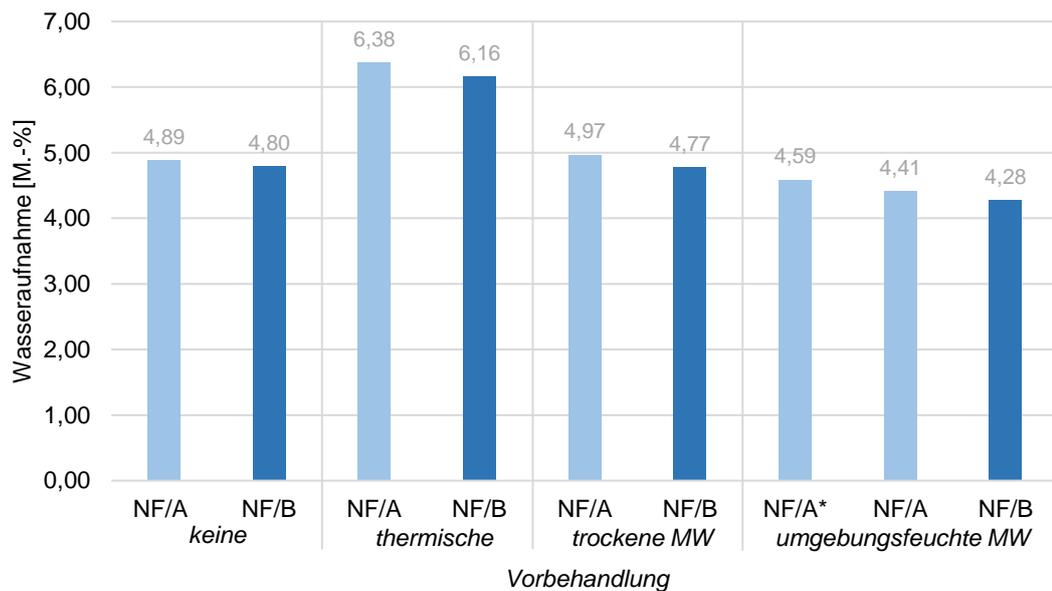
**Abbildung 57:** Rohdichten der normalfesten Carbonbeton-Rezyklate mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton



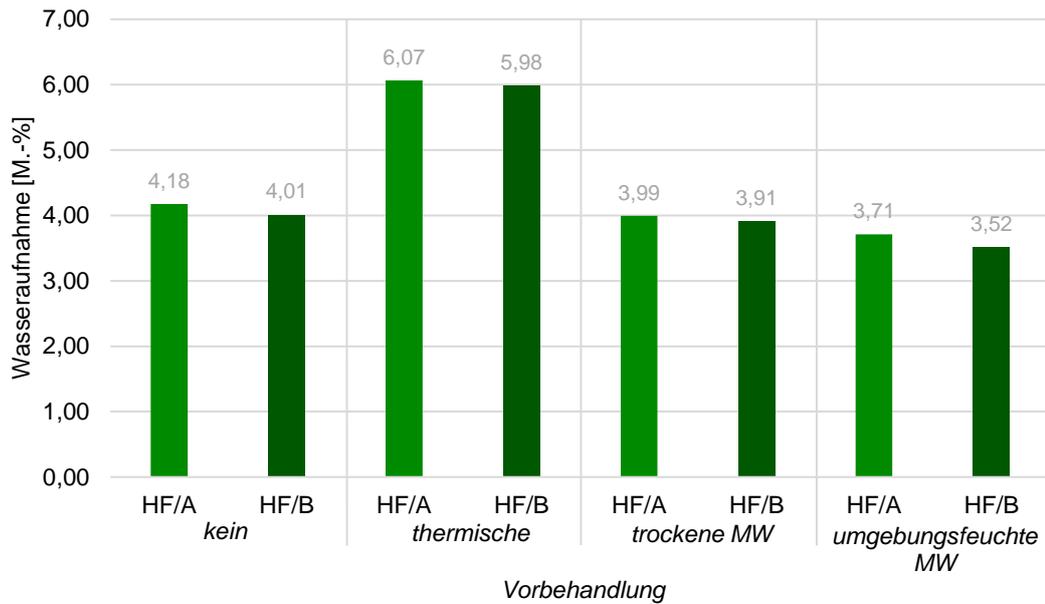
**Abbildung 58:** Rohdichten der hochfesten Carbonbeton-Rezyklate mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten

Die Wasseraufnahme der Carbonbeton-Rezyklate wurde ebenfalls für die Fraktion 8/16 mm bestimmt (Abbildung 59 und 60). Hier macht sich die obig beschriebene Strukturänderung im Zementstein besonders bei den Rezyklaten mit thermischer Vorbehandlung bemerkbar. Sie haben mit Werten um 6,0 M.-% mit Abstand die höchsten Wasseraufnahmen. Die geringsten Wasseraufnahmen weisen die Rezyklate mit umgebungsfeuchter Mikrowellen-Vorbehandlung auf, während sich die Wasseraufnahmen der Rezyklate ohne und mit trockener MW-Vorbehandlung ähneln.



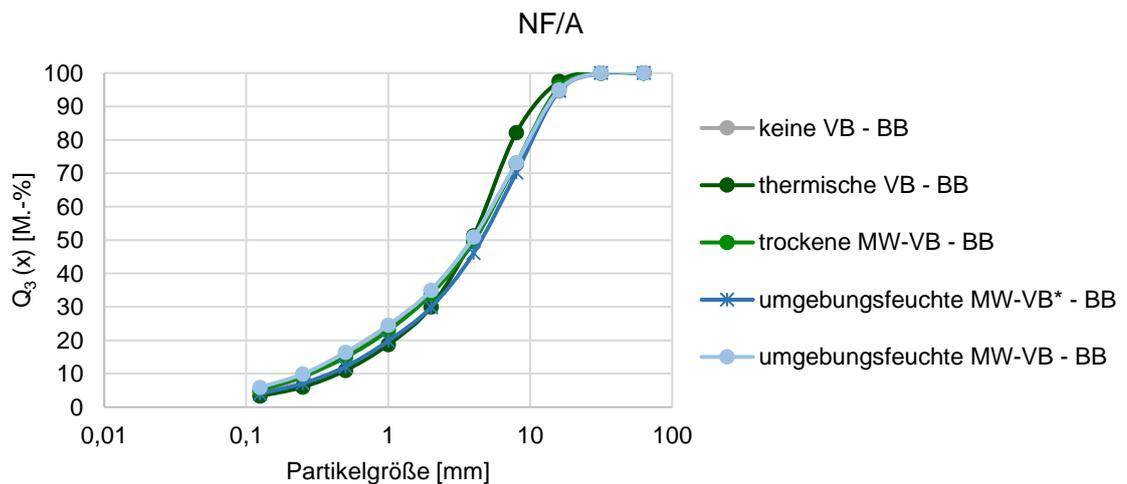
**Abbildung 59:** Wasseraufnahmen der normalfesten Carbonbeton-Rezyklate mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton



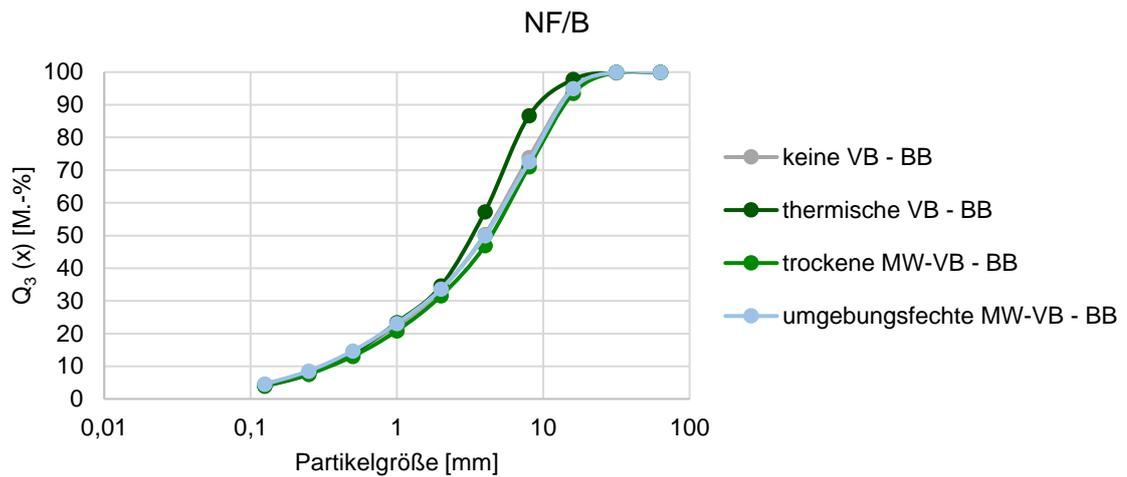
**Abbildung 60:** Wasseraufnahmen der hochfesten Carbonbeton-Rezyklate mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten

Die Korngrößenverteilungen der normalfesten Carbonbeton-Rezyklate unterscheiden sich je nach Vorbehandlungsart nicht sonderlich stark, wie den Abbildungen 61 und 62 zu entnehmen ist. Die hochfesten Carbonbeton-Rezyklate unterscheiden sich in ihren Korngrößenverteilungen abhängig von der Vorbehandlungsart ebenfalls kaum (Abbildung 63 und 64). Nur durch die Zerkleinerung der hochfesten Carbonbetone mit vorheriger thermischer Vorbehandlung entstehen feinere Korngrößen.

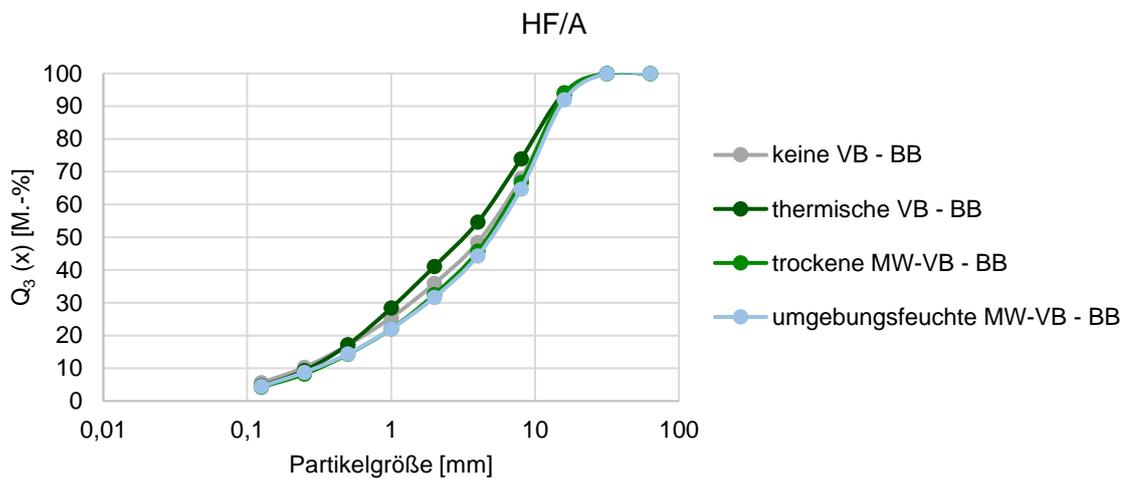


**Abbildung 61:** Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate NF/A mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten

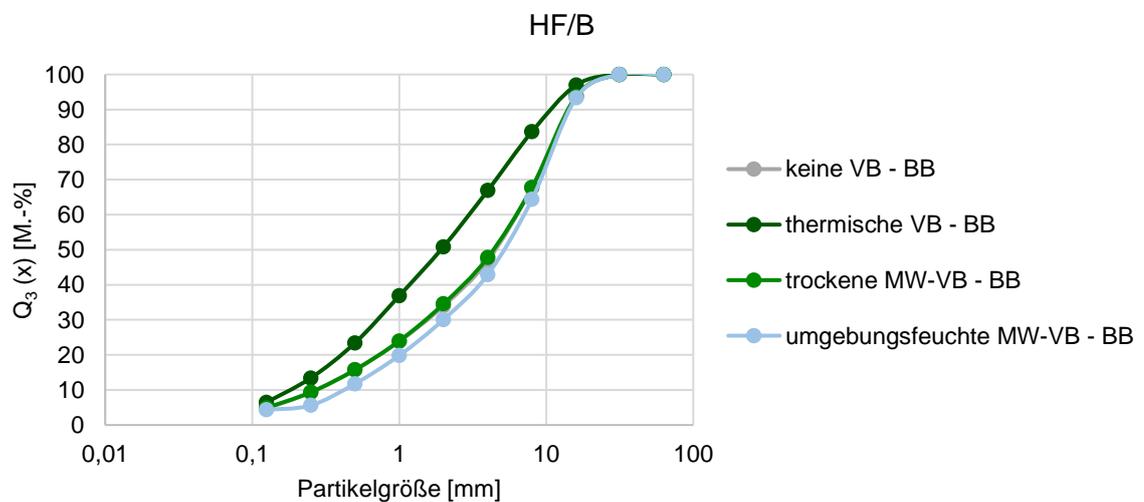
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton



**Abbildung 62:** Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate NF/B mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten



**Abbildung 63:** Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate HF/A mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten



**Abbildung 64:** Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate HF/B mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Die Kornform der Rezyklate wird grundsätzlich durch alle Vorbehandlungsarten verbessert (Abbildung 65 und 66). Besonders kontinuierlich fällt dies bei der thermischen Vorbehandlung auf. Bei allen Carbonbeton-Rezyklaten verringert sich durch diese das mittlere Seitenverhältnis (Länge/Breite) und erhöht sich die mittlere Zirkularität. Die rezyklierten Gesteinskörnungen sind mit thermischer Vorbehandlung also gerundeter als ohne Vorbehandlung, welches eine Folge des höheren Aufschlussgrades (Kapitel 3.5.3) ist. Auf die Kornform der hochfesten Carbonbetone hat die thermische Vorbehandlung die positivste Auswirkung. Die Kornform des Carbonbetons NF/B beeinflusste die umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung am stärksten und die des Carbonbetons NF/A die umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung bis zur Explosion des Probekörpers (\*).

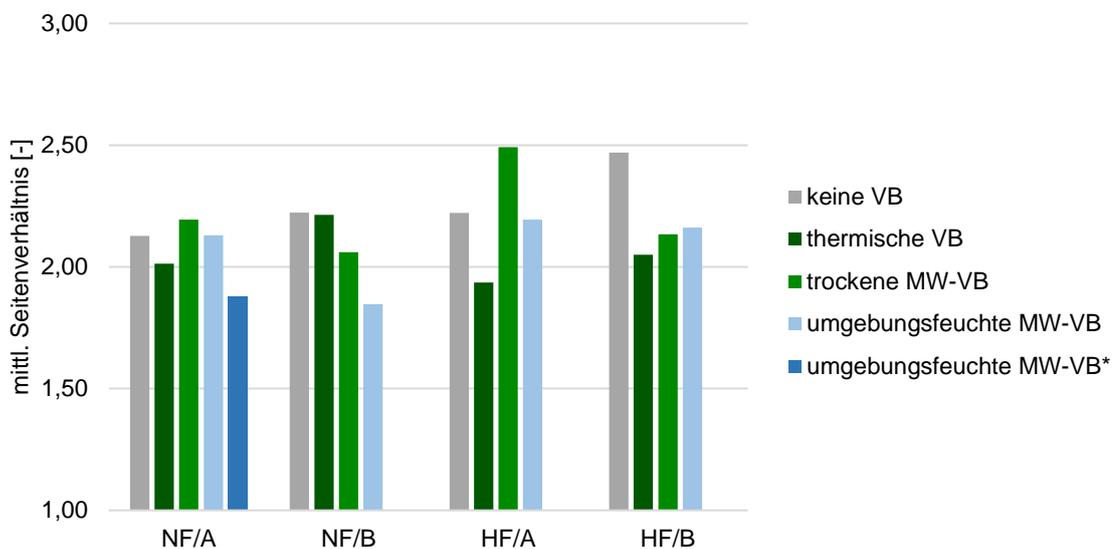


Abbildung 65: Mittleres Seitenverhältnis der Carbonbeton-Rezyklate mit Vorbehandlung des Backenbrechers

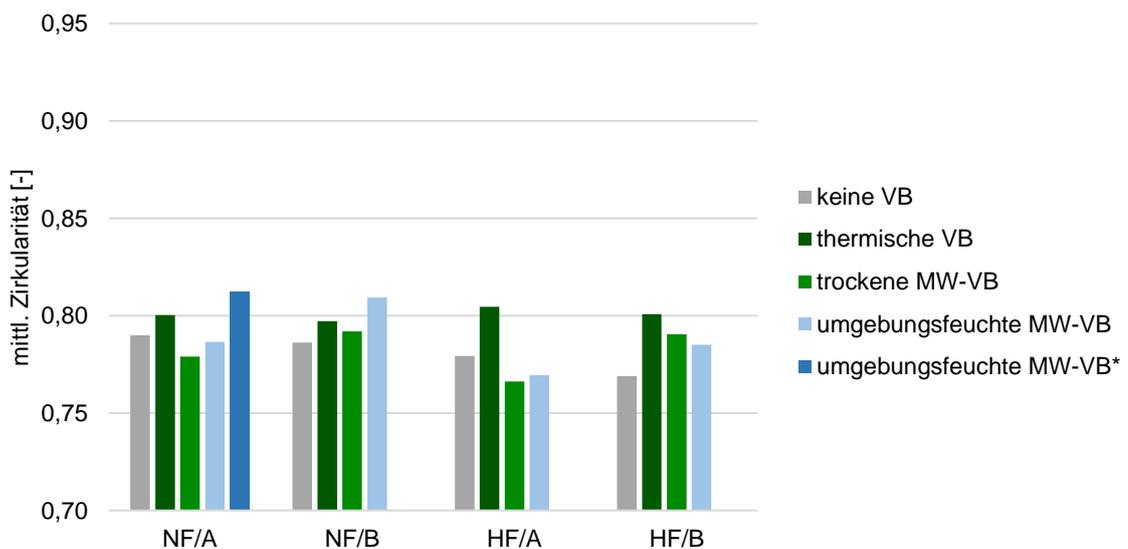


Abbildung 66: Mittlere Zirkularität der Carbonbeton-Rezyklate mit Vorbehandlung des Backenbrechers

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass die Vorbehandlungsart auf die Aufbereitungsqualität der Rezyklate einen Einfluss hat. Am stärksten macht sich dies bei den Rohdichten, Wasseraufnahmen und Kornformen bemerkbar.

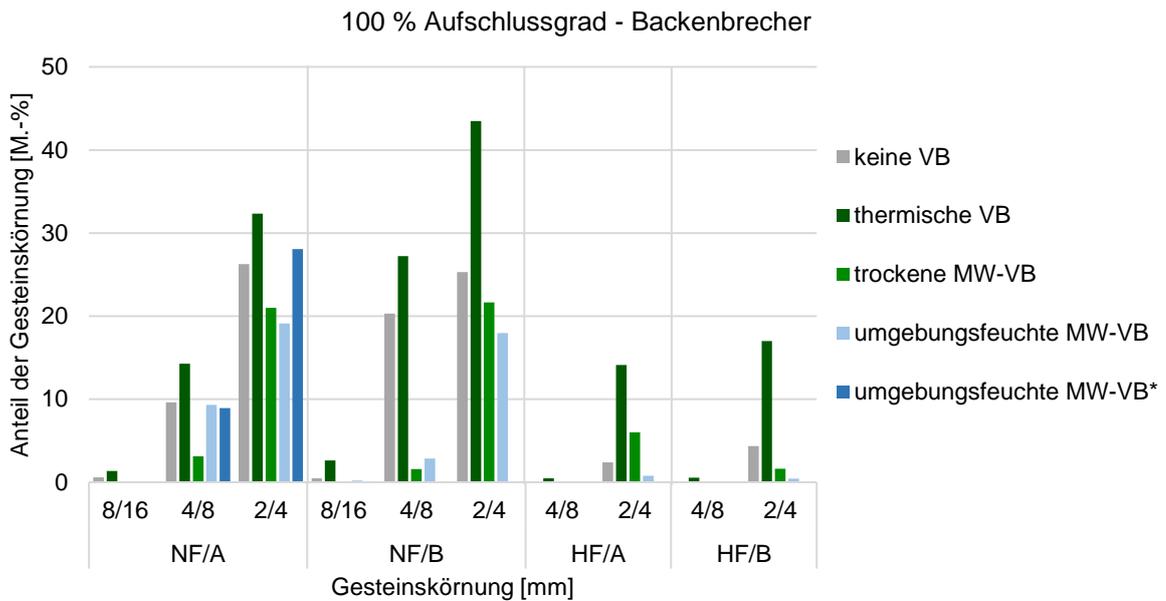
Die thermische Vorbehandlung der Carbonbetone hat einen positiven Einfluss auf die Kornform, jedoch einen negativen auf die weiteren Beurteilungskriterien der Aufbereitungsqualität. Die Rohdichte sinkt, während die Wasseraufnahme stark zunimmt. Des Weiteren werden die Carbonbetone feiner gebrochen. Dies ist unvorteilhaft für eine Wiederverwendung der Gesteinskörnung in RC-Beton, da Gesteinskörnung < 2 mm nicht weiterverarbeitet werden darf. Die Ursache hierfür liegt vorwiegend in dem kleinen Größtkorn der Carbonbetone, wodurch die gröberen Fraktionen der Rezyklate reich an strukturverändertem Zementstein sind.

Die mikrowelleninduzierende Vorbehandlung hat sowohl im umgebungsfeuchten als auch im trockenen Zustand der Carbonbetone nur einen geringen Einfluss auf die Aufbereitungsqualität. Die Rohdichten der mit Mikrowellen vorbehandelten Carbonbetone sind etwas geringer als die der unbehandelten. Dasselbe gilt für die Wasseraufnahmen, welches sich positiv auf die Qualität der Rezyklate auswirkt. Die Kornform der Carbonbeton-Rezyklate wird grundsätzlich positiv durch die Mikrowellen-Vorbehandlung beeinflusst, wobei die Rezyklate im umgebungsfeuchten Zustand größtenteils gerundeter vorliegen als die trockenen.

Die Carbonbeton-Rezyklate konnten unabhängig von der Vorbehandlungsart die Anforderungen an die Rohdichte ( $\geq 2000 \text{ kg/m}^3$ ) und die maximale Wasseraufnahme (10 M.-%) aus der DIN 1045-2 [04] für die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen in Beton erfüllen (Tabelle 3).

#### **3.5.3 Einfluss der Vorbehandlung auf den Aufschlussgrad des Rezyklats**

Der Aufschlussgrad der Gesteinskörnung wird durch die unterschiedlichen Vorbehandlungsarten deutlich beeinflusst, wie in Abbildung 67 zu erkennen ist. Durch die thermische Vorbehandlung wird der Aufschlussgrad sowohl von den normal- als auch den hochfesten Carbonbeton-Rezyklate aus dem Backenbrecher im Durchschnitt um 6,4 % erhöht. Der Grund hierfür liegt in der gegensätzlichen Volumenänderung des Zementsteins und der Gesteinskörnung, welches zu einer Porositätszunahme in der Verbundzone führt, wie bereits in Kapitel 2.2.1.2 ausführlich erklärt wurde. Durch alle anderen Vorbehandlungsarten wird der Aufschlussgrad nicht verbessert. Ausnahmen hiervon gibt es nur in der Fraktion 2/4 mm des NF/A- und HF/A-Rezyklats. Beim NF/A-Rezyklat erhöht die umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung bis zur Explosion des Probekörpers den Aufschlussgrad leicht, während dies beim HF/A-Rezyklat die trockene Mikrowellen-Vorbehandlung verursacht.



**Abbildung 67:** 100 % Aufschlussgrad der Carbonbeton-Rezyklate aus dem Backenbrecher mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten

Auffällig bei der Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 67 ist, dass der Aufschlussgrad der Rezyklate mit Mikrowellen-Vorbehandlung teilweise geringer ist als ohne Vorbehandlung. Besonders groß ist der Unterschied bei der Kornfraktion 4/8 mm des Rezyklats NF/B. Daraus kann abgeleitet werden, dass die thermische Beanspruchung der Probekörper durch Mikrowellen nicht ausreichend hoch war, um eine Schwächung in der Verbundzone Gesteinskörnung-Zementstein hervorzurufen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Aufschlussgrad der Gesteinskörnung bei den Zerkleinerungsversuchen nur durch die thermische Vorbehandlung der Carbonbetone grundsätzlich verbessert wird. Die Verbesserung liegt im Durchschnitt bei 6,4 %.

In Anhang 5 wurden Bilderreihen für die Zerkleinerungsversuche der Carbonbetone im Backenbrecher mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten dargestellt, um den Aufschluss der Carbonbewehrung untereinander vergleichen zu können. Abbildung 68 und 69 zeigen anhand der Fraktion 16/31,5 mm des Carbonbetons HF/A die grundlegenden Unterschiede zwischen dem Aufschluss der unterschiedlich vorbehandelten Carbonbetone auf. Sie werden anschließend ausführlich diskutiert.

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton



**Abbildung 68:** Aufschluss der Carbonbewehrung der Fraktion 16/31,5 mm des Carbonbetons HF/A ohne (links) und mit thermischer Vorbehandlung (rechts)



**Abbildung 69:** Aufschluss der Carbonbewehrung der Fraktion 16/31,5 mm des trockenen (links) und umgebungsfeuchten (rechts) Carbonbetons HF/A mit Mikrowellen-Vorbehandlung

Bei der Zerkleinerung der Carbonbetone ohne Vorbehandlung hat der Backenbrecher nicht die gesamte Carbonbewehrung freilegen können (Abbildung 68 – links). Es blieben vereinzelt in der Kornfraktion 16/31,5 mm Agglomerate aus Beton und Carbonbewehrung übrig, unabhängig von der Betonsorte und dem Carbongelege. Des Weiteren hafteten Bindfäden der Carbonbewehrung am Zementstein. Unterschiede zwischen den Carbonbeton-Varianten sind bezüglich der Faserlänge nicht zu verzeichnen. Die Carbonfasern beider Gelege behielten nach der Zerkleinerung in den gröberen Fraktionen größtenteils Längen  $> 2$  cm. Wobei in den feineren Fraktionen Fasersplitter zu finden sind. Die Fasern der Gelege liegen nach der Zerkleinerung eng gebündelt vor, jedoch sind die Faserenden des Geleges B häufig zerfranst.

Der Aufschluss der Carbonbewehrung der thermisch vorbehandelten und im Backenbrecher zerkleinerten Probekörper (Abbildung 68 – rechts) stellt sich im Vergleich zu den un-

behandelten Probekörpern sehr differenziert dar. Der Aufschlussgrad der Carbonbewehrung ist hier optimal, welches an der Zunahme der Porosität in der Verbundzone Betonmatrix-Carbonbewehrung liegt (Kapitel 2.2.1.2). Allerdings hat die Bewehrung ihre Form verloren und ist in allen Fraktionen nur noch in locker verknüpften Faserbündeln vorhanden. Folglich haben sich die Beschichtung und die Bindfäden bei der thermischen Vorbehandlung aufgelöst.

Beim Vergleich der unbehandelten Carbonbeton-Rezyklate mit den trockenen Mikrowellen vorbehandelten (Abbildung 69 – links) ist kein Unterschied hinsichtlich der Faserlänge und -qualität der aufgeschlossenen Bewehrung zu erkennen. Der Faseraufschluss hat sich hingegen verbessert. Die Carbonbewehrung ist komplett freigelegt und nur vereinzelt haften Bindfäden am Zementstein. Das macht deutlich, dass das Einbringen von Mikrowellen im trockenen Zustand des Carbonbetons den Verbund zwischen Carbonbewehrung und Betonmatrix schwächt. Dies war zu erwarten, da die vorbehandelten Probekörper entlang der Carbongelege Risse aufwiesen (Kapitel 3.3.3). Unter Berücksichtigung des Aufschlussverhaltens der Gesteinskörnung kann geschlussfolgert werden, dass die Mikrowellen vor allem an der Grenzfläche zwischen Betonmatrix und Carbonbewehrung wirken und weniger zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix.

Die Mikrowellen-Vorbehandlung im umgebungsfeuchten Zustand der Carbonbetone hat schlechtere Resultate für den Aufschluss der Carbongelege ergeben (Abbildung 69 – rechts), da die Bewehrung der Carbonbetone HF/A und NF/A\*<sup>1</sup> nicht vollständig aufgeschlossen werden konnten. Die Faserqualität und -länge unterscheidet sich jedoch nicht von den Rezyklaten der unbehandelten sowie trockenen Mikrowellen vorbehandelten Carbonbetone.

Letztlich verbessert also die thermische und trockene Mikrowellen-Vorbehandlung der Carbonbetone den Aufschlussgrad der Carbonbewehrung, wobei nur durch die thermische Vorbehandlung auch die Bindfäden vom Zementstein gelöst werden können.

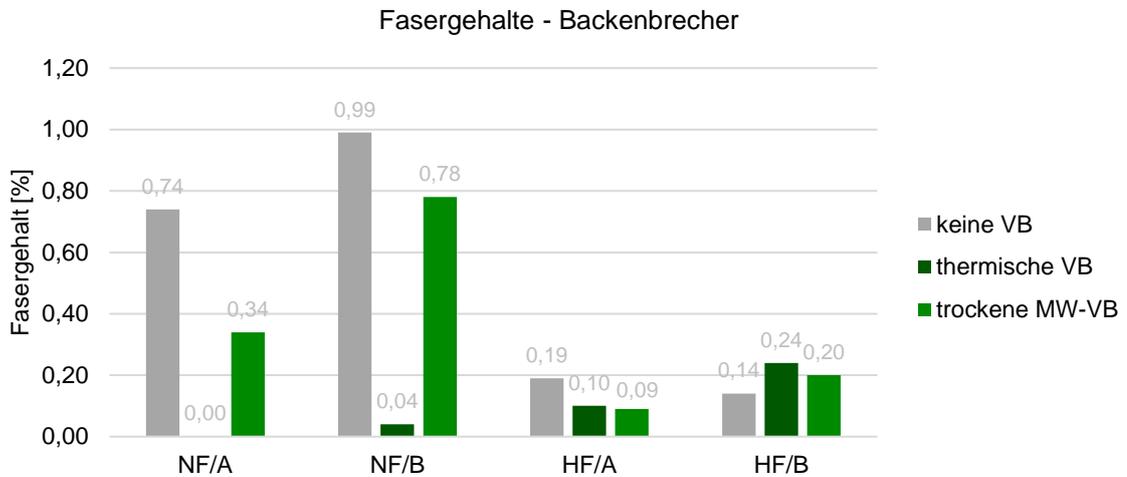
#### **3.5.4 Einfluss der Vorbehandlung auf den Fasergehalt im Rezyklat**

In Abbildung 70 werden die Fasergehalte der Fraktion 0/1 mm für die unterschiedlich vorbehandelten und im Backenbrecher zerkleinerten Carbonbetone verglichen. Die Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B und HF/A weisen ohne Vorbehandlung die höchsten Fasergehalte auf. Dies war zu erwarten, da durch die thermische und trockene Mikrowellen-Vorbehandlung der Aufschluss zwischen Betonmatrix und Carbonbewehrung verbessert wird. Dadurch wird die Carbonbewehrung bei der Zerkleinerung nicht so stark beansprucht und somit zerkleinert. Für das Carbonbeton-Rezyklat HF/B trifft diese Tendenz nicht zu, hier weist das unbehandelte Rezyklat den geringsten Fasergehalt auf. Ein Grund

---

<sup>1</sup> \*Probekörper wurde bis zur Explosion mit Mikrowellen behandelt

dafür könnte, wie bereits häufig erwähnt, eine fehlerhafte Probenahme sein, sodass die entnommene Probe nicht den eigentlichen Fasergehalt im Rezyklat repräsentiert.



**Abbildung 70:** Fasergehalte der Carbonbeton-Rezyklate aus dem Backenbrecher mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten bestimmt über den TOC-Gehalt

In den normalfesten, thermisch vorbehandelten Carbonbeton-Rezyklaten sind kaum Fasern enthalten, welches daran liegen könnte, dass sich die Carbonfasern dieser Rezyklate zu locker verknüpften Faserbündeln verbunden haben, wodurch eine repräsentative Probenahme erschwert wurde. Dieses ist bei den hochfesten, thermisch vorbehandelten Carbonbeton-Rezyklaten nicht der Fall. Beim HF/B-Rezyklat ist der Fasergehalt der thermisch vorbehandelten Probe sogar am höchsten, welches dafür spricht, dass in der getesteten Rezyklat-Probe ein Faserbündel vorhanden war.

Die Fasergehalte der trockenen und mit Mikrowellen vorbehandelten Carbonbeton-Rezyklate liegen, außer beim HF/B-Rezyklat, unterhalb derer ohne Vorbehandlung.

Die Beurteilung der Eignung der Aufbereitungsverfahren anhand der Fasergehalte ist kritisch zu betrachten, da die Bestimmung der Fasergehalte über den TOC-Gehalt mit Unsicherheiten verbunden ist, die in Kapitel 3.4.3 beschrieben wurden. Allerdings können die Ergebnisse zum Fasergehalt zusammenfassend so interpretiert werden, dass die thermische und trockene Mikrowellen-Vorbehandlung die Fasergehalte in den Rezyklaten prinzipiell verringern können.

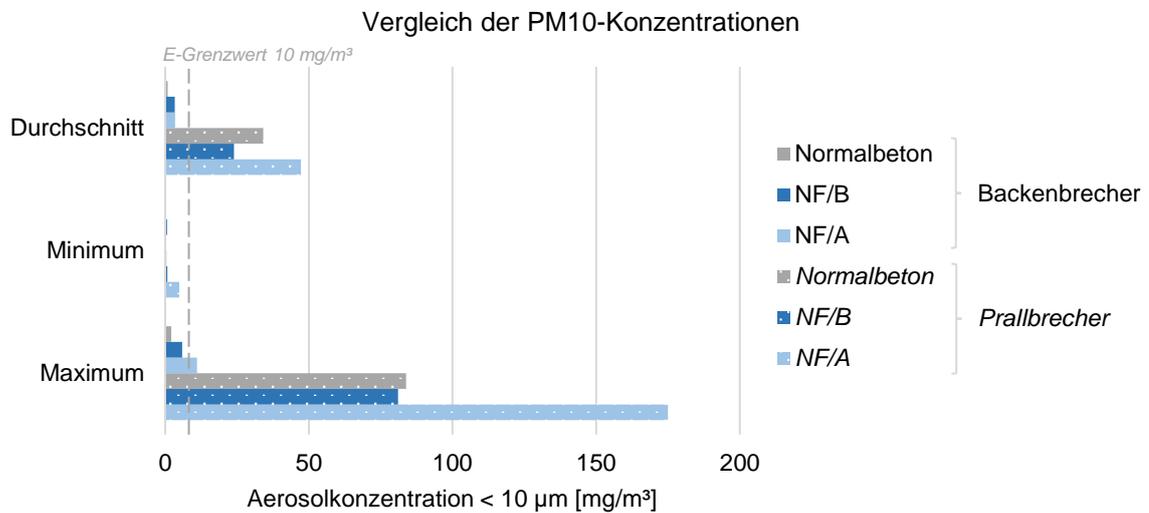
#### 3.5.5 Auswertung der Staubmessungen

Die Ergebnisse der Staubmessungen im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung der Carbonbetone im Prall- und Backenbrecher werden in diesem Kapitel ausgewertet und mit Raumluftmessungen bei der Zerkleinerung von Normalbeton verglichen. Die Messergebnisse für den Normalbeton wurden 2017 im Aufbereitungstechnikum der Bauhaus-Universität Weimar ermittelt [H1]. Die Staubentwicklung wurde dabei über einen Zeitraum

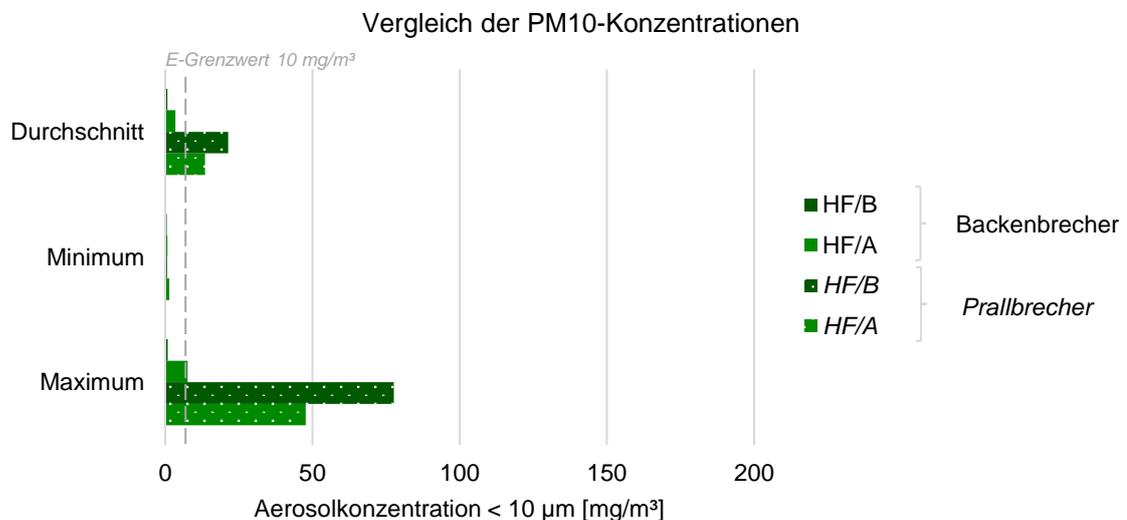
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

von 3 Minuten gemessen. Der Messzeitraum bei der Zerkleinerung der Carbonbetone betrug hingegen 1 Minute. Bei den Mengen des Aufgabeguts sind ebenfalls Unterschiede zu verzeichnen. Bei der Zerkleinerung des Normalbetons wurden 40 kg Altbetonbruch kontinuierlich dem Brecher zugegeben. Bei der Zerkleinerung des Carbonbetons war die Menge des Aufgabeguts auf ca. 10 kg beschränkt. Des Weiteren fand vor der Zerkleinerung des Altbetonbruchs im Prallbrecher eine Grobzerkleinerung von diesem im Backenbrecher statt. Der Standort des Staubmessgerätes war bei den Raumluftmessungen während der Zerkleinerung der Normal- und Carbonbetone identisch.

In Abbildung 71 und 72 werden zunächst die Messungen der PM10-Konzentrationen ausgewertet und anschließend in Abbildung 73 und 74 die Konzentrationen der PM2,5-Fraktion.



**Abbildung 71:** PM10-Konzentrationen im Vergleich für die Zerkleinerung normalfester Carbonbetone und Normalbeton im Prall- und Backenbrecher

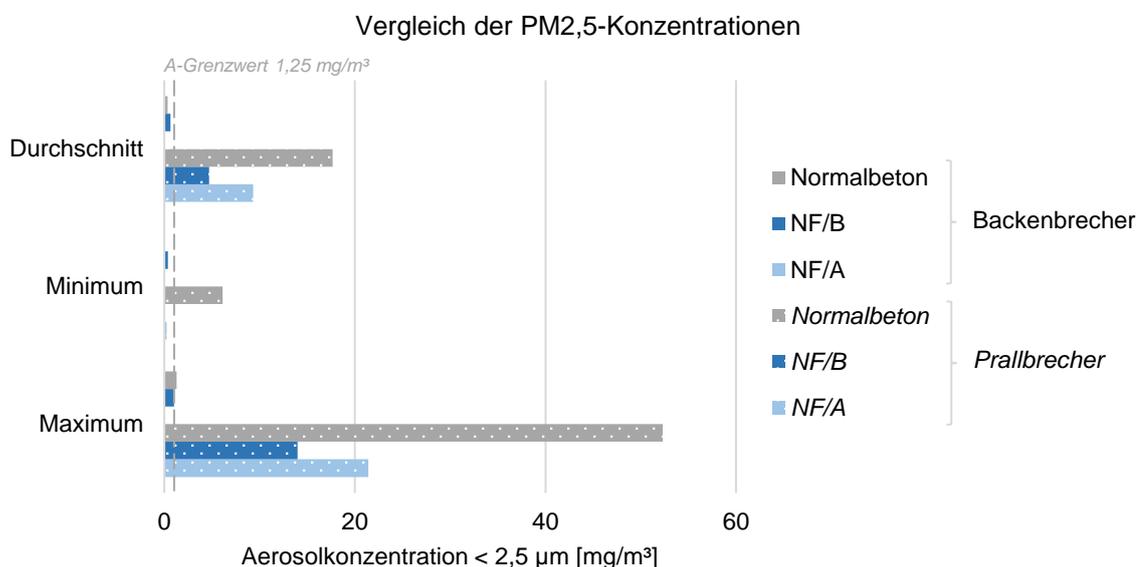


**Abbildung 72:** PM10-Konzentrationen im Vergleich für die Zerkleinerung hochfester Carbonbetone im Prall- und Backenbrecher

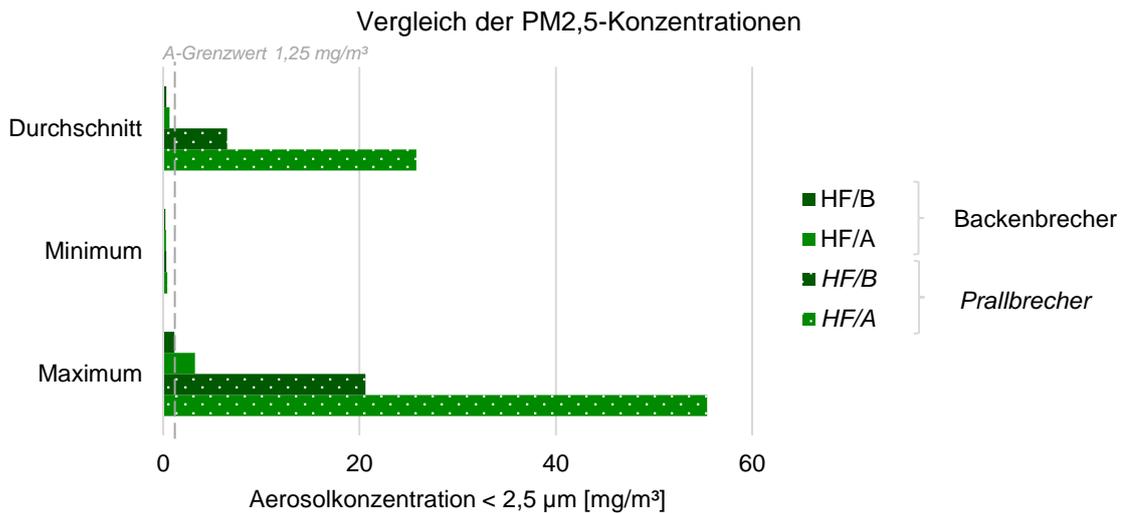
### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Beim Vergleich der PM10-Konzentrationen in Abbildung 71 für die normalfesten und Abbildung 72 für die hochfesten Carbonbetone, wird der immense Unterschied zwischen der Staubeentwicklung durch den Prall- und Backenbrecher deutlich.

Durch den Prallbrecher entsteht bei der Zerkleinerung der Carbonbetone eine in etwa zehnfach höhere durchschnittliche Staubbelastung, die den Arbeitsplatzgrenzwert der E-Fraktion von  $10 \text{ mg/m}^3$  für alle Betone überschreitet. Die normalfesten Carbonbetone setzen bei der Zerkleinerung mit dem Prallbrecher generell mehr Staubpartikel  $< 10 \mu\text{m}$  frei als die hochfesten, welches vermutlich an der geringeren Festigkeit und dem damit verbundenen höheren Zerkleinerungsgrad liegt. Während die Zerkleinerung der normalfesten Carbonbetone mit dem Prallbrecher durchschnittliche Konzentrationen über  $25 \text{ mg/m}^3$  erreichte, liegen die durchschnittlichen Werte der hochfesten Carbonbetone bei maximal  $20 \text{ mg/m}^3$ . Die Zerkleinerung des Carbonbetons NF/A ergab sowohl im Durchschnitt als auch für die maximalen Einzelwerte die höchsten PM10-Konzentrationen. Für die Zerkleinerung des Normalbetons im Prallbrecher befindet sich die durchschnittliche Aerosolkonzentration  $< 10 \mu\text{m}$  der Raumluft zwischen den Werten der Carbonbetone. Der Maximalwert des im Prallbrecher zerkleinerten Normalbetons ähnelt dem des Carbonbetons NF/B. Die PM10-Konzentrationen für den Backenbrecher sind für alle Betone sehr gering und überschreiten den E-Staub-Grenzwert nicht. Nur der Maximalwert des Carbonbetons NF/A überschreitet diesen Wert.



**Abbildung 73:** PM2,5-Konzentrationen im Vergleich für die Zerkleinerung normalfester Carbonbetone und Normalbetone im Prall- und Backenbrecher



**Abbildung 74:** PM<sub>2,5</sub>-Konzentrationen im Vergleich für die Zerkleinerung hochfester Carbonbetone im Prall- und Backenbrecher

In Abbildung 73 und 74 ist zu erkennen, dass auch die PM<sub>2,5</sub>-Konzentrationen des Prallbrechers höher sind als die des Backenbrechers. Die gemessenen Aerosolkonzentrationen < 2,5 µm bei den Zerkleinerungsversuchen des Prallbrechers überschreiten unabhängig von der Betonsorte den Arbeitsplatzkennwert der A-Fraktion von 1,25 mg/m<sup>3</sup>. Konträr zur Messung der PM<sub>10</sub>-Fraktion ist jedoch, dass der im Prallbrecher zerkleinerte Normalbeton mehr Staubpartikel < 2,5 µm freisetzt als die normalfesten Carbonbetone (Abbildung 73). Die hochfesten Carbonbetone zeigen in der PM<sub>2,5</sub>-Fraktion eine ähnliche Staubentwicklung durch den Prallbrecher wie die normalfesten. Die Zerkleinerung des Carbonbetons HF/A ergab sowohl im Durchschnitt als auch für die maximalen Einzelwerte die höchsten PM<sub>2,5</sub>-Konzentrationen.

Die durchschnittlichen PM<sub>2,5</sub>-Konzentrationen für den Backenbrecher liegen unterhalb des A-Staub-Grenzwertes. Bei den maximalen Konzentrationen überschreitet der Carbonbeton HF/A diesen Wert einmalig.

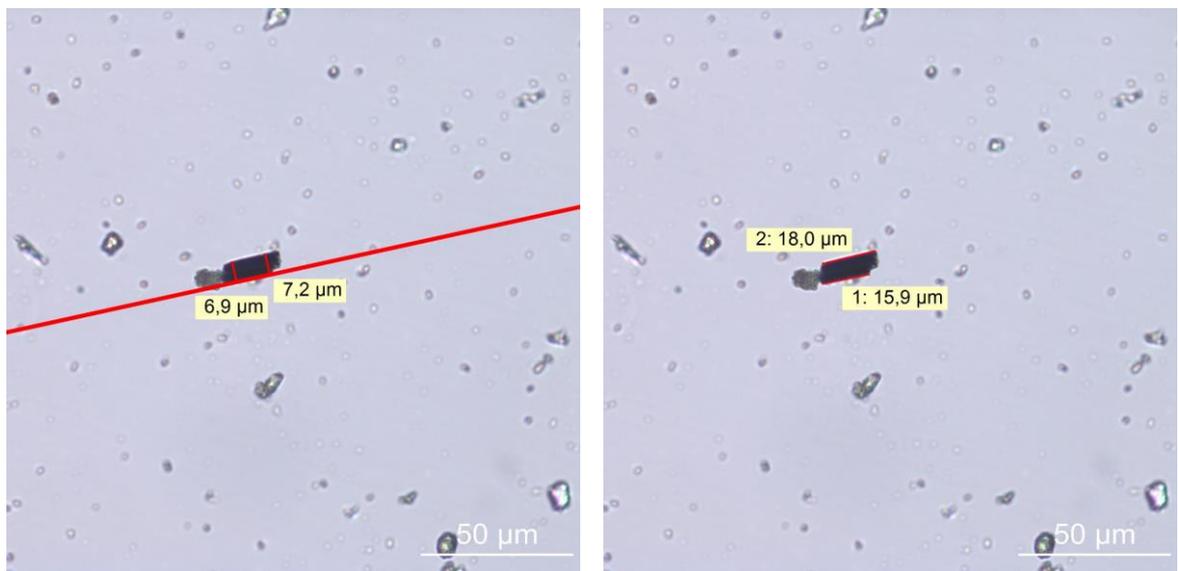
Die bei den Untersuchungen der Stäube NF/A und NF/B entstandenen Aufnahmen mit dem Stereo- und Polarisationsmikroskop sind dem Anhang 6 zu entnehmen. Durch das Stereomikroskop konnte gut festgehalten werden, dass bei der Zerkleinerung der Carbonbetone Faserbündel und einzelne Fasern freigesetzt werden. Die nachfolgende Abbildung 75 veranschaulicht dies für den Carbonbetonstaub NF/A aus dem Prall- und Backenbrecher. Auf den Mikroskopaufnahmen sind Faserbündel im Staub abgebildet, die aus den Rovings der Carbongelege gebrochen sind. Es ist gut zu erkennen, dass sich aus dem Verbund der Faserbündel einzelne Carbonfasern lösen und absplittern. In allen untersuchten Stäuben wurden diese gebündelten und vereinzelt Fasern gefunden.



**Abbildung 75:** Stereomikroskopische Aufnahmen des Carbonbetonstaubes NF/A durch den Prall- (links) und Backenbrecher (rechts)

Dabei waren augenscheinlich keine Unterschiede zwischen den gebrochenen Fasern des Prall- und Backenbrechers zu erkennen. Die Fasern werden also trotz unterschiedlicher Beanspruchung in den Brechern auf dieselbe Weise freigesetzt, wodurch es keine Unterschiede zwischen den freigesetzten Carbonfasern hinsichtlich der Länge und Form gibt. Die Gelege A und B unterscheiden sich diesbezüglich auch nicht. Allerdings sind in den Stäuben des Carbonbetons NF/B Bindfäden der Carbonbewehrung vorhanden sowie Partikel der Beschichtung, an denen noch vereinzelte Fasern haften.

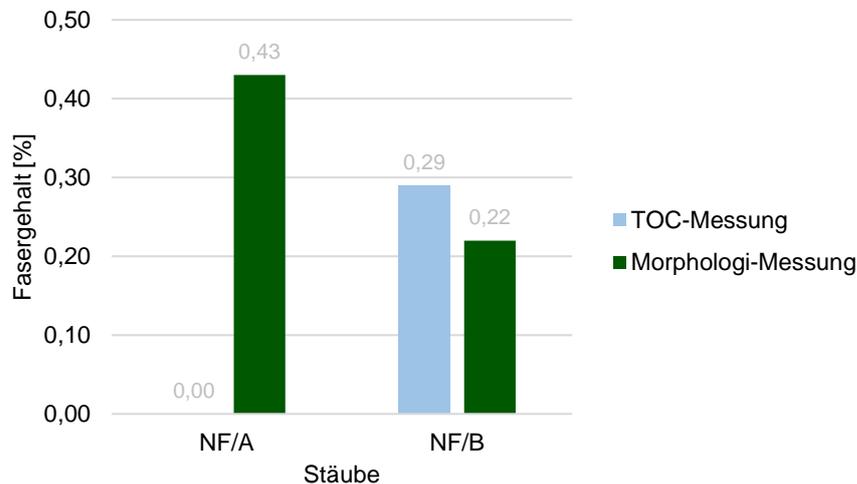
In den Aufnahmen des Polarisationsmikroskops konnten die vereinzelt abgesplitterten Carbonfasern vermessen werden. Im Staub des Carbonbetons NF/B, der im Backenbrecher zerkleinert wurde, konnte ein Faserpartikel mit den geringsten Abmessungen (Breite: 6,9 – 7,2 µm, Länge: 15,9 – 18,0 µm) detektiert werden. Die Vermessung des Partikels ist in Abbildung 76 dargestellt.



**Abbildung 76:** Vermessung einer Carbonfaser im Carbonstaub NF/B des Backenbrechers

### 3. Experimentelle Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung von Carbonbeton

Die ermittelten Fasergehalte der Stäube belegen nochmals das Vorhandensein von Carbonfasern. Sie sind in dem nachfolgenden Diagramm (Abbildung 77) veranschaulicht. Aufgrund der Unsicherheiten bei den Analysemethoden sind keine klaren Tendenzen aus den Ergebnissen ableitbar, welche Carbonbeton-Variante bei der Zerkleinerung weniger Faserpartikel freisetzt.



**Abbildung 77:** Fasergehalt der Carbonbetonstube NF/A und NF/B vergleichend ermittelt über den TOC-Gehalt und mit dem Morphologi

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass beim Einsatz des Prallbrechers eine höhere Staubentwicklung entsteht als beim Backenbrecher. Eine klare Tendenz, bei welcher Carbonbeton-Variante am wenigsten Stäube entstehen, gibt es nicht. Die Arbeitsplatzgrenzwerte können bei den Zerkleinerungsversuchen mit dem Prallbrecher nicht und bei denen mit Backenbrecher nur größtenteils eingehalten werden. Aus diesem Grund sind Arbeitsschutzmaßnahmen, wie die Absaugung der Stäube aus dem Brechraum und Atemschutzmasken, bei der Zerkleinerung der Carbonbetone mit beiden Brechertypen dringend erforderlich. Die Arbeitsschutzmaßnahmen sind jedoch nicht nur wegen der Überschreitung der E- und A-Staub-Arbeitsplatzgrenzwerte notwendig. Die Untersuchungen mit dem Stereo- und Polarisationsmikroskop konnten Carbonfasern < 18  $\mu\text{m}$  in den Stuben nachweisen. Es ist nicht auszuschließen, dass durch die Zerkleinerung der Carbonbetone auch noch feinere Carbonfasern freigesetzt werden, als die in Abbildung 76 dargestellte, da mit dem Morphologi G3 faserförmige Partikel bis 3  $\mu\text{m}$  in den Stuben detektiert werden konnten. Jedoch kann die statische Bildanalyse mit dem Morphologi G3 die Partikel stofflich nicht identifizieren, weshalb eine eindeutige Identifizierung als Carbonfaserpartikel nicht möglich ist. Folglich muss davon ausgegangen werden, dass bei der Aufbereitung von Carbonbeton inhalierbare und lungengngige Faserfraktionen entstehen. Diese Annahmen machen Arbeitsschutzmaßnahmen zwingend erforderlich, da die Frage nach den gesundheitlichen Folgen des Carbonbetonstaubes noch nicht geklärt ist.

#### 3.5.6 Fehlerbetrachtung

In dieser Arbeit wurden in den vorherigen Kapiteln bereits Unsicherheiten bei bestimmten Analysemethoden und mögliche Fehler bei der Probenahme erwähnt. Um mehr Sicherheit für die Aussagekraft der Analyseergebnisse zu gewinnen, wäre eine Doppelbestimmung einiger Ergebnisse sinnvoll gewesen. Dadurch hätten Standardabweichungen angegeben und die Ergebnisse besser eingeschätzt werden können. Aufgrund des großen Versuchsumfanges und der damit einhergehenden immensen Anzahl an Einzelversuchen war dies hinsichtlich des zeitlichen Rahmens einer Masterarbeit jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel erörtert, in welchen Analysebereichen eine Doppelbestimmung notwendig gewesen wäre, um Unstimmigkeiten in den Ergebnissen zu klären.

Die Ergebnisse der Analysemethoden für die Aufbereitungsqualität der Carbonbeton-Rezyklate sind erfahrungsgemäß repräsentativ und reproduzierbar. Hier wären durch eine Doppelbestimmung keine Abweichungen von den Ergebnissen zu erwarten.

Für die Bestimmung des Aufschlussgrades der Gesteinskörnung durch die händische Sortierung kann ein subjektiver Fehler bei der Erkennung der aufgeschlossenen Gesteinskörnung nicht ausgeschlossen werden. Durch eine Doppelbestimmung hätten die Ergebnisse abgesichert werden können. Die eindeutig positive Auswirkung der thermischen Vorbehandlung auf den Aufschlussgrad der Gesteinskörnung hätte dies aber nicht beeinflusst.

Bei der Ermittlung des Fasergehaltes über den TOC-Gehalt gab es die größten Unsicherheiten, weil eine Probenahme, die das Verhältnis von Fasern und Gesteinskörnung des ganzen Rezyklats repräsentiert, sehr schwierig ist. Dafür müssten die Fasern perfekt homogenisiert im Rezyklat vorliegen, was schlecht realisierbar ist. Des Weiteren werden für die Bestimmung des TOC-Gehaltes nur 70 mg der Probe verwendet. Folglich ist es schwierig, den Fasergehalt mit einer so geringen Probemenge repräsentativ für das gesamte Rezyklat zu bestimmen. Aus diesem Grund hätte eine Doppelbestimmung der Fasergehalte den Ergebnissen eine höhere Aussagekraft gegeben, da man diese aufgrund von Standardabweichungen besser hätte interpretieren können. Bei der Ermittlung des Fasergehaltes über das Morphologi G3 bestehen ebenfalls Unsicherheiten, da die statische Bildanalyse die Carbonfasern stofflich nicht identifizieren kann. Dadurch werden auch längliche Staubpartikel und die Bindfäden der Carbonbewehrung zum Fasergehalt hinzugerechnet oder zu stark zerkleinerte Fasern mit quadratischen Formen nicht im Fasergehalt berücksichtigt. Eine Doppelbestimmung hätte diese Unsicherheiten nicht beheben können.

### 4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Motivation und die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst sowie erläutert, welche Schwierigkeiten weiterhin beim Recycling von Carbonbeton bestehen. Ferner wird ein Ausblick für Themen gegeben, die über diese Arbeit hinaus für das Carbonbeton-Recycling interessant und zu untersuchen sind.

Carbonbeton ist ein neu entwickeltes Verbundmaterial, das fest im Markt etabliert werden soll. Dafür muss im Vorfeld der gesamte Lebenszyklus des Baustoffes betrachtet werden. Das Verhalten von Carbonbeton beim Rückbau und der Aufbereitung ist zur Zeit noch nicht hinreichend erforscht. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit der aktuelle Forschungsstand zum Recycling von Carbonbeton vorgestellt und im Rahmen einer Machbarkeitsstudie der Bauhaus-Universität Weimar, weiterführende Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Carbonbeton durchgeführt. Die Bewertung des Aufschlussverhaltens des Verbundmaterials für verschiedene mechanische Zerkleinerungsverfahren und Vorbehandlungsarten stand dabei im Vordergrund. Vergleichend wurde die mechanische Zerkleinerung des Carbonbetons mit dem Prall- und Backenbrecher sowie der Einfluss thermischer und mikrowelleninduzierender Vorbehandlung im trockenen und umgebungsfeuchten Zustand der Carbonbetone untersucht. Die Zerkleinerungsversuche wurden mit unterschiedlichen Carbonbeton-Varianten durchgeführt. Dabei wurde sich auf normal- und hochfeste Carbonbetone mit zwei verschiedenen, engmaschigen Carbonfasergelegen, wie sie im Sanierungs- und Instandsetzungsbereich zum Einsatz kommen, konzentriert. Des Weiteren wurden die im Zerkleinerungsprozess freigesetzten Stäube analysiert, um die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit einschätzen zu können. Ziel der Masterarbeit war die Beurteilung der ausgewählten Aufbereitungstechnologien hinsichtlich der Eignung für Carbonbeton.

Zwischen den Carbonbeton-Varianten gab es, bezüglich des Aufschlussverhaltens der Gelege, keine nennenswerten Unterschiede. Die Aufbereitungsqualität der verschiedenen Carbonbetone unterschied sich nur in betonfestigkeitsspezifischen Parametern, wie der Rohdichte, Wasseraufnahme und Kornform.

Die vergleichenden Zerkleinerungsversuche mit dem Prall- und Backenbrecher haben gezeigt, dass nicht vorbehandelter Carbonbeton im Backenbrecher besser aufgeschlossen werden kann als im Prallbrecher. So liegt die Carbonbewehrung nach der Aufbereitung mit dem Backenbrecher nur vereinzelt unaufgeschlossen im Rezyklat vor, während durch den Prallbrecher in mehreren Fraktionen Agglomerate aus Betonmatrix und Carbonbewehrung vorhanden bleiben. Grund dafür ist, dass mit dem Backenbrecher ein höherer Zerkleinerungsgrad des Carbonbetons erreicht wird. Somit stellte sich der Backenbrecher für die Aufbereitung von Carbonbeton geeigneter dar als der Prallbrecher, wenngleich die Carbonbewehrung durch den Backenbrecher nicht hundertprozentig aufgeschlossen werden konnte. Bei den Untersuchungen der Carbonbeton-Rezyklate ist aufge-

fallen, dass sich nicht nur in den gröbereren Fraktionen, sondern auch in den Fraktionen < 2 mm zerkleinerte Carbonfasern befunden haben. Daher wurde im Weiteren untersucht, inwiefern die thermische und mikrowelleninduzierende Vorbehandlung im trockenen und umgebungsfeuchten Zustand der Carbonbetone den Aufschlussgrad erhöhen und den Fasergehalt in den Rezyklaten reduzieren können. Gleichzeitig wurde festgehalten, wie sich die unterschiedlichen Vorbehandlungsarten auf die Aufbereitungsqualität der Rezyklate auswirken.

Durch den Vergleich der vorbehandelten und im Backenbrecher zerkleinerten Carbonbeton-Rezyklate konnte festgestellt werden, dass die thermische und trockene Mikrowellen-Vorbehandlung den Aufschluss der Carbonbewehrung verbessert, während dies bei der Mikrowellen-Vorbehandlung umgebungsfeuchter Carbonbetone nicht der Fall ist. Die thermische und trockene Mikrowellen-Vorbehandlung haben jedoch bestimmte Vor- und Nachteile, die bei der Beurteilung der Aufbereitungsverfahren berücksichtigt werden müssen.

Die thermische Vorbehandlung bewirkt den höchsten Aufschlussgrad der Gesteinskörnung und schließt die Carbonbewehrung einschließlich der Bindfäden, die die Gelege zusammenhalten, vollständig auf. Des Weiteren verbessert sie die Kornform der rezyklierten Gesteinskörnung, sodass diese gerundeter vorliegt als die unbehandelte. Allerdings verschlechtert die thermische Vorbehandlung die Aufbereitungsqualität der Rezyklate hinsichtlich der Rohdichte, Wasseraufnahme und Korngrößenverteilung.

Die Mikrowellen-Vorbehandlung trockener Carbonbetone kann den Aufschluss der Carbonbewehrung ebenfalls erhöhen, jedoch haften die Bindfäden der Carbongelege häufig noch an der rezyklierten Gesteinskörnung. Der Aufschlussgrad der Gesteinskörnung kann durch die trockene Mikrowellen-Vorbehandlung hingegen nicht verbessert werden. Die Aufbereitungsqualität der Rezyklate unterscheidet sich im Vergleich zu derer ohne Vorbehandlung bei der Rohdichte, Wasseraufnahme und Korngrößenverteilung nicht. Lediglich die Kornform der vorbehandelten Rezyklate ist etwas gerundeter als die der unbehandelten.

Die Qualität der aufgeschlossenen Carbonfasern ist für die beiden Vorbehandlungsarten unterschiedlich. Während die Carbongelege nach der thermischen Vorbehandlung und Zerkleinerung als locker verknüpfte Faserbündel vorliegen, behalten die Carbongelege nach der trockenen Mikrowellen-Vorbehandlung größtenteils ihre Form und sind als vereinzelte Rovings im Rezyklat vorhanden. Für die Beurteilung der Aufschlussqualität der rezyklierten Carbonbewehrung fehlen festgelegte Kriterien. In diesem Bereich müssten Grundlagenforschungen hinsichtlich der Verwertung betrieben werden, um festzustellen, welche Faserqualität und -länge am geeignetsten für eine Weiterverarbeitung ist.

Für die Rezyklate der Carbonbetone, die thermisch und im trockenen Zustand mit Mikrowellen vorbehandelt wurden, wurde zum Vergleich mit den nicht vorbehandelten Carbon-

beton-Rezyklaten die Fasergehalte der Fraktion 0/1 mm über den TOC-Gehalt bestimmt. Generell konnte durch beide Vorbehandlungsarten der Fasergehalt verringert werden. Dies ist allerdings nur von geringer Bedeutung, da trotzdem Fasern in allen Rezyklat-Fraktionen nachgewiesen werden konnten. Dadurch erlangt die Erforschung eines geeigneten Sortierverfahrens für Carbonbeton-Rezyklate eine besondere Bedeutung, da carbonfaserfreie rezyklierte Gesteinskörnungen unabdingbar sind für ein hochwertiges Recycling.

Darüber hinaus rücken auch Forschungen für die Verwertung der Fraktion  $< 2$  mm in den Fokus, da diese schwierig sortenrein zu sortieren und hinsichtlich lungengängiger Carbonfaserpartikel besonders zu beachten sind. Die Bauhaus-Universität Weimar wird zukünftig im Rahmen der Machbarkeitsstudie über neuartige Aufbereitungstechnologien für das Carbonbeton-Recycling in diesem Bereich forschen. Es sind Mörtelversuche mit den im Zuge dieser Arbeit entstandenen rezyklierten Gesteinskörnungen  $< 0,125$  mm angedacht, um herauszufinden, ob die Fasern des Rezyklats eine Armierungswirkung im Mörtel ausbilden können [L10].

Des Weiteren muss zukünftig geklärt werden, inwiefern eine industrielle Nutzung der thermischen und trockenen Mikrowellen-Vorbehandlung für das Recycling von Carbonbeton möglich ist und wie die Ökobilanz dieser Verfahren ausfällt. Als Alternative für eine Vorbehandlung der Carbonbetone kann auch eine zweite Zerkleinerungsstufe für die nichtaufgeschlossenen Carbonfasern in Betracht gezogen werden.

Ferner konnte durch die Analyse der Staubentwicklung bei den Zerkleinerungsversuchen festgestellt werden, dass durch den Prallbrecher eine höhere Staubbelastung entsteht als durch den Backenbrecher. Dennoch können die Arbeitsplatzgrenzwerte auch bei der Zerkleinerung der Carbonbetone im Backenbrecher nicht eingehalten werden. Aus diesem Grund sind Arbeitsschutzmaßnahmen, wie die Absaugung der Stäube aus dem Brechraum und Atemschutzmasken, bei der Zerkleinerung der Carbonbetone dringend erforderlich. Ebenfalls sind diese zwingend notwendig, weil in den Carbonbetonstäuben Faserpartikel von weniger als  $18 \mu\text{m}$  nachgewiesen werden konnten und die Frage nach den gesundheitlichen Folgen des Carbonbetonstaubes noch nicht geklärt ist. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Faserpartikel auch in den gesundheitsschädlichen, lungengängigen Fraktionen  $< 3 \mu\text{m}$  in den Stäuben vorliegen. Daher sollte bei der Eignungsbeurteilung eines Aufbereitungsverfahrens das Kriterium einer geringen Staubentwicklung immer berücksichtigt werden.

Folglich ist bei der Beurteilung der Eignung der Vorbehandlungsverfahren derzeit noch differenziert zu betrachten, worin der Fokus bei der Aufbereitung des Carbonbetons liegen soll. Zusammenfassend konnte diese Arbeit nicht nur die Machbarkeit des Carbonbeton-Recyclings aufzeigen, sondern auch die Schwierigkeiten, die mit diesem einhergehen, sowie den zukünftigen Bedarf an Forschungen im Bereich des Carbonbeton-Recyclings.

## Literaturverzeichnis

- [B1] Bilitewski, Bernd; Härdtle, Georg (2013): Abfallwirtschaft, Handbuch für Praxis und Lehre, 4. Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg
- [B2] BMBF-Abschlussbericht (2016): Grenzflächen – Aufschluss von Verbundbaustoffen durch mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen, Förderkennzeichen: 033R098, Bauhaus-Universität Weimar
- [B3] Bunge, Rainer (2012): Mechanische Aufbereitung – Primär- und Sekundärrohstoffe, 1. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim
- [C1] Curbach, Manfred; Assmann, Ulrich (2018): Die Zukunft des Bauens mitgestalten, in: Tagungsband der 10. Carbon- und Textilbetontage, Dresden, S. 9
- [D1] Debus, Frank; Kintsel, Nadja (2009): Mikrowellenerwärmung – eine innovative Erwärmungs- und Trocknungsmethode, in: Elektrowärme international, Heft 4, S. 271 – 273
- [D2] Dittrich, Sebastian; et al. (2016): Das Verbundprojekt BauCycle – Von feinkörnigem Bauabbruch zu funktionalen Baumaterialien und Bauteilen, in: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, Band 3, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 455 – 463
- [G1] Giebel, Elisabeth (2016): Das zweite Leben der Carbonfaser – Recycling faserverstärkter Kunststoffe in Verbundbauteilen, in: Carbon Composites e.V. (Hrsg.), Carbon Composites Magazin – Jahresthema Recycling, S. 17
- [H1] Hans, Svea (2017): Vergleichende Untersuchungen zur Staubentwicklung bei der Aufbereitung unterschiedlicher Baustoffe, Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar
- [H2] Hengstermann, Martin (2016): Überblick I – Standortbestimmung beim Recycling von Carbonfasern, in: Carbon Composites e.V. (Hrsg.), Carbon Composites Magazin – Jahresthema Recycling, S. 6 – 7

- [H2] Hillemann, Lars (2018): V1.3 & 3.2 Partikelemissionen aus dem Trennen von Carbonbeton, in: Tagungsband der 10. Carbon- und Textilbetontage, Dresden, S. 82 – 83
- [J1] Jeschke, Hagen (2006): Massenstromzerkleinerung von Beton im Prallbrecher, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [K1] Kakikazi, M.; Harada, M. (1988): Study of a method for crushing concrete with microwave energy, in: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Chapman & Hall, London, S. 290-299
- [K2] Kirsten, Martin; Freudenberg, Christiane; Cherif, Chokri (2015): Carbonfasern, der Werkstoff des 21. Jahrhunderts, in: Beton- und Stahlbetonbau Spezial, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 8 – 15
- [K3] Kortmann, Jan (2018): Quartalsbericht Q9 – C<sup>3</sup>-V1.5 Abbruch, Rückbau und Recycling von C<sup>3</sup>-Bauteilen, Forschungsprojekt: Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite, Technische Universität Dresden
- [K4] Kortmann, Jan (2018): V1.5 Abbruch, Rückbau und Recycling von C<sup>3</sup>-Bauteilen, in: Tagungsband der 10. Carbon- und Textilbetontage, Dresden, S. 84 – 85
- [K5] Kopf, Florian; Kortmann, Jan (2018): Großtechnische Umsetzung von Abbruch-, Rückbau- und Recyclingversuchen an Carbonbetonbauteilen, in: Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen – Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb, Bauverfahrenstechnik, Braunschweig, S. 162 - 169
- [K6] Kreibe, Siegfried (2016): MAI Carbon Nachhaltigkeit – Recycling carbonfaserverstärkter Kunststoffe (CFK), Fachtagung „Innovative Materialien und Arbeitsschutz“, DASA Dortmund
- [K7] Kreislaufwirtschaft Bau (2017): Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2014, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014, Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.), Berlin

- [K8] Kühnel, Michael; Sauer, Michael (2017): Der globale CF- und CC-Markt, in: Composites-Marktbericht 2017, Marktentwicklung, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, S. 26 - 52
- [L1] Landmann, Mirko; Müller, Anette; Palzer, Ulrich (2015): Potentiale der Kreislaufwirtschaft im Mauerwerksbau – Herausforderungen für die Aufbereitungstechnik, in: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, Band 2, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 681 - 706
- [L2] Lieboldt, Matthias (2015): Feinbetonmatrix für Textilbeton, in: Beton- und Stahlbetonbau Spezial, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 22 – 28
- [L3] Limburg, Marco; Quicker, Peter (2016): Entsorgung von Carbonfasern – Probleme des Recyclings und Auswirkungen auf die Abfallverbrennung, in: Karl J. Thomé-Kozmiensky; Michael Beckmann (Hrsg.), Energie aus Abfall, Band 13, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 135 - 144
- [L4] Linß, Elske (2018): Machbarkeitsstudie: Neuartige Aufbereitungsverfahren für das Carbonbetonrecycling, Ergebnisbericht Stand Q2/2018, Vorhaben C<sup>3</sup>-V-I.15, Forschungsprojekt: Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite
- [L5] Linß, Elske (2017): Baustoffrecycling – Wiederverwendung von Betonbruch, Vorlesungsskript, Bauhaus-Universität Weimar
- [L6] Linß, Elske (2016): Sensorgestützte Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen, Fachtagung Recycling R'16
- [L7] Linß, Elske (2014): Sensorgestützte Sortierung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle mit hyperspektraler Nahinfrarot-Sensorik, in: Jahrestagung „Aufbereitung und Recycling“ 12./ 13.11.2014, S.40
- [L8] Linß, Elske (2008): Untersuchungen zur Leistungsschallimpulszerkleinerung für die selektive Aufbereitung von Beton, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar

- [L9] Ludwig, Horst-Michael; Müller, Matthias (2017): Optimierung des Verbundverhaltens von Carbonbeton – Alternative Bindemittel und modifizierte Faseroberflächen, Ergebnisbericht Stand Q4/2017, Vorhaben V4.4, Forschungsprojekt: Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite
- [L10] Ludwig, Horst-Michael (2017): Machbarkeitsstudie: Neuartige Aufbereitungsverfahren für das Carbonbetonrecycling, Vorhabenbeschreibung C3-V-I.15 der Bauhaus-Universität Weimar, Forschungsprojekt: Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite
- [M1] Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- [M2] Meiners, Dieter; Eversmann, Bertram (2014): Recycling von Carbonfasern, in: Karl J. Thomé-Kozmiensky; Daniel Goldmann (Hrsg.), Recycling und Rohstoffe, Band 7, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 371 – 378
- [M3] Menz, Verena (2017): Innovatives Carbonfaser-Recycling, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), Osnabrück
- [M4] Möhring, Ralf; et. al (2016): Baustoffkenntnis, 18. Auflage, Bundesanzeiger Verlag, Köln
- [N1] Noguchi, T. (2009): Advanced Technologies of Concrete Recycling in Japan, in: International Rilem Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, São Paulo
- [O1] Orzol, Carsten H. M.; et al. (2017): Voruntersuchungen zur elektrohydraulischen Zerkleinerung von CFRP für das Carbonfaser-Recycling, in: Chemie Ingenieur Technik, Band 89, Nr. 12, Wiley-VHC, Weinheim, S. 1773 – 1781
- [Q1] Quicker, Peter (2016): Carbonfasern, ITAD Podiumsdiskussion: Wohin mit den High-Tech-Materialien – Entsorgung CFK-haltiger Abfälle 25, München
- [S1] Scheerer, Silke (2015): Was ist Textilbeton?, in: Beton- und Stahlbetonbau Spezial, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 4 – 6

- [S2] Schneider, Kai (2016): Basisvorhaben B2: Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft, Matrix-Datenblatt C3-B2-NF-1-150-8, Forschungsprojekt: Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite
- [S3] Schneider, Kai (2016): Basisvorhaben B2: Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft, Matrix-Datenblatt C3-B2-HF-2-145-5, Forschungsprojekt: Zwanzig20 – C<sup>3</sup> Carbon Concrete Composite
- [S4] Seifert, Severin; Thome, Volker; Karlsletter, Christof (2014): Elektrodynamische Fragmentierung – Eine Technologie zur effektiven Aufbereitung von Abfallströmen, in: Karl J. Thomé-Kozmiensky; Daniel Goldmann (Hrsg.), Recycling und Rohstoffe, Band 7, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 431 – 438
- [S5] Shima, Hirokazu; et al. (2005): An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis, in: Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 3, No. 1, S. 53 – 67
- [S6] Streibel, Thorsten (2017): V1.3 Effekte auf die menschliche Gesundheit bei mechanischer Bearbeitung von Carbonbeton, in: Tagungsband der 9. Carbon- und Textilbetontage, Dresden, S. 92 – 93
- [S7] Sui, Yuwu (2011): Untersuchungen zu den Einflussgrößen der thermisch-mechanischen Behandlung für das Recycling von Altbeton sowie Charakterisierung der entstehenden Produkte, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar
- [V1] Vegas, Iñigo; et al. (2015): Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology, in: Construction and Building Materials, Band 75, Elsevier Ltd., S. 121 – 128
- [V2] V.Fraas Solutions in Textile GmbH (2017): Datenblatt: SITgrid 040
- [W1] Weimann, Karin (2008): Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar
- [W2] Wolf, Kathrin; Merkel, Andreas (2014): Spinnverfahren für recycelte Carbonfasern – Phase 1, Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, Förderkennzeichen: 29910, Dietenheim

- [Y1] Yasunaka, Hideo; et al. (1987): Microwave decontaminator for concrete surface decontamination in JPDR, in: Proceedings of the 1987 International Decommissioning Symposium, Pittsburgh, S. 120 - 127
- [Y2] Younes, Ayham; et al. (2015) : Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile, in: Beton- und Stahlbetonbau Spezial, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 16 – 21

**Internetquellen:**

- [I] Textilbeton – leicht, tragfähig und nachhaltig, in: [www.beton.org](http://www.beton.org),  
URL: <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/textilbeton/>  
(letzter Abruf: 27.09.2018)
- [II] Brechtechnik, in: [www.kleemann.info/de](http://www.kleemann.info/de),  
URL: <https://www.kleemann.info/de/technologien/brechtechnik/>  
(letzter Abruf: 05.10.2018)
- [III] Mikrowellenerwärmung, in: [www.linn.de](http://www.linn.de),  
URL: <https://www.linn-high-therm.de/de/ueber-uns/download/kataloge.html>  
(letzter Abruf: 10.10.2018)
- [IV] CFK Recycling Center, in: [www.cfk-recycling.de](http://www.cfk-recycling.de), Stand: 19.03.2014,  
URL: <https://www.cfk-recycling.de/index.php?id=6>  
(letzter Abruf: 14.10.2018)
- [V] Feinstaub, in: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de), Stand: 05.01.2018  
URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub>  
(letzter Abruf: 24.10.2018)
- [VI] Windsichter WSS: diagonaler Windsichter, in: [www.nihot.de](http://www.nihot.de)  
URL: <http://www.nihot.de/produkte/windsichter/wss-diagonaler-windsichter/>  
(letzter Abruf: 30.10.2018)

- [VII] Makro-Elementaranalysator multi EA 4000, in: [www.analytik-jena.de](http://www.analytik-jena.de),  
Stand: 28.04.2010  
URL: [https://www.analytik-jena.de/fileadmin/content/pdf\\_analytical\\_instrumentation/alle\\_technischen\\_Daten/td\\_multEA4000\\_Internet\\_d.pdf](https://www.analytik-jena.de/fileadmin/content/pdf_analytical_instrumentation/alle_technischen_Daten/td_multEA4000_Internet_d.pdf)  
(letzter Abruf: 23.11.2018)

**Richtlinien und Normen:**

- [01] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV), 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465)
- [02] DIN 4226-101: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, August 2017
- [03] DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton, Juli 2015
- [04] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206, August 2014
- [05] DAfStb-Richtlinie: Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, September 2010
- [06] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808)
- [07] Technische Regeln für Gefahrstoffe – TRGS 905, März 2016, zuletzt geändert am 02.05.2018
- [08] DIN EN 15936: Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall – Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung, November 2012

- [09] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte – TRGS 900, Januar 2006, zuletzt geändert am 07.06.2018
  
- [10] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, September 2013
  
- [11] DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung, April 2011

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Weltweiter Carbonfaser- Bedarf für Verbundwerkstoffe in Tsd. Tonnen nach Anwendungsgebieten (Stand: 09/2017) [K8] .....	3
<b>Abbildung 2:</b> Spannungsverteilung im Filamentgarn, links ohne Imprägnierung, rechts vollständige Beschichtungsimprägnierung [Y2] .....	4
<b>Abbildung 3:</b> Bi- (links) und multiaxiales (rechts) Bewehrungsgelege aus Carbon [Y2]....	5
<b>Abbildung 4:</b> Funktionsprinzip eines Backenbrechers [II].....	10
<b>Abbildung 5:</b> Funktionsprinzip eines Prallbrechers [II] .....	11
<b>Abbildung 6:</b> Elektrische Durchschlagsfestigkeit von verschiedenen Materialien in Abhängigkeit von der Pulsdauer der Entladung [S4].....	12
<b>Abbildung 7:</b> Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung eines Verbundwerkstoffes [S4] .....	13
<b>Abbildung 8:</b> REM-Aufnahmen der getrockneten (a) bzw. mit Leitungswasser gespülten (b) freien Komponenten [O1].....	14
<b>Abbildung 9:</b> Funktionsweise eines Windsichters in diagonaler Bauweise [VI].....	17
<b>Abbildung 10:</b> Funktionsweise der sensorgestützten Sortierung am Beispiel der Einzelkornsortierung mittels nahinfraroter Sensorik [L1].....	18
<b>Abbildung 11:</b> Grundaufbau einer Setzmaschine ohne (links) und mit Graupenbett ‚G‘ (rechts) [W1].....	20
<b>Abbildung 12:</b> Rezyklierte Carbonfasern nach dem Pyrolyseprozess (links) [K6], Fiberballs (rechts) [M3].....	22
<b>Abbildung 13:</b> Faservlies (links) [L3], Garn aus recycelten Carbonfasern und Polyamidfasern (rechts) [G1].....	22
<b>Abbildung 14:</b> Einstufung rezyklierter Gesteinskörnung in 0 %, 50 % und 100 % Aufschlussgrad.....	32
<b>Abbildung 15:</b> Carbonbewehrung A vor (links) und nach (rechts) dem Glühverlust-Versuch.....	34

<b>Abbildung 16:</b> Carbonbewehrung B vor (links) und nach (rechts) dem Glühverlust-Versuch.....	34
<b>Abbildung 17:</b> Leere Balkenschalung mit mittig eingebrachter Carbonbewehrung (links), mit normalfestem Beton gefüllte Balkenschalung (rechts) .....	38
<b>Abbildung 18:</b> Ausgeschalter normalfester Carbonbetonbalken.....	38
<b>Abbildung 19:</b> Lage der Carbonbewehrung in den gesägten Probekörpern.....	39
<b>Abbildung 20:</b> Druckfestigkeitsentwicklung der beiden Carbonbeton-Varianten.....	40
<b>Abbildung 21:</b> HF/B-Rezyklat aus dem Prall- (links) und Backenbrecher (rechts) .....	41
<b>Abbildung 22:</b> Rissbildung an den thermisch vorbehandelten Probekörpern NF/A (links) und NF/B (rechts) .....	42
<b>Abbildung 23:</b> Rissbildung an den thermisch vorbehandelten Probekörpern HF/A (links) und HF/B (rechts) .....	42
<b>Abbildung 24:</b> Mikrowellenkammerofen (links), Versuchsaufbau innerhalb des Kammerofens (rechts).....	43
<b>Abbildung 25:</b> Nach Mikrowellen-Vorbehandlung explodierter Probekörper NF/A*-umgebungsfeucht.....	43
<b>Abbildung 26:</b> Rissverlauf der quadratischen Seitenfläche des Probekörpers NF/B - umgebungsfeucht (links) und als Nahaufnahme (rechts) .....	44
<b>Abbildung 27:</b> Rissverlauf der rechteckigen Seitenfläche des Probekörpers NF/B - umgebungsfeucht (links) und als Nahaufnahme (rechts) .....	45
<b>Abbildung 28:</b> Rissverlauf der quadratischen Seitenfläche des Probekörpers HF/A - trocken (links) und als Nahaufnahme (rechts) .....	45
<b>Abbildung 29:</b> Rissverlauf der rechteckigen Seitenfläche des Probekörpers HF/A - trocken (links) und als Nahaufnahme (rechts) .....	45
<b>Abbildung 30:</b> Position des mobilen Staubmessgerätes am Prall- (links) und Backenbrecher (rechts) .....	46
<b>Abbildung 31:</b> Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Prallbrecher ohne Vorbehandlung.....	49
<b>Abbildung 32:</b> Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Backenbrecher ohne Vorbehandlung .....	49

<b>Abbildung 33:</b> Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Backenbrecher mit thermischer Vorbehandlung.....	50
<b>Abbildung 34:</b> Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Backenbrecher mit trockener MW-Vorbehandlung.....	50
<b>Abbildung 35:</b> Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate NF/A*, NF/A, NF/B, HF/A und HF/B; Zerkleinerung im Backenbrecher mit umgebungsfeuchter MW-VB.....	51
<b>Abbildung 36:</b> Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/A mit dem Prallbrecher.....	52
<b>Abbildung 37:</b> Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/B mit dem Prallbrecher.....	53
<b>Abbildung 38:</b> Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/A mit dem Prallbrecher.....	53
<b>Abbildung 39:</b> Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/B mit dem Prallbrecher.....	53
<b>Abbildung 40:</b> Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/A mit dem Backenbrecher.....	54
<b>Abbildung 41:</b> Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons NF/B mit dem Backenbrecher.....	54
<b>Abbildung 42:</b> Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/A mit dem Backenbrecher.....	54
<b>Abbildung 43:</b> Massenstrom der Zerkleinerung des Carbonbetons HF/B mit dem Backenbrecher.....	54
<b>Abbildung 44:</b> Fasern im nicht vorbehandelten Carbonbeton-Rezyklat HF/B-BB der Fraktion 1/2 mm (links), 2/4 mm (mittig) und 16/31,5 mm (rechts).....	57
<b>Abbildung 45:</b> PM10-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Prallbrecher.....	58
<b>Abbildung 46:</b> PM2,5-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Prallbrecher.....	59
<b>Abbildung 47:</b> PM10-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Backenbrecher.....	59

<b>Abbildung 48:</b> PM <sub>2,5</sub> -Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Backenbrecher.....	60
<b>Abbildung 49:</b> Carbonfasern (links) und Bindfäden (rechts) im Carbonbetonstaub NF/B-BB-keine VB.....	61
<b>Abbildung 50:</b> Korngrößenverteilung der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers.....	63
<b>Abbildung 51:</b> Wasseraufnahme der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers .....	64
<b>Abbildung 52:</b> Rohdichte der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers .....	65
<b>Abbildung 53:</b> Anteil zementsteinfreier Partikel in den Carbonbeton-Rezyklaten ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers.....	65
<b>Abbildung 54:</b> Aufschluss der Carbonbewehrung der Fraktion 16/31,5 mm des Carbonbetons HF/B ohne Vorbehandlung mit dem Prall- (links) und Backenbrecher (rechts).....	66
<b>Abbildung 55:</b> Mittleres Seitenverhältnis der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers.....	67
<b>Abbildung 56:</b> Mittlere Zirkularität der Carbonbeton-Rezyklate ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers .....	67
<b>Abbildung 57:</b> Rohdichten der normalfesten Carbonbeton-Rezyklate mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten.....	68
<b>Abbildung 58:</b> Rohdichten der hochfesten Carbonbeton-Rezyklate mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten .....	69
<b>Abbildung 59:</b> Wasseraufnahmen der normalfesten Carbonbeton-Rezyklate mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten.....	69
<b>Abbildung 60:</b> Wasseraufnahmen der hochfesten Carbonbeton-Rezyklate mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten.....	70
<b>Abbildung 61:</b> Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate NF/A mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten.....	70
<b>Abbildung 62:</b> Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate NF/B mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten.....	71

<b>Abbildung 63:</b> Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate HF/A mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten.....	71
<b>Abbildung 64:</b> Korngrößenverteilungen der Carbonbeton-Rezyklate HF/B mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten.....	71
<b>Abbildung 65:</b> Mittleres Seitenverhältnis der Carbonbeton-Rezyklate mit Vorbehandlung des Backenbrechers.....	72
<b>Abbildung 66:</b> Mittlere Zirkularität der Carbonbeton-Rezyklate mit Vorbehandlung des Backenbrechers .....	72
<b>Abbildung 67:</b> 100 % Aufschlussgrad der Carbonbeton-Rezyklate aus dem Backenbrecher mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten .....	74
<b>Abbildung 68:</b> Aufschluss der Carbonbewehrung der Fraktion 16/31,5 mm des Carbonbetons HF/A ohne (links) und mit thermischer Vorbehandlung (rechts).....	75
<b>Abbildung 69:</b> Aufschluss der Carbonbewehrung der Fraktion 16/31,5 mm des trockenen (links) und umgebungsfeuchten (rechts) Carbonbetons HF/A mit Mikrowellen-Vorbehandlung.....	75
<b>Abbildung 70:</b> Fasergehalte der Carbonbeton-Rezyklate aus dem Backenbrecher mit unterschiedlichen Vorbehandlungsarten bestimmt über den TOC-Gehalt .....	77
<b>Abbildung 71:</b> PM10-Konzentrationen im Vergleich für die Zerkleinerung normalfester Carbonbetone und Normalbeton im Prall- und Backenbrecher .....	78
<b>Abbildung 72:</b> PM10-Konzentrationen im Vergleich für die Zerkleinerung hochfester Carbonbetone im Prall- und Backenbrecher.....	78
<b>Abbildung 73:</b> PM2,5-Konzentrationen im Vergleich für die Zerkleinerung normalfester Carbonbetone und Normalbetone im Prall- und Backenbrecher .....	79
<b>Abbildung 74:</b> PM2,5-Konzentrationen im Vergleich für die Zerkleinerung hochfester Carbonbetone im Prall- und Backenbrecher.....	80
<b>Abbildung 75:</b> Stereomikroskopaufnahmen des Carbonbetonstaubes NF/A durch den Prall- (links) und Backenbrecher (rechts).....	81
<b>Abbildung 76:</b> Vermessung einer Carbonfaser im Carbonstaub NF/B des Backenbrechers .....	81
<b>Abbildung 77:</b> Fasergehalt der Carbonbetonstäube NF/A und NF/B vergleichend ermittelt über den TOC-Gehalt und mit dem Morphologi.....	82

<b>Abbildung 78:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/A ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers.....	110
<b>Abbildung 79:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/B ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers.....	110
<b>Abbildung 80:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/A ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers.....	111
<b>Abbildung 81:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/B ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers.....	111
<b>Abbildung 82:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/A mit thermischer Vorbehandlung des Backenbrechers.....	111
<b>Abbildung 83:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/B mit thermischer Vorbehandlung des Backenbrechers.....	112
<b>Abbildung 84:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/A mit thermischer Vorbehandlung des Backenbrechers.....	112
<b>Abbildung 85:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/B mit thermischer Vorbehandlung des Backenbrechers.....	112
<b>Abbildung 86:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/A mit trockener Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers.....	113
<b>Abbildung 87:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/A mit umgebungsfeuchter Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers.....	113
<b>Abbildung 88:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/B mit Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers.....	114
<b>Abbildung 89:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/A mit Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers.....	114
<b>Abbildung 90:</b> Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/B mit Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers.....	114

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Vergleich textilphysikalischer Eigenschaften von Baustahl, AR-Glas-, Basalt- und Carbonfasern [I, K2] .....	6
<b>Tabelle 2:</b> Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von Beton bei der thermischen Behandlung [S7].....	15
<b>Tabelle 3:</b> Regelanforderungen für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Beton [04].....	24
<b>Tabelle 4:</b> Übersicht über die hergestellten Carbonbeton-Varianten und deren Bezeichnung .....	29
<b>Tabelle 5:</b> Versuchsplan .....	30
<b>Tabelle 6:</b> Verwendete Ausgangsmaterialien und Rezeptur der normalfesten Carbonbeton-Variante C3-B2-NF-1-150-8 [S2].....	39
<b>Tabelle 7:</b> Verwendete Ausgangsmaterialien und Rezeptur der hochfesten Carbonbeton-Variante C3-B2-HF-2-145-5 [S3] .....	39
<b>Tabelle 8:</b> Frisch- und Festbetoneigenschaften der hergestellten Carbonbeton-Varianten .....	40
<b>Tabelle 9:</b> Übersicht über die erreichten Temperaturen der Probekörper bei der Mikrowellen-Vorbehandlung .....	44
<b>Tabelle 10:</b> Gliederung der Versuchsergebnisse .....	47
<b>Tabelle 11:</b> Rohdichten und Wasseraufnahmen der Carbonbeton-Rezyklate .....	48
<b>Tabelle 12:</b> Beschreibung der Kornform durch das Seitenverhältnis und die Zirkularität .	51
<b>Tabelle 13:</b> Mittleres Seitenverhältnis und mittlere Zirkularität der Carbonbeton-Rezyklate .....	52
<b>Tabelle 14:</b> Kohlenstoff- und Fasergehalte der Carbonbeton-Rezyklate aus dem Backenbrecher .....	56
<b>Tabelle 15:</b> Vergleich der Fasergehalte (TOC und Morphologi G3) des Carbonbeton-Rezyklats HF/B - keine VB - BB .....	57

<b>Tabelle 16:</b> PM10-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung der Carbonbetone im Prall- und Backenbrecher .....	60
<b>Tabelle 17:</b> PM2,5-Konzentration der Raumluft im Aufbereitungstechnikum bei der Zerkleinerung von Carbonbeton im Prall- und Backenbrecher.....	61
<b>Tabelle 18:</b> Fasergehalte der Carbonbeton-Stäube NF/A - und NF/B – keine VB - BB ...	62
<b>Tabelle 19:</b> Vergleich der Massenanteile der Carbonbeton-Rezyklate 0/2 mm ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers.....	64
<b>Tabelle 20:</b> Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B - ohne Vorbehandlung - Prallbrecher.....	115
<b>Tabelle 21:</b> Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B - ohne Vorbehandlung - Prallbrecher.....	116
<b>Tabelle 22:</b> Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B - ohne Vorbehandlung - Backenbrecher .....	117
<b>Tabelle 23:</b> Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B - ohne Vorbehandlung - Backenbrecher .....	118
<b>Tabelle 24:</b> Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B - thermische Vorbehandlung - Backenbrecher .....	119
<b>Tabelle 25:</b> Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B - thermische Vorbehandlung - Backenbrecher .....	120
<b>Tabelle 26:</b> Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B – trockene MW-Vorbehandlung - Backenbrecher .....	121
<b>Tabelle 27:</b> Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B – trockene MW-Vorbehandlung - Backenbrecher .....	122
<b>Tabelle 28:</b> Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B – umgebungsfeuchte MW-VB - Backenbrecher .....	123
<b>Tabelle 29:</b> Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B – umgebungsfeuchte MW-VB - Backenbrecher .....	124
<b>Tabelle 30:</b> Bilderreihe des Rezyklats NF/A* – umgebungsfeuchte MW-VB - Backenbrecher .....	125

# Anhang

**Anhang 1**

*Kapitel 3.1.3 Analysemethoden zur Bestimmung des Fasergehaltes im Rezyklat*

Versuchsbericht zur Bestimmung des Fasergehaltes über die Thermoanalyse:

Bauhaus-Universität Weimar, Dr.-Ing. Jens Schneider

Bestimmung des oxidierbaren Kohlenstoffs eines Recyclingbetons mittels TG-MS-PulseTA  
 Dr.-Ing. Jens Schneider, Professur Bauchemie und Polymere Werkstoffe, Bauhaus-Universität Weimar

**Messungen**

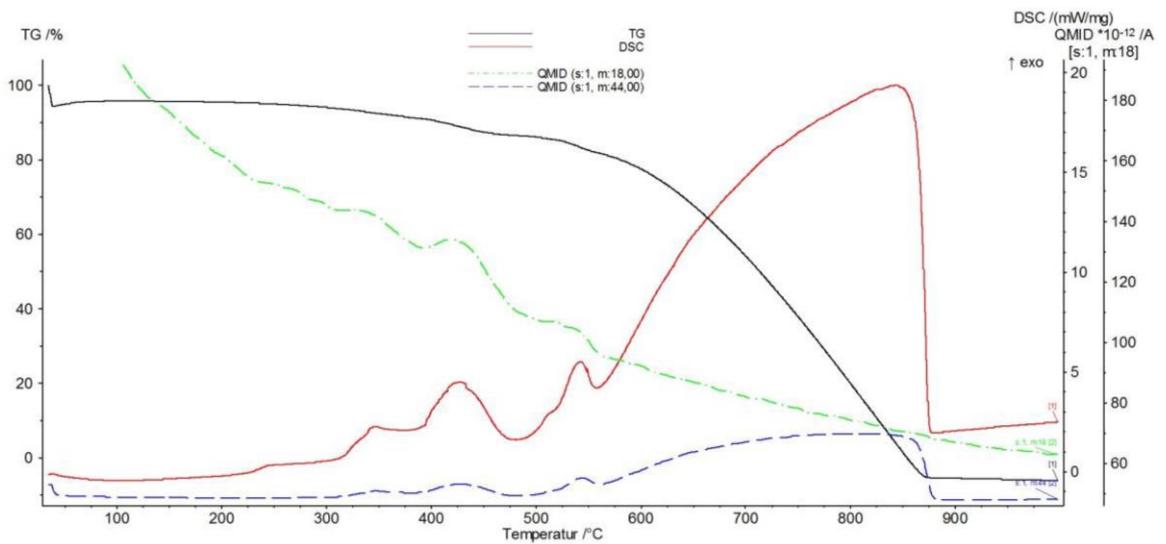


Abb. 1: Messung der C-Fasern ohne Beschichtung

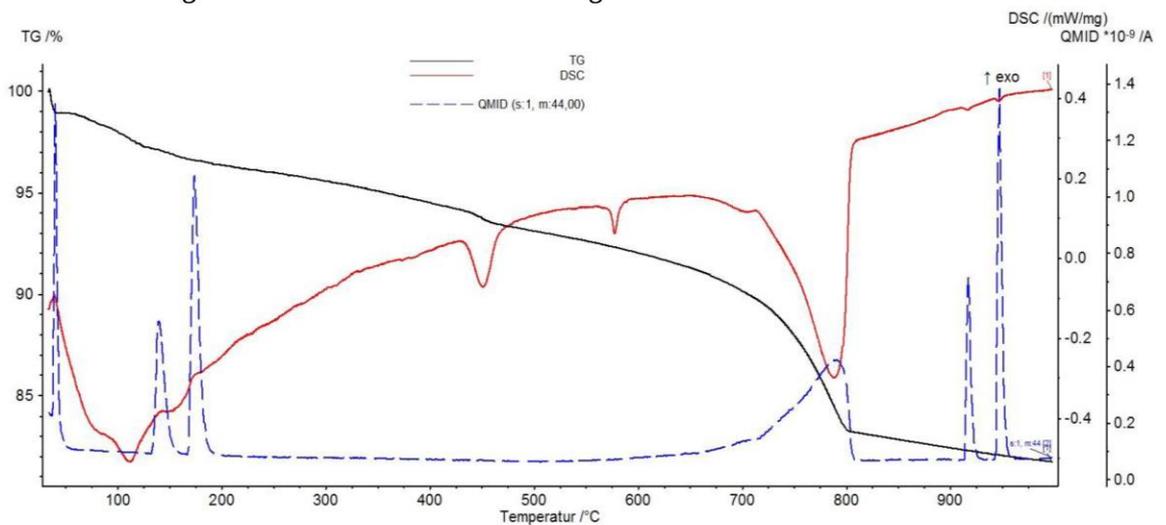


Abb. 2: Messung Beton mit Fasern unter synthetischer Luft

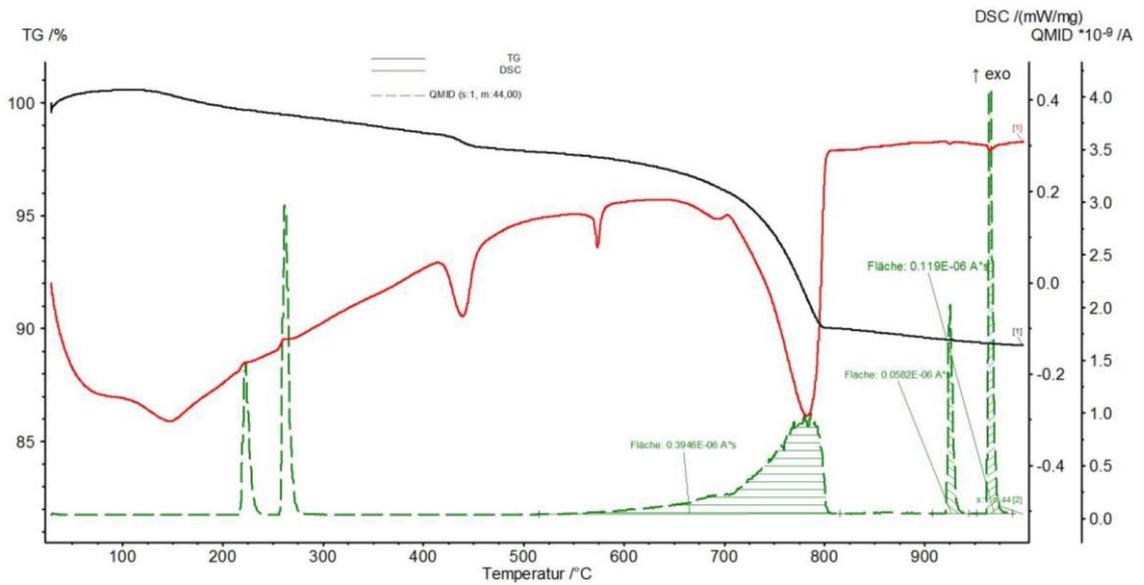
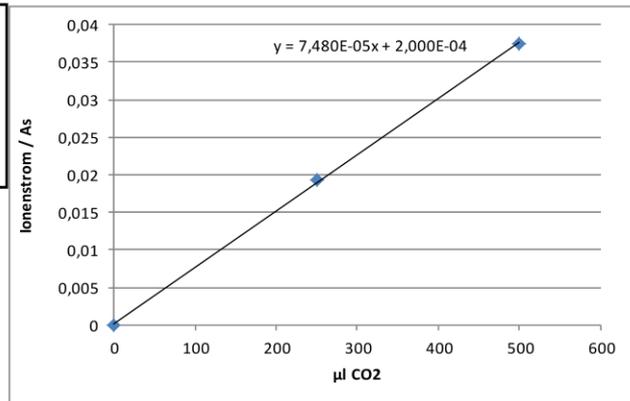


Abb. 3: Messung Beton mit Fasern unter Argon

### Auswertung der Messungen

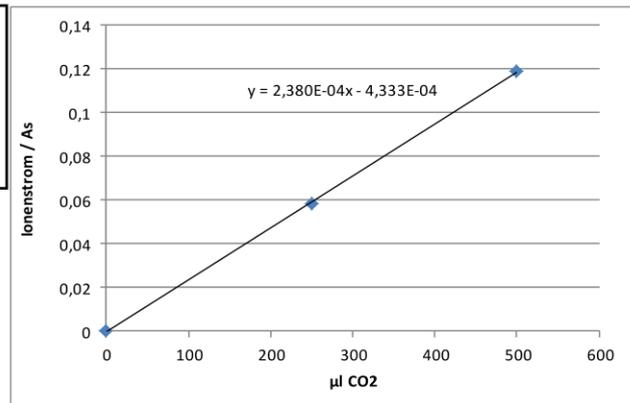
#### Messung mit Sauerstoff

Kalibration		Probe	44,3 mg
$\mu\text{l}$	$10^{-6}$ As	a	$7,48\text{E-}05$ As/ $\mu\text{l}$
0	0	b	$2,00\text{E-}04$ As
250	0,0193	gem.	0,1463 As
500	0,0374		
		ber. Vol.	1953,2 $\mu\text{l}$ CO <sub>2</sub>
		bez. Vol.	44,09 $\mu\text{l}/\text{mg}$



#### Messung ohne Sauerstoff unter Argon

Kalibration		Probe	41,7 mg
$\mu\text{l}$	$10^{-6}$ As	a	$2,38\text{E-}04$ As/ $\mu\text{l}$
0	0	b	$4,33\text{E-}04$ As
250	0,0582	gem	0,395 As
500	0,119		
		ber. Vol.	1657,8 $\mu\text{l}$ CO <sub>2</sub>
		bez. Vol.	39,76 $\mu\text{l}/\text{mg}$



#### Berechnung

Differenz	4,33 $\mu\text{l}/\text{mg}$
Stoffmenge	0,000172614 mmol/mg
Masse	0,007595038 mgCO <sub>2</sub> /mg
	<b>0,76 %CO<sub>2</sub></b>
	<b>0,21 % C</b>

C+O<sub>2</sub>-->CO<sub>2</sub>  
12/44=0,273

Die Fasern verbrennen erst bei 880°C vollständig. Daher koinzidiert der CO<sub>2</sub> Peak der Decarbonatisierung mit dem der Faserersetzung nahezu vollständig. Das CO<sub>2</sub>-Signal der Faserersetzung überlagert sich zu 50% mit dem der Decarbonatisierung. Auf den ersten Blick deutet nichts auf das Vorhandensein residualer C-Fasern hin. Es wurde ein Versuch unternommen, den Gehalt an oxidierbarem Kohlenstoff über eine Differenzrechnung zu ermitteln. Dabei wurde die Probe zweimal, unter Schutzgas Ar bzw. unter synthetischer Luft (80 % Ar, 20 % O<sub>2</sub>), gemessen. Es wurden jeweils zwei CO<sub>2</sub> Kalibrationspulse von 250 µl bzw. 500 µl eingebracht, anhand derer die Kalibrationsfaktoren a und b ermittelt wurden. Die Flächen unter dem großen CO<sub>2</sub>-Peak zwischen 500°C und 810°C wurden voneinander abgezogen und über die Differenz der oxidierbare C-Gehalt ermittelt. Dieser ist sehr gering und wahrscheinlich\* im Fehlerbereich der Methode.

\*Es liegen noch zu wenig Erfahrungen mit dieser Methode vor

**Anhang 2**

*Kapitel 3.1.3 Analysemethoden zur Bestimmung des Fasergehaltes im Rezyklat*

Versuchsbericht zur Bestimmung des Fasergehaltes über den TOC-Gehalts:

MFPA Weimar, Dr.-Ing. Dennys Dressel

Carbonfasern:

	C (TC)	C (TIC)	C (TOC)
Probe „A“	95,4 %	< 0,01	95,4 %
Probe „B“	91,9 %	< 0,01	91,9 %

Heisst: Die reinen Fasern bestehen erwartungsgemäß fast ausschließlich aus Kohlenstoff (95 % bzw. 92 %) Anorganischer Kohlenstoff ist nicht enthalten, ebenfalls erwartungsgemäß. Dass hier nicht 100 % stehen liegt an einem geringen Verbrennungsrückstand im Ofen des Elementaranalysators. Ob hier die Verbrennung nicht vollständig ist, oder hier z. B. eine Schlichte der Fasern zurückbleibt ist an dieser Stelle offen. Messbar ist das Material in jedem Fall.

Betonmehle:

	C (TC)	C (TIC)	C (TOC)
NF/A-2 Vers. 1 BB0/0,125 mit Fasern	2,16 %	1,06 %	1,10 %
NF/A ohne Fasern	1,43 %	1,07 %	0,36 %

Das Betonmehl ohne Fasern hat einen natürlichen TOC-Hintergrund (0,36 %). Dies ist typisch und stammt aus Betonzusatzmittel und weiteren Aufgangsstoffen.

Das Betonmehl mit Fasern hat – zum Glück – einen deutlich höheren TOC-Gehalt. Die Differenz aus 1,10 % und 0,36 % könnte man also einem Fasergehalt des Betons zuordnen und ich denke das war ihre ursprüngliche Motivation.

Berechnung Standardabweichung:

	Probe	Einzelmessung	Mittelwert	Standardabweichung
<b>TC [%]</b>	NF/A -Referenz-	1,43	1,42	0,01
		1,41		
<b>TIC [%]</b>		1,10	1,07	0,05
		1,03		
<b>TC [%]</b>	A	96,00	95,45	0,78
		94,90		
<b>TC [%]</b>	B	92,60	91,95	0,92
		91,30		

**Anhang 3***Kapitel 3.4.1 Versuchsergebnisse zur Aufbereitungsqualität der Rezyklate*

Kornformanalyse der Rezyklat-Fractionen von 2/4 mm bis &gt; 31,5 mm:

Mittleres Seitenverhältnis (Länge/Breite):

Vorbehandlung -Brechertyp-	Beton/Gelege	mittleres Seitenverhältnis				
		2/4	4/8	8/16	16/31,5	>31,5
keine -PB-	NF/A	2,42	2,97	2,05	2,01	1,64
	NF/B	2,25	2,56	1,72	1,84	1,83
	HF/A	2,26	3,03	2,07	1,61	1,80
	HF/B	1,92	2,26	2,01	2,17	2,38
keine -BB-	NF/A	2,35	2,65	1,96	1,76	-
	NF/B	2,35	2,66	2,15	1,88	-
	HF/A	2,75	2,66	1,75	2,05	-
	HF/B	2,72	2,68	2,16	2,40	-
thermische -BB-	NF/A	1,64	2,89	1,74	2,20	-
	NF/B	2,02	2,32	2,09	2,48	-
	HF/A	2,19	1,95	1,90	1,75	-
	HF/B	2,12	1,97	1,86	2,30	-
trockene MW -BB-	NF/A	2,23	3,45	1,74	1,96	-
	NF/B	1,97	2,72	2,00	1,76	-
	HF/A	2,97	3,16	2,09	2,11	-
	HF/B	2,29	2,07	2,07	2,11	-
umgebungsfeuchte MW -BB-	NF/A*	2,20	1,62	1,55	2,43	-
	NF/A	2,46	2,98	1,70	1,83	-
	NF/B	1,83	1,72	1,95	1,90	-
	HF/A	3,00	3,03	2,00	1,52	-
	HF/B	2,46	2,70	1,74	2,01	-

\*Probekörper wurde bis zur Explosion mit Mikrowellen behandelt

Mittlere Zirkularität:

Vorbehandlung -Brechertyp-	Beton/Gelege	mittlere Zirkularität				
		2/4	4/8	8/16	16/31,5	>31,5
keine -PB-	NF/A	0,76	0,73	0,81	0,81	0,81
	NF/B	0,78	0,77	0,82	0,81	0,82
	HF/A	0,78	0,75	0,81	0,82	0,81
	HF/B	0,79	0,78	0,81	0,80	0,79
keine -BB-	NF/A	0,77	0,76	0,81	0,82	-
	NF/B	0,77	0,76	0,80	0,81	-
	HF/A	0,75	0,75	0,81	0,81	-
	HF/B	0,75	0,75	0,80	0,79	-
thermische -BB-	NF/A	0,82	0,76	0,82	0,80	-
	NF/B	0,80	0,78	0,81	0,80	-
	HF/A	0,79	0,80	0,82	0,81	-
	HF/B	0,79	0,80	0,82	0,80	-
trockene MW -BB-	NF/A	0,78	0,71	0,82	0,81	-
	NF/B	0,79	0,75	0,81	0,81	-
	HF/A	0,74	0,72	0,80	0,80	-
	HF/B	0,77	0,79	0,80	0,80	-
umgebungsfeuchte MW -BB-	NF/A*	0,78	0,84	0,83	0,80	-
	NF/A	0,77	0,74	0,82	0,82	-
	NF/B	0,80	0,81	0,81	0,81	-
	HF/A	0,73	0,74	0,80	0,81	-
	HF/B	0,76	0,76	0,82	0,81	-

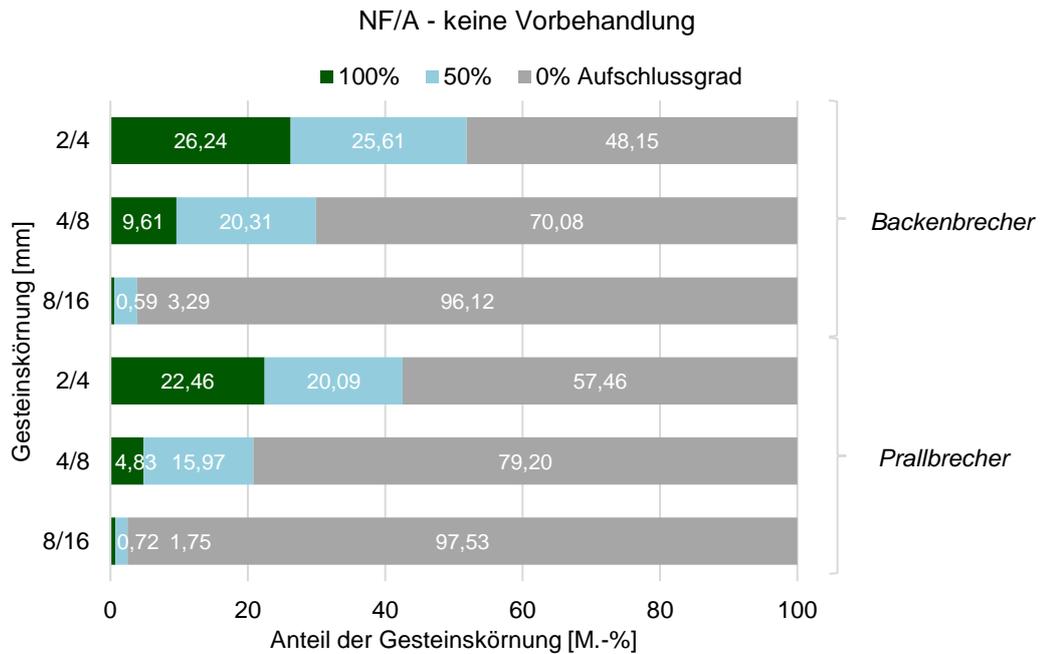
\*Probekörper wurde bis zur Explosion mit Mikrowellen behandelt

**Anhang 4**

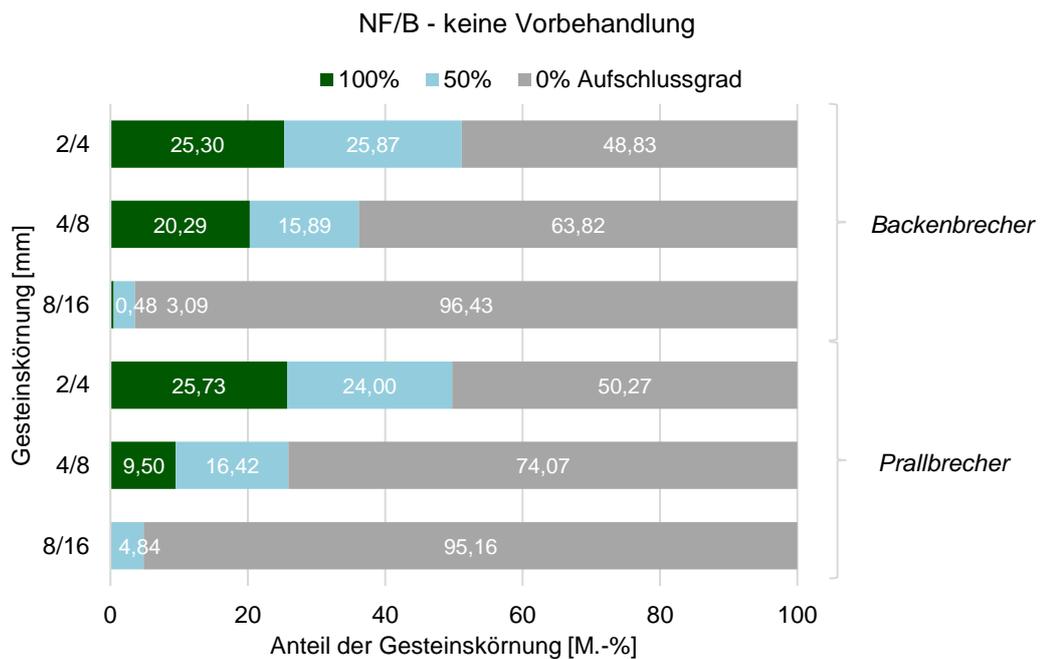
*Kapitel 3.4.2 Versuchsergebnisse zum Aufschlussgrad des Rezyklats*

Aufschlussgrad der Gesteinskörnung:

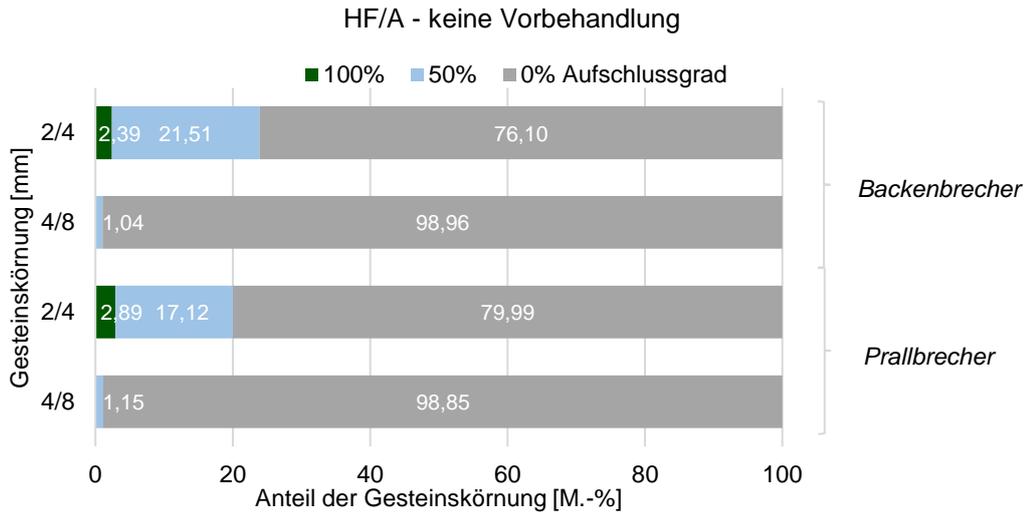
Prall- und Backenbrecher – ohne Vorbehandlung:



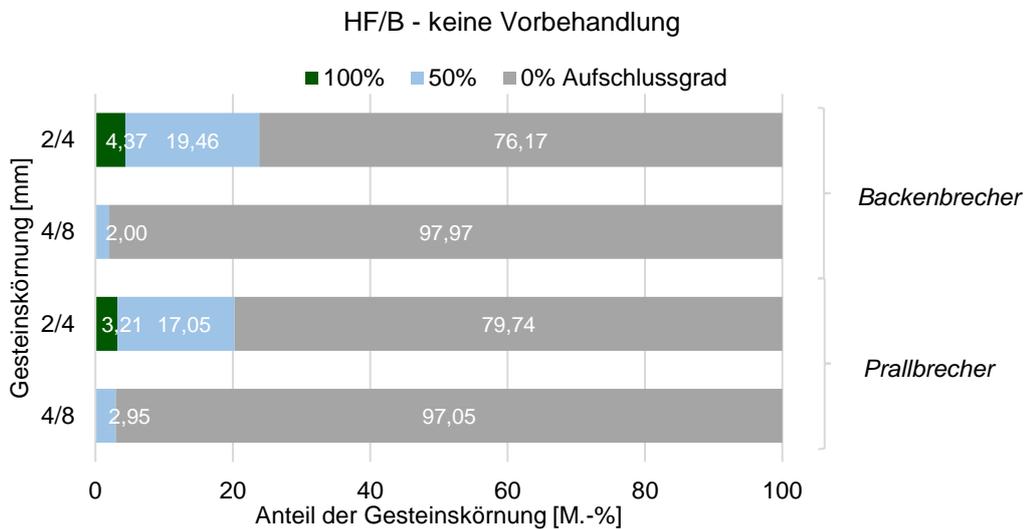
**Abbildung 78:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/A ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers



**Abbildung 79:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/B ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers

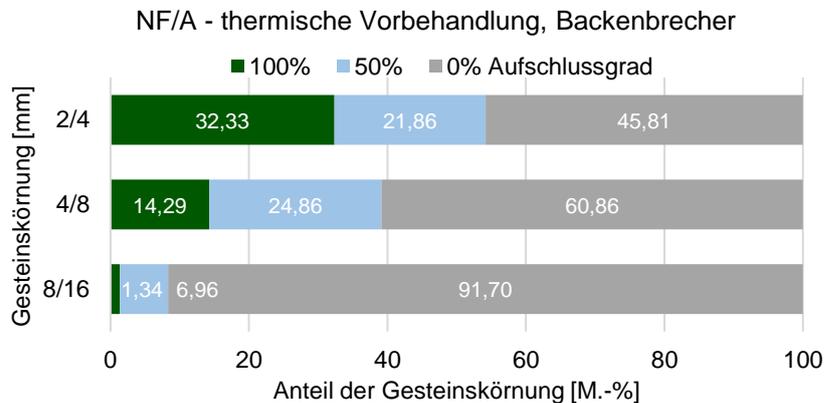


**Abbildung 80:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/A ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers



**Abbildung 81:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/B ohne Vorbehandlung des Prall- und Backenbrechers

Backenbrecher – thermische Vorbehandlung:



**Abbildung 82:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/A mit thermischer Vorbehandlung des Backenbrechers

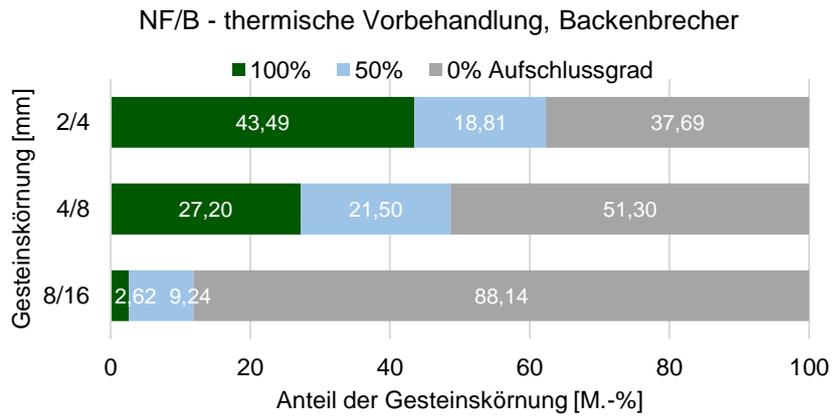


Abbildung 83: Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/B mit thermischer Vorbehandlung des Backenbrechers

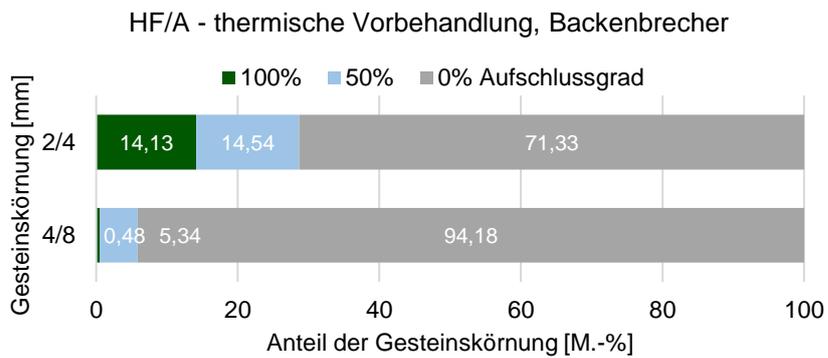


Abbildung 84: Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/A mit thermischer Vorbehandlung des Backenbrechers

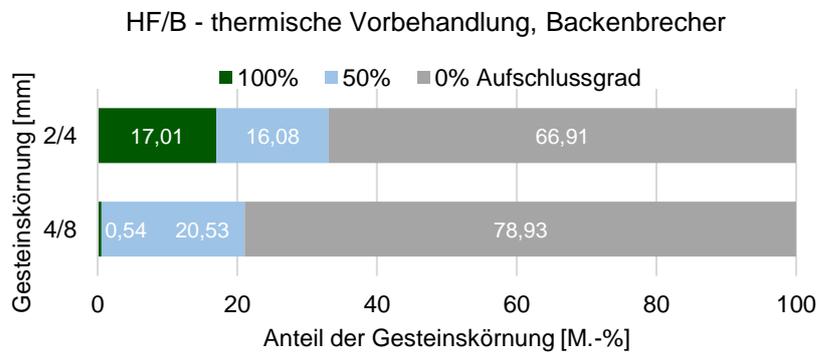
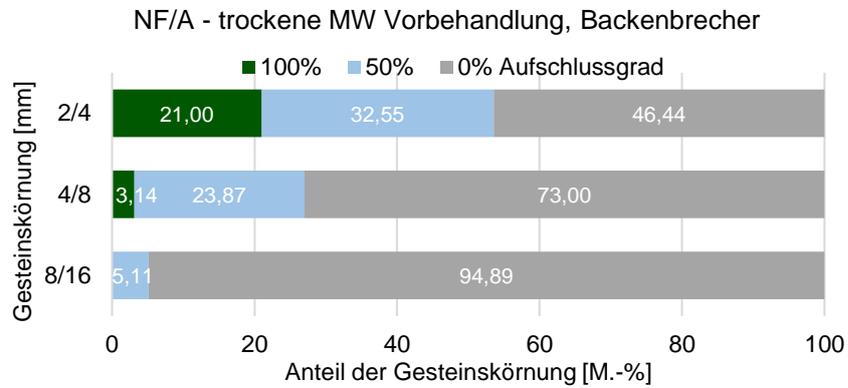
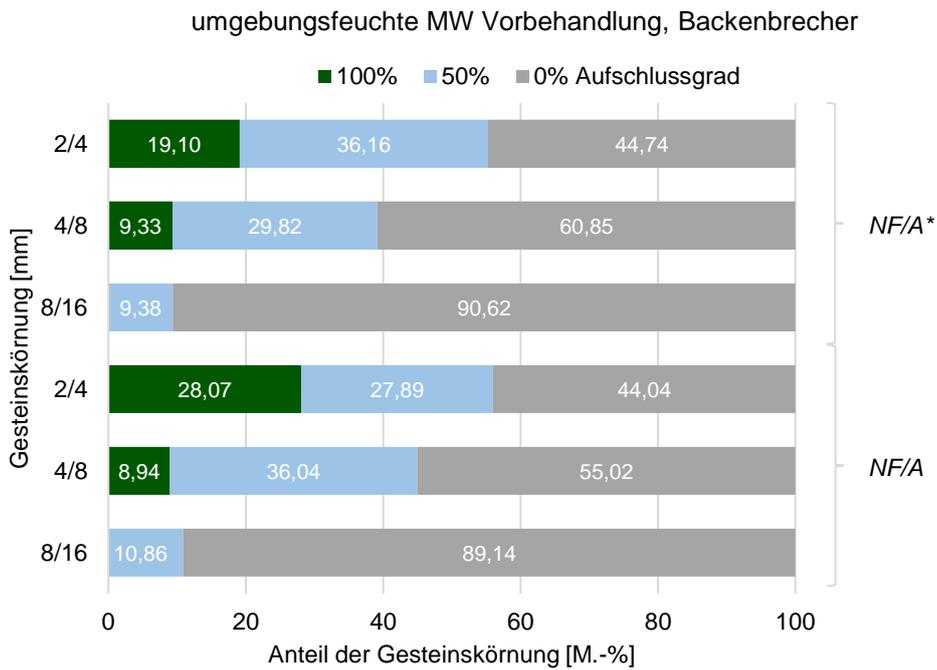


Abbildung 85: Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/B mit thermischer Vorbehandlung des Backenbrechers

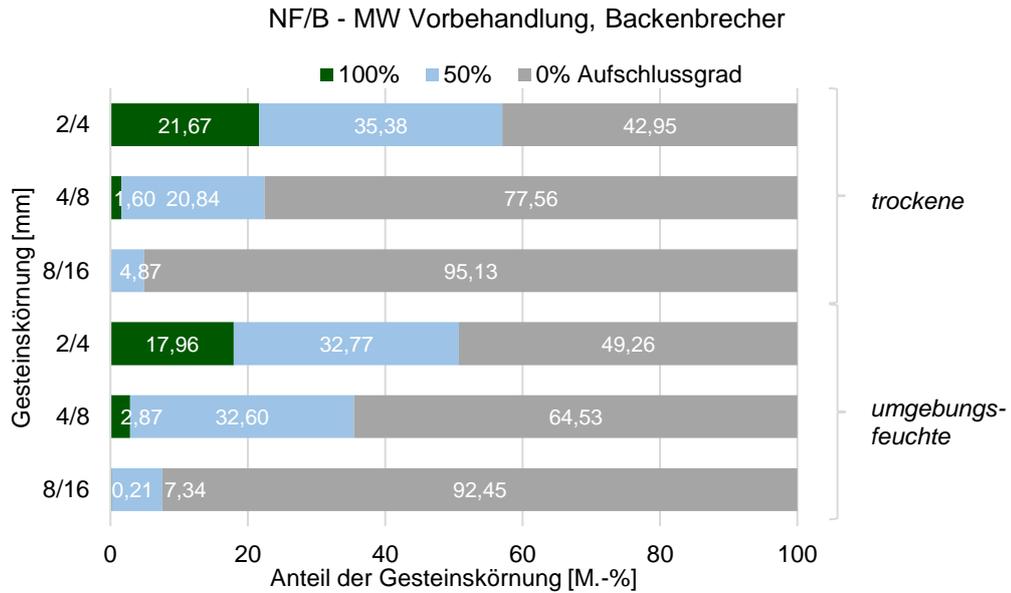
Backenbrecher – Mikrowellen-Vorbehandlung:



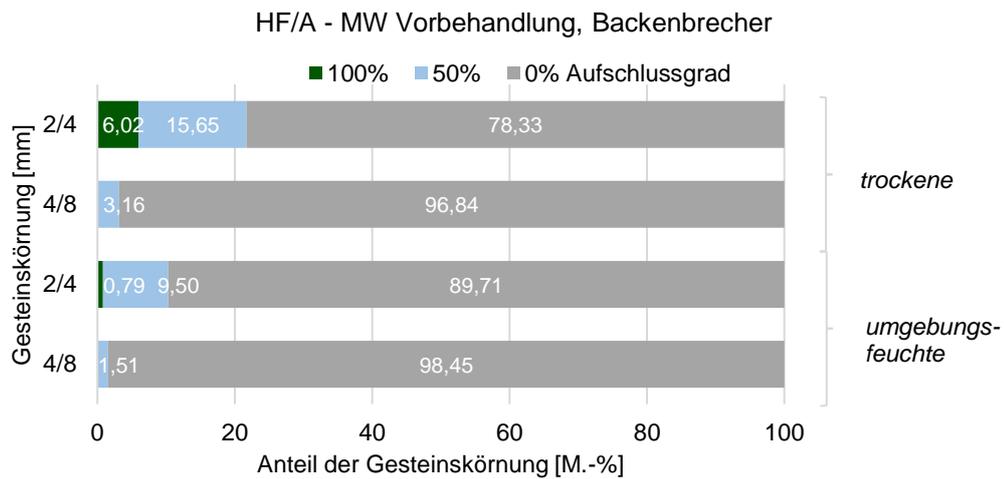
**Abbildung 86:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/A mit trockener Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers



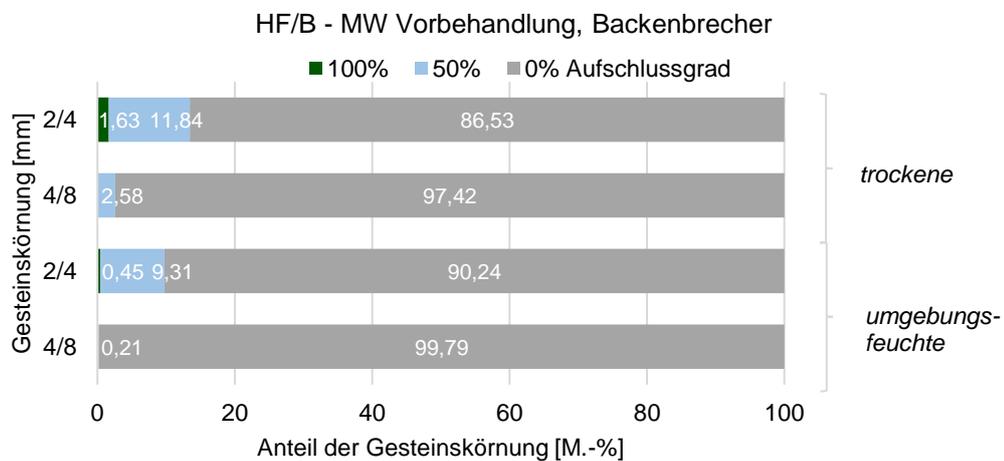
**Abbildung 87:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/A mit umgebungsfeuchter Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers



**Abbildung 88:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats NF/B mit Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers



**Abbildung 89:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/A mit Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers



**Abbildung 90:** Aufschlussgrad der Gesteinskörnung des Rezyklats HF/B mit Mikrowellen-Vorbehandlung des Backenbrechers

**Anhang 5**

*Kapitel 3.4.2 Versuchsergebnisse zum Aufschlussgrad des Rezyklats*

Aufschluss der Carbonbewehrung:

Prallbrecher ohne Vorbehandlung:

**Tabelle 20:** Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B - ohne Vorbehandlung - Prallbrecher

<b>NF/A – ohne Vorbehandlung - Prallbrecher</b>		
> 31,5 mm	16/31,5 mm	8/16 mm
		
4/8 mm	2/4 mm	1/2 mm
		
<b>NF/B – ohne Vorbehandlung - Prallbrecher</b>		
> 31,5 mm	16/31,5 mm	8/16 mm
		
4/8 mm	2/4 mm	1/2 mm
		

**Tabelle 21:** Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B - ohne Vorbehandlung - Prallbrecher

<b>HF/A – ohne Vorbehandlung - Prallbrecher</b>		
> 31,5 mm	16/31,5 mm	8/16 mm
		
4/8 mm	2/4 mm	1/2 mm
		
<b>HF/B – ohne Vorbehandlung - Prallbrecher</b>		
> 31,5 mm	16/31,5 mm	8/16 mm
		
4/8 mm	2/4 mm	1/2 mm
		

Backenbrecher ohne Vorbehandlung:

**Tabelle 22:** Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B - ohne Vorbehandlung - Backenbrecher

NF/A – ohne Vorbehandlung - Backenbrecher		
> 31,5 mm	16/31,5 mm	8/16 mm
		
4/8 mm	2/4 mm	1/2 mm
		
NF/B – ohne Vorbehandlung - Backenbrecher		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

**Tabelle 23:** Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B - ohne Vorbehandlung - Backenbrecher

HF/A – ohne Vorbehandlung - Backenbrecher		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		
HF/B – ohne Vorbehandlung - Backenbrecher		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

Backenbrecher mit thermischer Vorbehandlung:

**Tabelle 24:** Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B - thermische Vorbehandlung - Backenbrecher

<b>NF/A – thermische Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		
<b>NF/B – thermische Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

**Tabelle 25: Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B - thermische Vorbehandlung - Backenbrecher**

<b>HF/A – thermische Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		
<b>HF/B – thermische Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

Backenbrecher mit trockener Mikrowellen-Vorbehandlung:

**Tabelle 26:** Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B – trockene MW-Vorbehandlung - Backenbrecher

<b>NF/A – trockene Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		
<b>NF/B – trockene Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

**Tabelle 27: Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B – trockene MW-Vorbehandlung - Backenbrecher**

<b>HF/A – trockene Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		
<b>HF/B – trockene Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

Backenbrecher mit umgebungsfeuchter Mikrowellen-Vorbehandlung:

**Tabelle 28:** Bilderreihe der Rezyklate NF/A und NF/B – umgebungsfeuchte MW-VB - Backenbrecher

<b>NF/A – umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		
<b>NF/B – umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

**Tabelle 29: Bilderreihe der Rezyklate HF/A und HF/B – umgebungsfeuchte MW-VB - Backenbrecher**

<b>HF/A – umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		
<b>HF/B – umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher</b>		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

**Tabelle 30:** Bilderreihe des Rezyklats NF/A\* – umgebungsfeuchte MW-VB - Backenbrecher

NF/A* – umgebungsfeuchte Mikrowellen-Vorbehandlung - Backenbrecher		
16/31,5 mm	8/16 mm	4/8 mm
		
2/4 mm	1/2 mm	
		

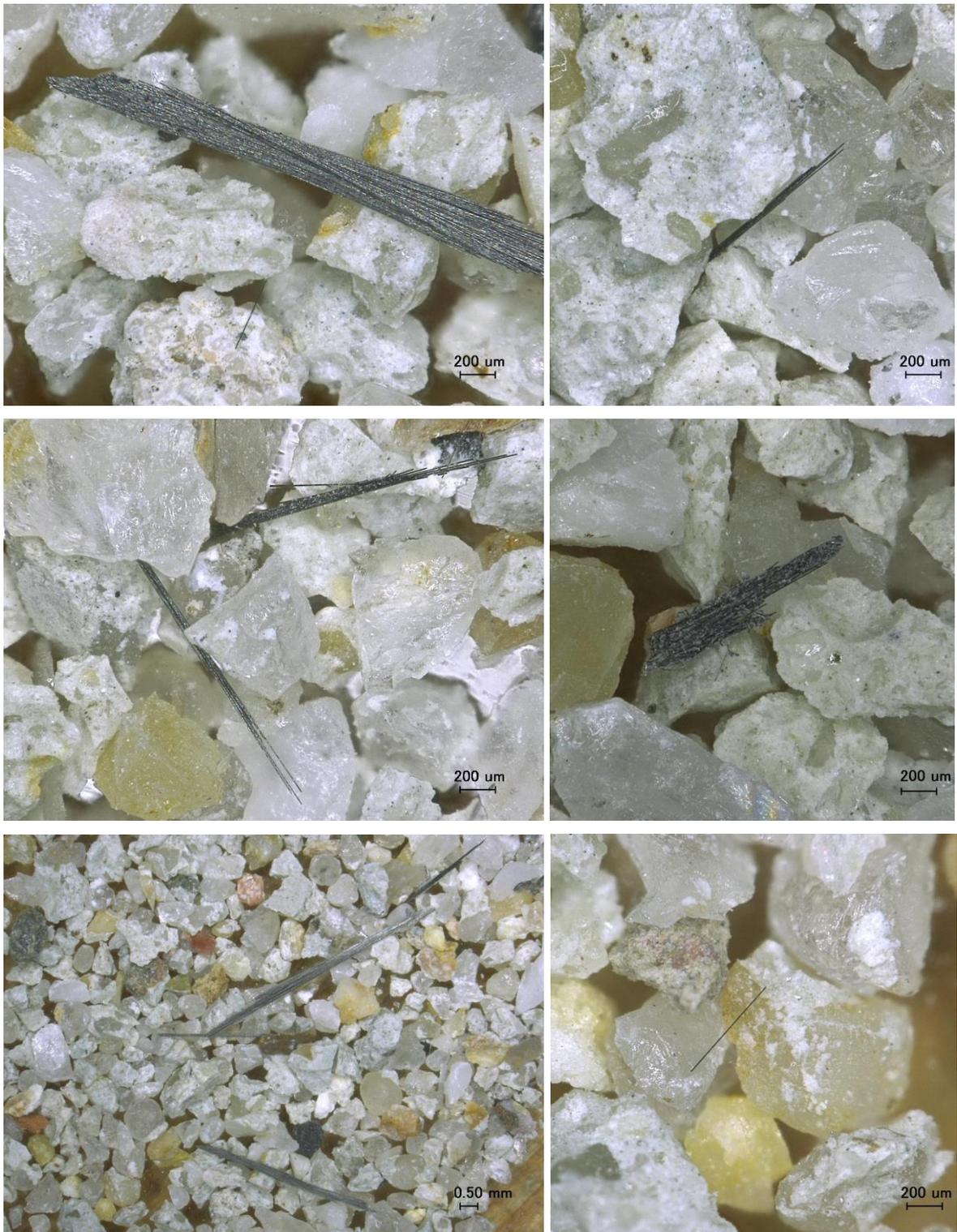
\*Probekörper wurde bis zur Explosion mit Mikrowellen behandelt

**Anhang 6**

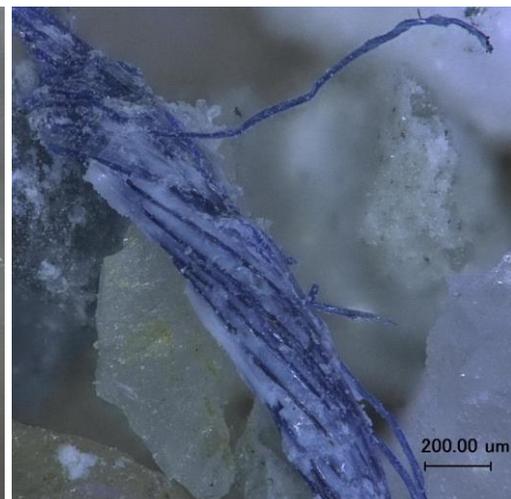
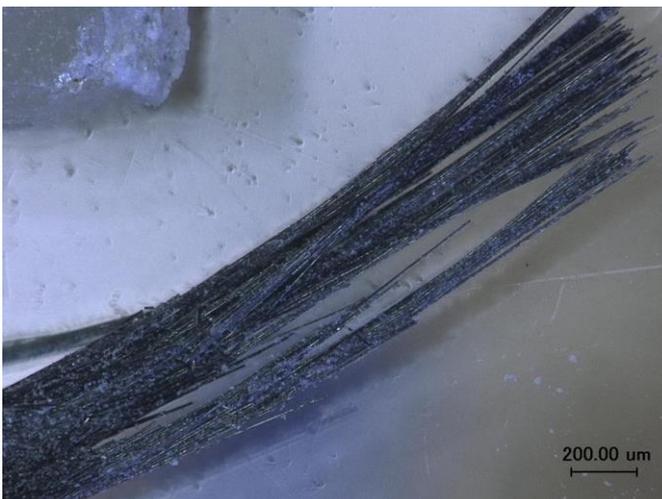
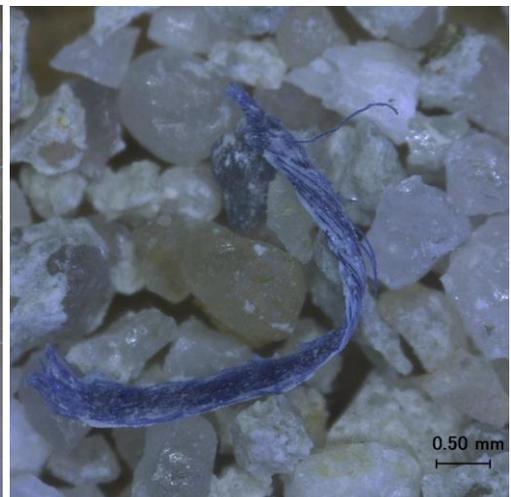
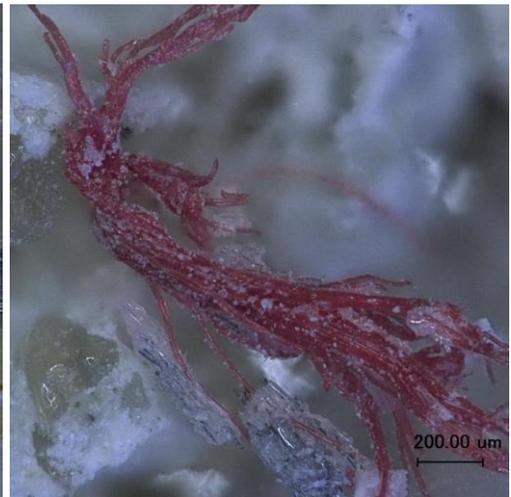
*Kapitel 3.4.4 Versuchsergebnisse der Staubmessungen*

Aufnahmen der Stäube mit dem Stereo- und Polarisationsmikroskop:

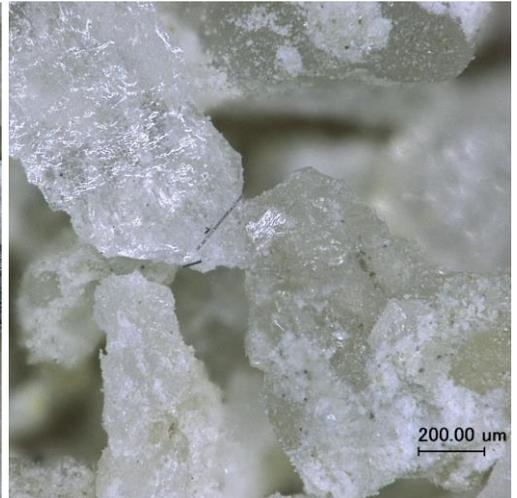
Stereomikroskop – Staub NF/A-PB:



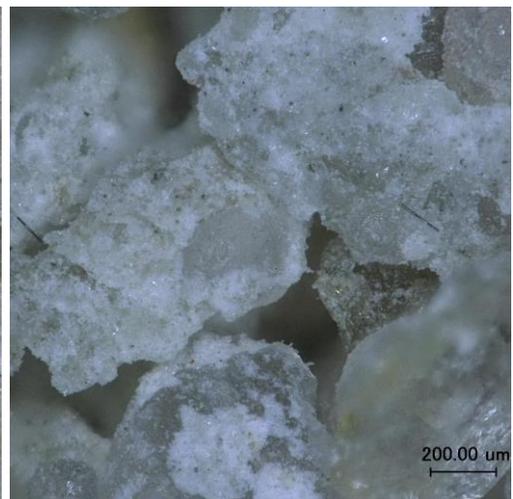
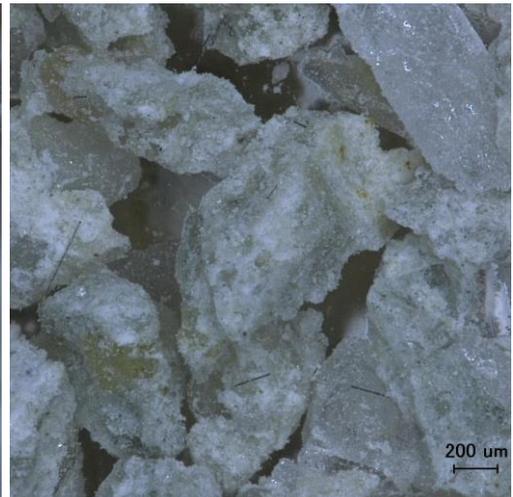
Stereomikroskop – Staub NF/B-PB:



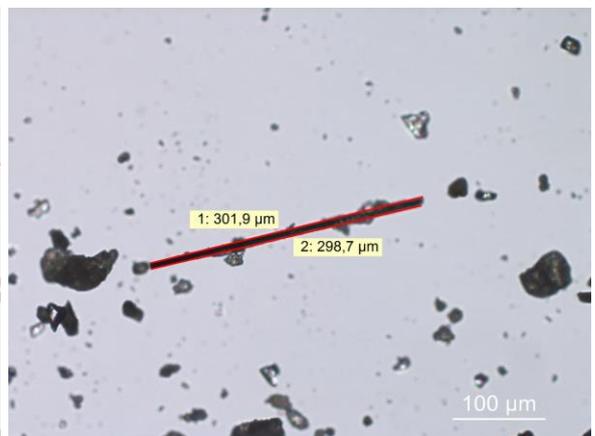
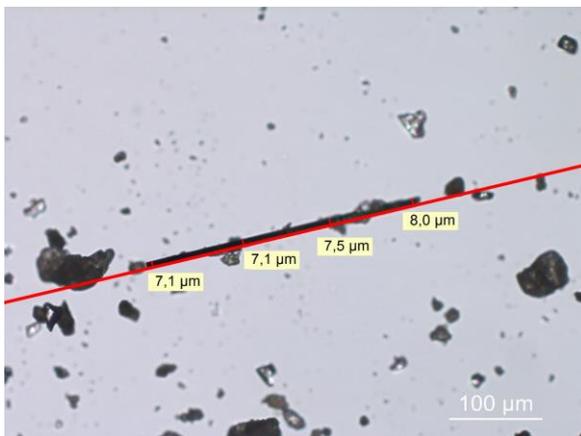
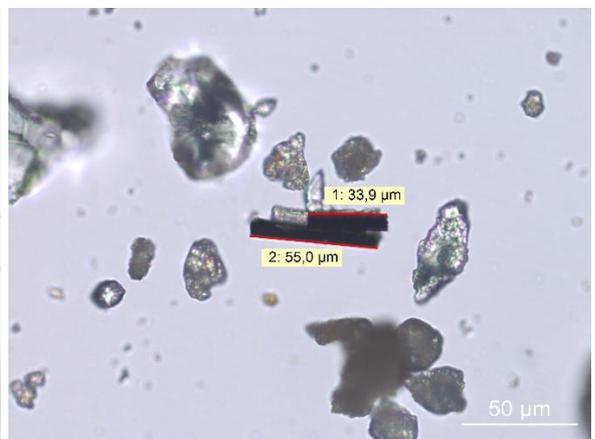
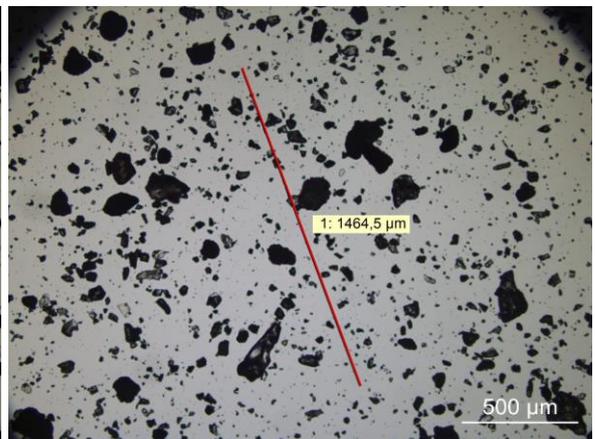
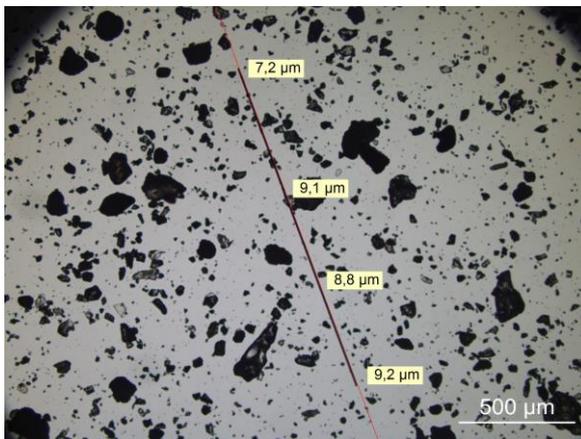
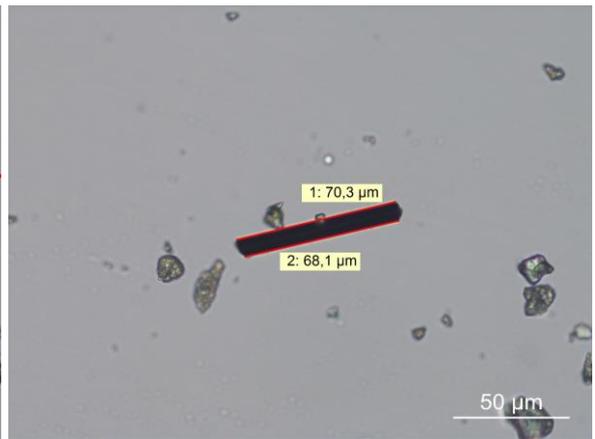
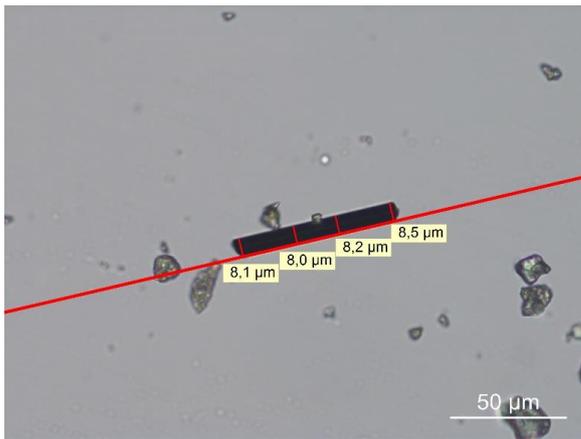
Stereomikroskop – Staub NF/A-BB:



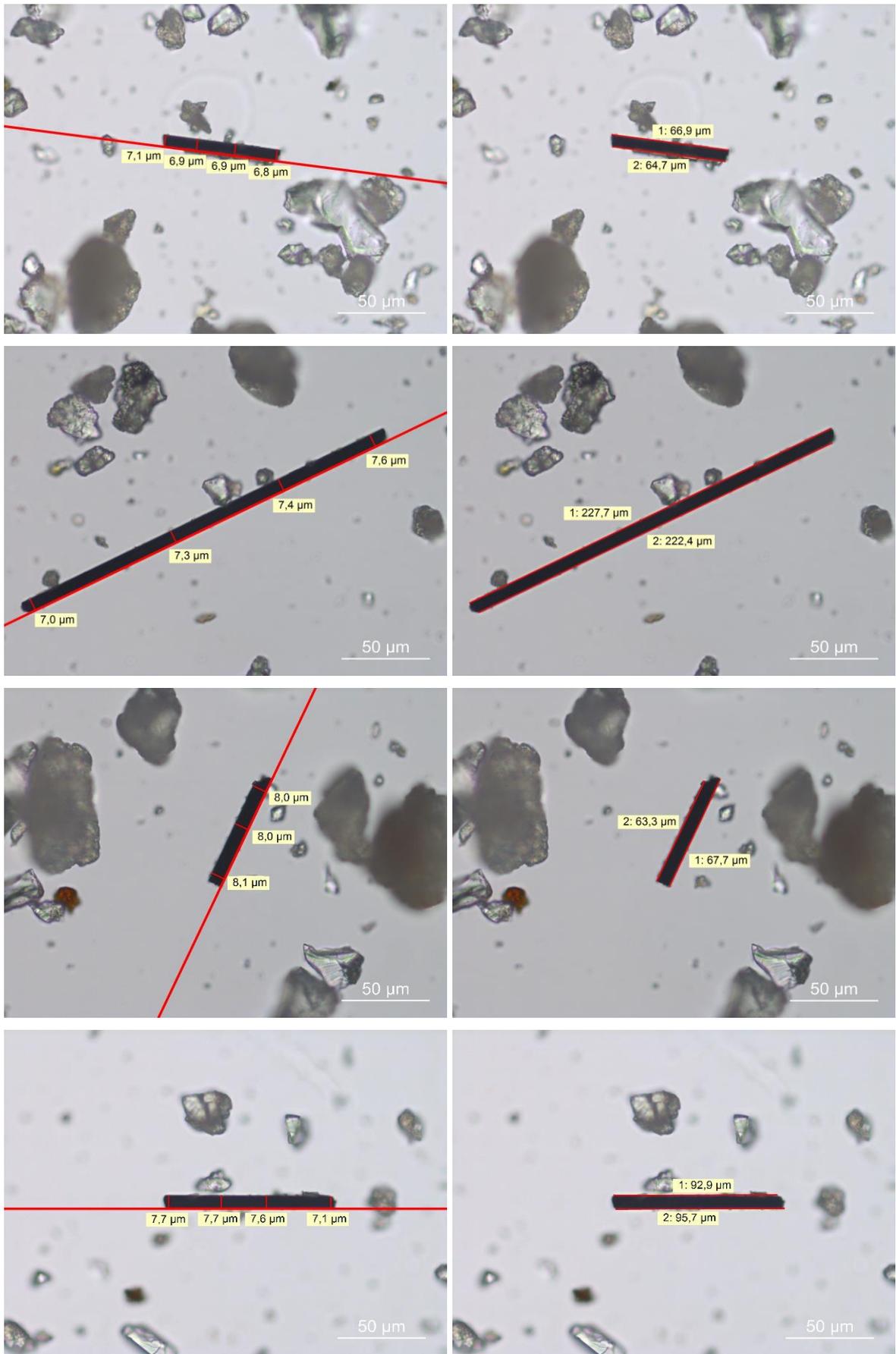
Stereomikroskop – Staub NF/A-BB:



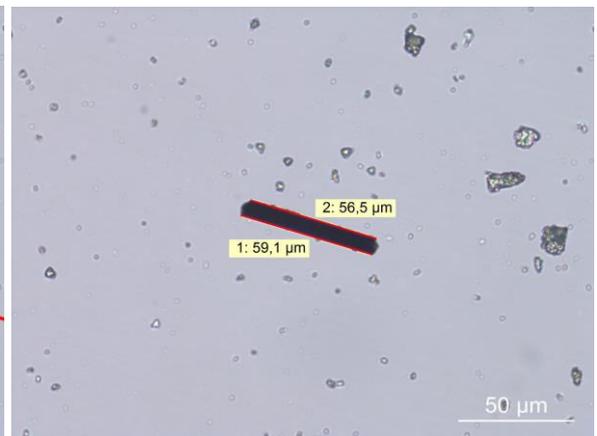
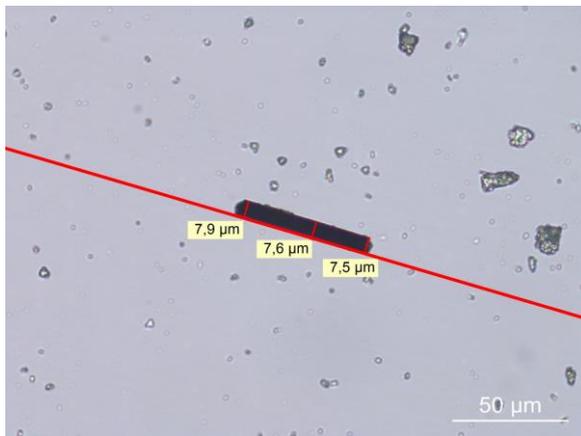
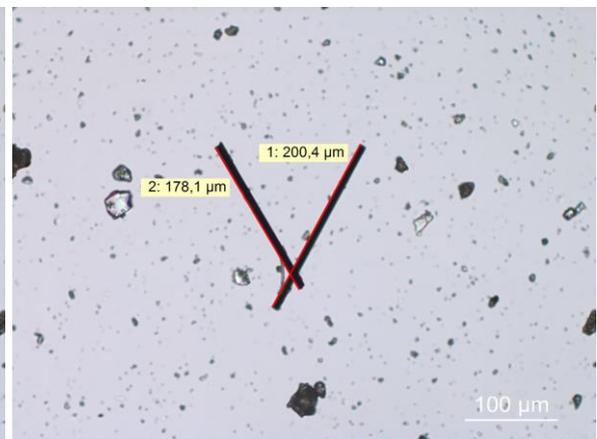
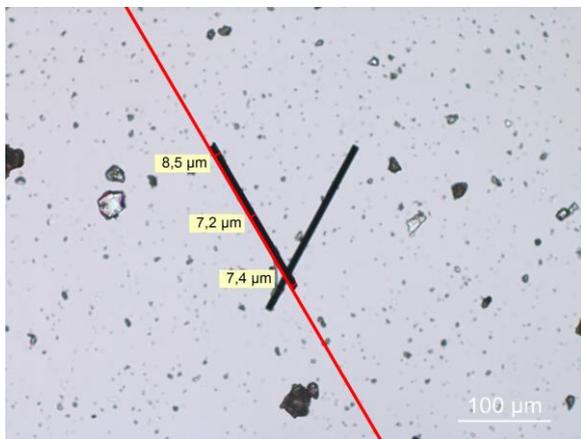
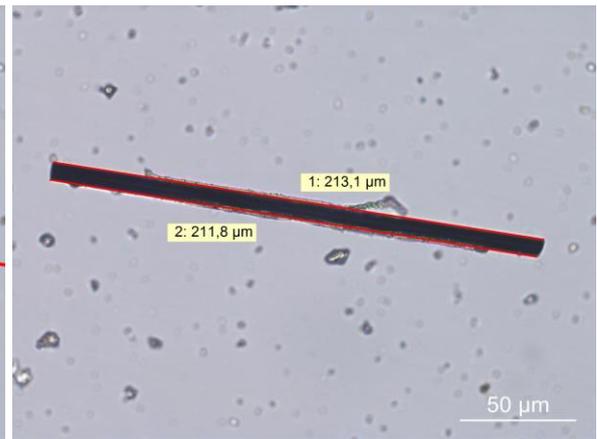
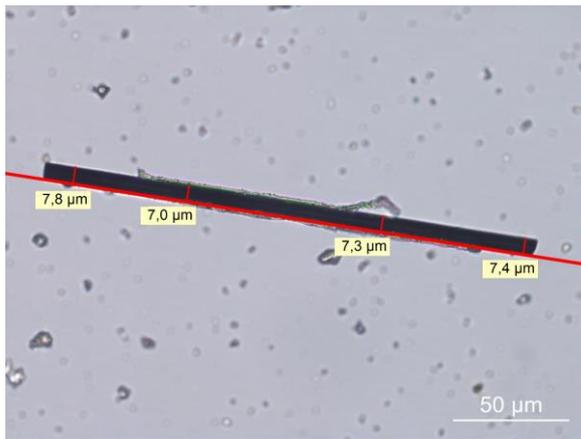
Polarisationsmikroskop – Staub NF/A-PB:



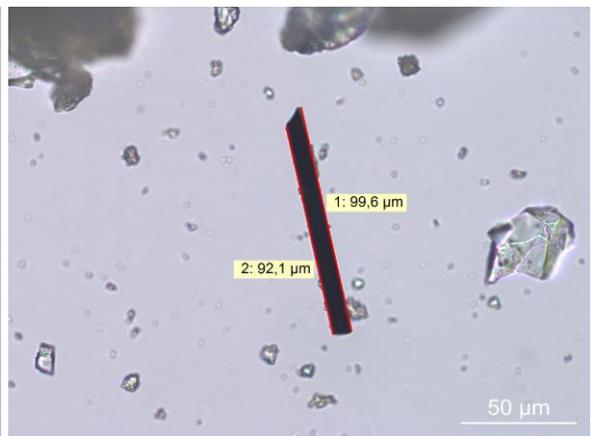
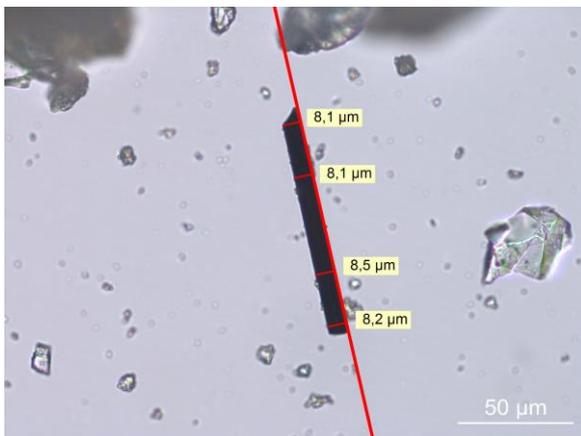
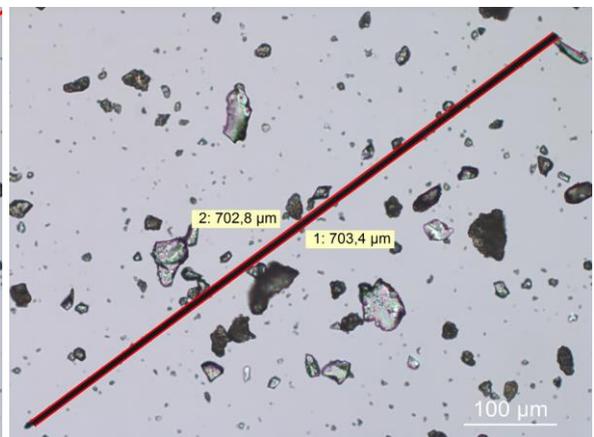
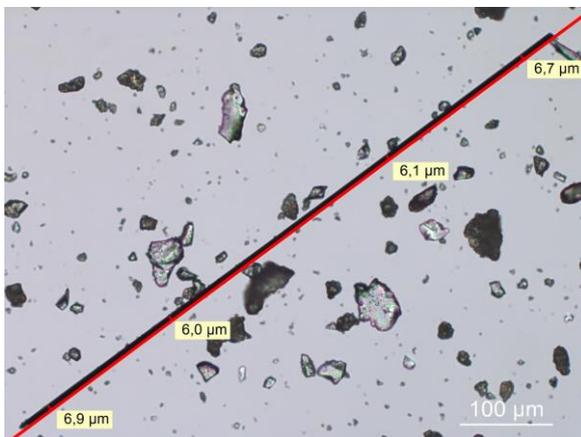
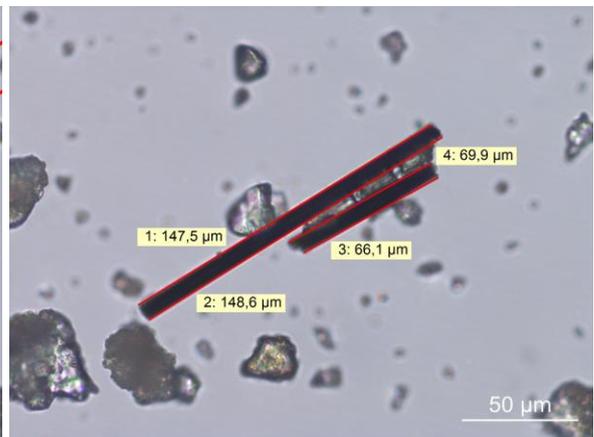
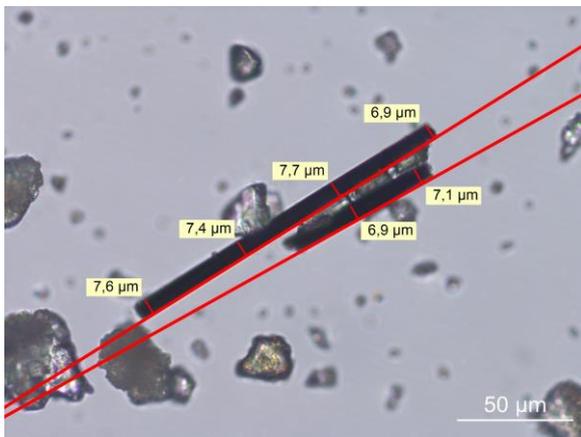
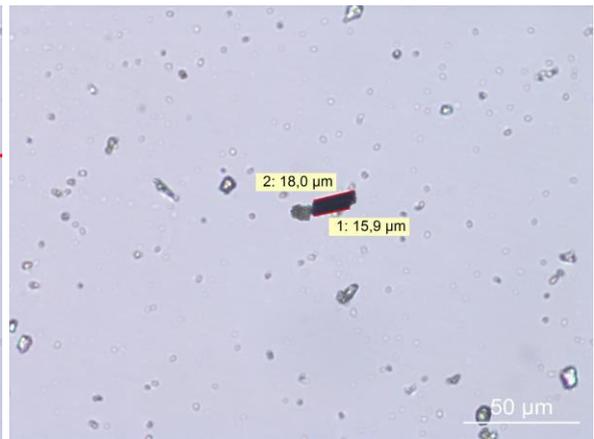
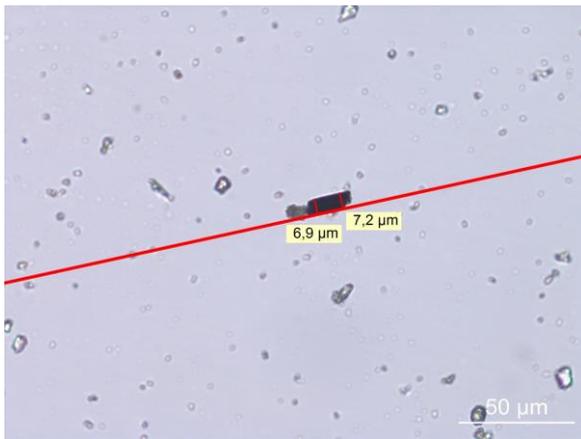
Polarisationsmikroskop – Staub NF/B-PB:



Polarisationsmikroskop – Staub NF/A-BB:



Polarisationsmikroskop – Staub NF/B-BB:



**Erklärung**

Name: Verena Horstmann

Matrikelnummer: 117059

**Urheberrechtliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken entnommen habe, habe ich unter Angabe der Quellen als solche kenntlich gemacht.

26.11.2018



---

Datum

Unterschrift