

Baubetriebswesen und Bauverfahrenstechnik

Jan Kortmann

Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton



Springer Vieweg

Baubetriebswesen und Bauverfahrenstechnik

Reihe herausgegeben von

Jens Otto, Dresden, Deutschland

Peter Jehle, Dresden, Deutschland

Die Schriftenreihe gibt aktuelle Forschungsarbeiten des Instituts Baubetriebswesen der TU Dresden wieder, liefert einen Beitrag zur Verbreitung praxisrelevanter Entwicklungen und gibt damit wichtige Anstöße auch für daran angrenzende Wissensgebiete.

Die Baubranche ist geprägt von auftragsindividuellen Bauvorhaben und unterscheidet sich von der stationären Industrie insbesondere durch die Herstellung von ausgesprochen individuellen Produkten an permanent wechselnden Orten mit sich ständig ändernden Akteuren wie Auftraggebern, Bauunternehmen, Bauhandwerkern, Behörden oder Lieferanten. Für eine effiziente Projektabwicklung unter Beachtung ökonomischer und ökologischer Kriterien kommt den Fachbereichen des Baubetriebswesens und der Bauverfahrenstechnik eine besonders bedeutende Rolle zu. Dies gilt besonders vor dem Hintergrund der Forderungen nach Wirtschaftlichkeit, der Übereinstimmung mit den normativen und technischen Standards sowie der Verantwortung gegenüber eines wachsenden Umweltbewusstseins und der Nachhaltigkeit von Bauinvestitionen.

In der Reihe werden Ergebnisse aus der eigenen Forschung der Herausgeber, Beiträge zu Marktveränderungen sowie Berichte über aktuelle Branchenentwicklungen veröffentlicht. Darüber hinaus werden auch Werke externer Autoren aufgenommen, sofern diese das Profil der Reihe ergänzen. Der Leser erhält mit der Schriftenreihe den Zugriff auf das aktuelle Wissen und fundierte Lösungsansätze für kommende Herausforderungen im Bauwesen.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/16521>

Jan Kortmann

Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton

Mit einem Geleitwort von Prof. Peter Jehle und
Prof. Jens Otto

 Springer Vieweg

Geleitwort

Carbonbeton ist ein in den letzten Jahren entwickelter neuartiger Baustoff, der die Herstellung sehr dauerhafter Bauteile und Bauwerksteile verspricht. Der bisher verwendete korrosionsempfindliche Bewehrungsstahl im Beton wird dabei durch Carbonfasern in Form von Carbonstäben und Carbonlegen ersetzt. Durch die vielfach höhere Tragfähigkeit der Carbonbewehrung und die inertten Eigenschaften können die Carbonbetonbauteile wesentlich schlanker ausgeführt werden als konventionelle Stahlbetonbauteile. Damit werden signifikante Ressourceneinsparungen bei den eingesetzten mineralischen Rohstoffen erzielt und erhebliche Reduktionen bei der Freisetzung von CO² erreicht. Es ist festzustellen, dass trotz zunehmender Einsatzmengen von Carbonfasern im Bauwesen, aber auch in anderen Branchen, notwendige Erkenntnisse zum Gesundheitsgefährdungspotenzial zerkleinerter Carbonfasern und der Recyclingfähigkeit der Verbundwerkstoffe fehlen. Mit der Substitution des Betonstahls durch Carbonfaserbewehrungen fallen beim Abbruch faserhaltige Abfälle an. Dafür existieren noch keine etablierten Recyclingverfahren. Mit den verfahrenstechnischen Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton widmet sich Herr Kortmann diesen Fragen im Rahmen seiner Promotion am Institut für Baubetriebswesen der TU Dresden.

Mit den Untersuchungen werden das Gesundheitsgefährdungspotenzial von Carbonfasern auf Grundlage des Faserbruchverhaltens analysiert und die Möglichkeiten zum Recycling nachgewiesen. Dazu wurden einerseits die mechanische Bearbeitung von Carbonbetonbauteilen mit handelsüblichen Werkzeugen, Geräten und Maschinen durchgeführt und die auftretenden Staubemissionen erfasst und bewertet sowie andererseits die Eignung dieser konventionellen Verfahren überprüft. In weiteren Arbeitsprozessen folgten die Zerkleinerung, der Aufschluss und die Sortierung der angefallenen Carbonbetonabfälle mit am Markt verfügbaren Brech- und Sortieranlagen. Die Auswertung der bei den Arbeitsprozessen in großer Zahl erfassten Staubproben ergab keinerlei Hinweise auf Carbonfasern, die das WHO-Kriterium erfüllen. Das Gefährdungspotenzial und die Gesundheitsrisiken sind bei der mechanischen Be- und Verarbeitung von carbonbewehrten Betonbauteilen nicht höher als bei Beton- und Stahlbetonbauteilen.

Die mit der Arbeit exemplarisch aufgezeigte Herangehensweise ist eine innovative Aufforderung an alle Produktentwickler und Entscheidungsträger, grundsätzliche Untersuchungen an neuen Produkten zum Nachweis der Recyclingfähigkeit einerseits und dem sicheren Ausschluss von Gesundheits- und Umweltgefahren andererseits vor eine Markteinführung zu stellen.

Dresden, im März 2020

Prof. Dr.-Ing. Peter Jehle

Prof. Dr.-Ing. Jens Otto

Vorwort des Verfassers

„Natürlich interessiert mich die Zukunft. Ich will schließlich den Rest meines Lebens darin verbringen.“ [Mark Twain]

Dieses Zitat steht als Leitgedanke für viele Innovations- und Forschungsansätze, die über die bloße Weiterentwicklung bereits bestehender Denkmuster hinausgehen. Dazu zählen insbesondere auch Untersuchungen, die weit in die Zukunft gerichtet sind und sich mit den kurz- und langfristigen Auswirkungen anthropogener Entwicklungen beschäftigen. Die Beurteilung des Gefährdungspotenzials und der Recyclingfähigkeit von Bauprodukten – bereits vor der Markteinführung – ist ein Beispiel dafür.

In jüngster Vergangenheit wurden bereits Bauteile aus carbonfaserbewehrtem Beton hergestellt. Diese und alle zukünftig herzustellenden Carbonbetonbauteile werden aufgrund der guten Dauerhaftigkeit über viele Jahrzehnte in Wechselwirkung mit dem Nutzer und dem örtlichen Umfeld stehen. Anders als Güter des täglichen Gebrauchs mit kurzer oder mittlerer Lebensdauer werden Bauwerke im Zuge ihrer Nutzung wiederholt bearbeitet. Dabei kommt es immer zu einer Materialfreisetzung. Mit weiteren tiefgreifenden Umnutzungsmaßnahmen und zum Lebenszyklusende fallen darüber hinaus beim Teil- oder Totalabbruch große Abbruchmengen an, zu deren Umgang bisher keine gesicherten Erkenntnisse vorlagen. Das vorliegende Werk liefert dazu Antworten.

Die Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baubetriebswesen an der Technischen Universität Dresden. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jehle, der mir bei meiner Promotion fördernd zur Seite stand. Die konstruktiven Diskussionen zum Inhalt und die methodische Herangehensweise waren für meine wissenschaftliche Arbeitsweise prägend. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Motzko von der Technischen Universität Darmstadt und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto von der Technischen Universität Dresden für ihre Bereitschaft zur Begutachtung meiner Arbeit sowie für ihre fachlichen Hinweise und Anregungen bedanken.

Herzlich danken möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Baubetriebswesen für die unvergessliche gemeinsame Zeit sowie die offenen Gespräche und Diskussionen. Überdies möchte ich mich bei allen Personen anderer Institute und Unternehmen bedanken, mit den ich zusammen auf diesem Gebiet forschen durfte. Ein weiterer Dank gilt meinen Freunden, meiner Familie sowie ganz besonders meiner Frau und meinen beiden Kindern, die mir selbstlos und mit viel Nachsicht in der Promotionszeit Rückhalt gaben. Danke!

Dresden, im März 2020

Jan Kortmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielstellung und Abgrenzung der Arbeit	4
1.3	Aufbau und Lösungsweg	6
2	Carbonbeton und spezifische Markteintrittsbarrieren	9
2.1	Entwicklung von Carbonbeton	10
2.2	Vorteile der Carbonbetonbauweise	11
2.3	Werkstoffliche Grundlagen von Carbonfasern	14
2.3.1	Übersicht zu Textilfasern	14
2.3.2	Materialeigenschaften von Carbonfasern	17
2.3.3	Branchenübergreifender Einsatz von Carbonfasern	18
2.3.4	Carbonfaserherstellung aus Polyacrylnitril	21
2.4	Markteintrittsbarriere Gesundheitsschutz – Wirkungspfad Mensch	26
2.4.1	Notwendigkeit der Untersuchung	28
2.4.2	Zielsetzung der Untersuchung	31
2.4.3	Versuchsdurchführung und Messstrategie	32
2.4.4	Ergebnis der Untersuchung zu den Emissionen	33
2.5	Markteintrittsbarriere Recyclingfähigkeit – Wirkungspfad Umwelt	35
3	Vorbetrachtungen zur Recyclingfähigkeit	39
3.1	Begriffsabgrenzung „Recycling“	39
3.1.1	Recyclingprozesskette	41
3.2	Rechtliche Vorgaben zur Recyclingfähigkeit	43
3.2.1	Kreislaufwirtschaftsgesetz	43
3.2.2	Gewerbeabfallverordnung	45
3.2.3	Mantelverordnung	46
3.2.4	LAGA M20 und weitere Regelungen	46
3.3	Stand der Forschung zum Recycling von Carbonbeton	47
3.4	Notwendigkeit und Zielsetzung der Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit ..	50
3.5	Vorversuche zum Abbruch und Recycling von Carbonbeton	51
3.5.1	Vorversuch 1 – Grundsätzliches Trennverhalten	51
3.5.2	Vorversuch 2 – Trennverhalten bei einer Varianz an Bewehrungsgehalten	52

3.5.3	Vorversuch 3 – Trennverhalten bei einer Varianz an Betongütern.....	53
3.6	Methodischer Ansatz zur Beurteilung der Recyclingfähigkeit.....	53
3.7	Multikriterielle Bewertungsverfahren zur Beurteilung von Alternativen.....	56
3.7.1	Ablauf der Nutzwertanalyse.....	57
3.7.2	Schritt 1: Vorauswahl und Formulierung möglicher Separationsverfahren.....	58
3.7.3	Schritt 2: Festlegung der Bewertungskriterien.....	61
3.7.4	Schritt 3: Gewichtung der Bewertungskriterien.....	64
3.7.5	Schritt 4: Erstellung der Bewertungsmatrix.....	65
3.7.6	Schritt 5: Bewertung der Separationsverfahren.....	66
3.7.7	Schritt 6: Berechnung der Teil- und Gesamtnutzwerte.....	66
3.7.8	Schritt 7: Durchführung der Sensitivitätsanalyse.....	67
3.7.9	Schritt 8: Ergebnisdarstellung, Vergleich der Alternativen.....	69
4	Baustoffliche und baukonstruktive Randbedingungen.....	71
4.1	Spezifika der Carbonbewehrung.....	72
4.1.1	Carbonbewehrungen aus Carbonfasern.....	72
4.1.2	Herstellungsprozess für Carbonbewehrungen.....	73
4.1.3	Kunststoffmatrices zur Beschichtung der Carbonbewehrungen.....	74
4.1.4	Lieferformen von Carbonbewehrungen.....	77
4.1.5	Festlegung der Carbonbewehrung.....	81
4.2	Spezifika der Betonmatrix.....	83
4.2.1	Bandbreite mineralischer Betonmatrices.....	83
4.2.1.1	Betonbindemittel – Zement.....	84
4.2.1.2	Betonzuschlagsstoffe – Gesteinskörnungen.....	86
4.2.1.3	Zugabewasser.....	87
4.2.1.4	Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe.....	88
4.2.2	Festlegung der Carbonbetonmatrix.....	88
4.3	Spezifika der Bauteilgeometrie.....	95
4.3.1	Konstruktionsgrundsätze.....	95
4.3.2	Bandbreite der Anwendungsfelder.....	98
4.3.2.1	Fassadenplatten und Fassadenbekleidungen.....	99
4.3.2.2	Sandwichelemente und Elementwände.....	100
4.3.2.3	Schalentragwerke.....	102
4.3.2.4	Decken und Balkonplatten.....	103

4.3.2.5	Brücken.....	104
4.3.2.6	Fertigaragen als Moduleinheiten.....	107
4.3.2.7	Verstärkung und Instandsetzung.....	107
4.3	Festlegung der Bauteilgeometrie.....	110
4.4	Herstellung repräsentativer Versuchsbauteile für die Untersuchungen.....	112
5	Experimentelle Versuche zum Abbruch und Recycling.....	115
5.1	Abbruch und Zerkleinerung der Carbonbetonbauteile.....	115
5.2	Charakterisierung des vorliegenden Abbruchmaterials.....	121
5.3	Aufbereitungsprozesse zur Sortierung des Abbruchmaterials.....	126
5.4	Verfahren der Sortierenden Klassierung.....	128
5.4.1	Arten der Sortierenden Klassierung.....	128
5.4.2	Separationsverfahren: Sortierende Siebklassierung.....	129
5.4.2.1	Funktionsprinzip Sortierende Siebklassierung.....	129
5.4.2.2	Experiment Siebung im Labor.....	130
5.4.2.3	Feldexperiment Siebung in der Aufbereitungsanlage.....	133
5.4.3	Separationsverfahren: Querstromsichtung.....	133
5.4.3.1	Funktionsprinzip Querstromsichtung.....	133
5.4.3.2	Feldexperiment Querstromsichtung in situ.....	135
5.4.3.3	Feldexperiment Querstromsichtung in der Aufbereitungsanlage.....	137
5.4.4	Separationsverfahren: Wirbelschichtsortierung.....	140
5.4.4.1	Funktionsprinzip Wirbelschichtsortierung.....	140
5.4.4.2	Experiment Wirbelschichtsortierung im Labor.....	140
5.4.5	Auswertung der Fallstudie Sortierende Klassierung.....	142
5.5	Verfahren der Dichtesortierung.....	143
5.5.1	Arten der Dichtesortierung.....	143
5.5.2	Separationsverfahren: Schwimm-Sink-Sortierung mit Schwerlösung.....	144
5.5.2.1	Funktionsprinzip Schwimm-Sink-Sortierung mit Schwerlösung.....	144
5.5.2.2	Experiment Schwimm-Sink-Sortierung mit Schwerlösung im Labor.....	147
5.5.3	Separationsverfahren: Schwimm-Sink-Sortierung über die Viskosität.....	153
5.5.3.1	Funktionsprinzip Schwimm-Sink-Sortierung über die Viskosität.....	153
5.5.3.2	Experiment Schwimm-Sink-Sortierung mit Bentonitsuspension.....	155
5.5.4	Auswertung der Fallstudie Dichtesortierung.....	158

5.6	Verfahren der Einzelkornsartierung.....	158
5.6.1	Arten der Einzelkornsartierung.....	158
5.6.2	Separationsverfahren: Manuelle Klaubung.....	160
5.6.2.1	Funktionsprinzip Manuelle Klaubung.....	160
5.6.2.2	Feldexperiment Manuelle Klaubung.....	162
5.6.3	Separationsverfahren: Nahinfrarot-Sortierung.....	164
5.6.3.1	Funktionsprinzip Nahinfrarot-Sortierung.....	164
5.6.3.2	Feldexperiment Nahinfrarot-Sortierung.....	165
5.6.4	Separationsverfahren: Kamerabasierte Sortierung.....	168
5.6.4.1	Funktionsprinzip Kamerabasierte Sortierung.....	168
5.6.4.2	Feldexperiment Kamerabasierte Sortierung.....	170
5.6.5	Auswertung der Fallstudie Einzelkornsartierung	174
5.7	Bewertung der Separationsverfahren mittels Nutzwertanalyse	175
5.7.1	Vorbemerkungen.....	175
5.7.2	Bewertung des Kriteriums: Carbonfaserausbringung	177
5.7.3	Bewertung des Kriteriums: Technische Umsetzbarkeit.....	179
5.7.4	Bewertung des Kriteriums: Qualität der Sekundärrohstoffe.....	182
5.7.5	Bewertung des Kriteriums: Wirtschaftlichkeit	185
5.7.6	Bewertung des Kriteriums: Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz... 187	
5.7.7	Ergebnis der Nutzwertanalyse.....	189
5.7.8	Überprüfung durch die Sensitivitätsanalyse	191
5.8	Ergebnisse der Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton	193
6	Verwertungsoptionen der aufbereiteten Fraktionen	199
6.1	Einsatz der separierten mineralischen Fraktion	200
6.1.1	Stoffliche Verwertung der mineralischen Fraktion.....	201
6.1.2	Sonstige Verwertung der mineralischen Fraktion.....	205
6.2	Einsatz der separierten Carbonfaserfraktion	206
6.2.1	Stoffliche Verwertung der Carbonfaserfraktion	207
6.2.2	Sonstige Verwertung und Deponierung der Carbonfaserfraktion.....	214
7	Schlussbetrachtung	219
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	219
7.2	Ausblick	222
	Literaturverzeichnis.....	225

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Doppel-T-Träger mit Glas- und Carbonfaserbewehrung und Betonstahlbewehrung	13
Abbildung 2.2:	Rippendecke aus Carbonbeton unter 4-Punkt-Biegebelastung	13
Abbildung 2.3:	Vergleich der Faserdurchmesser und Faser-Zugfestigkeiten	14
Abbildung 2.4:	Globaler Carbonfaserbedarf in Tausend Tonnen	19
Abbildung 2.5:	CFK-Bedarf in Tonnen nach Anwendungen	19
Abbildung 2.6:	Herstellungsprozess von Carbonfasern aus Polyacrylnitril	23
Abbildung 2.7:	Stabilisierung der Polyacrylfaser bis zur Carbonfaser	24
Abbildung 2.8:	Glatte Bruchflächen einzelner Carbonfilamente	34
Abbildung 2.9:	Glatte Bruchflächen ganzer Carbonfaserbündel	34
Abbildung 3.1:	Lebenszyklus eines Gebäudes mit Abfallbewirtschaftungsoptionen	42
Abbildung 3.2:	Intaktes Carbonfaser- und Glasfasertextil nach der Bearbeitung	52
Abbildung 3.3:	Bruchfläche mit Anhaftung von Wirkfäden	52
Abbildung 3.4:	Bruchfläche und Carbonroving ohne Anhaftungen	52
Abbildung 3.5:	Bearbeitung Probekörper mit dem Abbruchverfahren „Stemmen“ ..	53
Abbildung 3.6:	Bruchfläche mit größtenteils abgetrennter normalfester Betonmatrix	53
Abbildung 3.7:	Bruchfläche mit größtenteils abgetrennter hochfester Betonmatrix.	53
Abbildung 3.8:	Wissenschaftliche Methodik Beurteilung der Aufbereitungsverfahren	56
Abbildung 4.1:	Carbongelege mit flexibler Matrix für die Anwendungsfälle Verstärkung, Produkt: TUDALIT BZT2 V.FRAAS	74
Abbildung 4.2:	Carbongelege mit steifer Matrix für den Anwendungsfall Neubau, Produkt: solidian GRID Q142/142-CCE-38	74
Abbildung 4.3:	Carbonstab „Carbon4ReBAR“	82
Abbildung 4.4:	Carbongelege und Bewehrungskorb „solidian GRID Q95/95-CCE-38“	82
Abbildung 4.5:	Durchführung der Tastversuche	91
Abbildung 4.6:	Ergebnisse der Tastversuche	91
Abbildung 4.7:	Grundriss Probekörper aus Carbonbeton im Betonpulverisierer	92
Abbildung 4.8:	Fassadenplatten am Hubert-Engels-Labor der TU Dresden	100
Abbildung 4.9:	Fassadenplatte am Gebäude „SchieferErlebnis“	100

Abbildung 4.10: Fassadenplatten an der dritten Bosphorusbrücke	100
Abbildung 4.11: Fassadenansicht Institutsneubau INNOTEX an der RWTH Aachen.....	101
Abbildung 4.12: Detail des AR-Glas-Schubgitters in einer Sandwichwand	101
Abbildung 4.13: Sandwichelement, Bauvorhaben „Eastsite VIII“ in Mannheim	101
Abbildung 4.14: Ansicht des Pavillons, RWTH Aachen, Rohbaufertigstellung	103
Abbildung 4.15: Carbonbetonschale als Pavillon, Kahla	103
Abbildung 4.16: Hybridbewehrte Balkonplatte im Prüfstand OML der TU Dresden	104
Abbildung 4.17: Untersicht Deckenelement im OML der TU Dresden	104
Abbildung 4.18: Segmentbrücke in Kempten aus AR-Glasbewehrtem Textilbeton	106
Abbildung 4.19: Carbonbetonbrücke in Albstadt- Ebingen	106
Abbildung 4.20: Ansicht Textilbetonbrücke Albstadt-Lautlingen	106
Abbildung 4.21: Plattenbalkenquerschnitt Textilbetonbrücke in Albstadt- Lautlingen	106
Abbildung 4.22: CFK-Lamellen zur Verstärkung eines Stahlbetonunterzuges.....	108
Abbildung 4.23: Aufbringen des textilen Carbonfasergeleges	108
Abbildung 4.24: Querschnitt der Pi-Platte als Deckenelement	111
Abbildung 4.25: Pi-Platte vor der Montage, im Hallenbereich gelagert.....	111
Abbildung 4.26: Grundriss der Demonstratorbauwerke	112
Abbildung 4.27: Wandelemente vor der Montage, im Hallenbereich gelagert	112
Abbildung 5.1: Demonstratorgebäude.....	117
Abbildung 5.2: Abbruch von Demonstratorgebäude 2 mittels Betonpulverisierer..	117
Abbildung 5.3: Prozesskette vom Abbruch zum Ausgangsmaterial für die Versuche.....	120
Abbildung 5.4: Gebrochener Carbonbeton, Größe 0/56, vollständiger Aufschluss.	122
Abbildung 5.5: Trennfläche Betonmatrix (vergrößert), keine Filamentreste	122
Abbildung 5.6: Prüfsieb A mit quadratischen Sieböffnungen der Größe 10 mm....	131
Abbildung 5.7: Ergebnis Siebung mit quadratischen Sieböffnungen Größe 10 mm.....	131
Abbildung 5.8: Bei der in-situ-Querstromsichtung eingesetzter Windsichter	134
Abbildung 5.9: Prinzip der Querstromsichtung	134
Abbildung 5.10: Bei der in-situ-Querstromsichtung ausgeblasene Fraktion	136
Abbildung 5.11: Mit in-situ-Querstromsichtung ausgeblasene Carbonbewehrung...	136

Abbildung 5.12: Einzellängen Carbonrovingfragmente (Querstromsichtung in situ)	137
Abbildung 5.13: Einzellängen separierter Rovingfragmente (Querstromsichtung ex situ)	139
Abbildung 5.14: Einzellängen im Abbruchmaterial 0/10 verbliebener Rovingfragmente	139
Abbildung 5.15: Wirbelschichtenanlage, Schacht geöffnet	141
Abbildung 5.16: Schüttschicht des 0/10er-Baustoffgemischs, Luftstrom aus.....	141
Abbildung 5.17: Luftstrom volle Leistung, Ausbildung stationärer Wirbelschichten	141
Abbildung 5.18: Schale links: Schwerfraktionen mit mineralischem Material 4/10; Schale rechts: Leichtfraktion mit mineralischem Anteil 0/3 und Carbonrovingfragmenten	142
Abbildung 5.19: Schale links: Siebergebnis der Leichtfraktion, sortenreine mineralische Fraktion 0/3; Schale rechts: sortenreine Carbonbewehrungsfragmente	142
Abbildung 5.20: Schwimm-Sink-Sortierung; Standzylinder mit Wasser (links); Standzylinder mit SPT, Fraktionen schwimmen auf (rechts).....	149
Abbildung 5.21: Dichtefunktion der Schwerlösung SPT	149
Abbildung 5.22: Bestimmung des Trennbereich zur Schwimm-Sink-Sortierung	150
Abbildung 5.23: Prinzipskizze eines Schnecken-Aufstrom-Sortierers	152
Abbildung 5.24: Pulverförmiges Natriumbentonit CEBOGEL OCMA.....	156
Abbildung 5.25: Versuchsaufbau zur Schwimm-Sink-Sortierung mit Bentonit	156
Abbildung 5.26: 0/10er Abbruchmaterial in einer 4%igen Bentonitsuspension	157
Abbildung 5.27: Separierte Carbonrovingfragmente mit Bentonitanhaftungen.....	157
Abbildung 5.28: Sortierband mit Carbonbetonabbruchmaterial.....	161
Abbildung 5.29: Durchführung der Manuellen Kläubung, Prinzip der Positivsortierung	161
Abbildung 5.30: Carbonbetonabbruchmaterial mit dem Größtkorn 56 mm	162
Abbildung 5.31: Carbonbetonabbruchmaterial mit dem Größtkorn 10 mm	162
Abbildung 5.32: Ergebnis NIR-Detektion (optische Aufnahme und Metallsignal) .	167
Abbildung 5.33: Sortieranlage der TOMRA Sorting GmbH	171
Abbildung 5.34: Minimale Begrenzungslinien der mineralischen Fraktion.....	171
Abbildung 5.35: Funktionsweise des verwendeten Kamerabasierten Sortiersystems	173

Abbildung 5.36: Ergebnis Kamerabasierte Sortierung von Carbonbetonabbruchmaterial	173
Abbildung 5.37: Optimaler Aufbereitungsprozess für das Recycling von Carbonbeton	195
Abbildung 6.1: Materialprobe aus der Separation als Ausgangsmaterial für Pyrolyse	211
Abbildung 6.2: 50 mm lange Carbonfaserstränge nach 60 min Pyrolyse bei 550 °C	211
Abbildung 6.3: REM-Bild Carbonfaser nach 60 min Pyrolyse mit 550 °C	211
Abbildung 6.4: Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der Faserorientierung	213
Abbildung 6.5: Ergebnis Faserrecycling: Stapelfasergarne auf Spulen	213

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Einteilung der Faserarten	15
Tabelle 2.2:	Vergleich mechanische Eigenschaften Fasermaterialien und Betonstahl	17
Tabelle 2.3:	Faserfreisetzung bei PAN- und pechbasierten Carbonfasern	34
Tabelle 3.1:	Ablaufschritte zur Durchführung einer Nutzwertanalyse.....	58
Tabelle 3.2:	Auflistung verfügbarer Verfahren zur Separation der Carbonfasern	59
Tabelle 3.3:	Vorauswahl der zu untersuchenden Separationsverfahren	61
Tabelle 3.4:	Festlegung der Bewertungskriterien mit Gewichtung	63
Tabelle 3.5:	Bewertungsmatrix zur Beurteilung der Separationsverfahren	65
Tabelle 3.6:	Varianz der Gewichtungswerte im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.....	68
Tabelle 4.1:	Eigenschaften verfügbarer SBR-beschichteter Carbonbewehrungsgelege.....	78
Tabelle 4.2:	Eigenschaften verfügbarer EP-beschichteter Carbonbewehrungsgelege.....	79
Tabelle 4.3:	Eigenschaften der aktuell lieferbaren epoxidharzbeschichteten Carbonstäbe	80
Tabelle 4.4:	Auswertung der Tastversuche, Masse der freigelegten Carbonbewehrung	93
Tabelle 4.5:	Betonrezeptur für die Herstellung der Carbonbetonbauteile.....	94
Tabelle 4.6:	Technologische und baukonstruktive Anforderung für den Korrosionsschutz	96
Tabelle 4.7:	Zusammenfassung festgelegter Carbonbetonbauteile mit Bauteilkennwerten	113
Tabelle 5.1:	Überblick über die Grundprozesse in der Materialaufbereitung	116
Tabelle 5.2:	Charakterisierung des Abbruchmaterials (Typ 0/56 und Typ 0/10).....	125
Tabelle 5.3:	Charakterisierung Abbruchmaterial im Experiment Siebung im Labor.....	131
Tabelle 5.4:	Ergebnisse zur den Separationsverfahren Sortierende Klassierung	143
Tabelle 5.5:	Ergebnisse zu den Separationsverfahren Dichtesortierung	158
Tabelle 5.6:	Einflussfaktoren auf die Effizienz der Manuellen Kläubung	163

Tabelle 5.7:	Prozessschritte zur Kamerabasierten Sortierung von Carbonrovingfragmenten	169
Tabelle 5.8:	Formkennwerte zur Partikeldetektion Kamerabasierte Sortierung	171
Tabelle 5.9:	Ergebnisse zu den Separationsverfahren Einzelkornsortierung	175
Tabelle 5.10:	Entscheidungsmatrix für die Art der Aufbereitungsanlage (mobil/stationär)	176
Tabelle 5.11:	Bewertungsmatrix zur Beurteilung der Carbonfaserausbringung	177
Tabelle 5.12:	Bewertungsmatrix zur Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit	179
Tabelle 5.13:	Bewertungsmatrix zur Beurteilung der Qualität der Sekundärrohstoffe	183
Tabelle 5.14:	Bewertungsmatrix zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit	185
Tabelle 5.15:	Bewertungsmatrix zur Beurteilung Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz	188
Tabelle 5.16:	Analyseergebnisse zu den Nutzwerten der Separationsverfahren	190
Tabelle 5.17:	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse	192
Tabelle 6.1:	Anforderung an die Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung	203

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

°C	Grad Celsius, physikalische Größe der Temperatur
η	Ny (griechischer Buchstabe), Formelzeichen für die dynamische Viskosität, Einheit = $\frac{kg}{m \cdot s}$
ρ	Rho (griechischer Buchstabe), Formelzeichen für die Dichte eines Körpers, Einheit = $\frac{kg}{m^3}$ oder $\frac{g}{cm^3}$
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
AbfVerbrG	Abfallverbringungsgesetz
AbZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
aD	aerodynamischer Durchmesser
AGS	Ausschuss für Gefahrstoffe
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
AR-Glasfasern	Alkali resistente Glasfasern (AR = Alkaline Resistant)
A-Staub	alveolengängiger Staub
Bar	Bar, physikalische Größe des Drucks ($1 \text{ bar} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$)
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BG Bau	Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
C ³	Carbon Concrete Composite e. V. (Verein und Forschungsverbund zur Erforschung und Verbreitung der Carbonbetonbauweise)
CCeV	Carbon Composites e. V.
CEM	Cement (deutsch: Zement)
CF	carbon fibre (deutsch: Kohlenstofffaser oder auch Carbonfaser)
CFK (CFRP)	Carbon-fibre-reinforced plastic (deutsch: kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff oder auch carbonfaserverstärkter Kunststoff)
ChemG	Chemikaliengesetz
CRA	Chancen-Risiko-Analyse
DafStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.

dB (A)	Dezibel (A), physikalische Größe A-bewerteter Schalleistungspegel
DepV	Deponieverordnung
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V.
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Norm nach „Deutsches Institut für Normung“
ebd.	ebenda (deutsch: „dort gleichbedeutend“)
EN	Europäische Norm
EP-Harz	Epoxidharz
E-Staub	einatembarer Staub
et al.	et alii (deutsch: „und andere“)
EU	Europäische Union
f./ff.	folgende/fortfolgende
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
J	Joule = physikalische Einheit der Energie ($1 \text{ J} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$)
KFK	Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff (gleichbedeutend mit CFK)
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (außer Kraft gesetzt 01.06.2012)
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kW	Kilowatt = 1.000 Watt, physikalische Größe der Leistung ($1 \text{ W} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$)
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
MantelV	Mantelverordnung
Mio.	Million[en]
µm	Mikrometer = 10^{-6} m (1.000 µm = 1 mm)
N	Newton = physikalische Einheit der Kraft ($1 \text{ N} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$)
NIR	Nahinfrarotspektroskopie
p. a.	per annum oder pro anno (lateinisch „pro Jahr“)
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril

PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PES	Polyester
PP	Polypropylen
PVA	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
REM	Rasterelektronenmikroskop
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk, aus dem Engl.: Styrene Butadiene Rubber
SPT	Sodium polytungstate, engl. Bezeichnung für Natriumpolywolframat
T	Tonne = 10^3 kg (1.000 kg = 1 t)
TOC	organischer Anteil des Trockenrückstandes in der Originalsubstanz
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
Tsd.	tausend
Ω	Masseanteil = dimensionslose Gehaltsgröße zur Beschreibung der Zusammensetzung von Stoffgemischen, Hilfsmaßeinheit [kg/kg] und [g/kg]
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHO	Weltgesundheitsorganisation, aus dem Englischen: World Health Organization
ZiE	Zustimmung im Einzelfall



1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Bauwesen ist das ressourceneffiziente Bauen unter dem ökologischen Aspekt einer Ressourceneinsparung eines der großen Schwerpunktthemen.^{1, 2} Ein Vertreter einer Vielzahl an Forschungsprojekten mit dieser Zielsetzung ist das interdisziplinäre Forschungsprojekt *Carbon Concrete Composite* (kurz *C³*), gefördert vom BMBF im Programm „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ der Initiative „Unternehmen der Region“, zu nennen. Gegenstand des Projektes ist der Einsatz von textilen Kohlenstofffasern (Carbonfasern)³ als Bewehrungsmaterial. Die Betonstahlbewehrung soll durch die Carbonbewehrung sinnvoll ergänzt und stellenweise substituiert werden. Durch damit hergestellte Carbonbetone soll eine neue und ressourceneffizientere Bauweise zukünftig auf breiter Basis etabliert werden. Carbonfasern korrodieren nicht, wodurch sich Carbonbetonbauteile mit einer wesentlich reduzierten Betondeckung herstellen lassen. Die hergestellten Baukonstruktionen und -elemente zeichnen sich durch eine hohe mechanische Leistungsfähigkeit, einen geringeren Ressourcenverbrauch und eine längere Lebensdauer aus.

Auf Basis bisheriger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konnten in jüngster Vergangenheit vereinzelte Bauteile und Bauwerke aus Carbonbeton als Leuchtturmprojekte hergestellt werden. Bereits bestehende oder zukünftig herzustellende Carbonbetonbauteile werden aufgrund der guten Dauerhaftigkeit über viele Jahrzehnte in Wechselwirkung mit dem Nutzer (Mensch) und dem örtlichen Umfeld (Mensch und Umwelt) treten. Anders als Güter des täglichen Gebrauchs mit kurzer oder mittlerer Lebensdauer, wie beispielsweise Unterhaltungselektronik und Kraftfahrzeuge,⁴ werden Bauwerke und Bauwerksteile im Zuge ihrer Nutzung wiederholt bearbeitet, wobei es immer zu einer Materialfreisetzung kommt. Zu diesen mechanischen Bearbeitungen zählen das Herstellen von Bohrungen, nachträglichen Wandschlitzern oder von Bauteilöffnungen für Fenster, Türen oder Mediendurchführungen. Mit weiteren tiefgreifenden Umnutzungsmaßnahmen und zum Nutzungsende fallen darüber hinaus durch die Arbeiten des Teil- oder Totalabbruchs große Abbruchmengen an, zu deren Umgang bisher keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen. Die bei diesen Arbeiten anfallenden hochwertigen faserhaltigen Stoffe werden bisher regelmäßig beseitigt oder selten auf niedrigem Verwertungslevel verwertet. Stattdessen müssen diese Stoffe einem hochwertigen Recycling zugeführt

¹ BBSR (2016) Ziele und Strategien für ressourceneffizientes Bauen

² BMUB (2019) Leitfaden Nachhaltiges Bauen

³ In den nachfolgenden Ausführungen wird die Bezeichnung *Carbonfaser* verwendet.

⁴ Martens/Goldmann (2016) Recyclingtechnik, S. 7

werden. Daraus ergeben sich zwei wichtige Fragestellungen, die ohne das Aufzeigen von Lösungsansätzen als Markteintrittsbarrieren für den Verbundbaustoff Carbonbeton bestehen bleiben würden:

- Stellen die bei der Be- und Verarbeitung von Carbonbeton emittierten Fasern und Staubpartikel ein Gesundheitsgefährdungspotenzial für den Menschen dar?
- Können Abfallmassen aus dem Abbruch von Carbonbetonbauteilen in der Art aufbereitet werden, dass die stoffliche Verwertung der Fraktionen gewährleistet ist?

Der ressourcenschonende Einsatz von Carbonbeton mit der Möglichkeit zum Recycling ist neben der gesundheitlichen Unbedenklichkeit eine unabdingbare Voraussetzung für die Marktetablierung. In den bestehenden Baustoffmärkten muss sich Carbonbeton unter qualitativen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten mindestens gleichwertig zu konkurrierenden konventionellen Baustoffen, wie Stahlbeton, verhalten. Es sind daher Konzepte für das Recycling auf einem möglichst hohen Energielevel sowie der Ausschluss negativer Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nachzuweisen. Der anfängliche Verdacht, dass sich Carbonbeton im Gesundheitsgefährdungspotenzial ähnlich wie andere faserhaltige Baustoffe und Bauprodukte der Vergangenheit verhalten könnte, ist oberflächlich betrachtet nachvollziehbar.

Da es sich bei Carbonfasern immer um rohstofftechnisch wertvolle und energieintensiv hergestellte Werkstoffe handelt,⁵ ist eine lange Verweilzeit im Stoffkreislauf – auch über die Bauteilnutzungsdauer hinaus – anzustreben. Dafür sind Prozesse für ein qualitativ hochwertiges Recycling der Abfälle, die bei Produktions- und Abbrucharbeiten anfallen, zwingend erforderlich. Dabei ist vor allem ein sogenanntes Downcycling zu verhindern, bei dem die ursprüngliche Qualität oder die Verarbeitbarkeit der Ausgangsstoffe verloren gehen. Infolgedessen sollen auch die abfallwirtschaftlich wertvollen Deponiekapazitäten geschont werden, indem alle anfallenden Fraktionen zu verwerten sind. Gleichmaßen werden volkswirtschaftlich wichtige Ressourcen in Form der Sekundärrohstoffe dem Wertstoffkreislauf wieder zugeführt.

Unter anderem sind die Vorgaben aus der EU-Verordnung Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten einzuhalten.⁶ In dieser Bauprodukteverordnung sind in Bezug auf das Recycling von Baustoffen konkrete Vorgaben

⁵ Martens/Goldmann (2016) Recyclingtechnik, S. 307

⁶ Stand 2011, zuletzt geändert 09. März 2011

dokumentiert. Es gelten für die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen folgende Grundsätze: ⁷ „Das Bauwerk muss derart entworfen, errichtet und abgerissen [abgebrochen – Anm. d. Verf.] ⁸ werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und darüber hinaus Folgendes gewährleistet ist:

- Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abbruch wiederverwendet oder recycelt werden können.
- Das Bauwerk muss dauerhaft sein.
- Für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärrohstoffe verwendet werden.“⁶

Für die Vorgabe zur Wiederverwendung und zum Recycling von Baustoffen und Teilen eines Bauwerks ist festzustellen, dass die Substitution von Betonstahl durch textile Carbonfasern eine Zäsur im Bauwesen darstellt. Der Einsatz von faserförmigen Bewehrungsstrukturen wird unmittelbaren Einfluss auf gängige Abbruch- und Recyclingarbeiten haben. Bisherige Betonstähle können über ferromagnetische Separatoren aussortiert werden und im Elektrohochofen zu annähernd 100 % stofflich verwertet und somit hochwertig recycelt werden. In Anlehnung daran stellt sich für Carbonbewehrungsstrukturen in Carbonbetonbauteilen die Frage, wie eine vergleichbare Prozesskette auszusehen hat.

Erste orientierende Versuche des Autors zeigen, dass die Bewehrungsstrukturen in Zerkleinerungsprozessen spröde brechen und nicht als ganzheitlicher Bewehrungsstab oder Matte (Gelege) wiedergewonnen werden können. Daher sind für die Separation kleinteiliger Fragmente Verfahren zu finden. Die Frage zu praktikablen Verfahren, die das effiziente Recycling von Carbonbeton und damit hergestellten Bauteilen sicherstellen, wird bereits durch zahlreiche Baubeteiligte und Institutionen geäußert. ^{9, 10} Zu den bisher offenen Punkten zählen insbesondere offene Untersuchungen zum vollständigen Aufschluss der Fraktionen ¹¹ und der sortenreinen Separation der Carbonfasern aus dem Carbonbetonabbruchmaterial. Ganz konkret äußert beispielsweise der Geschäftsführer des bvse-Fachverbandes Mineralik – Recycling und Verwertung: ¹²

⁷ BauPVO (2011), Anhang 1, Abschnitt 7

⁸ Die gängige Bezeichnung *Abriss* ist häufig nicht korrekt, da mit dem Abriss sehr häufig der Abbruch (eines Gebäudes) gemeint ist. Das *Reißen* oder das *Einziehen* sind definierte Verfahren der Abbrucharbeiten nach DIN 18007 (05/2000). In den seltensten Fällen wird ein Gebäude eingerissen oder eingezogen, sodass es sich dabei nicht um einen Abriss handelt. Die verfahrensneutrale Bezeichnung ist *Abbruch*.

⁹ Asche et al. (2018) Fasern in Form

¹⁰ Reckter (2018) Gerettet?

¹¹ Unter der Begrifflichkeit *Aufschluss* wird nach *Martens/Goldmann (2016)* die Auftrennung (Zerlegung) vorliegender Werkstoffverbindungen verstanden. Der Aufschluss kann beispielsweise durch die Verfahren Demontage, Trennen, Brechen, Mahlen erfolgen.

¹² Rehbock (11.01.2018) Sind neuartige Faserbetone nachhaltig?

„Entscheidend ist aber für das Betonrecycling, ob und wie die Fasern aus dem Beton rausgetrennt werden können. Ob dies mit der herkömmlichen Brech-, Sieb- und Sortiertechnik gelingen kann, ist fraglich.“

Mit den Ergebnissen der Arbeit sollen Markteintrittsbarrieren untersucht und weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt werden. Darüber hinaus soll die vorliegende Arbeit bei zukünftigen Produktentwicklungen einen Beitrag zur Sensibilisierung für die beiden Themenfelder „Gesundheitsschutz“ und „Umweltschutz“ leisten.

1.2 Zielstellung und Abgrenzung der Arbeit

Die Zielstellung der vorliegenden Arbeit besteht in der Untersuchung möglicher Markteintrittsbarrieren für den neuartigen Verbundbaustoff Carbonbeton. Die bisher bestehenden Barrieren werden in den offenen Fragen zur Recyclingfähigkeit und der Beurteilung des Gefährdungspotenzials auf die menschliche Gesundheit gesehen. Diese Fragen ergeben sich aus der besonderen baustofflichen Zusammensetzung des Verbundbaustoffs Carbonbeton mit dem Einsatz einer faserförmigen Bewehrung in der Betonmatrix.

Ungeachtet der noch geringen Verbreitung von Carbonbeton ist die gegenständliche Untersuchung zur Einhaltung gesundheitlicher und umweltschutzrechtlicher Anforderungen ein wichtiges Erfordernis bei der weiteren Marktverbreitung von Carbonbeton im Bauwesen. Die weitere Entwicklung von Carbonbeton wäre dann für den Fall zu überprüfen, dass die Carbonbewehrung eine Gesundheitsgefährdung dargestellt, die über das bekannte Gefährdungsmaß konventioneller (Stahl-)Beton hinausgeht.¹³ Mit der Carbonbewehrung ergibt sich eine zusätzliche faserförmige Emissionskomponente, die in Kombination mit den bei der Betonbearbeitung auftretenden quarzhaltigen Stäuben zu bewerten ist. Dazu sind die emittierten Faserstäube auf das Vorhandensein kritischer Geometrien im Größenbereich der WHO-Definition zu untersuchen.¹⁴ Das gesundheitliche Gefährdungspotenzial ist in ungünstigen Szenarien mit einer Bandbreite technischer Bearbeitungsverfahren zu untersuchen und die freigesetzten Faserstäube sind zu bewerten. Mit einem Ausschluss der Gefährdungen für Mensch und Umwelt könnte durch die Sicherstellung des Gesundheits- und Umweltschutzes die weitere Etablierung des Baustoffes Carbonbeton forciert werden.

Zu Beginn der Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton lässt sich feststellen, dass mit der Carbonfaserbewehrung ein nichtmetallischer, zugfester und spröder

¹³ Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) (09/2011) TRGS 559 - Mineralischer Staub

¹⁴ WHO - World Health Organization (1997) Determination of Airborne Fibre Number Concentrations

Werkstoff vorliegt, der im Recyclingprozess nicht mittels konventioneller Magnetabscheidung separiert werden kann. Die Teilzielstellung der Arbeit besteht in der Validierung technologisch umsetzbarer Verfahren für die Trennung der Carbonbewehrung aus der umschließenden Betonmatrix. Dies beinhaltet den Materialaufschluss und die Sortierung der Fraktionen. Die anhand der baustofflichen Betrachtung als potenziell umsetzbar identifizierten Separationsverfahren sind im besten Fall großtechnisch zu erproben und mit geeigneter wissenschaftlicher Methodik zu analysieren. Die Ergebnisse sind mit festzulegenden Bewertungskriterien in eine Rangfolge entsprechend ihrer Vorteilhaftigkeit zu bringen. Mit dem Vorliegen der sortenreinen Fraktionen sind die Verwertungsoptionen aufzuzeigen. Im Ergebnis der Arbeit ist nach Möglichkeit ein aktuell umsetzbares Konzept für die vollständige Recyclingfähigkeit von Carbonbeton aufzuzeigen.

Die inhaltliche Abgrenzung der Arbeit erfolgt in der Art, dass als Kohlenstoffquelle für die Herstellung der untersuchten Carbonfasern Polyacrylnitril (PAN) herangezogen wurde, was direkten Einfluss auf die Untersuchungen zur Gefährdung auf die Gesundheit hat. Pechbasierte Carbonfasern sind nicht Gegenstand der Untersuchung. Diese hochmoduligen Carbonfasern werden fast ausschließlich in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt und sind im Bauwesen nicht relevant.¹⁵ Ausgangspunkt der Betrachtung zum Gesundheitsgefährdungspotenzial von Carbonfasern ist die auf die Baustelle oder ins Fertigteilwerk gelieferte Carbonbewehrung mit dem ersten bautypischen Prozessschritt des Bewehrens. Die vorangegangenen Prozesse zur Carbonfaserherstellung und zur Fertigung der textilen Bewehrung werden nicht in die Betrachtungen einbezogen. Schlusspunkt der Untersuchung ist die Zerkleinerung und die Aufbereitung des Materials aus dem Abbruch von Carbonbetonbauteilen. Die Prozessschritte zur Carbonfaseraufbereitung mit thermischen und mechanischen Verfahren werden nicht hinsichtlich des Gesundheitsschutzes untersucht. Die Arbeit beschränkt sich im Schwerpunkt Gesundheitsschutz daher auf bautypische Arbeiten und die Untersuchung potenzieller Gefährdungen für die Bauausführenden und Nutzer.

Das Recycling von Carbonbeton wird in der Arbeit als stoffliche Verwertung der getrennten Fraktionen aus den gebrochenen und zerkleinerten Carbonbetonbauteilen verstanden. Die direkte Wiederverwendung ganzer Bauteile mit der Ausnutzung lösbarer Verbindungstechniken ist nicht Gegenstand der Untersuchung. Die Arbeit widmet sich dabei vorrangig dem Recycling von konstruktiven und raumabschließenden Neubauteilen aus Carbonbeton, die mit steifen Carbonstrukturen als Matten und Stäbe bewehrt sind. Die Untersuchung der Recyclingfähigkeit von Stahlbetonbauteilen, die mit einer

¹⁵ Siehe Materialeigenschaften von Carbonfasern (Abschnitt 2.3.2), S. 15

dünnen Schicht Feinbeton und einem flexiblen Carbongelege zusätzlich verstärkt oder instandgesetzt sind, ist nicht Gegenstand der Arbeit.

Mit den Ergebnissen zum Recycling soll der Lückenschluss zwischen der Herstellung von Carbonbetonbauteilen und der stofflichen Verwertung der Fraktionen Betonmatrix und Carbonfaserbewehrung erarbeitet werden. Kann die Recyclingfähigkeit von Carbonbeton nachgewiesen werden, würde dies eine potenzielle Markteintrittsbarriere für die flächendeckende Etablierung des Baustoffes Carbonbeton beseitigen. Zudem führt das hochwertige Recycling mit dem Ziel der stofflichen Verwertung aller Fraktionen zur weiteren Steigerung der Gesamtrohstoffeffizienz von Carbonbeton. Damit wird dem Grundsatz des ressourceneffizienten Bauens im besonderen Maße entsprochen.

Die Arbeit ist an alle am Bau beteiligten Akteure, wie Abbruch- und Recyclingunternehmer, Planer, Bauausführende, potenzielle Investoren aus dem öffentlichen und privaten Bereich sowie Entscheidungsträger auf kommunaler, Landes- und Bundesebene, gerichtet und soll bei der Entscheidungsfindung im Zusammenhang mit dem Einsatz von Carbonbeton helfen. Die Arbeit soll baupraktisch umsetzbare Separationsverfahren und Wege aufzeigen, wie die Carbonbetonabbruchmassen zukünftig hochwertig verwertet und parallel Primärrohstoffe substituiert werden können. Die Untersuchungen zum Gesundheitsschutz sollen die zukünftige Gefährdung von Menschen verhindern und als positives Beispiel für die Entwicklung neuer Bauprodukte dienen.

1.3 Aufbau und Lösungsweg

Mit der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob die Recyclingfähigkeit des Verbundbaustoffes Carbonbeton eine Markteintrittsbarriere darstellt. Dies beinhaltet die Fragestellungen, ob Carbonbeton recycelt werden kann, welche technologischen Verfahren für die Umsetzung des Recyclings notwendig sind und wie die anfallenden Materialfraktionen im Anschluss verwertet werden können. Neben dem Ressourcenschutz – im Sinne der Recyclingfähigkeit – wurde der Gesundheitsschutz betrachtet. Die Arbeit widmet sich daher auch der Betrachtung von Faseremissionen, die mit der Ver- und Bearbeitung von Carbonbeton freigesetzt werden, und der Beurteilung der Emissionen auf eine mögliche Gefährdung der menschlichen Gesundheit.

In Kapitel 2 wird die Entwicklung der Carbonfaserbewehrung im Bauwesen aufgezeigt und der Verbundbaustoff Carbonbeton in die Arbeit eingeführt. Die Vorteile der Carbonbetonbauweise sollen das bestehende Einsatzspektrum verdeutlichen. Für den weiteren Einstieg in den Faserverbundwerkstoffbau wird ein Überblick über die Bandbreite textiler Bewehrungsstrukturen für das Bauwesen gegeben. Vertiefend werden die stofflichen Eigenschaften, die Herstellung und die Lieferformen von Carbonfaserbewehrungen erläutert.

Der damit verbundene Werkstoff Carbonfaser wird mit den Ausgangsstoffen, der Herstellung, den Materialeigenschaften und in einer Marktübersicht ausführlich dargestellt. Im weiteren Bearbeitungsprozess ergeben sich mit dem Verbundbaustoff Carbonbeton die beiden Wirkungspfade Carbonbeton – Mensch und Carbonbeton – Umwelt. Für den Einfluss des Carbonbetons und seiner Komponenten auf den Menschen (Wirkungspfad Carbonbeton – Mensch) werden die durchgeführten Untersuchungen zum Gefährdungspotenzial von Carbonbeton auf die menschliche Gesundheit dargestellt und die Ergebnisse beurteilt. Die positiven Ergebnisse zum Einfluss auf die menschliche Gesundheit erlauben im weiteren Verlauf der Arbeit den alleinigen Fokus auf den Wirkungspfad Carbonbeton – Umwelt.

In Kapitel 3 wird zu den Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton mit den theoretischen Grundlagen zum Baustoffrecycling hingeführt. Basierend auf den rechtlichen Vorgaben zum Recycling wird der weitgefaste Begriff *Recycling* als ausschließlich hochwertige, stoffliche Verwertung der Abbruchmassen zur Substitution von Primärrohstoffen definiert. Mit diesem Grundverständnis werden der Stand der Forschung zum Recycling von Carbonbeton dargestellt und die Zielsetzung für die späteren Versuche beschrieben. Die Versuche sollen die Möglichkeiten zur Zerkleinerung von Carbonbeton und die Aufbereitung des Materials für die stoffliche Verwertung der Fraktionen nachweisen. Vor Ausführung der großtechnischen Untersuchungen zur Trennung der Carbonbewehrung von der Betonmatrix werden Tastversuche durchgeführt und die orientierenden Ergebnisse zum Bruch- und Aufschlussverhalten von Carbonbeton dargestellt. Die daran anschließenden Großversuche sollen mit Hilfe multikriterieller Bewertungsmethoden ausgewertet werden, wofür im Schlussteil des Kapitels die theoretischen Grundlagen gelegt werden.

Mit Kapitel 4 erfolgt die baustoffliche und baukonstruktive Festlegung repräsentativer Bauteile für die (Feld-)Experimente zum Abbruch und Recycling. Mit den Grundlagen und der Bandbreite zur Verfügung stehender Textilfasern werden repräsentative Faser- und Matrixkombinationen für die Untersuchungen zum Abbruch und zur Recyclingfähigkeit ausgewählt. Die ausgewählte Bewehrungsspezifikation soll stellvertretend für die Carbonbetonbauweise zur Herstellung von Neubauteilen stehen und die Ergebnisse zum Recycling von Carbonbeton validierbar sicherstellen. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird der Einfluss der Betontechnologie und der Baukonstruktion auf die nachfolgenden Abbruch- und Recyclingverfahren erörtert werden. Mit den Grundlagen zur Betontechnologie kann die Betonrezeptur für die Herstellung der Carbonbetonbauteile festgelegt werden. Zur Festlegung repräsentativer Bauteile wird die Bandbreite der bisher umgesetzten Bauwerke und Verstärkungsmaßnahmen aus Carbonbeton vorgestellt.