

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Recycling von Beton mit alternativen Bewehrungen

Autoren

C. Neuhaus M.Sc. / Prof. Dr.-Ing. F. Dehn

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	03
Tabellenverzeichnis	03
Vorwort	04
1 Einleitung	05
2 Einsatz von Betonen mit alternativer Bewehrung	06
2.1 Alternative Bewehrungen im Betonbau	06
2.2 Betonzusammensetzungen	12
3 Recycling – Rechtliche und normative Grundlagen	14
4 Technische Verfahren beim Rückbau von Stahlbeton	17
4.1 Aufbereitung	17
4.2 Sortierung	20
5 Verwertungsmöglichkeiten der Komponenten	23
5.1 Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Komponenten	23
5.2 Untersuchungen zu Aufbereitungsverfahren	31
6 Betrachtung möglicher Gesundheitsgefährdungen	40
6.1 Darstellung der relevanten Bewertungsgrundlagen zur Beurteilung der Gesundheitsgefährdungen	40
6.2 Untersuchungen zu Gesundheitsgefährdungen	42
6.3 Bewertung hinsichtlich notwendiger Sicherheitsmaßnahmen	45
7 Diskussion der Verfahren	46
8 Zusammenfassung und Ausblick	49
Autorenschaft	51
Literaturverzeichnis	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	
Im Rahmen der Studie betrachtete alternative Bewehrungen	06
Abbildung 2-2:	
Beispiele für textile Bewehrungen aus a) Carbon [4] b) Basalt [5] c) Glas [4]	07
Abbildung 2-3:	
Beispiele für Stabbewehrung aus a) Carbon [12] b) Basalt [5] c) Glas [13]	09
Abbildung 2-4:	
Beispiele für Kurzfaserbewehrung aus a) Carbon [19] b) Basalt [5] c) Polymeren [Mikrofaser] [20] d) Polymeren [Makrofaser] [20] e) Glas [21]	10
Abbildung 4-1:	
Beispielhafter Aufbau einer mobilen Aufbereitungsanlage [48]	18
Abbildung 4-2:	
Beispielhafter Aufbau einer stationären Aufbereitungsanlage [48]	19
Abbildung 5-1:	
Ergebnis der Zerkleinerung von Textilbeton mit beschichteter Carbonbewehrung im Backenbrecher [93] Bewehrung beschichtet mit a) Kaliumsilikat b) Styrol-Butadien-Kautschuk, c) Epoxidharz	32
Abbildung 5-2:	
Zurückgewonnene Carbonfasern nach Aufbereitung von Carbonbeton in a) einer Hammermühle, b) einem Backenbrecher und c) einer Prallmühle [58]	33
Abbildung 5-3:	
Optimaler Aufbereitungsprozess für das Recycling von Carbonbeton nach Kortmann [65]	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1:	
Übersicht über die vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Carbonfasern	27
Tabelle 5-2:	
Übersicht über die vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Basaltfasern	28
Tabelle 5-3:	
Übersicht über die vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Glasfasern	29
Tabelle 5-4:	
Übersicht über die vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Kunststoffe	30

Vorwort

Für viele gilt „Carbonbeton“ als die Zukunft des Bauens. Materialeinsparungen je nach Einsatzgebiet von bis zu 80 % sollen möglich sein.

Beton besitzt die Eigenschaft, große Druckkräfte, aber so gut wie keine Zugkräfte aufnehmen zu können. Dies übernehmen die heute üblicherweise eingesetzten Stahlbewehrungen im Stahlbeton. Die Stahlbewehrungen durch nichtmetallische Bewehrungen zu ersetzen, bietet die Möglichkeit, extrem leichte und stabile Bauwerke zu erstellen. Fassadenplatten von nur noch zwei Zentimeter mit Carbonbeton gegenüber acht bis zehn Zentimeter Dicke für Stahlbeton sind machbar. Dies führt zu einer erheblichen Ressourceneinsparung. Gleichzeitig sind nichtmetallische Bewehrungen korrosionsbeständig und widerstandsfähiger. Im Brückenbau bedeutet dies eine erheblich längere Lebensdauer und weniger Reparaturarbeiten. Ein gewichtiges Argument bei dem gegenwärtig hohen Bedarf der Erneuerung von Brücken in Deutschland. In Verbindung mit dem stark reduzierten Materialbedarf – insbesondere an Beton – führt dies zu einer deutlichen Einsparung an Rohstoffen und stellt damit eine nachhaltige Alternative im Bauwesen dar.

Demgegenüber stehen Bedenken, ob ein hochwertiges Recycling möglich ist und ob zum Beispiel im Falle von Carbonfaser mit erhöhten gesundheitlichen Risiken zu rechnen ist. Auch rechtliche Regulierungen und fehlende Standards und Normen können den Einsatz von alternativen Bewehrungen hindern.

Die Studie betrachtet diese Fragestellungen und zeigt vielversprechende Ansätze zur Kreislaufführung alternativer Bewehrungen auf. Wichtig ist dabei, die Chance zu nutzen, bereits bei der Planung ein „Design for Recycling“ umzusetzen. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die Kreislaufführung von Betonen mit alternativen Bewehrungen möglich ist. Nichtsdestotrotz bestehen noch erhebliche Wissenslücken, die durch entsprechende Forschungsprojekte und Demonstrationsvorhaben zu schließen sind.

Mit dieser Studie will der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien einen Beitrag leisten, mit Fakten Bedenken zu widerlegen und Hindernissen entgegenzutreten, denn ressourceneffizientes und nachhaltiges Bauen ist für diesen sehr materialintensiven Bereich notwendig.



Dr. Christian Kuehne

Geschäftsführer

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

1 Einleitung

Im klassischen Massivbau kommen üblicherweise Betone mit einer Bewehrung aus Stahl zum Einsatz, jedoch steigt das Interesse an Bewehrungen aus alternativen Materialien. Insbesondere in korrosiven Umgebungen können nicht korrodierende Bewehrungsmaterialien von Vorteil sein. Ein weiterer wichtiger Vorteil alternativer Bewehrungen ist, dass aufgrund der entfallenen Mindestbetondeckung, schlankere Bauteilausführungen möglich sind. Dadurch entsteht ein geringer Ressourcenverbrauch, was die Nachhaltigkeit der Bauteile verbessert.

In der Baupraxis eingesetzt und erforscht werden daher Bewehrungen aus verschiedenen Materialien, wie Carbon, Basalt oder auch Polymeren. Diese können entweder als textile (mattenartige) oder stabförmige Bewehrung in den Beton eingelegt oder auch als Kurzfaserbewehrung dem Frischbeton zugegeben werden.

Ressourceneffizient können Baustoffe jedoch nur sein, wenn am Ende der Nutzungsdauer ein zielgerichtetes Recycling möglich ist. Für die Wiederverwertung ist bei Verbundbaustoffen meist eine Trennung der Komponenten notwendig. Zudem muss untersucht werden, ob die aufbereiteten Komponenten für eine Wiederverwendung geeignet sind. Dabei ist neben der technischen Umsetzbarkeit auch die Wirtschaftlichkeit der Aufbereitungsverfahren relevant.

Die vorliegende Studie beleuchtet die Möglichkeiten des Recyclings von Betonen mit alternativen Bewehrungen. Hierzu wird zunächst kurz auf den Einsatz alternativer Bewehrungen im Allgemeinen und auf die rechtlichen Vorgaben bezüglich des Recyclings von Bauabbruch eingegangen. Anschließend wird ein Überblick über die technischen Verfahren im Rückbau gegeben. Eine Betrachtung der möglichen Verwertungsstrategien für die einzelnen Bestandteile der alternativen Bewehrungen sowie eine Sichtung der Literatur zu untersuchten Trenn- und Aufbereitungsverfahren der Komponenten schließt sich an. Im zweiten Teil der Studie werden potentielle Gesundheitsrisiken im Hinblick auf die beim Rückbau der Betone entstehenden (insbesondere quarzhaltigen) Stäube sowie Abmessungen der freigesetzten Fasern betrachtet. Abschließend werden der derzeitige Stand der Forschung zum Recycling von Betonen mit alternativen Bewehrungen sowie die noch offenen Forschungsfragen zusammengefasst und darauf aufbauend Empfehlungen für weitere Forschung gegeben.

2 Einsatz von Betonen mit alternativer Bewehrung

Beton zeichnet sich durch eine hohe Druckfestigkeit aus, verfügt aber nur über eine geringe Zugfestigkeit. Zur Übertragung von Zugkräften und zur Begrenzung der Rissbreite sowie der Verformungen wird daher eine Bewehrung angeordnet. Im klassischen Stahlbetonbau kommt hierfür eine Stab- oder Mattenbewehrung aus Stahl zum Einsatz. Es werden vermehrt auch andere Bewehrungsarten, sog. alternative Bewehrungen, erforscht. Diese können alternative Geometrien (z.B. Gelege mit geringen Durchmessern und Garnabständen oder Kurzfasern) aufweisen und aus anderen Materialien bestehen (wie z. B. Kunststoff, Carbon oder Basalt).

2.1 Alternative Bewehrungen im Betonbau

Neben Stabbewehrung aus anderen Materialien, wie kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK, Carbonbewehrung), glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK, Glasfaserbewehrung) oder basaltfaserverstärkten Kunststoffen (BFK, Basaltbewehrung), werden auch mattenartige (textile) Bewehrungen aus CFK, GFK oder BFK und Kurzfaserbewehrungen mit Stahlfasern, Glasfasern, Kunststofffasern (Polymerfasern), Kohlenstofffasern (Carbonfasern) oder Basaltfasern verstärkt betrachtet. Die vorliegende Studie stellt die Recyclingfähigkeit von Bewehrungen aus Carbon, Kunststoffen und Basalt in den Vordergrund. Auf Glasfasern wird nur am Rande eingegangen. Eine Übersicht über im Rahmen der Studie betrachtete alternative Bewehrungen gibt **Abbildung 2-1**.



Abbildung 2-1: Im Rahmen der Studie betrachtete alternative Bewehrungen

2.1.1 Textile und stabförmige Bewehrungen

Die Forschung an textilbewehrten Betonen konzentriert sich derzeit auf Beton mit einer Bewehrung aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (Carbonbeton). Aber auch textile Bewehrungen aus Kunststoffen mit einer Verstärkung aus alkaliresistenten Glasfasern [AR-Glasfasern] oder basaltfaserverstärkten Kunststoffen sind möglich [1]. Zur Herstellung der textilen Bewehrungen werden zunächst Endlosfasern, sog. Filamente, zu Garnen, sog. Rovings, gesponnen. Diese Rovings werden anschließend zu flächigen Bewehrungen verarbeitet [1, 2]. In **Abbildung 2-2** sind Beispiele für textile Bewehrungen aus den verschiedenen Materialien dargestellt. Bewehrungen aus Glas- oder Basaltfasern sind wegen der hohen Verfügbarkeit der Rohstoffe und aufgrund technologischer Gründe bei der Herstellung deutlich kostengünstiger als Bewehrungen aus Carbon. Sie werden laut Kirsten et al. [3] jedoch hauptsächlich für nicht tragende Bauteile oder Bauteile mit mittleren Belastungen eingesetzt [3].

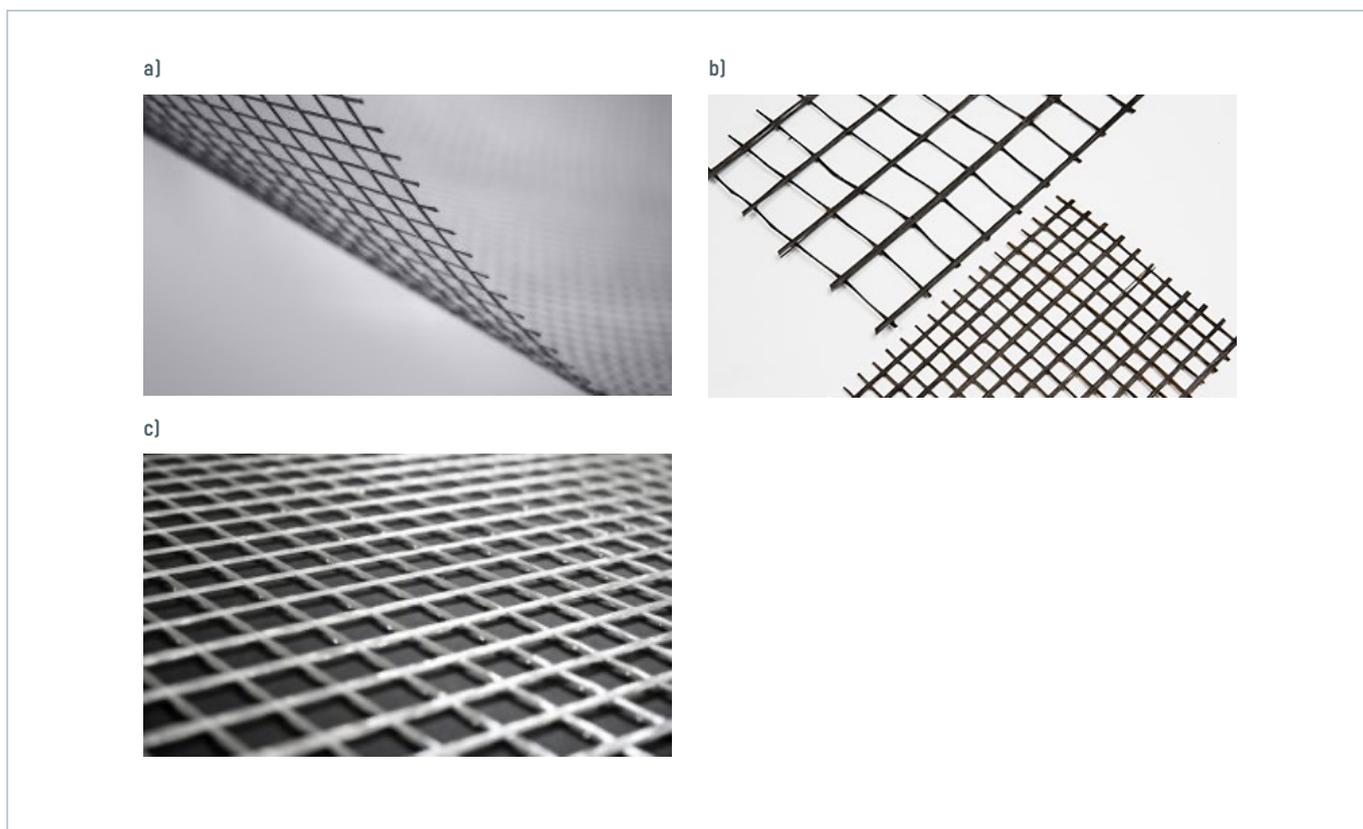


Abbildung 2-2: Beispiele für textile Bewehrungen aus a) Carbon [4] b) Basalt [5] c) Glas [4]

Textile Bewehrung aus Carbon kann hingegen auch für hohe Belastungen eingesetzt werden [3]. Ein weiterer Vorteil von Carbonbewehrungen sind die guten Dauerhaftigkeitseigenschaften. Diese führen dazu, dass die Lebensdauer von carbonbewehrten Bauteilen auf 100 Jahre ausgelegt werden kann [6]. Nachteilig lassen sich die hohen Kosten und die energieintensive und aufwendige Herstellung der Bewehrung nennen [6, 3]. Carbonfasern werden hergestellt auf Basis von Polyacrylnitril (PAN), Pech oder Viskose. Carbonfasern auf PAN-Basis werden bevorzugt im Bauwesen eingesetzt. Grund hierfür sind hochwertig herstellbare Carbonfasern bei – verglichen mit Carbonfasern aus anderen Ausgangsstoffen – niedrigen Herstellkosten. Pechbasierte Carbonfasern können Anwendung finden, wenn besonders hohe Fasersteifigkeiten gefordert sind [3]. Insbesondere für pechbasierte Carbonfasern gibt es jedoch Vorbehalte aufgrund gesundheitlicher Risiken (siehe hierzu Kapitel 6).

Zur Sicherstellung eines guten Verbundes zwischen der textilen Bewehrung und dem Beton werden die Bewehrungen beschichtet [7]. Früher kamen hierfür Tränkungen mit Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) zum Einsatz, inzwischen werden meist Epoxidharze oder Polyacrylate (PA) eingesetzt [6].

Die Einsatzgebiete von Carbonbewehrungen umfassen sowohl die Verstärkung bestehender Bauteile, als auch den Neubau. Zur Verstärkung werden Gelege mit kleinen Maschenweiten und dünnen Querschnitten eingesetzt. Die Anwendung ist bei fast allen gängigen Bestandsbetonen möglich. Es können bspw. Bauwerke aus Hochbau, Brückenbau oder auch denkmalgeschützte Bauwerke verstärkt werden. Im Vergleich zu Verstärkungen mit Spritzbeton ist ein bis zu 86 % geringerer Ressourcenverbrauch möglich. Im Neubau werden Gelege mit größeren Querschnitten und größeren Maschenweiten eingesetzt [6]. Durch die engmaschigen Bewehrungsnetze textiler Bewehrungen in Vergleich zu den Stababständen klassischer Stahlbewehrung wird zudem eine feinere Rissverteilung erreicht [7].

Neben textiler Bewehrung wird auch der Einsatz alternativer Bewehrung in Stabform untersucht. Auch für stabförmige Bewehrungen gibt es Forschung zum Einsatz von Carbon [6]. Stabbewehrungen aus Basalt und Glas werden ebenfalls erforscht [8, 9]. Basaltstäbe eignen sich aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit für die Anwendung in Verstärkung und Neubau. Bei Versuchen ließen sich durch Basaltbewehrungen hohe Tragfähigkeiten, allerdings größere Rissbreiten und auch größere Verformungen als bei Stabstahlbewehrung nachweisen [10, 11]. **Abbildung 2-3** zeigt Beispiele für stabförmige alternative Bewehrungen.

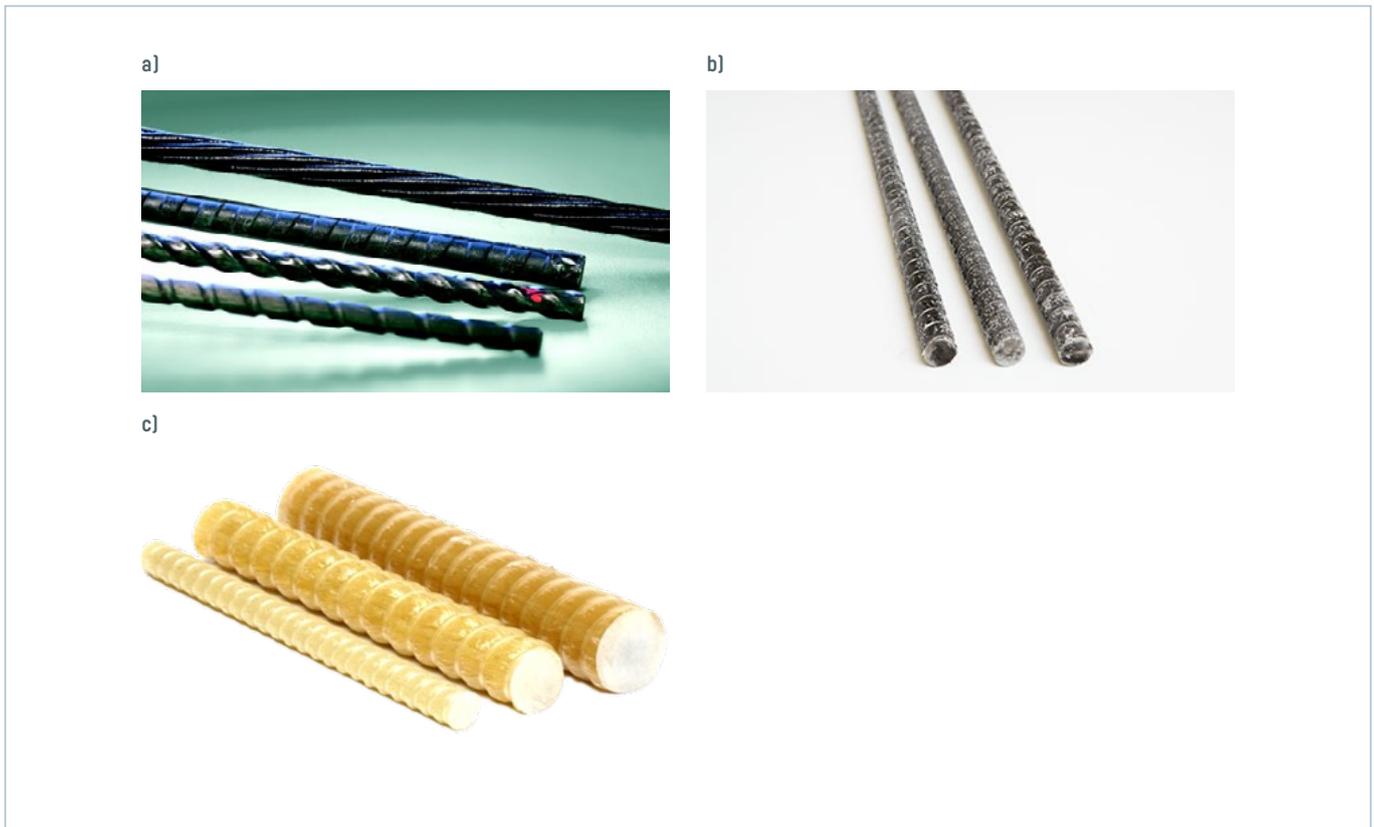


Abbildung 2-3: Beispiele für Stabbewehrung aus a) Carbon [12] b) Basalt [5] c) Glas [13]

Derzeit ist der Einsatz von textiler Bewehrung nicht normativ geregelt. Eine DAfStb-Richtlinie „Nichtmetallische Bewehrungen“ ist laut Curbach et al. [6] für die Anwendung im Neubau in Erarbeitung. Auch für den Einsatz textiler Bewehrungen in der Verstärkung wird die Erstellung einer Richtlinie diskutiert. Bisher erfolgt der Einsatz über Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) oder auch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) bzw. allgemeine Bauartgenehmigungen (aBG). Derzeit bestehen bspw. allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen und allgemeine Bauartgenehmigungen für die Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton [14, 15] und für stabförmige Glasfaserbewehrung [16].

2.1.2 Kurzfaserbewehrung

Kurzfasern werden im Betonbau zur Verbesserung des Riss- und Bruchverhaltens eingesetzt. Üblicherweise werden Kurzfasern direkt beim Mischvorgang dem Beton zugegeben. So erfolgt eine zufällige Verteilung und Orientierung der Fasern in Beton. Diese kann lediglich durch besondere Verarbeitungsbedingungen leicht beeinflusst werden [17]. Eingesetzt werden häufig Stahl-, Glas oder Polymerfasern. Kohlenstofffasern kommen bisher nur selten zum Einsatz, das lässt sich auf den verhältnismäßig hohen Preis sowie die leichte Beschädigung der Fasern beim Mischen zurückführen [1]. Auch Kurzfasern aus Basalt werden erforscht [18]. Beispiele für Kurzfaserbewehrungen sind in **Abbildung 2-4** dargestellt.

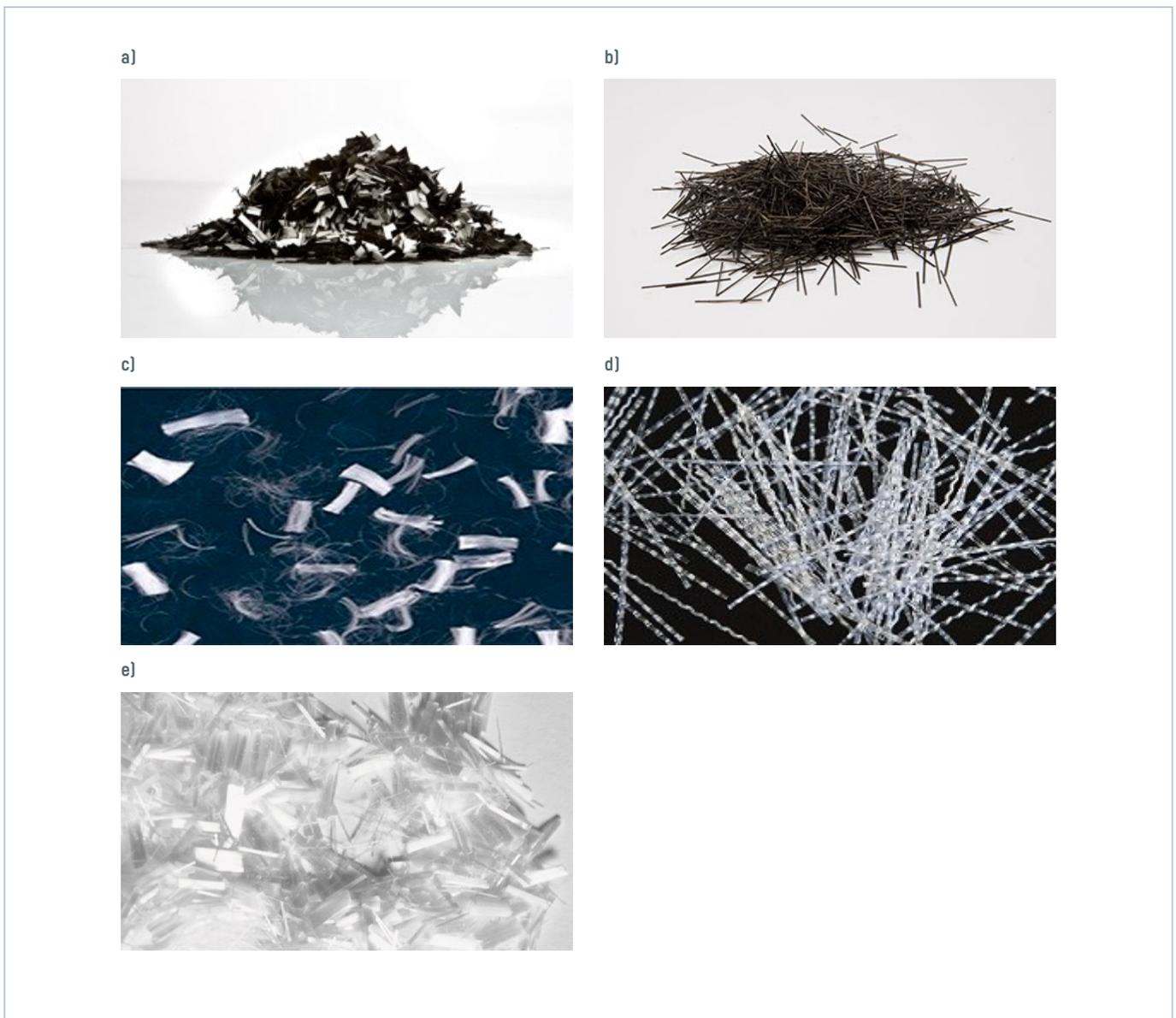


Abbildung 2-4: Beispiele für Kurzfaserbewehrung aus a) Carbon [19] b) Basalt [5] c) Polymeren (Mikrofaser) [20] d) Polymeren (Makrofaser) [20] e) Glas [21]

Polymerfasern (Kunststofffasern) werden für vielfältige Anwendung eingesetzt. Je nach Fasertyp können sie unter anderem zur Erhöhung der Beständigkeit der Konstruktion im Brandfall, zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit und für konstruktive Zwecke angewendet werden [22]. Grundsätzlich dürfen als Kunststoffbewehrung alle Polymere genutzt werden [23]. Häufig eingesetzt werden Fasern aus Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Mischungen aus PP und PE, Polyvinylalkohol (PVA), Polyacrylnitril (PAN) und aromatisierte Polyamide. Die häufigste Anwendung finden jedoch PP-Fasern. Als Vorteile von PP-Fasern sind insbesondere die gute Alkalibeständigkeit sowie die vergleichsweise niedrigen Materialkosten zu nennen [17]. Detailliertere Informationen zu PP-Fasern sind beispielsweise [22] zu entnehmen. DIN EN 14889-2:2006 „Fasern für Beton – Teil 2: Polymerfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität“ [23] gibt die Anforderungen für Polymerfasern in Beton vor. Unterschieden werden Mikrofasern mit einem Durchmesser kleiner 0,3 mm und Makrofasern mit einem Durchmesser größer als 0,3 mm [23]. Makrofasern weisen üblicherweise eine Länge von 30 mm bis 60 mm auf, während Mikrofasern lediglich eine Länge von 5 mm bis 30 mm aufweisen [24].

Glasfasern aus AR-Glas werden ebenfalls als Kurzfasern in Beton eingesetzt. Diese besitzen meist eine Länge von 6 mm bis 25 mm und werden Betonen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften oder der Dauerhaftigkeitseigenschaften zugegeben [1, 25]. Zum Einsatz von Glasfasern in Beton ist bisher eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) notwendig [17].

Auch Kurzfasern aus Basalt werden verstärkt auf ihr Einsatzpotential im Beton untersucht. Basaltkurzfasern können beschichtet und unbeschichtet eingesetzt werden [18]. Bisher bestehen für Basaltfasern als Mikrofasern und Makrofaser zur Verminderung der Schrumpfrissbildung allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen [26, 27]. Aber auch der Einfluss von Basaltfasern auf die mechanischen Eigenschaften wurde mit positivem Ergebnis untersucht. So konnte bspw. eine Erhöhung der Druckfestigkeit gezeigt werden [28]. Auch eine Erhöhung der Biegezugfestigkeit wurde bestätigt [29]. Für eine Anwendung in Beton eignen sich laut [30] Basaltfasern mit Längen zwischen 6 mm und 26 mm und Durchmesser von 10 µm bis 25 µm am besten. Weitere Untersuchungsergebnisse zur Forschung an Basaltfasern sind bspw. in [30–32] zusammengefasst.

Untersucht werden Carbonkurzfasern bislang hauptsächlich für den Einsatz in Mörtel, eingesetzt werden hierfür Fasern mit Längen bis zu 6 mm. Carbonkurzfasern werden beispielsweise in Zusammenhang mit 3D-Druck für Beton betrachtet. Durch die Ausnutzung der verfahrensbedingt orientierten Fasern in Richtung der Zugspannungen kann die Zugfestigkeit der Fasern gut ausgenutzt werden [33]. Die bisherige Forschung weist gute mechanische Eigenschaften der Kurzfasern in Beton nach. Genauere Untersuchungsergebnisse sind bspw. in [34, 35] zu finden.

2.2 Betonzusammensetzungen

2.2.1 Betonzusammensetzungen für Betone mit textilen und stabförmigen Bewehrungen

Die Betonzusammensetzungen für den Einsatz textiler Bewehrungen unterscheiden sich für die Anwendungsfälle Neubau und Verstärkung von Bauwerken.

Bei der Verstärkung von Bauwerken sind häufig nur Schichtdicken von wenigen Millimetern notwendig [6]. Auch sind die Maschenweiten der eingesetzten Gelege gering mit Garnabständen zwischen 1 cm und 2 cm. Die Maschenweite sollte für einen guten Verbund größer als das Drei- bis Vierfache des Größtkorns sein [7]. Aus diesen Gründen werden meist spezielle Feinbetone mit einem Größtkorn von 1 mm bis 2 mm eingesetzt. Häufig sind bei der Verstärkung ein bis zwei Lagen ausreichend, was einer Gesamtschichtdicke von 10 mm bis 15 mm entspricht [6]. Die Betonzusammensetzung für Verstärkungsmaßnahmen zeichnen sich zudem durch einen hohen Bindemittelgehalt aus. Das Verhältnis Bindemittel zu Gesteinskörnung beträgt häufig 1,33:1 bis 1:1. Das Bindemittel ist zumeist aus zwei Massenanteilen Zement und einem Massenanteil Puzzolan zusammengesetzt, wobei der Puzzolananteil aus 85 % – 90 % Flugasche und 10 % – 15 % Mikrosilika besteht. Insbesondere für den Einsatz von Bewehrungen aus AR-Glas wird zur Abpufferung der Alkalität der Puzzolananteil erhöht, bspw. in Verbindung mit einem Einsatz von CEM III/B-Zementen [36]. Häufig kommen Wasserzementwerte [w/z-Werte] von 0,3 – 0,4 zum Einsatz, was für eine hohe Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Betone sorgt. Durch hochleistungsfähige Fließmittel, bspw. Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether [PCE], wird dennoch ein verarbeitbarer Beton erreicht [36].

Insbesondere bei Verstärkungen kommt das Laminierverfahren zum Einsatz. Hierbei wird zunächst eine 3 mm – 5 mm dicke Schicht im Sprühverfahren aufgetragen, anschließend die erste textile Bewehrungslage in den frischen Beton eingedrückt. Diese Arbeitsschritte werden wiederholt, bis die gewünschte Anzahl an Bewehrungslagen aufgebracht ist. Abschließend erfolgt eine weitere dünne Feinbetonschicht, welche händisch oder im Sprühverfahren aufgetragen werden kann [1]. Als Sprühverfahren wird hierbei ein Verfahren mit deutlich niedrigeren Spritzdrücken als beim Auftrag von Spritzbeton beschrieben. Dadurch fällt kein Rückprallgut an, was zum einen Ressourcenverbrauch und Abfallaufkommen reduziert, zum anderen durch den Wegfall des Sprühnebels bessere Arbeitsbedingungen schafft und somit eine höhere Ausführqualität ermöglicht. Eine höhere Aufprall- und somit Verdichtungsenergie ist auch im Hinblick auf die filigranen Carbon- oder AR-Glasfasern undenkbar, da dies eine Schädigung der querdruckempfindlichen Fasern mit geringer Biegesteifigkeit nach sich ziehen könnte [37]. Bei der Betonzusammensetzung ist daher darauf zu achten, dass der Feinbeton sich im Sprühverfahren auftragen lässt [36].

Beim Neubau erfolgt das Einbringen des Betons häufig durch Gießen, sodass gießfähige Betone gefordert sind [38]. Zudem werden meist weitere Stababstände bzw. Maschenweiten gewählt [6]. Es werden sowohl hochfeste „Feinbetone“ mit einem Größtkorn von 2 mm oder 5 mm als auch normalfeste Betone mit einem Größtkorn von 8 mm verwendet [38]. Generell sind auch Betone nach DIN EN 206-1 „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“ [39] einsetzbar [6]. Das Einbringen ist zudem auch durch Drucken oder Schleudern möglich [1].

2.2.2 Betonzusammensetzung für Betone mit Kurzfaserbewehrung

Grundsätzlich sind für Betone mit Kurzfaserbewehrungen die allgemeinen Regeln der Biontechnologie anzuwenden. Jedoch gibt es einige Besonderheiten zu beachten. Für Faserbetone haben sich Betone mit Wasserzementwerten (w/z -Werte) von 0,4 – 0,5 mit hohem Zementgehalt als geeignet erwiesen. Der Zement kann auch anteilig durch Flugasche (25 % – 30 %) oder Silikastaub (bis zu 10 %) ersetzt werden. Das Einmischen von höheren Fasermengen wird durch einen geringeren Anteil grober Gesteinskörnung begünstigt. Bei größeren Größtkorndurchmessern sind Fasern mit einem größeren Durchmesser vorteilhaft. Häufig wird das Größtkorn auf 8 mm oder weniger begrenzt, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Betons zu erzielen [1]. Für Glasfaserbeton empfehlen sich aufgrund der Kerbempfindlichkeit möglichst feinkörnige Betone. Zudem sind Zusammensetzungen mit einem möglichst niedrigen Zementgehalt und einem möglichst hohen Anteil an Gesteinskörnung zu bevorzugen. Dies führt zu einem schnellen Karbonatisieren und somit zu einer Verringerung der Alkalität [1, 25]. Da bis-her die Forschungsergebnisse zur Alkali-wider-standsfähigkeit von Basalt widersprüchlich sind [17], sind die für Glasfasern empfohlenen Betone mit verringerter Alkalität auch für Basaltfasern zu empfehlen.

3 Recycling – Rechtliche und normative Grundlagen

Die Verwendung und die Pflicht zur Wiederverwertung von Abfällen sind in Deutschland in verschiedenen Gesetzen und Vorschriften definiert. In diesem Kapitel werden die relevanten Regelwerke kurz aufgezeigt. Detailliertere Informationen sind den Regelwerken selbst zu entnehmen.

3.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Zweck des „Gesetzes zur Förderung und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“ [Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG] [40] ist „die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen“. Das Gesetz setzt die Vorgaben der europäischen Richtlinie 2008/98/EG in deutsches Recht um.

Im Kreislaufwirtschaftsgesetz wird die Abfallhierarchie definiert:

1. Vermeidung,
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,
3. Recycling,
4. sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,
5. Beseitigung.

Der Hierarchie ist deutlich zu entnehmen, dass eine Beseitigung oder sonstige Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen zu vermeiden ist. Es ist ein Recycling anzustreben. Bei der derzeitigen Bauweise ist eine Wiederverwendung, bspw. in Form von modularen Bauteilen, in der Regel nicht umsetzbar.

Unter Verwertung fallen laut Anlage 2 des Gesetzes auch die Hauptverwendung als Brennstoff oder anderes Mittel zur Energieerzeugung, das Recycling und die Rückgewinnung anorganischer Stoffe sowie organischer Stoffe, die nicht als Lösungsmittel verwendet werden. Auch die Vergasung und Pyrolyse unter Verwendung der Bestandteile als Chemikalien ist hier inbegriffen. Unter Beseitigung fällt laut Anlage 1 bspw. die Ablagerung in Deponien [40].

Eine Ausnahme von der Pflicht zur Verwertung von Abfällen besteht, wenn dies technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist (§7 [4] KrWG) [40].

3.2 Ersatzbaustoffverordnung

Die „Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung“ (Ersatzbaustoffverordnung, Mantelverordnung) [41] wird am 01.08.2023 in Kraft treten. Die Ersatzbaustoffverordnung stellt Anforderungen an die Herstellung und den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen, die bspw. als Abfall aus dem Rückbau anfallen. Zudem soll die Verordnung Änderungen der Deponieverordnung enthalten [41].

Auch die Ersatzbaustoffverordnung fordert eine getrennte Verwertung von mineralischen Rückbauabfällen und restlichen Abfällen, solange dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist.

3.3 Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial

Bis zum Inkrafttreten der Ersatzbaustoffverordnung gelten zur Verwertung von Baustoffrecyclingmaterial in Baden-Württemberg laut einem Schreiben vom 25.09.2019 des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [42], die 2004 durch das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg erlassenen „Vorläufigen Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“ [43]

Diese nennen Grenzwerte im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit von Verfüllstoffen zum Einsatz im Straßen- und Dammbau sowie zur Verfüllung von Arbeitsräumen und Leitungsgräben für einzelne Einbaukonfigurationen und Materialqualitäten. Für Produkteigenschaften rezyklierter mineralischer Bauprodukte wird auf die Richtlinie für die Verwendbarkeit von rezyklierten mineralischen Bauprodukten, herausgegeben vom Bundesverband der Deutschen Recycling-Baustoff-Industrie e.V. (BRB-Richtlinie), verwiesen.

3.4 Abfallverzeichnisverordnung

In der „Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen“ (Abfallverzeichnisverordnung AVV) [44] werden die Bezeichnungen von Abfällen festgelegt und die Einstufungen von Abfällen nach ihrer Gefährlichkeit vorgenommen.

Für das beim Rückbau anfallende Abbruchmaterial, welches in der vorliegenden Studie berücksichtigt wird, sind insbesondere folgende Abfallschlüssel von Bedeutung:

- 17 01 01** Beton
- 17 01 03** Kunststoff
- 17 09 04** gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen

Abfälle, auf die keine der in Abfallverzeichnisverordnung vorgegebenen Abfallschlüssel zutrifft, werden mit der Abfallschlüsselnummer 99 bezeichnet [44].

3.5 Gewerbeabfallverordnung

Die „Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen“ (Gewerbeabfallverordnung, GewAbfV) [45] regelt unter anderem Erfassung, Vorbehandlung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling und sonstige Verwertung von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen [45].

In der Gewerbeabfallverordnung wird definiert, dass bestimmte Abfälle, wie bspw. Beton und Kunststoffe, getrennt behandelt werden müssen. Ist keine getrennte Sammlung der Bau- und Abbruchabfälle möglich, so sind die Gemische in einer Aufbereitungsanlage zu separieren. Ist dies technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar, entfällt diese Pflicht. Unter wirtschaftlich nicht zumutbar wird verstanden, „wenn die Kosten für die Behandlung der Gemische und die anschließende Verwertung außer Verhältnis zu den Kosten für eine Verwertung steigen, die keine Vorbehandlung oder Aufbereitung erfordert“ (§9 (4), GewAbfV [45]). Geeignete Aufbereitungsanlagen müssen mindestens 85 % der Kunststoffe aus einem Gemisch ausbringen [45].

3.6 Deponieverordnung

Die Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung) [46] regelt unter anderem die Ablagerung von Abfällen auf Deponien. Es werden fünf Deponieklassen unterschieden (Deponiekategorie 0 [(DK 0) bis Deponiekategorie IV (DK IV)])

In Anhang 3 der Verordnung werden Zulässigkeits- und Zuordnungskriterien definiert. Für die untersuchten alternativen Bewehrungen ist insbesondere der organische Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz von Bedeutung. Dieser darf bestimmt als TOC (Total organic carbon – gesamter organischer Kohlenstoff) für Deponien der Klasse DK 0 maximal 1 % betragen, für DK 3 maximal 6 % [46].

4 Technische Verfahren beim Rückbau von Stahlbeton

In diesem Kapitel werden derzeit angewendete Verfahren des Abbruchs und des Recyclings dargestellt. Neben den etablierten Verfahren, die beim Rückbau und Recyclingkonventionelle Bauwerke eingesetzt werden, werden auch weitere bereits entwickelte Verfahren betrachtet.

Der Abbruch von Bauwerken in Massivbaueise erfolgt üblicherweise mechanisch durch Hydraulikbagger, Fallbirnen oder auch händische Verfahren (bspw. mit einem Vorschlaghammer). Auch Sprengungen werden beim Abbruch eingesetzt. Die Verfahren können der im Entwurf vorliegenden E DIN 18007:2022-01 „Abbrucharbeiten – Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche“ [47] entnommen werden.

An der Abbruchstelle erfolgt häufig ein weiteres Zerkleinern des Abbruchmaterials. Dies kann durch Hydraulikbagger mit geeigneten Anbauteilen, wie bspw. einem Pulverisierer, erfolgen [48, 49].

Bereits beim Rückbau der Bauwerke kann durch einen selektiven Rückbau das Recycling der Baustoffe erleichtert werden. So können bereits unterschiedliche Baustoffe wie Ziegel, Holz und Beton voneinander getrennt werden. Dies erleichtert die folgenden Aufbereitungsschritte zur der Gewinnung eines möglichst sortenreinen Abbruchmaterials [48].

4.1 Aufbereitung

Die Aufbereitung von Bauabfällen ist Grundvoraussetzung für das anschließende Verwerten der Komponenten und/oder der Baustoffe. Zunächst wird das abgebrochene Material vorsortiert und anschließend zerkleinert und sortiert.

4.1.1 Zerkleinerung

Durch die Zerkleinerung kann bereits ein Aufschluss in die einzelnen Komponenten erfolgen. Dies setzt jedoch voraus, dass die Phasengrenze zwischen den verschiedenen Komponenten die Schwachstelle des Baustoffs darstellt. Auch wenn die Zerkleinerungswiderstände der Komponenten sich unterscheiden, können diese nach einer erfolgten selektiven Zerkleinerung in anschließenden Prozessschritten selektiert werden [48].

Zur Zerkleinerung des Materials kommen bei der Aufbereitung grundsätzlich verschiedene Brecher und Mühlen in Frage. Brecher zerkleinern hierbei grundsätzlich in gröberes Aufbereitungsgut und Mühlen in feineres. Häufig zum Einsatz kommen Backenbrecher oder Prallbrecher [50, 48]. In Backenbrechern wird das Aufgabegut zwischen zwei Platten, den

sogenannten Backen, im Quetschbruch zerkleinert. Backenbrecher eignen sich zur Zerkleinerung von groben Aufgabematerial und werden vorwiegend zur Grob- und Mittelzerkleinerung eingesetzt [50]. Das gewonnene Material weist eher plattige Kornformen auf [48]. Im Prallbrecher hingegen wird das Aufgabegut durch Schlag und Prall zerkleinert. Hierbei wird über eine mit Schlagleisten bestückte, sich drehende Achse das Aufgabegut gegeneinander sowie an Pralleisten oder Prallplatten geschlagen. Durch Prallbrecher kann eine Feinzerkleinerung des Aufgabeguts erfolgen. Prallbrecher zeichnen sich durch eine gute Zerkleinerungsleistung sowie kubisch geformtes Brechgut aus. Nachteilig ist der vergleichsweise hohe Verschleiß im Brecher sowie die große Menge an entstehendem Feingut zu nennen [50].

Die weitere Zerkleinerung von Bauabfällen ist grundsätzlich in mobilen oder stationären Aufbereitungsanlagen durchführbar. In einfachen Aufbereitungsanlagen erfolgt eine Vorabsiebung, um das Material in zwei Fraktionen zu trennen. Der Siebdurchgang, das Vorsiebmaterial, wird nicht weiter aufbereitet. Die gröbere Fraktion wird in einem nachgeschalteten Brecher, bspw. einem Prallbrecher, zerkleinert. Nach dem Brechen des Materials werden mit Hilfe eines Überbandmagneten Eisenteile aussortiert. Übrig bleibt der mineralische Recyclingbaustoff. Dieser Aufbau einer Aufbereitungsanlage wird beispielsweise in mobilen Anlagen eingesetzt. Ein beispielhafter Aufbau ist in **Abbildung 4-1** dargestellt [48].

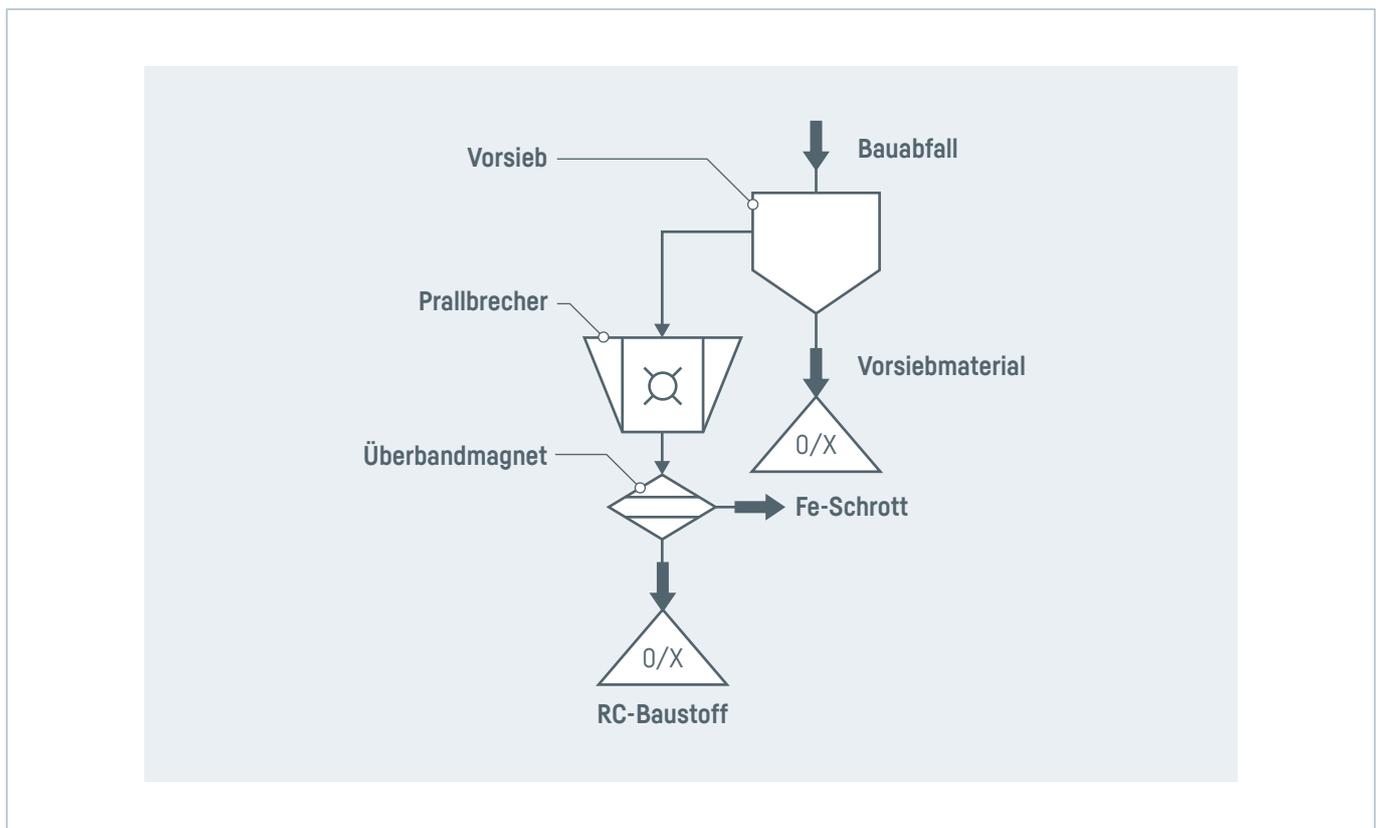


Abbildung 4-1: Beispielhafter Aufbau einer mobilen Aufbereitungsanlage [48]

Zusätzliche Aufbereitungsschritte können das Ergebnis verbessern. Es ist beispielsweise eine mehrstufige Zerkleinerung durch verschiedene Brecher möglich. Auch sind weitere Zwischenschritte zur Aussortierung von Störstoffen zielführend, um ein möglichst sortenreines Rezyklat zu erhalten. Auf mögliche Sortierverfahren wird im folgendem [Abschnitt 4.2] genauer eingegangen. Zudem kann über Siebe mit verschiedenen Lochgrößen eine Aufteilung in die Kornfraktionen erfolgen. Ein beispielhafter Aufbau einer solchen aufwendigeren Aufbereitungsanlage ist in **Abbildung 4-2** dargestellt. Aufwendigere Aufbereitungen erfolgen meist in stationären Anlagen.

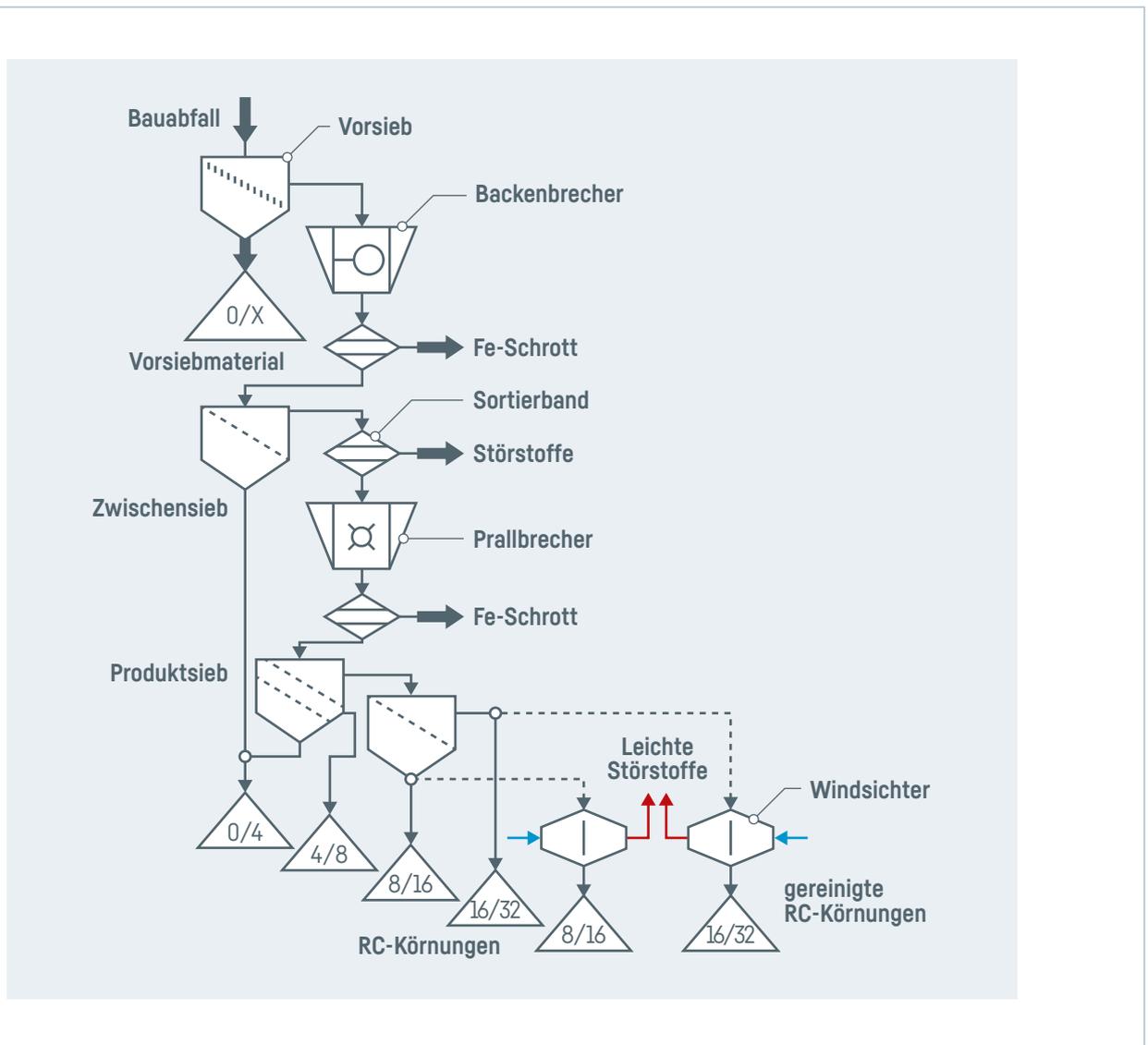


Abbildung 4-2: Beispielhafter Aufbau einer stationären Aufbereitungsanlage [48]

4.2 Sortierung

Nach der Zerkleinerung erfolgt die Sortierung des Recycling-Materials. Grundlage für die Sortierung ist zum einen ein erfolgreicher Aufschluss der Komponenten und zum anderen die Möglichkeit der Unterscheidung der Komponenten an mindestens einem Merkmal [48]. Hierfür können verschiedene Verfahren eingesetzt werden, die Prinzipien dieser Verfahren werden im Folgenden in Kürze beschrieben.

4.2.1 Verfahren zur Trennung nach geometrischen Abmessungen

Die Sortierung der Materialien nach den geometrischen Abmessungen erfolgt über die Siebklassierung. Über diese wird das Recyclinggut in die einzelnen Kornfraktionen unterteilt. Aber auch in der Aufbereitung kommen verschiedene Siebe zum Einsatz. So wird beispielsweise das Material vor der Zugabe zum Brecher gesiebt, um die Brecher vor zu groben Aufgabegut zu schützen oder um bereits feines Aufgabegut abzusieben und so die Aufgabemenge zu reduzieren.

Zur Siebung von Bauschutt können verschiedene Arten von Sieben eingesetzt werden. Die einfachste Form sind feste Roste. Hierbei wird das Aufgabegut auf ein schräg gestellten Rost gegeben. Während Bestandteile, die feiner sind, als der Abstand zwischen den Stäben des Rosts durch dieses hindurchfallen, gleiten gröbere Bestandteile auf dem Rost nach unten. Bei bewegten Rosten und Rollenrosten erfolgt der Weitertransport des Materials zusätzlich durch Bewegung. Die Bewegung begünstigt zudem das Lösen eingeklemmter Bestandteile. Mit Hilfe von Rosten werden eher gröbere Fraktionen abgetrennt [48].

Für die Trennung feinerer Bestandteile eignen sich Siebe. Im Bereich der Bauabfallaufbereitung werden meist Trommelsiebe oder Schwingsiebe eingesetzt [48]. Die Klassierung durch Trommelsiebe erfolgt über geneigte Trommeln, die um die eigene Achse rotieren. Durch die Sieböffnungen in der Trommelwand tritt das feinere Material aus, während das gröbere weiter durch die Trommel transportiert wird. Durch die ständige Vermischung des Aufgabeguts wird eine Abdeckung der Sieblöcher vermieden. Auch bei Schwingsieben wird das Aufgabematerial durch Bewegung des Siebes in Bewegung versetzt. Das Aufgabegut wird bei den häufig eingesetzten Wurfsieben senkrecht zum Sieb angeregt und bewegt sich so in Richtung der Siebneigung durch kleine Würfe. Dies hat den Vorteil, dass das Aufgabematerial aufgelockert und durchmischt wird und so feinere Bestandteile durch das Sieb gelangen können [48, 50].

Bei sogenannten Schrägbandabscheidern werden kubische Partikel von plattigen abgetrennt. Das Aufgabegut wird auf ein in Bandrichtung und senkrecht dazu geneigtes Förderband gegeben. Plattige Partikel werden über das Band befördert, während kubische und kugelige Partikel nach senkrecht zur Bandrichtung nach unten rollen und so abgetrennt werden [48].

4.2.2 Verfahren zur Trennung nach der Dichte

Die Verfahren zur Sortierung nach der Dichte beruhen auf der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeit von Partikeln in einem Trägermedium wie Wasser oder Luft.

Trockene Verfahren zur Trennung nach der Dichte

Bei der Windsichtung erfolgt die Trennung der Partikel über das Einblasen eines Luftstroms. Leichtere Partikel werden vom Luftstrom ausgetragen, schwere Partikel fallen nach unten. Voraussetzungen für eine erfolgreiche Sortierung mittels der Windsichtung ist, dass die Partikel vereinzelt vorliegen und eine ausreichend enge Kornfraktion realisiert wurde. Der Luftstrom bei der Windsichtung kann aus unterschiedlichen Richtungen erfolgen. Im Bauwesen wird häufig die Querstromsichtung eingesetzt. Hierbei wird das zerkleinerte Material senkrecht durchströmt. Die Abluft muss bei diesem Verfahren gefiltert werden, um Verunreinigungen der Umgebungsluft zu vermeiden. Baupraktisch können mittels der Windsichtung organische oder mineralische Dämmstoffe, Folien und Papier von der mineralischen Substanz abgetrennt werden [48].

Eine Kombination von Windsichtung und Schwingsieb sind sogenannte Trenntische oder Luftherde. Hierbei wird das Schwingsieb von unten mit Luft durchströmt. Leichte Bestandteile wandern auf dem Luftstrom nach unten, während schwerere Bestandteile über das Schwingsieb nach oben befördert werden. Bei gleichen Partikelformen ist so eine Trennung nach der Dichte möglich. Bei ähnlicher Dichte ist eine Trennung nach Partikelform möglich [48].

Ein weiteres Verfahren zur Abtrennung leichter Stoffe sind Luftsetzmaschinen. Diese können bspw. mit einem fluidisierten Sandbett arbeiten. Hierbei sinken Partikel mit einer größeren Dichte als das Sandbett ab, während Partikel mit geringerer Dichte nach oben steigen [48].

Nasse Verfahren zur Trennung nach der Dichte

Nasse Verfahren zur Trennung nach der Dichte basieren auf dem Dichteunterschied der Materialien im Verhältnis zu einer Trennflüssigkeit, bspw. Wasser. Das einfachste Verfahren dieser Art ist die Schwimm-Sink-Sortierung. Unter anderem Sand- und Splitterfraktionen können so abgetrennt werden. Die Fraktionen werden über Förderbänder oder Schnecken aus dem Sortierer ausgetragen. Die Austragung des Schwerguts erfolgt hierbei so, dass möglichst wenig Wasser mit ausgetragen wird. Das mit ausgetragene Wasser ist aufzufangen und entweder zurückzuführen oder aufzubereiten [48].

Es gibt verschiedene Verfahren, die eine Erweiterung der Schwimm-Sink-Sortierung darstellen. So ist bspw. Aufstromsortierung zu nennen. Bei dieser unterstützt eine aufwärts gerichtete Strömung die Separation der leichten Bestandteile [48].

Bei der Filmschichtsortierung wird das Aufgabematerial und Wasser auf ein schrägliegendes gemuldetes Förderband gegeben. Das absinkende Material wird über das Förderband nach oben abgetragen, während die leichteren Bestandteile auf der Wasseroberfläche abwärts getragen werden [48].

Bei der Setsortierung wird über eine aufwärtsgerichtete pulsierende Strömung das Aufschwimmen der leichteren Bestandteile gefördert, während schwere Bestandteile absinken [48].

4.2.3 Verfahren zur Trennung nach weiteren Eigenschaften

Bei der Aufbereitung von Bauabfällen sind auch Eisenbestandteile, bspw. aus Bewehrungsstahl, aus dem Abbruchmaterial zu entfernen. Dies kann aufgrund der magnetischen Eigenschaft von Eisen über einen Elektro- oder Permanentmagneten erfolgen. Meist wird ein sogenannter Überbandmagnet eingesetzt. Hierbei wird über dem eigentlichen Förderband quer zur Laufrichtung ein weiteres Förderband mit Magnet angebracht. Die magnetisierbaren Teile werden angezogen und über das zweite Förderband abtransportiert. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz eines Trommelmagneten. Bei diesem Verfahren wirkt ein Magnet in der Förderbandumlenkung, sodass die magnetischen Teile weiter in der Umlenkung bis zu einem Abstreifer mitgeführt werden und die nicht magnetisierbaren Bestandteile das Förderband am Umlenkpunkt verlassen [48].

4.2.4 Sensorbasierte Trennverfahren

Durch sensorbasierte Trennverfahren wird eine hochwertige Trennung des Aufgabeguts erzielt. Bislang werden sensorbasierte Trennverfahren in der Aufbereitung von Bauabfällen selten eingesetzt. Bei diesen Verfahren werden bestimmte Stoffe durch einen Sensor erkannt, die Position dieser wird an einen Sortiergreifer weitergeleitet, der die Stoffe anschließend vom Band nimmt. Statt eines Sortiergreifers kann die Aussortierung auch über gesteuerte Druckluftventile erfolgen. So kommen in anderen Bereichen bereits optische Zeilenkameras zur Anwendung, die nach Helligkeit, Farbe, Transparenz, Reflexion oder Form Partikel erkennen können. Auch eine Erkennung von Partikeln nach der Wellenlänge über Nahinfrarotsensoren, die bspw. zur Kunststoffsortierung eingesetzt werden, ist möglich. Weitere sensorbasierte Möglichkeiten sind die Sortierung anhand der atomaren Dichte, durch die Messung der Röntgentransmission oder eine direkte chemische Analyse mittels Laserinduzierter Plasmaspektroskopie [LIBS]. Bei letztere können jedoch nur die oberflächennahen Schichten erfasst werden [48].

5 Verwertungsmöglichkeiten der Komponenten

In diesem Kapitel wird auf verschiedene Möglichkeiten der Wiederverwendung der Komponenten von Beton mit alternativen Bewehrungen eingegangen. Zunächst werden mögliche Einsatzmöglichkeiten beschrieben und anschließend werden bisher durchgeführte Untersuchungen zu Aufbereitungsmöglichkeiten dargestellt.

5.1 Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Komponenten

Die hochwertigste Variante des Recyclings ist eine modulare Bauweise, bei der anschließend an den Rückbau eine Wiederverwendung von Bauteilen als Ganzes erfolgt [sog. Re-use]. Dies ist jedoch baupraktisch in der Regel nicht möglich. Eine auf den Re-use ausgerichtete Bauweise ist jedoch zukünftig erstrebenswert.

Kann nicht das Bauteil als Ganzes wiederverwertet werden, ist eine Verwertung der einzelnen Komponenten anzustreben. Möglichkeiten hierfür werden im Folgenden dargestellt.

5.1.1 Betonbruch

Das Recycling von Betonbruch ist im klassischen Stahlbeton bereits etabliert. So kann aufbereiteter Betonbruch, bspw. als rezyklierte Gesteinskörnung, wieder im Beton eingesetzt werden. Hierfür wird der Betonbruch zerkleinert [1]. Dabei entstehen Betonsplitt mit einem Durchmesser größer als 2 mm und Betonbrechsand mit einem Durchmesser kleiner als 4 mm [51]. Während die geometrischen Eigenschaften von rezyklierter Gesteinskörnung gebrochener natürlicher Gesteinskörnung ähneln, weichen die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften von diesen ab, da rezyklierte Gesteinskörnung aus natürlicher Gesteinskörnung und Zementstein besteht. Im Allgemeinen weist Zementstein im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung eine niedrigere Festigkeit und Steifigkeit und eine höhere Porosität auf, daher ist rezyklierte Gesteinskörnung mit einem möglichst geringen Zementsteingehalt von Vorteil. Dies kann bspw. durch Auftrennen in Form von mechanischer Beanspruchung wie Brechen oder Mahlen, thermische Beanspruchung (Erhitzen oder im Mikrowellenverfahren), durch Ultraschallbehandlung oder durch eine chemische Behandlung durch Säure erfolgen [1]. Auch elektrodynamische oder elektrohydraulische Verfahren können eingesetzt werden [48]. Einen Überblick über verschiedene Verfahren geben bspw. Wang et al. [52].

Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung für den Einsatz in Beton werden in DIN EN 12620:2002+A1:2008 „Gesteinskörnungen für Beton“ [51] festgelegt. Grundsätzlich muss diese denselben Anforderungen genügen wie natürliche Gesteinskörnung. Im Hinblick auf Betonabbruch von Betonen mit alternativen Bewehrungen ist hierbei insbesondere der Grenzwert für organische Bestandteile in der Gesteinskörnung zu beachten. Der Anteil für

sonstige Materialien (bindige Materialien, Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi und Gips) ist gemeinsam mit dem Anteil an Glas auf maximal 2 M.-% begrenzt [51].

Nach DIN 4226-101:2017-08 [53] wird rezyklierte Gesteinskörnung in vier Typen unterteilt, welche unterschiedliche Zusammensetzungen und Einsatzgebiete aufweisen. Zudem ist in Anhang A der Norm definiert, welche Rohmaterialien und Abfallschlüssel der Abfallverzeichnisverordnung [44] welchen entstehenden Bestandteilen rezyklierter Gesteinskörnung nach der Aufbereitung zuzuordnen sind.

Die DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [54] legt genaue Anforderungen an die rezyklierte Gesteinskörnung fest. So ist bspw. der Feinanteil (< 0,063 mm) auf max. 4 % für Gesteinskörnung Typ 1 (Betonspalt) begrenzt. Zudem muss der Massenanteil aus Beton, Betonprodukten, Mörtel, Mauerstein aus Beton, ungebundener Gesteinskörnung, Naturstein und hydraulisch gebundener Gesteinskörnung mindestens 90 % betragen. Der Massenanteil an Glas und sonstigen Materialien darf maximal 1 % betragen [54, 51].

Die sich derzeit im Entwurf befindliche DIN 1045-2:2022-07 [55] beinhaltet die Anforderungen der DAfStb-Richtlinie [54] und passt diese auf den Stand der Technik an. So können laut des Norm-Entwurfs auch feinere Gesteinskörnungen (Durchmesser < 2 mm) zukünftig im Recyclingbeton verwendet werden.

Weitere Möglichkeiten neben der Verwertung als Recyclinggesteinskörnung in Beton sind eine Verwertung als Trag- oder Frostschuttschicht im Straßen- und Wegebau, als Verfüllmasse im Kanal- und Leitungsbau sowie als Damm- oder Verfüllbaustoff [56].

Für eine Verwendung als Frostschutz- oder Schottertragschicht ist eine Begrenzung des Gehalts an Fremdstoffen, wie Gummi, Kunststoffen, Textilien und Papier auf max. 0,2 M.-% begrenzt. Zusätzlich ist der Gehalt an Glas auf maximal 5 M.-% begrenzt [57]. Für den Einsatz im Straßenbau kommen grobkörnige Korngemische, bspw. 0/32, 0/45 oder 0/53 zum Einsatz. Der Feinanteil unter 0,063 mm ist jedoch begrenzt und darf 5 M. % nicht übersteigen [48].

5.1.2 Faserbestandteile

Recycling von Carbon-, Basalt- und Polymerfasern ist bisher im Bausektor ein untergeordnetes Thema. Aus anderen Bereichen gibt es für diese Materialien aber bereits Recyclingansätze. Insbesondere die Verwertung von Carbonfasern bzw. kohlenstoffverstärkter Kunststoffe aus anderen Industriebereichen wurde und wird in vielen Forschungsvorhaben untersucht. Die Wiederverwertung der Carbonfasern ist insbesondere aufgrund der im Vergleich zu anderen Faserarten hohen Kosten und des hohen Energieverbrauchs bei der Herstellung von besonderem Interesse.

Carbonfasern

Kimm et al. [58] untersuchten im Labormaßstab den Einsatz von rezyklierten Textilbewehrungen aus epoxidharzbeschichteten Carbonfasergelegen in Feinbeton. Die Probekörper zeigten eine um 30 % – 40 % verringerte Biegezugfestigkeit im Vergleich zu Probekörpern mit neuwertiger Bewehrung. Es konnten lediglich 60 % der rezyklierten Bewehrungen wieder in den Beton eingebracht werden [58].

Eine Wiederverwertung als Ganzes ist auf Basis dieser Ergebnisse nicht zielführend, daher werden im Folgenden weitere Verwertungsmöglichkeiten für die reine Faserfraktion beleuchtet.

Erforscht wird derzeit eine Anwendung von rezyklierten Carbonfasern als Verstärkung in Beton oder Zement. Norambuena-Contreras et al. [59] untersuchten den Einfluss von Carbonpulvern auf die mechanischen Eigenschaften von Zementstein. Eingesetzt wurden im Schneidprozess von Carbonfasern entstehende Partikel mit einer Größe von max. 1,25 mm. Es konnte mit steigendem Carbonpulveranteil ein positiver Einfluss auf die Biegefestigkeit gezeigt werden, bei leichter Verringerung der Druckfestigkeit und deutlich steigender Porosität [59]. Die Beeinflussung des mechanischen Bruchverhaltens von Zementmörtel durch verschiedene rezyklierte Carbonfasern mit einer Länge von 0,05 mm bis 15 mm untersuchten Nguyen et al. [60]. Sie konnten insbesondere für Carbonfasern mit Epoxidharzmatrix einen positiven Effekt auf das Schwind- und Nachrissverhalten feststellen [60]. Auch Mastali et al. [61] dokumentierten in ihren Versuchen eine positive Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton unter Verwendung von Fasern aus rezyklierten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffplatten. Es wurden hierbei Faserlängen von 10 mm bis 30 mm in verschiedenen Volumengehalten untersucht. Eine deutliche Steigerung der Druck- und Biegefestigkeit bei Verringerung der Verarbeitbarkeit konnte nachgewiesen werden [61]. Kimm et al. [62] erzielten in ihren Untersuchungen mit rezyklierten Carbonfasern in Zementmörtel höhere Biegezugfestigkeiten als mit den vergleichend untersuchten Stahl- und AR-Glasfasern. Die eingesetzten Carbonfasern wurde vorher mittels Pyrolyse (beschrieben in Abschnitt 5.2.2) aufbereitet [62].

Zurückgewonnene von der Matrix getrennte Carbonfasern mit einer Länge ab 40 mm können zu Stapelfasergarnen verarbeitet werden. Grundsätzlich sind Garne aus reinen rezyklierten Carbonfasern oder Hybridgarne bspw. aus einer Kombination von rezyklierten Carbonfasern und Polyamidfasern möglich [9]. An Hybridgarnen bspw. wurden Verbundfestigkeiten von bis zu 80 % der Referenzgarne aus nicht rezyklierten Ausgangsstoffen nachgewiesen [63]. Aus dem rezyklierten Hybridgarnen hergestellte Halbzeuge zeigten bessere Biegefestigkeiten als aus Vliesen auf Basis rezyklierter Carbonfasern hergestellte Prüfkörper [64]. Eine Entwicklung von textiler Bewehrung für Beton mit Recyclinggarn als Ausgangsmaterial ist zukünftig denkbar [65].

Auch für die Herstellung von Vliesen müssen Faser und Matrix zuvor getrennt werden. Die Vliesherstellung kann direkt aus dem Faserrohmaterial erfolgen. Die Fasern sollten hierfür eine Länge von ca. 30 mm bis 100 mm aufweisen [66]. Es konnten mit Vliesen aus rezyklierten Carbonfasern in einer Epoxidharzmatrix Eigenschaften erzielt werden, die mit herkömmlichen Kohlenstofffaservliesen vergleichbar sind [67]. Vliese aus rezyklierten Carbonfasern können bspw. zum Homogenisieren von Betonoberflächen oder für Verkleidungselemente eingesetzt werden [68, 69]. Aufgrund des geringeren Herstellungsaufwands stellen Vliese im Vergleich zu Garnen eine kostengünstigere Recyclingalternative für Carbonfasern dar. Allerdings bedeutet diese Methode im Vergleich ein Downcycling [69].

Außerhalb der Baubranche ist auch die Wiederverwendung der Carbonfasern als Organofolie eine Option. Auch hier ist eine Trennung von Faser und Matrix im Vorfeld notwendig. Die Faserstücke werden bei diesem Verfahren gerichtet auf eine PET-Folie aufgebracht und konsolidiert. Die Organofolien können zu neuen Bauteilstrukturen verarbeitet werden [68].

Eine Möglichkeit des Recyclings der Carbonfaser mit verhältnismäßig geringem Aufwand ohne Auftrennung von Faser und Matrix ist das Partikelrecycling. Hierfür erfolgt eine Zerkleinerung der beschichteten Carbonfasern. Die entstehenden Partikel können anschließend in der Herstellung duromerer Faserverbundmaterialien als Füllstoffe zugesetzt werden. Eine Anwendung in Beton ist laut Meiners und Eversmann [68] ebenfalls denkbar. Aufgrund des einfachen Aufbereitungsprozesses ist diese Methode theoretisch für das Verwerten großer Mengen geeignet. Allerdings können hier die Eigenschaften der Carbonfasern nicht in hohem Maße ausgenutzt werden [68].

Auch ein Partikelrecycling der reinen, durch Pyrolyse oder Solvolyse (siehe Kapitel 5.2.2) von der Matrix getrennten, Carbonfaser ist möglich. Die Faserpartikel können als Füller in neuen Faserverbundmaterialien eingesetzt werden bspw. als Verstärkung für thermoplastische Polymere dienen und so in neuen Kunststoffprodukten Verwendung finden [70, 68]. Wird auch das Harz zurückgewonnen, kann dieses als Füllstoff wiederverwendet werden [56].

Aufgrund des hohen Heizwertes, der vergleichbar mit dem Heizwert von Braunkohle ist, ist ein Einsatz von Carbonfasern zumindest theoretisch als Energiequelle denkbar [71]. Derzeit ist jedoch kein Prozess zur thermischen Verwertung von Carbonfasern in der Industrie im Einsatz [72]. So verbleibt in konventionellen Müllverbrennungsanlagen die Faser nicht lang genug in der heißen Zone, sodass keine vollständige Verbrennung erfolgt [73]. Die sich bei unvollständiger Verbrennung bildenden kleineren Faserfragmente können aus der Brennkammer entweichen und zu einem Zusetzen der Gewebefilteranlagen oder aufgrund ihrer Leitfähigkeit zu Kurzschlüssen oder Bränden in elektrostatischen Abscheidern führen [74]. Auch in Sonderverbrennungsanlagen wurden in Untersuchungen nachgewiesen, dass keine vollständige Zersetzung der Fasern erfolgt, dies wurde durch den Nachweis von Carbonfasern in der Schlacke belegt. Zudem wurde die Bildung von gesundheitsgefährdenden WHO-Fasern (siehe Abschnitt 6.1) beobachtet. Die Fasern wurden jedoch in der Abgasreinigungsanlage der Verbrennungsanlagen vollständig zurückgehalten [75].

Des Weiteren wurde der Einsatz von kohlenstofffaserhaltigen Abfällen als Kohleersatz in der Stahlerzeugung untersucht. Eine grundsätzliche Möglichkeit hierfür, die jedoch noch weiterer Forschung bedarf, wurde festgestellt [76].

In Erprobung ist auch der Einsatz von kohlenstofffaserhaltigen Abfällen bei der Calciumcarbidherstellung [77]. Erste Forschungsergebnisse zeigen nur einen geringen Anteil an Carbonfasern in den Reststoffen, was auf eine gute Zersetzung der Carbonfasern hinweist. Auch wurde nur eine sehr geringe Menge an WHO-Fasern nachgewiesen. Ein Austrag von Carbonfasern wurde nicht festgestellt. Weitere Forschung ist auch hier notwendig, um einen industriellen Einsatz zu ermöglichen [75].

Eine Deponierung von Carbonfaserbewehrung in Epoxidharzmatrix ist unzulässig. Durch die Carbonfasern weist die Bewehrung einen hohen organischen Kohlenstoffanteil von bis zu 30 % auf [65]. Eine Deponierung ist nach der Deponieverordnung [46] selbst auf Anlagen der Deponiekategorie III für Sondermüll nur bis zu einem gesamten organischen Kohlenstoffanteil (TOC) von maximal 6 % erlaubt. Theoretisch ist nach Trennung von Faser und Matrix eine Deponierung möglich, dies wird jedoch aufgrund der aufwendigen Aufbereitung nicht als sinnvoll angesehen [74].

Es zeigt sich, dass mit steigenden Faserabmessungen der rezyklierten Carbonfasern hochwertigere Recyclingmöglichkeiten möglich sind. Für viele Verwertungsmöglichkeiten ist zudem eine Trennung von Faser und Kunststoffmatrix notwendig. Mögliche Verfahren hierfür sind in Abschnitt 5.2.2 dargestellt. **Tabelle 5-1** fasst die dargestellten Verfahren zum Recycling von Carbonfasern zusammen.

Tabelle 5-1: Übersicht über die vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Carbonfasern

Quelle	Einsatzzweck	Trennung von Faser und Matrix	Faserlänge	Grundsätzliche Eignung
[58]	Rezyklierte Bewehrung	Nein	Textilgewebe	Nein
[59]	Carbonpulver in Zementstein	Nein	Max. 1,25 mm	Ja
[60]	Kurzfasern in Zementmörtel	Nein	0,05 mm bis 15 mm	Ja
[61]	Kurzfasern in selbstverdichtendem Beton	Nein	10 mm bis 30 mm	Ja
[62]	Kurzfasern in Beton	Ja	5 mm bis 40 mm	Ja
[9, 63, 64]	Stapelfasergarn, Hybridgarn	Ja	Mind. 40 mm	Ja
[66, 67]	Vliese	Ja	30 mm bis 100 mm	Ja
[68]	Organofolien	Ja	1 mm bis 50 mm	Ja
[68, 70]	Partikelrecycling, bspw. Verstärkung von Kunststoffen	Ja / Nein	Max. 100 µm	Ja
[72-75]	Thermische Verwertung	Nein	Keine Anforderung	Nein
[76]	Kohleersatz in Stahlerzeugung	Nein	Keine Anforderung	Ja
[75, 77]	Calciumcarbidherstellung	Nein	Keine Anforderung	Ja
[65]	Deponierung	Ja	Keine Anforderung	Nein

Basaltfasern

Auch Basaltfasern können theoretisch erneut in Kunststoffen zur Verstärkung eingesetzt werden. Neben der Trennung von Faser und Matrix ist jedoch eine weitere Behandlung bspw. mittels Natriumhydroxid der Faser zum Erhalten der Zugfestigkeit nach der thermischer Auftrennung notwendig [78, 79].

Für Basaltfaserabfälle und Basaltwolle aus der Chemieindustrie wurde durch Artemenko et al. [80] ein Einsatz in Asphalt untersucht. Die Untersuchung weist auf einen positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit und die Hitzebeständigkeit des Asphalts hin [80]. Eine solche Verwertung ist auch für rezyklierte Basaltfasern aus textiler Betonbewehrung denkbar.

Den Einfluss von Fasern aus rezyklierten basaltfaserverstärkten Kunststoffen auf das Schwinden von Beton mit einem Größtkorn von 16 mm untersuchten Kowalik und Ubysz [81]. Bei einer Zugabe von 2 Vol.-% Fasern konnte eine Verringerung des Schwindens um 65 % im Vergleich zu unbewehrten Proben nachgewiesen werden. Genaue Angaben zur Aufbereitung und Abmessung der Fasern werden nicht gegeben [81]. **Tabelle 5-2** zeigt die betrachteten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Basaltfasern.

Tabelle 5-2: Übersicht über die vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Basaltfasern

Quelle	Einsatzzweck	Trennung von Faser und Matrix	Faserlänge	Grundsätzliche Eignung
-	Verstärkung von Kunststoffen	Ja	Keine Angabe	Möglich
[80]	Verstärkung von Asphalt	Ja	50 mm bis 60 mm	Möglich
[81]	Kurzfasern in Beton	Nein	Keine Angabe	Ja

Aufgrund der den Glasfasern ähnelnden physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften von Basaltfasern [82] ist es denkbar, dass sich auch ähnliche Einsatzmöglichkeiten der rezyklierten Bewehrung ergeben. Aufgrund dessen werden im Folgenden kurz mögliche Verwertungen für rezyklierte Glasfaserbewehrung beleuchtet.

Glasfasern

Zu Pulver zerkleinerte glasfaserbewehrte Kunststoffe wurden durch Farinha et al. [83] auf ihr Potential beim Einsatz in Mörtel als Ersatzstoff für Sand untersucht. Es wurden bis zu 50 % des Sandes ersetzt. Es zeigten sich verbesserte Biege- und Druckfestigkeiten. Auch wurde die Wasseraufnahme reduziert [83].

Wie rezyklierte kohlenstofffaserbewehrte Kunststoffe wurde auch für rezyklierte glasfaserbewehrte Kunststoffe aus anderen Industriebereichen der Einsatz in Beton untersucht. Mastali et al. [84] führten Versuche mit 20 mm langen Fasern in selbstverdichtendem Beton durch. Es konnte eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften nachgewiesen werden [84]. Auch in Mörtel wurde durch García et al. [85] eine Verbesserung der Druck- und Biegefestigkeit durch Kurzfaserbewehrung aus rezyklierten glasfaserbewehrten Kunststoffen im Vergleich zu unbewehrtem Mörtel festgestellt [85].

Produktionsabfälle aus der Herstellung von Glasfaserbewehrungsstäben wurden von Yazdanbakhsh et al. [86] zugeschnitten und auf ihre Anwendung als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung in Beton untersucht. Trotz abnehmender Druck- und Zugfestigkeiten sehen die Autoren eine grundsätzliche Einsetzbarkeit von glasfaserbewehrten Kunststoffen als Gesteinskörnungsersatz [86]. Weitere Untersuchungen, ob sich auch für aus Beton rezyklierten Bewehrungsstäben eine solche Verwendung grundsätzlich eignet, sind nötig.

Auch für Glasfasern kommt ein Partikelrecycling in Frage. Wie bei Carbonfasern können die Partikel zur Verstärkung neuer Kunststofffaserverbundmaterialien verwendet werden [87].

Aus wirtschaftlichen Gründen erfolgt für glasfaserverstärkte Kunststoffe meist eine Verwertung in Zementwerken als kombinierte energetische und stofflich Verwertung. Hierbei dient das Harz als Energieträger während die Glasbestandteile als Mineralstoff genutzt werden können [88].

Während nicht in Kunststoffmatrix gebundene Glasfasern kostengünstig deponiert werden können, ist für glasfaserverstärkte Kunststoffe eine Deponierung aufgrund des Brennwertes der Matrix ausgeschlossen [88]. Eine Übersicht der vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Glasfasern gibt **Tabelle 5-3**.

Tabelle 5-3: Übersicht über die vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Glasfasern

Quelle	Einsatzzweck	Trennung von Faser und Matrix	Faserlänge	Grundsätzliche Eignung
[83]	Ersatz von Sand in Mörtel	Nein	Max. 63 µm	Ja
[84]	Kurzfasern in selbstverdichtendem Beton	Ja	20 mm	Ja
[85]	Kurzfasern in Mörtel	Nein	Mind. 5,6 mm	Ja
[86]	Ersatz von Gesteinskörnung in Beton	Nein	Stabbewehrung, 4,8 mm – 37,5 mm	Möglich
[87]	Partikelrecycling, bspw. Verstärkung von Kunststoffen	Nein	Ca. 50 µm	Ja
[88]	Kombinierte energetische und stoffliche Verwertung in Zementwerken	Nein	Keine Angabe	Ja
[89]	Deponierung	Nein	Keine Anforderung	Nein

Polymerfasern

Zur Herstellung von Polymerfasern haben sich Polypropylen [PP], Polyethylen [PE] und Polyvinylalkohol [PVA], die alle der Gruppe der Thermoplaste zugeordnet werden können, etabliert. Sortenreine Thermoplaste können eingeschmolzen werden und als Granulat wieder zur Herstellung neuer Kunststoffprodukte genutzt werden [56].

Zudem kann auch eine chemische bzw. thermische Verwertung in Betracht gezogen werden. Möglich sind hierbei bspw. die thermische Zersetzung durch Pyrolyse in Öle und Gase oder auch die Vergasung im Hochofen [56]. In **Tabelle 5-4** sind die betrachteten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Kunststoffe dargestellt.

Tabelle 5-4: Übersicht über die vorgestellten Verfahren zum Einsatz rezyklierter Kunststoffe

Quelle	Einsatzzweck	Trennung von Faser und Matrix	Faserlänge	Grundsätzliche Eignung
[56]	Granulat zur Herstellung neuer Kunststoffe	–	Keine Anforderung	Ja
[56]	Chemische bzw. thermische Verwertung	–	Keine Anforderung	Ja

5.1.3 Gemischte Fraktionen

Neben der Verwertung der einzelnen Komponenten ist auch die Möglichkeit des Recyclings des ungetrennten Materials zu betrachten.

Kortmann [65] untersuchte beispielsweise für Beton mit textiler Carbonbewehrung die Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung. Hierbei wurden die Carbonrovingfragmente nicht aus dem Abbruchmaterial separiert. Die Carbonrovingfragmente wurden somit als Kunststoff-Massenanteil in der rezyklierten Gesteinskörnung belassen. Mit einem Massenanteil von 1 % ist der Grenzwert für „Liefertyp 1“ nach DIN 4226-101:2017-08 [53] eingehalten. Mit dem zerkleinerten Mischmaterial als rezyklierte Gesteinskörnung der Fraktion 0/10 wurden Probekörper mit einem definierten Anteil an Carbonrovingfragmenten hergestellt und an diesen im Dreipunkt-Biegeversuch die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit bestimmt. Es konnte weder eine Verbesserung noch eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften nachgewiesen werden. Laut Kortmann ist daher die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung ohne Separation denkbar. Allerdings ist dies für die Fraktion der Carbonbewehrung eher als Downcycling anzusehen, da diese als rezyklierte Gesteinskörnung keinen Mehrwert bringt [65].

Denkbar ist auch für eine Kunststofffaserbewehrung mit einem Massenanteil geringer als 1 % ein Verbleib im Beton und so eine gemeinsame Wiederverwertung des Materials mit geringem Aufbereitungsaufwand. Erste Untersuchungen zur mehrmaligen Wiederverwertung von PP-faserbewehrtem Beton als rezyklierte Gesteinskörnung wurden von Tošić et al. [89] durchgeführt. Neben einer grundsätzlichen Eignung wurde insbesondere ein positiver Einfluss der rezyklierten Gesteinskörnung mit PP-Fasern auf die residuelle Biegezugfestigkeit aufgezeigt [89].

Laut Kimm et al. [69] können auch Glasfaserbewehrungen im Beton ohne weitere Separation mit dem Betonrezyklat gemeinsam bspw. zur Verfüllung im Straßenbau verwertet werden. Dies bietet sich aufgrund der anorganischen Eigenschaften der Bewehrungen an. Zudem ist hier die Separation als unwirtschaftlich einzustufen, da der Preis für Glasfaserbewehrung gering ist [69]. Selbiges gilt für die Betone mit Basaltbewehrung [90].

Eine Deponierung von glasfaserbewehrten Betonen ist in Deponieklasse DK 0 (gering belastete mineralische Abfälle) nach Deponieverordnung [46] möglich. Häufig ist dies aus wirtschaftlichen Gründen die gewählte Lösung [69]. Auch für Basaltfaserbeton ist eine Einstufung in Deponieklasse DK 0 durchführbar.

Laut dem Abschlussbericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ der LAGA [91] ist auch für Carbonbeton unter Zustimmung der zuständigen Behörde eine Deponierung möglich, da in der Deponieverordnung geregelt ist, dass die Möglichkeit einer Deponierung bei Überschreitung der Zuordnungswerte für den organischen Kohlenstoffanteil auf elementaren Kohlenstoff zurückzuführen ist [46]. Dies ist bei Carbonfasern der Fall [91].

5.2 Untersuchungen zu Aufbereitungsverfahren

Im Folgenden wird auf die Auftrennung von Betonen mit alternativen Bewehrungen eingegangen. Anschließend werden weitere Aufbereitungsschritte für die alternativen Bewehrungsmaterialien untersucht.

5.2.1 Separierbarkeit der Materialien

Für ein zielsicheres Recycling der einzelnen Komponenten ist eine möglichst sortenreine Trennung der Komponenten Grundvoraussetzung.

Insbesondere das Recycling bzw. die Aufbereitung von Beton mit einer textilen Carbonbewehrung wurde in den letzten Jahren in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht.

Textile Bewehrungen

Eine Aufbereitung, die eine reine Betonfraktion ohne Rückstände der Carbonbewehrung ergibt, ist nach bisherigem Kenntnisstand nicht möglich [69]. Laut Koch [92], zitiert in [69], ist bei unbeschichteten Textilien keine Rückgewinnung der Bewehrung möglich. Versuche an Textilbetonen mit unbeschichteter Glasfaserbewehrung zeigten ein Zersplittern der Bewehrung bei der Aufbereitung. Eine Zerkleinerung von Textilbeton mit unbeschichteter Carbonbewehrung erwies sich als schwierig, da die Carbonrovings sich zum Teil nicht zertrennen ließen. Beschichtete Textilien sind jedoch fast vollständig aus der Matrix lösbar [92], zitiert in [69]. In [93] beschreiben Kimm et al. den Einfluss der Beschichtung der Carbonbewehrung auf die Separierbarkeit nach Aufbereitung in einem Backenbrecher. Die beste Trennung erfolgte bei einer mit epoxidharzbeschichteten Carbonbewehrung. Hier verblieben nur geringe Mengen an Beton an der Bewehrung haften. Diese konnten händisch abgelöst werden. Die Bewehrung wies nur geringe Beschädigungen auf. Mit Styrol-Butadien-Kautschuken (SBR) beschichtete Bewehrung ließ sich mit Hilfe des Backenbrechers deutlich schlechter aus der Betonmatrix lösen. Es verblieben deutlich mehr Betonanhaftungen und die Matrix wies deutlich größere Beschädigungen auf. Mit Kaliumsilikat beschichtete Bewehrungen ließen sich nicht aus der Betonmatrix lösen [93]. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 5-1** dargestellt.

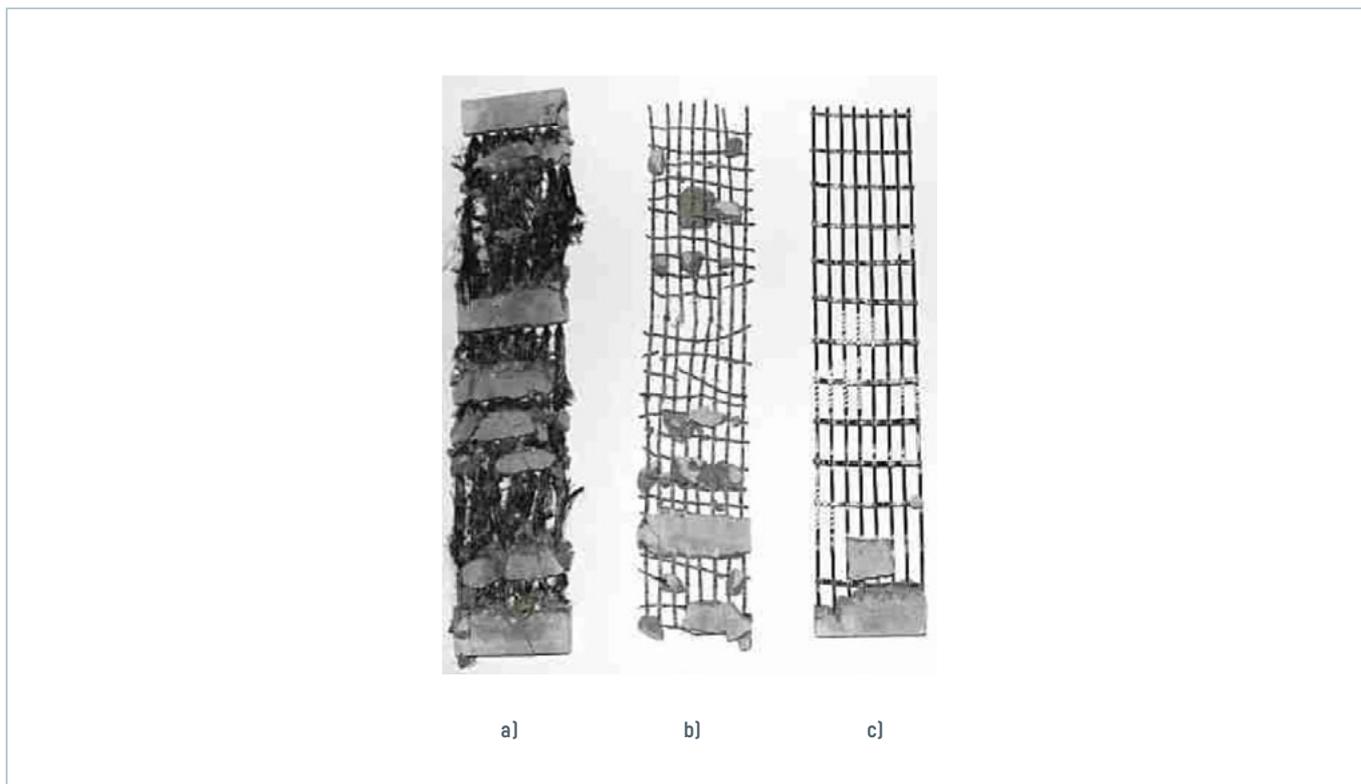


Abbildung 5-1: Ergebnis der Zerkleinerung von Textilbeton mit beschichteter Carbonbewehrung im Backenbrecher [93] Bewehrung beschichtet mit a) Kaliumsilikat b) Styrol-Butadien-Kautschuk, c) Epoxidharz

Einflüsse auf die Beschädigung der Carbonbewehrung wurden ebenfalls untersucht. Neben dem Einfluss der Beschichtung, der bereits oben beschrieben wurde, beeinflusst beispielsweise auch der Bewehrungsdurchmesser den Schädigungsgrad. So konnte in [92], zitiert in [69], gezeigt werden, dass Bewehrungen mit kleinerem Durchmesser, also niedrigerem Garn-titer, größere Beschädigungen aufweisen, als Bewehrungen mit größerem Durchmesser, also höherem Garn-titer.

Die Untersuchungen von Kimm et al. [93] zeigten zudem, dass auch die Lage der Bewehrung einen Einfluss auf die zu erwartenden Beschädigungen bei der Zerkleinerung im Backenbrecher hat. So konnte in den Untersuchungen gezeigt werden, dass eine oberflächennahe Bewehrung [1 mm bis 2 mm Betonüberdeckung] ca. 18 % weniger Schäden aufwies als eine mittig eingelegte [Betonüberdeckung jeweils 10 mm] [93].

Die Beschädigung von SBR-beschichteter Carbonbewehrung in Textilbeton bei der Aufbereitung in verschiedenen Brechern und Mühlen wurde von Kimm et al. [58] untersucht. Hier zeigte sich, dass durch Zerkleinerung in einer Hammermühle zwar 91 % der eingesetzten Carbonbewehrung als reines Material zurückgewonnen werden konnte, aber dieses stark in der Struktur beschädigt wurde. Von der Betonfraktion konnte 98,5 % als reines Material wiedergewonnen werden. Im Backenbrecher hingegen lag die Masse an zurückgewonnenem, reinem Beton bei lediglich 82,8 % und der Anteil zurückgewonnener reiner Carbonbewehrung war mit 0,75 % sehr gering. Bei Zerkleinerung mit einer Prallmühle lag der Anteil des reinen zurückgewonnenen Betons bei 51,4 % und der zurückgewonnenen Carbonbewehrung bei 13 %. Die Beschädigungen der Bewehrung erwiesen sich insbesondere bei Aufbereitung im Backenbrecher geringer als bei der Aufbereitung mit der Hammermühle. **Abbildung 5-2** zeigt die im Versuch zurückgewonnenen Bewehrungen. Aufgrund der generell hohen Beschädigungen sehen Kimm et al. die Aufbereitung von Textilbeton mit Carbonbewehrung in einer Hammermühle als am geeignetsten an. Hier erfolgt die beste Trennung. Die Carbonfraktion muss aufgrund der starken Schädigungen jedoch in weiteren Schritten aufbereitet werden [58].

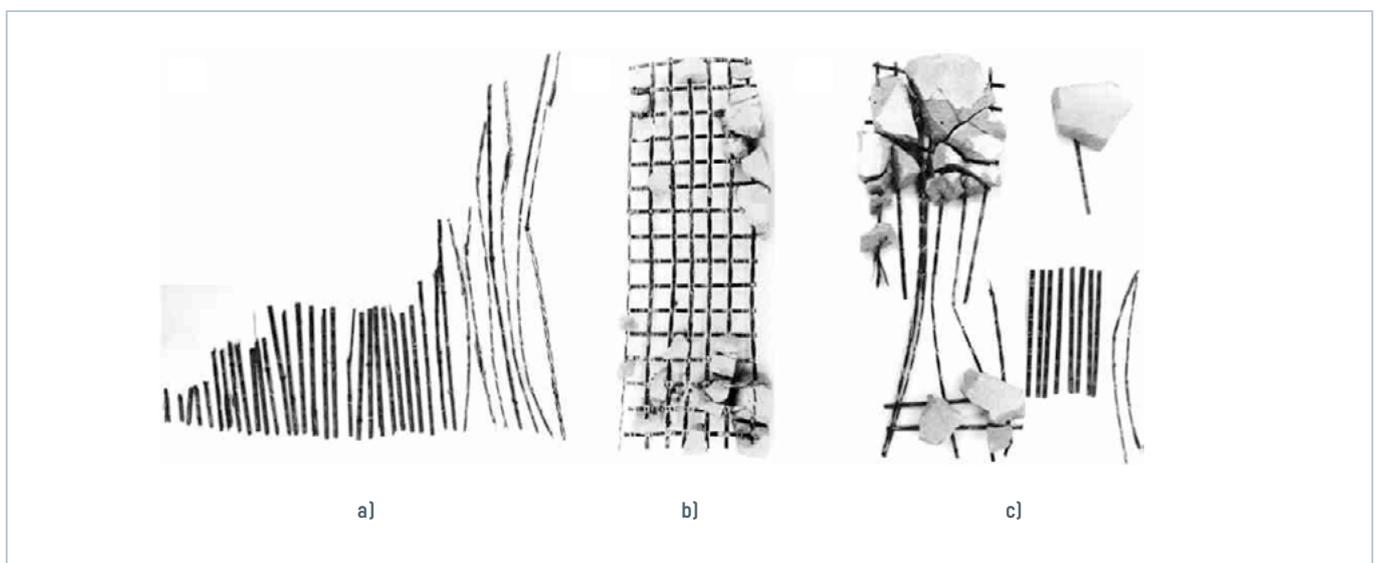


Abbildung 5-2: Zurückgewonnene Carbonfasern nach Aufbereitung von Carbonbeton in a) einer Hammermühle, b) einem Backenbrecher und c) einer Prallmühle [58]

Die Aufbereitung von Abbruch bis möglichst sortenreiner Sortierung von epoxidharzbeschichteten Carbonbewehrung in Textilbeton untersuchte Kortmann [65]. Bei seinen Untersuchungen wurden klassische Aufbereitungsverfahren aus der Bauindustrie eingesetzt. Es konnte eine gute Trennung von Beton und Carbonbewehrung unter Verwendung von im Bauwesen üblichen Aufbereitungsmethoden erzielt werden. Die eingesetzte epoxidharzbeschichtete Carbonbewehrung auf PAN-Basis wurde in Stab oder Gelegeform in Beton mit der Nennfestigkeit C 60/75 und einem Größtkorn von 8 mm eingebaut. Das von Kortmann [65] als am besten zur Trennung der Komponenten identifizierte Verfahren ist in **Abbildung 5-3** dargestellt. Nach dem selektiven Abbruch auf der Baustelle, bspw. mit einem Betonpulverisierer, wird das vorzerkleinerte Abbruchmaterial in eine stationäre Sortieranlage gebracht und mit einem Backenbrecher zerkleinert. In einer Vorseparation werden metallische Teile über einen Magnetabscheider aussortiert und Betonfeinbestandteile sowie leichte Kunststoffbestandteile über einen Querstromsichter vom Betonbruch separiert. Die im Querstromsichter separierten Betonfeinbestandteile können in einem weiteren Schritt durch Siebung abgetrennt werden. Bei der Hauptseparierung werden über eine kamera-basierte Sortierung Carbonfasern aussortiert. Hierbei wurde als Trennmerkmal das Verhältnis Partikelbreite / Partikellänge zu 0,3 gesetzt. Partikel die über diesem Kennwert liegen, werden als mineralische Fraktion erkannt und Partikel unter diesem Kennwert als Carbonfasern. Mit diesem Verfahren erzielte Kortmann insgesamt eine Betonfraktion mit einem Carbonanteil von 0,023 %. Folgende Fraktionen lagen nach der Aufbereitung zum weiteren Recycling laut Kortmann vor: Beton der Korngruppe 0/2 mit einem geringen Anteil an faserförmigen Carbonstäuben, Beton der Korngruppe 3/56 mit einem Restanteil < 0,5 % von Carbonfasern, Carbonrovingfragmente mit einer Einzellänge von 240 mm und Resten von leichten Kunststoffen, Carbonrovingfragmente mit einer Einzellänge von 80 mm und einem Restanteil an Beton [65].

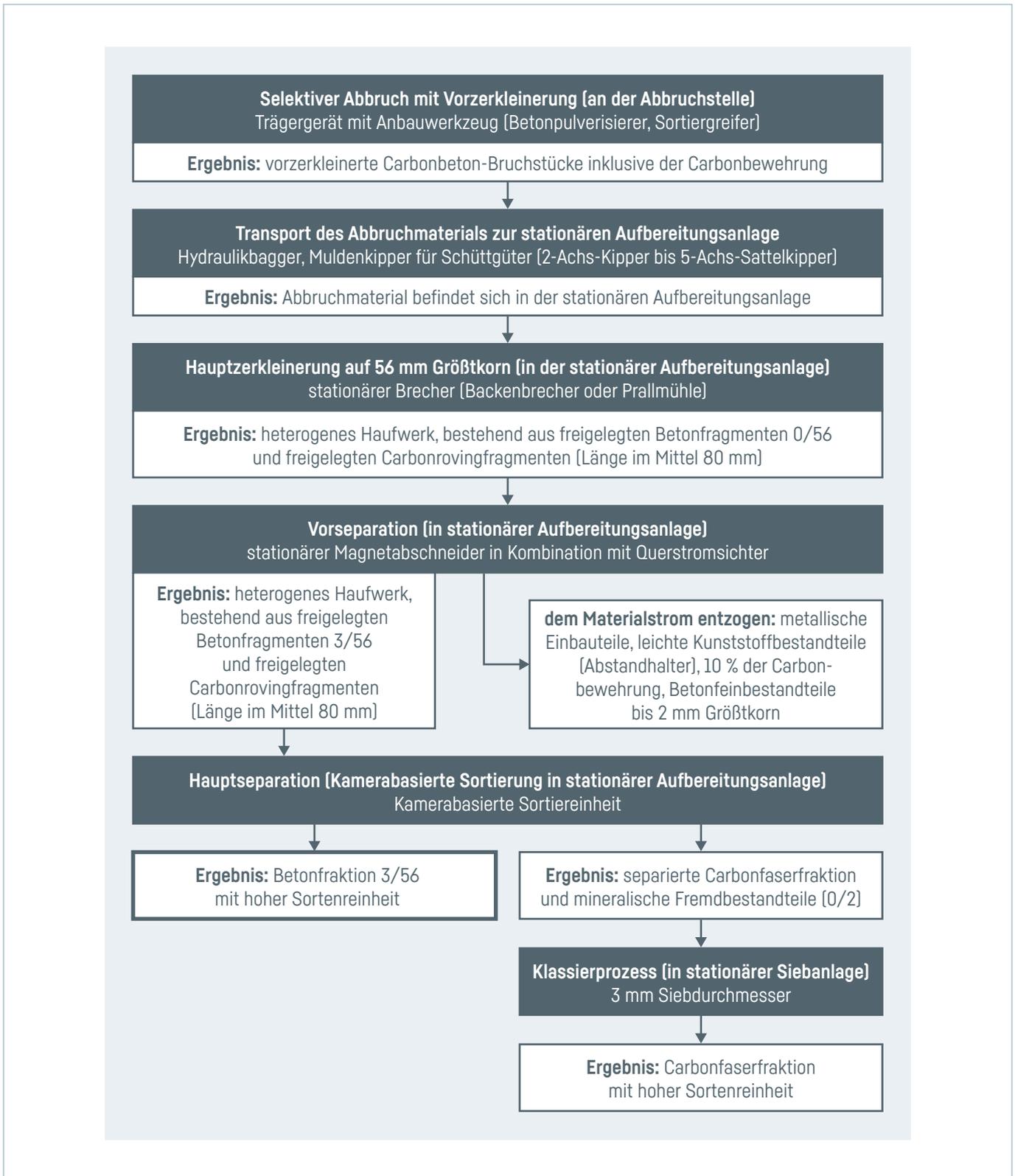


Abbildung 5-3: Optimaler Aufbereitungsprozess für das Recycling von Carbonbeton nach Kortmann [65]

Auch Jäckel et al. [94] halten auf Basis ihrer Untersuchungen, die Aufbereitung von carbonbewehrten Beton, wie Kortmann sie in [65] vorschlägt, grundsätzlich für möglich, auch wenn in den durch die Autoren durchgeführten Untersuchungen der Aufschlussgrad im Backenbrecher sich als nicht zufriedenstellend herausgestellt hat. Einen besseren Aufschlussgrad zeigte sich bei der Aufbereitung in einer Hammermühle. Hier konnte der Verbund gut getrennt werden, allerdings lag nach der Aufbereitung ein hoher Feingutanteil vor. Eine Ausbringung von 86 % nahezu sortenreinem CFK-Materials konnte so erfolgen. Allerdings sehen Jäckel et al. die weitere Sortierung der Feinfraktion (< 0,2 mm) als eher kritisch an, da bisher kein Verfahren zur Erkennung und Abtrennung des carbonhaltigen Feinguts vom mineralischen Feingut bekannt ist [94]. Eine Bestimmung der Größe der erhaltenen Carbonfragmente ist nicht beschrieben. Kortmann hingegen begründete die Wahl des Backenbrechers statt der Prallmühle mit einer geringeren Schädigung des Aufgabematerials [65].

Kurzfaserbewehrung

Kunieda et al. [95] untersuchten das Recycling von Beton mit Polymerfaserbewehrung. Hierbei wurden PP-Makrofasern (l = 48 mm, d = 0,7 mm) einem Beton mit einem Größtkorn von 20 mm zugegeben. Betrachtet wurden Fasergehalte von 0,2 Vol. %, 0,5 Vol. % und 1,0 Vol. %. Nach der Zerkleinerung im Backenbrecher und anschließender Siebung lagen in der Fraktion 20 – 40 mm Betonbruch mit deutlichen Faseranhaftungen, in der Fraktion 10 – 20 mm Betonbruch mit nur sehr wenigen Faseranhaftungen und in der Fraktion 2,5 – 5 mm Betonbruch und Fasern vollständig separiert vor. Zudem wies die Wasseraufnahme der Kornfraktion 10 mm bis 20 mm darauf hin, dass in dieser Fraktion bei der Aufbereitung von Faserbetonen im Vergleich zur Aufbereitung von Normalbeton, eine bessere Trennung der Ursprungsgesteinskörnung aus der Zementsteinmatrix erfolgt. Zurückgeführt wird dieser Effekt auf die Verstärkung der Matrix durch die Faserbewehrung, wodurch der Bruch eher in der Kontaktzone zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung erfolgt. Mit steigendem Fasergehalt verstärkte sich dieser Effekt. Zudem entstanden bei der Aufbereitung der PP-Betone mit höheren Fasergehalten Betonbruch mit höheren Feianteilen. Kunieda et al. kommen zu dem Schluss, dass Polymerfasern problemlos bei der Aufbereitung aus dem Beton zu entfernen sind [95]. Eine weitere Separation der Fraktionen wurde nicht untersucht.

Zur weiteren Sortierung der getrennten Fraktionen ist beispielsweise das dichte-basierte Schwimm-Sink-Verfahren vorstellbar. Dieses Verfahren wird auch in der Kunststoffaufbereitung zur Abtrennung fremder Rohstoffe wie Keramik oder Steine oder zur Sortierung verschiedener Kunststoffe eingesetzt. Auch eine elektrostatische Sortierung oder eine Nahinfrarotspektroskopie eignen sich grundsätzlich zur Abtrennung von Kunststoffen [56]. Eine weitere Sortierung nach dem von Kortmann [65] vorgeschlagenem Verfahren für Carbonbeton ist potentiell ebenfalls möglich.

Das mechanische Heraustrennen einer Mikrofaserbewehrung auf Polymerbasis aus der Betonmatrix gestaltet sich schwierig. Erfahrungen aus Durchführung des Verfahrens zur Bestimmung des Fasergehaltes an Festbeton nach Anhang 5 der ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauelemente aus Beton“ [96] zeigen, dass

eine Wiedergewinnung der Fasern – auch bei feinem Aufmahlen des Betons auf eine Korngröße kleiner 1 mm – nur bedingt möglich ist [97]. Die Trennung der Fraktionen erfolgt bei diesem Verfahren über die Dichteunterschiede in Bezug auf eine Kochsalzlösung [96]. Es verbleibt ein nicht unerheblicher Anteil der Fasern im Betonrückstand und die erhaltenen Fasern weisen deutliche Anhaftungen von Zementstein auf [97].

Zur Trennung verschiedener Kunststoffe werden auch selektive Löseverfahren eingesetzt. Denkbar ist auch hier ein Einsatz an aufgemahlenem Polymerfaserbeton. Durch organische Lösungsmittel können bestimmte Kunststoffe gelöst werden. Beispielweise ist eine Auflösung von Polypropylen bei einer Temperatur von 120 °C durch Xylol möglich. Nach dem selektiven Auflösen des Kunststoffs kann die Lösung abgetrennt, das Lösungsmittel verdampft und das reine Kunststoffpulver kann zurückgewonnen werden [56]. Neben der technischen Umsetzbarkeit des Verfahrens sind auch mögliche Auswirkungen auf den Betonbruch zu untersuchen. Zudem ist fraglich, ob dieses Verfahren zur Rückgewinnung der verhältnismäßig geringen Anteile an Polymeren im Betonbruch wirtschaftlich sein kann.

Auch eine thermische Trennung von Polymerfasern aus der Betonmatrix ist an gemahlenem Betonbruch theoretisch denkbar. Bspw. durch Pyrolyse erfolgt bei 450 °C – 600 °C eine thermische Zersetzung des Kunststoffs. Die entstehenden Gase können aufgefangen und thermisch verwertet werden [56]. Zurück bliebe thermisch behandelter Betonbruch. Auch hier ist, neben der technischen Umsetzbarkeit, die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens fraglich.

Durch elektrodynamische Fragmentierung ist ein Lösen der Gesteinskörnung aus der Zementsteinmatrix möglich. Dieses Verfahren wurde auch für die Auftrennung von Faser und Matrix in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen untersucht. Bei der elektrodynamischen Fragmentierung entstehen kurze Impulse zwischen zwei Elektroden, die durch einen sich zwischen den Elektroden befindlichen Festkörper geleitet werden. Der Impuls verläuft entlang der Phasengrenzen, da dort der geringste Widerstand besteht und führt so zu einer Auftrennung der Materialien [98]. Eine grundsätzliche Eignung zur Trennung von faserverstärktem Betonbruch erscheint daher möglich. Denkbar ist daher auch eine Trennung von Kurzfasern und Beton. Die Auftrennung des Betons in diesem Verfahren ist ein weiterer Vorteil für die anschließende Wiederverwertung der Bestandteile. Jedoch ist zu beachten, dass sich kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe bereits nach kurzer Zeit auflösen. Eine Eignung des Verfahrens für Beton und Carbonfasern ist daher zu untersuchen. Auch zur Trennung anderer Kurzfasern aus dem Beton sollten weiterführende Untersuchungen erfolgen.

Zur Trennung von kurzfaserbewehrten Betone sind ansonsten kaum Verfahren bekannt [69]. Als Hindernisse einer zielsicheren Aufbereitung von Kurzfaserbeton zum anschließenden Recycling könnte sich zudem eine erforderliche Brechung auf kleine Korngrößen herausstellen, da feine Betonfraktionen nach derzeitigem Stand schwieriger einem hochwertigen Recycling zugeführt werden können [99].

5.2.2 Aufbereitung der Faserfraktion

Aufgrund der Beschichtung der Carbonfasern auf Duroplast- (bspw. Epoxidharz-) oder Elastomerbasis (Styrol-Butadien-Kautschuk [SBR]) gestaltet sich das Wiederverwerten von Carbonfasern als aufwendig. Für eine direkte stoffliche Verwertung der Carbonfraktion ist eine Aufbereitung bspw. durch thermische Zersetzung zur Trennung der Kunststoffmatrix von der Faser notwendig [56]. Selbiges gilt für in eine Kunststoffmatrix eingebettete Bewehrungen aus Basalt- oder Glasfasern. Bei Polymerfasern im Beton handelt es sich um sortenreine Bewehrung. Eine weitere Auftrennung in Bestandteile ist daher nicht notwendig.

Pyrolyse

Die Pyrolyse zur Aufbereitung von Carbonfasern wurde in verschiedenen Forschungsvorhaben bereits untersucht, bspw. in [100]. Inzwischen hat sich die Pyrolyse zur Aufbereitung von kohlenstoffverstärkten Kunststoffen aus anderen Branchen bereits etabliert [100, 101]. Bei der Pyrolyse erfolgt die Trennung auf Basis der unterschiedlichen Zersetzungstemperaturen der Carbonfaser und der Kunststoffmatrix. Während sich die Kunststoffmatrix bei Temperaturen von 450 °C – 600 °C unter Sauerstoffausschluss in flüchtige Stoffe wie Gas und Öl und einen festen Rückstand (Ruß) auftrennt, bleibt die Carbonfaser, deren Zersetzung erst ab 3.600 °C beginnt, bestehen [56]. Die entstehenden Gase können verbrannt werden und so Energie für den Prozess liefern [74]. Die Carbonfasern können anschließend durch mechanische Verfahren vom Ruß abgetrennt werden [56]. Da die gewonnenen Fasern durch Rußanhaftungen spröder, steifer und auch schwerer sind als die Primärfasern, empfiehlt sich eine Oxidation der Fasern am Ende des Pyrolyse-Prozesses. Auch wenn thermogravimetrische Untersuchungen gezeigt haben, dass bei Temperaturen unter 600 °C die Faser keinen Massenverlust erfährt, kommt es durch die Aufbereitung zu einem Verlust der Zugfestigkeit. Bei durch Pyrolyse zurückgewonnenen Fasern wurde unter optimalen Bedingungen eine Zugfestigkeit von 80 % der Ausgangsfaser erreicht [74, 102]. In anderen Quellen wird von einer Reduktion der Zugfestigkeit der Carbonfaser um 4 – 85 % [70] bzw. 20 – 70 % [74] durch Pyrolyse ermittelt.

Auch für die Wiederverwendung von Basaltfasern ist eine Trennung vom Matrix und Faser notwendig. Basaltfasern verlieren jedoch unter erhöhten Temperaturen, bspw. bei der Pyrolyse, über 65 % ihrer Festigkeit [78]. Jedoch konnten Tirillò et al. [79] in ihren Untersuchungen zeigen, dass durch eine Behandlung mit Natriumhydroxid die Fasern wieder bis zu 95 % ihrer Ursprungsfestigkeit erlangen können [79].

Laut Job et al. [70] ist für eine Glasfaserbewehrung eine Aufbereitung durch Pyrolyse nur bei anschließender Nachbehandlung geeignet, da sich anderenfalls eine deutliche Reduktion der Zugfestigkeit um 52 – 64 % und der Verarbeitbarkeit ergibt [70].

Solvolyse

Ein weiteres Verfahren zur Auftrennung der Carbonfasern aus der Epoxidharzmatrix ist die Solvolyse. Bei diesem Verfahren wird die Matrix von den Fasern unter erhöhten Temperaturen und erhöhtem Druck durch eine überkritische Flüssigkeit gelöst. Als überkritische Flüssigkeiten kommen bspw. Propanol oder Wasser, welches ab einer Temperatur von 221 °C und einem Druck von 374 bar überkritische Eigenschaften annimmt, zum Einsatz [68, 101, 103]. Im Nachgang zur Solvolyse sind weitere Aufbereitungsschritte, wie das Waschen und Trocknen der Fasern und die Aufbereitung des Lösungsmittels notwendig. Die gelösten Matrixbestandteile können in der Industrie weiterverwendet werden [68]. Die Carbonfasern bleiben in diesem Verfahren nahezu unbeschädigt. Die rezyklierten Carbonfasern besitzen bis zu 90 % der mechanischen Eigenschaften der Ausgangsfasern. Für Glasfasern ist dieses Verfahren aufgrund der hohen Beschädigungen nicht geeignet [70].

Auch zur Trennung von Basaltfasern und Epoxidharzmatrix wurde die Eignung der Solvolyse untersucht. Persico et al. [104] kamen in ihrer Untersuchung zu dem Ergebnis, dass durch Solvolyse gewonnene Fasern ca. 90 % der Zugfestigkeit der Ursprungsfaser aufweisen.

Im Vergleich zur Pyrolyse besitzt die Solvolyse die Vorteile der geringeren Beschädigung der Fasern, die Gewinnung sauberer Fasern sowie einen geringeren Energieverbrauch, aufgrund der deutlich geringeren Temperaturen. Dem entgegen stehen die aufwendigen anschließenden Verfahrensschritte, die teureren Reaktoren sowie die Tatsache, dass es derzeit noch keine großtechnischen Anlagen zur Solvolyse gibt [65, 70].

Elektrodynamische Fragmentierung / elektrohydraulische Zerkleinerung

Eine weitere derzeit erforschte Aufbereitungsmöglichkeit ist die elektrodynamische Fragmentierung. Bei diesem Verfahren erfolgt die Trennung an Material- oder Korngrenzen aufgrund einer Hochspannungs-Entladung. Seifert et al. [98] haben die grundsätzliche Eignung für Carbonfasern mit positivem Ergebnis untersucht. Die elektrischen Impulse verlaufen an der Phasengrenze zwischen Carbonfaser und Matrix. So konnten Fasern in Versuchen nahezu unbeschädigt wiedergewonnen werden. Eine zu lange Anwendung der elektrodynamischen Fragmentierung führt jedoch zur Zerkleinerung und Auflösung der Faser [98]. Allerdings ist dieses Verfahren bisher nur für kleine Korngrößen möglich [105] zitiert in [101].

Die ähnlich funktionierende elektrohydraulische Zerkleinerung wurde von Orzol et al. [106] an Carbonfasern untersucht. Auch sie halten dieses Verfahren grundsätzlich für geeignet [106].

Weitere Zerkleinerung

Auch für das theoretisch für Carbonbewehrung in Betracht kommende Partikelrecycling ist eine weitere Aufbereitung notwendig. Hierbei werden die Carbonfasern zerkleinert, beispielsweise in einer Hammermühle. Als Produkte der Zerkleinerung fallen kurze Faserstücke sowie pulverisiertes Epoxidharz an. Die Fraktionen können anschließend durch Siebung voneinander getrennt und der weiteren Aufbereitung zugeführt werden [56].

6 Betrachtung möglicher Gesundheitsgefährdungen

Zur Betrachtung möglicher Gesundheitsgefährdungen beim Recycling von Beton mit alternativen Bewehrungen werden zunächst relevante Bewertungsgrundlagen dargestellt. Anschließend wird auf Untersuchungen zu Gesundheitsgefährdungen beim Bearbeiten von Betonen mit alternativen Bewehrungen eingegangen und eine Einschätzung hinsichtlich notwendiger Sicherheitsrisiken gegeben.

6.1 Darstellung der relevanten Bewertungsgrundlagen zur Beurteilung der Gesundheitsgefährdungen

Die vom Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) herausgegebene Verordnung zum Schutz vor Gefahrenstoffen [Gefahenstoffverordnung [GefStoffV]] [107] hat zum Ziel, „den Menschen und die Umwelt vor stoffbedingten Schädigungen zu schützen“, unter anderem durch Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten bei Tätigkeiten mit Gefahrenstoffen [107]. Umgesetzt werden die Regelungen der Gefahrenstoffverordnung durch die Technischen Regelungen zum Gesundheitsschutz [TRGS]. In diese werden auch konkrete EG-Vorschriften eingebunden und so in nationales Recht umgesetzt [108].

Für Abbrucharbeiten ist insbesondere die TRGS 559 „Quarzhaltiger Staub“ [109] zu beachten. Diese definiert die besonderen Schutzmaßnahmen für Arbeiten mit quarzhaltigem Staub. Der Beurteilungsmaßstab für Quarzstaub liegt bei $0,5 \text{ mg/m}^3$ bezogen auf eine 8 Stunden Schicht, zudem sind auch Arbeitsplatzgrenzwerte für alveolengängigen Staub (A-Staub) von $1,25 \text{ mg/m}^3$ sowie einatembaren Staub (E-Staub) von 10 mg/m^3 zu beachten. Zur Einhaltung dieser Grenzwerte sind nach Möglichkeit staubarme Verfahren zu wählen, bei Abbrucharbeiten eignet sich hierzu bspw. ein Befeuchten der Arbeiten mit Wasser, und technische Schutzmaßnahmen, wie bspw. Absaugungen, umzusetzen. Eine branchenübliche Verfahrens- und Betriebsanweisung ist laut der TRGS einzuführen [109]. Hierzu gibt es die Handlungsanleitung „Staub bei Abbruch- und Rückbauarbeiten“ [110]. In dieser werden konkrete Verfahren zur Einhaltung der Grenzwerte aufgezeigt. Es sind technische und organisatorische Maßnahmen einzusetzen. So ist beispielsweise eine Absaugung einzusetzen und falls dies nicht möglich ist, ein nasses Verfahren mit Staubbiederschlagung durch Wasser zu wählen. Erst wenn diese Maßnahmen nicht ausreichen, ist auf persönliche Schutzausrüstung in Form eines Atemschutzes zu setzen. Als Atemschutz sind mindestens Gummi-Halbmasken mit P2-Filter, bzw. Gebläse gestützte Atemschutzgeräte [THP2] oder kurzzeitig Partikel filternde Halbmasken [FFP2] zu verwenden. Die Maßnahmen sind organisatorisch so zu planen, dass im Bereich der Staubentstehung keine anderen Arbeiten parallel stattfinden [110].

Bei Arbeiten mit faserigen Baustoffen ist zusätzlich zu überprüfen, ob bei diesen krebserzeugende Fasern nach WHO Definition entstehen können. Fasern nach WHO Definition (WHO-Fasern) sind Fasern mit einer Länge größer $5 \text{ }\mu\text{m}$, einem Durchmesser kleiner $3 \text{ }\mu\text{m}$ und

einem Längen-Durchmesser-Verhältnis größer als 3:1 [111]. Fasern mit diesen Abmessungen können in die tieferen Bereiche der Lunge gelangen und unter bestimmten Voraussetzungen Krebs auslösen [112].

In der TRGS 905 „Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe“ [113] sind unter anderem Stoffe, die auf Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse als krebserzeugend eingestuft werden, aufgelistet. Fasern aus den im Rahmen der Studie untersuchten Materialien, sind in dieser Liste nicht aufgeführt.

Eine Bewertung von anorganischen Faserstäuben, außer Asbest, mit WHO-Abmessungen wird in Abschnitt 2.3 der TRGS vorgegeben. Durch Kanzerogenitätsversuche kann die Kategorie, in welche die Faser einzustufen ist, ermittelt werden. Anorganische Faserstäube mit WHO-Abmessungen, die nicht explizit erwähnt sind, werden in Kategorie 2 eingestuft.

Auch die MAK- und BAT-Werte-Liste 2022 der Deutschen Forschungsgemeinschaft [114], die die maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen und biologischen Arbeitsstofftoleranzwerte angibt, listet lediglich Asbestfasern und Faserstaub aus Glasfasern. Auch die Liste der krebserzeugenden, mutagenen und reproduktionstoxischen Stoffe (KMR-Liste) des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) [115] verweist lediglich für die Einstufung von weiteren Faserstäuben – abgesehen von Stäuben aus Keramischen Mineralfasern oder Asbestfasern – auf die TRGS 905. Das Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (GESTIS-Stoffdatenbank) [116] beinhaltet ebenso keine Einträge zur Kanzerogenität für Fasern aus Basalt, Carbon oder Polymeren. Auch in Anhang XVII der REACH-Verordnung [117], welcher alle erlassenen Beschränkungen der European Chemicals Agency (ECHA) enthält, sind keine weiteren Beschränkungen zu den untersuchten Fasern zu finden.

Für den Abbruch faserhaltiger Betone gibt es lediglich für asbestfaserverstärkte Bauteile gesonderte Regelungen. Auf Grund der bei Asbest entstehenden krebserzeugenden Fasern nach WHO-Definition sind hier aufwendige Sicherheitsvorkehrungen notwendig, welche in der TRGS 519 „Asbest – Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten“ [118] geregelt werden. Des Weiteren sind in der TRGS 521 "Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle" [111] Schutzmaßnahmen für drei verschiedene Expositionskategorien für Rückbauarbeiten von alter Mineralwolle, welche ebenfalls krebserzeugende Fasern nach WHO-Definition freisetzen kann, angegeben.

Für die Bearbeitung von CFK-Materialien gibt es aus anderen Branchen Handlungsempfehlungen. So gibt bspw. die DGUV-Information „Bearbeitung von CFK-Materialien – Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen“ [119] Vorgaben für verschiedene Expositionsklassen. Diese sehen für die Expositionsklasse 3 (Tätigkeiten mit hoher Exposition) strengere Anforderungen vor. Als Tätigkeiten mit hoher Exposition ist nach der DGUV-Information eine Tätigkeit mit der Entstehung von über 250.000 Fasern/m³ oder 1/10 des Staubgrenzwertes zu verstehen. Bspw. ein manuelles Sägen von CFK mit einer Dauer von über 15 Minuten wird dieser Expositionsklasse zugeordnet. Neben Absaugen oder Nassbearbeitung ist

persönliche Schutzausrüstung in Form von atmungsaktiven Schutzanzügen, Atemschutz, dichtschießenden Sicherheitsbrillen und Schutzhandschuhen zu tragen [119]. Laut Mattenklott und van Gelder [112] sind laut Unfallversicherungsvertretern auf der sicheren Seite, die Regelungen der TRGS 521 [111] für CFK-Materialien zu befolgen.

6.2 Untersuchungen zu Gesundheitsgefährdungen

Beim Rückbau und Aufbereiten von Beton entstehen quarzhaltige Stäube, welche in bestimmten Konzentrationen als gesundheitsgefährdend eingestuft werden (siehe Abschnitt 6.1). Untersuchungen hierzu werden im Hinblick auf Betone mit alternativen Bewehrungen im Folgenden vorgestellt. Anschließend wird auf Forschungen zur Gefährdung durch entstehende Fasergeometrien eingegangen.

6.2.1 Entstehende quarzhaltige Stäube

Die entstehenden Stäube beim Abbruch und Bearbeiten von Beton wurden in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht. So messen bspw. Flanagan et al. [120] in ihren Untersuchungen zum Bearbeiten von Beton durch Sägen mit Wasserzugabe eine Staubbelastung von 0,05 – 0,71 mg/m³ an quarzhaltigen Stäuben. Die festgestellte Staubexposition beim Bohren war hingegen gering [120]. Das Schleifen von Beton in Baustellenbetrieb wurde bspw. durch Akbar-Khanzadeh und Brillhart [121] untersucht. Sie haben hierbei eine sehr hohe Konzentration von alveolengängigen Stäuben detektiert. Die gemessenen Werte lagen zwischen 0,34 mg/m³ und 81 mg/m³ [121]. Auch Azarmi et al. [122] stellten bei ihren Untersuchungen zum Bohren und Schneiden von Beton eine hohe Freisetzung an quarzhaltigen Stäuben fest. Die höchsten Werte wurden hierbei bei einer Bearbeitung des Betons durch Schneiden gemessen. Insgesamt lag ein Großteil der gemessenen Stäube im ultrafeinen Bereich (< 100 nm) [122]. Den Einfluss der Betonfestigkeit und der aufgebrachten Energie auf die Staubbildung untersuchten Soo et al. [123]. Sie stellten in vergleichenden Untersuchungen einen Anstieg der Staubexposition mit Erhöhung der Betondruckfestigkeit fest [123]. Durch Kumar und Morawska [124] wurde auch bei der Wiederverwendung von rezykliertem Betonbruch im Mischer die Entstehung von Stäuben mit ultrafeinen Partikeln beobachtet [124]. All diese Untersuchungen weisen auf die Entstehung gesundheitsgefährdender Konzentrationen an quarzhaltigen Stäuben beim Aufbereiten von Beton hin.

Speziell für Betone mit textiler Carbonbewehrung wurde von Hillemann et al. [125] untersucht, ob bei einer Bearbeitung des Betons mit einer erhöhten Entstehung von quarzhaltigen Stäuben in Vergleich zu unbewehrtem Beton zu rechnen ist. Hierzu wurden Betone mit textiler Carbonbewehrung und identische Betone ohne Bewehrung mit einem Trennstaubgenerator bearbeitet, der mit einer handelsüblichen Trennscheibe ausgestattet war. Hillemann et al. konnten keinen Einfluss der Carbonbewehrung auf die Partikelgrößenverteilung im untersuchten Partikelbereich (0,2 – 10 µm) des Staubs feststellen [125]. Die Untersuchungen legen nahe, dass somit in Bezug auf quarzhaltige Stäube kein erhöhtes Risiko beim Recycling von carbonbewehrtem Beton in Vergleich mit herkömmlichen Stahlbeton zu erwarten ist.

Jäckel et al. [94] sehen jedoch bei der Bearbeitung von carbonbewehrten Betonen eine potentielle Gefährdung durch die Entstehung carbonfaserhaltiger Stäube, die noch weiter zu untersuchen ist. Diese entstehen laut den Autoren insbesondere bei der thermischen Behandlung [94].

Auch für die anderen Bewehrungsarten ist zu erwarten, dass die Freisetzung quarzhaltiger Stäube mit der Freisetzung bei der Bearbeitung von Stahlbeton vergleichbar ist.

6.2.2 Entstehende Fasergeometrien

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der im Zuge des Recyclings von faserbewehrten Betonen zu bedenken ist, ist die Entstehung möglicher gesundheitsschädlicher Fasergeometrien.

Unabhängig vom Einsatz in der Bauindustrie wurden die entstehenden Fasergeometrien bei der Bearbeitung von Carbonfasern untersucht. Bäger et al. [126] wiesen bei der mechanischen Bearbeitung von Carbonfasern auf Pechbasis eine Freisetzung von Fasern nach WHO-Definition nach. Daher sollte diese Art der Carbonfasern für die Verwendung in der Bauindustrie ausgeschlossen werden [65]. Das unterschiedliche Verhalten von PAN- und pechbasierten Carbonfasern im Hinblick auf die Entstehung von Fasern nach WHO-Definition belegten auch Kehren et al. [127]. Sie stellten in ihren Untersuchungen bei einer mechanischen Beanspruchung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen bei Proben auf Pechbasis eine deutlich höhere Anzahl entstehender WHO-Fasern fest, als bei Proben auf PAN-Basis. Bei Letzteren handelte es sich bei den entstehenden faserartigen Partikeln mit WHO-Abmessungen hauptsächlich um augenscheinlich lose, durch Epoxidharz zusammengehaltene Agglomerate aus Partikeln, die einzeln keine WHO-Abmessungen aufweisen. Eine abschließende gesundheitliche Bewertung ist laut den Autoren auf Basis der Ergebnisse nicht durchführbar [127]. Das Forschungsvorhaben „CarboBreak“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [128] untersucht das Bruchverhalten verschiedener Carbonfasern mit dem Ziel, Empfehlungen für Arbeits- und Gesundheitsschutz zu geben. Zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Studie wurden noch keine abschließenden Ergebnisse veröffentlicht.

Für Carbonfasern auf PAN-Basis wurden durch Limburger und Quicker [74] gezeigt, dass sich bei einer thermischen Behandlung ab einer Temperatur von 650 °C lungengängige Carbonfasern bilden, die als krebserregender Stoff nach TRGS 905 eingestuft werden müssen. In von Eibl [129] durchgeführten Brandversuchen an Flugzeugbauteilen konnte die Entstehung von Fasern mit kritischen Abmessungen nach der WHO-Definition ebenfalls nachgewiesen werden.

Auch zur Entstehung möglicher Fasergeometrien beim Aufbereiten von Beton mit textiler Carbonbewehrung gab es bereits Untersuchungen. Hillemann et al. [125] untersuchte die durch den Trennprozess entstandenen Fasergeometrien. Es konnten keine gesundheitsgefährdenden Fasern nach WHO-Definition nachgewiesen werden. Die detektierten Fasern besaßen eine Länge größer als 5 µm und einen Durchmesser größer als 3 µm. Zudem

zeigten Untersuchungen unter einem Rasterelektronenmikroskop glatte, senkrecht zur Faser verlaufende Bruchflächen. Aus Sicht der Autoren ist daher kein weiteres Zerfallen der Fasern, bei dem dünnere Teilfasern entstehen könnten, zu erwarten. In der Abluft wurden zudem organische Verbindungen (unter anderem Benzole, Phenole und Styrole) detektiert. Die Entstehung dieser wird auf die thermische Zersetzung des Beschichtungsmaterials der Carbonfaserfilamente zurückgeführt. Die durch Hillemann et al. durchgeführten Untersuchungen führen zu dem Ergebnis, dass die Zytotoxizität bei der Aufbereitung von reinem Beton und Beton mit textiler Carbonbewehrung vergleichbar ist [125].

Auch Kortmann [65] kommt in seinen Untersuchungen zur Rezyklierbarkeit von textilbewehrtem Carbonbeton zu dem Schluss, dass bei der Aufbereitung des bewehrten Betons keine kritischen Fasern nach WHO-Definition freigesetzt werden. Die Untersuchungen der durch die Aufbereitung entstandenen Fasergeometrien unter einem Rasterelektrodenmikroskop zeigen weder Faserverjüngungen noch ein Anzeichen für ein Auflösen der Einzelfilamente. Es waren keine kritischen Fasergeometrien nach WHO-Definition nachweisbar. Kortmann sieht die potentielle Gefährdung bei der Aufbereitung von Beton mit einer Carbonbewehrung auf PAN-Basis als vergleichbar mit der Gefährdung bei der Aufbereitung von Stahlbeton an [65].

Laut [130] bilden Basaltfasern keine WHO-kritischen Faserstäube aus. Zudem ergaben an Ratten und Meerschweinchen durchgeführte Studien zur Toxizität von Asbest und Basaltfasern, dass Ratten, die einer Exposition von Basaltfasern ausgesetzt wurden, deutlich geringere Schädigungen der Lunge festgestellt wurden, als bei einer Exposition von Asbestfasern in geringeren Konzentrationen [131]. Auch bei ähnlichen Untersuchungen mit Steinwolle aus Basalt wurde an Ratten kein Hinweis auf eine Kanzerogenität der Basaltfasern gefunden [132].

Miltiký et al. [133] untersuchten das Bruchverhalten von Basaltfasern beim Schleifen. Bei der mikroskopischen Auswertung der entstandenen Fasern zeigten sich keine gespaltenen Fasern und es wurden keine Fasern nach WHO-Definition nachgewiesen [133].

Für Glasfaserbewehrung gibt es bisher keine Hinweise auf die Entstehung von bedenklichen Fasergeometrien unter hohen Temperaturen [88].

Es konnten im Rahmen der Literatursichtung keine Quellen, die eine besondere Gefährdung bei der Bearbeitung von Kunststofffaserbetonen untersuchen, gefunden werden.

6.3 Bewertung hinsichtlich notwendiger Sicherheitsmaßnahmen

Beim Rückbau von Beton bzw. Stahlbetonbauten sind aufgrund der Entstehung von quarzhaltigen Stäuben Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Diese beinhalten insbesondere eine Absaugung oder das Tragen von Atemschutzmasken.

Nach derzeitigem Stand der Forschung sind bei mechanischer Bearbeitung von Betonen mit alternativen Bewehrungen unter Raumtemperaturen keine Gefährdungen durch Faserstäube zu erwarten. Eine Ausnahme hiervon bildet Carbonbewehrung auf Pechbasis, da bei dieser eine Entstehung von Fasern mit WHO-Abmessungen unter mechanischer Beanspruchung festgestellt wurde (vgl. Abschnitt 6.2.2). Weitere Forschungen zur abschließenden gesundheitlichen Bewertung sind jedoch durchzuführen. Insbesondere beim Rückbau von carbonbewehrten Betonen empfiehlt sich bis zur abschließenden Bewertung Vorsicht und das zusätzliche Tragen eines Atemschutzes.

Bei den Verfahren zur weiteren Aufbereitung der Faserfraktion sind die Hinweise zur Bearbeitung von CFK-Materialien der DGUV [119] zu beachten. Eine Messung der Faserexposition bei den verwendeten Verfahren ist hierbei als sinnvoll anzusehen, um die geforderten Schutzmaßnahmen zu bestimmen.

Insbesondere bei Prozessen, die eine thermische Aufbereitung der Faser-Fractionen beinhalten, ist dafür zu sorgen, dass eine funktionierende Absaugung und Filterung der entstehenden Stäube erfolgt und keine Fasern in die Umgebung gelangen.

7 Diskussion der Verfahren

In verschiedenen Forschungsvorhaben wurde die Separierung von Beton mit alternativer Bewehrung betrachtet. Zum Einsatz kamen verschiedene Brecher und Mühlen, wie sie bereits in der Aufbereitung von Abbruchabfällen eingesetzt werden. Auch die Separierung der einzelnen Fraktionen wurde in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht. Hier kamen, neben bereits in der Aufbereitung von Abbruchabfällen eingesetzten Verfahren, auch Verfahren aus anderen Bereichen zum Einsatz.

Insbesondere zur Trennung der Komponenten von Beton mit textiler Bewehrung aus Carbonfasern gibt es bereits einige wissenschaftliche Veröffentlichungen. Dies ist zum einen mit dem steigenden Interesse am Einsatz von Carbonbewehrung zu begründen, zum anderen begünstigt der hohe Preis und die energieintensive Produktion der Carbonbewehrung, die Attraktivität einer Aufbereitung der Fasern [68]. Kortmann [65] untersuchte zudem den Prozess von Abbruch über Trennung der Komponenten bis zur möglichst sortenreinen Sortierung und gibt einen Vorschlag für eine aus seiner Sicht optimale Abfolge von Aufbereitungsschritten. Neben im Rückbau etablierten Verfahren beim Aufbrechen und der Sortierung über Siebe und einen Querstromsichter kommt auch ein kamerabasiertes Sortierverfahren zu Anwendung.

Auf Basis der Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass für Carbonbeton ein Austrag von mindestens 85 % der Carbonbewehrung und somit des Epoxidharzes, also des Kunststoffes, aus der mineralischen Fraktion möglich ist. Die Forderungen der Gewerbeabfallverordnung können somit erfüllt werden, sofern das Kriterium zur Ausbringung von Kunststoff auch für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe Gültigkeit besitzt.

Für Carbonbewehrungen konnten im Rahmen der Literaturrecherche eine Vielzahl möglicher Recyclingansätze identifiziert werden. Jedoch sind die meisten Verfahren bisher lediglich in der Forschung erprobt und noch nicht in die industrielle Fertigung übertragen worden. Neben den technischen Gegebenheiten sind hierbei auch die rechtlichen Regelungen zu betrachten. So ist beispielsweise für die Verwendung von Recyclingmaterial in Beton eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall erforderlich. Viele der untersuchten Verfahren sind zudem an recycelten Produkten aus anderen Anwendungsbereichen durchgeführt worden. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf rezyklierte Carbonfasern aus Betonbewehrung ist daher zu untersuchen.

Für ein hochwertiges Recycling von Carbonfasern sind möglichst lange Faserbruchstücke aus dem Beton zu gewinnen. Die Untersuchungen von Kortmann [65] ergaben, dass eine Aufbereitung mittels Backenbrecher hierfür geeignet ist. Allerdings ist der erhaltene Aufschlussgrad geringer als bei einer feineren Zerkleinerung, beispielsweise mit einer Hammermühle, wie von Kimm et al. [69] favorisiert.

Aus technischer Sicht ist die Herstellung von Recyclinggarnen als hochwertigste Recyclingmöglichkeit zu betrachten. Aus diesen Garnen können neue Produkte hergestellt und somit ein wirklicher Kreislauf der Ressourcen umgesetzt werden. Allerdings ist hier bislang ein Festigkeitsverlust im Vergleich zum Originalgarn nicht zu verhindern. Streng genommen sind alle anderen Verfahren als Downcycling der hochwertigen Fasern anzusehen. Zur Herstellung hochwertiger neuer Faserprodukte sind vorab aufwendige Aufbereitungsschritte wie die Auftrennung der textilen Bewehrungsmaterialien in Faser und Epoxidharzmatrix bspw. durch Pyrolyse notwendig. Aus wirtschaftlicher Sicht sind daher auch Verwertungsmöglichkeiten, die eine geringere Aufbereitung der Fasern erfordern, attraktiv. So ist insbesondere das Partikelrecycling ohne Separieren von Fasern und Matrix verhältnismäßig einfach umzusetzen. Die hochwertigen Eigenschaften der Faser kommen jedoch bei dieser Recyclingmethode nicht zum Tragen.

Für textile Bewehrung aus Basaltfasern dürfte eine Separation aus der Betonmatrix wie bei textiler Bewehrung aus Glasfasern möglich sein. Auch eine Aufbereitung und Wiederverwendung der Fasern durch Pyrolyse ist technisch ebenfalls möglich. Allerdings ist für den Erhalt der Zugfestigkeit ein weiterer Aufbereitungsschritt, bspw. durch Behandlung mit Natriumhydroxid notwendig. Aufgrund der geringen Herstellungskosten von Basaltfasern ist eine aufwendige Aufbereitung der Fasern bislang wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Insbesondere für Kurzfaserbewehrungen konnten kaum Untersuchungen zur Separierung der Fraktionen gefunden werden. Die Betrachtungen zum Recycling textiler Bewehrung legen nahe, dass eine Trennung von unbeschichteten Fasern aus Carbon, Basalt oder Glas aus der Betonmatrix schwierig ist. Weitere Untersuchungen zur Trennung der Fraktionen sind anzustreben. Des Weiteren sind die geringen Volumenkonzentrationen der Faserbewehrung in Beton ein weiterer Aspekt, weshalb eine Rückgewinnung von Kurzfasern aus der Betonmatrix durch aufwendige Verfahren wirtschaftlich kritisch zu betrachten ist. Auch ein Einsatz von Betonbruch mit Fasern als Recycling-Gesteinskörnung sollte daher, insbesondere im Hinblick auf umwelttechnische und technische Aspekte, untersucht werden. Die Auswirkungen von Mikro-Polymerfasern in Beton im Hinblick auf den Austrag von Mikroplastik wird derzeit unter anderem von einem Arbeitskreis des Deutschen Bauchemie e.V. untersucht [134].

Nach derzeitigem Stand ist für den Einsatz des Betonbruchs als Recycling-Gesteinskörnung ein möglichst geringer Feinanteil von Vorteil. Auch wenn die Verwendung von Betonbrechanden in Recyclingbetonen zukünftig erlaubt sein wird, ist hier die Marktakzeptanz noch ungewiss. Die Aufbereitungsverfahren, die einen gröberen Betonbruch erzeugen, bringen jedoch auch eine geringere Sortenreinheit des Recyclingmaterials mit sich. Hier sind rechtliche Vorgaben zu konkretisieren, wie viel Bestandteile der verschiedenen alternativen Bewehrungen im Betonbruch verbleiben dürfen. Die bisher für alternative Bewehrungen eingesetzten, im Vergleich zum klassischen Stahlbetonbau feinkörnigen, Betone ergeben in der Aufbereitung grundsätzlich einen feineren Betonbruch, was ebenfalls bei den Verwertungsmöglichkeiten des Betonbruchs aus alternativen Bewehrungen zu berücksichtigen ist.

Insbesondere für eine Bewehrung aus Glas- oder Basaltfasern ist derzeit eine Rückgewinnung der Bewehrung aus wirtschaftlicher Sicht in den meisten Fällen nicht sinnvoll. Aufgrund der anorganischen Eigenschaften der Bewehrung kann hier eine gemeinsame Verwertung des Aufbruchs ohne Separation erfolgen [69, 90]. Hersteller von Basaltbewehrung betonen, dass aufgrund der Herstellung der Bewehrung „überwiegend aus einem natürlichen Rohstoff“ [5] bzw. aufgrund des Bestehens von Basaltbeton aus einem „rein mineralischen Gemisch“ [130] keine Separierung von Faser und Bewehrung am Ende des Lebenszyklus notwendig ist.

Der derzeitige Stand der Forschung lässt keine klaren Schlüsse zu, welche Aufbereitungsverfahren für alternative Bewehrungen am besten geeignet sind. Die Forschungsergebnisse zur Trennung von textilibewehrten Betonen zeigen auf, dass ein Recycling der Fraktionen zukünftig wahrscheinlich möglich sein wird. Das hierzu zu favorisierende Aufbereitungsverfahren muss im Hinblick auf die gewünschte Verwertungsstrategie gewählt werden. Zur Wahl einer sinnvollen Verwertungsstrategie sind weitere Forschungen und Entwicklungen notwendig, um die untersuchten Verfahren zu etablieren. Neben technischen Aspekten muss insbesondere auch die wirtschaftliche Rentabilität der Verwertungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der unterschiedlich aufwendigen Aufbereitungsschritte betrachtet werden.

Bei kurzfaserbewehrten Betonen muss weitere Forschung erfolgen, bevor die Recyclingfähigkeit der Betone abschließend beurteilt werden kann. Aus wirtschaftlicher Sicht ist hier insbesondere das Recycling der gemischten Fraktionen zu untersuchen, da laut der Gewerbeabfallverordnung die getrennte Aufbereitung der Fraktionen entfallen darf, wenn die Kosten der Aufbereitung nicht im Verhältnis zu den Kosten einer gemeinsamen Verwertung stehen [45].

Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist eine möglichst hochwertige Verwertung der Fraktionen anzustreben. Insbesondere eine Deponierung und eine energetische Verwertung sind zu vermeiden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Betone mit alternativen Bewehrungen bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten und großes Potential für den zukünftigen Einsatz im Massivbau. Insbesondere für die Verstärkung bestehender Bauwerke ist durch die geringe notwendige Materialstärke großes Potential für textile Bewehrungen vorhanden.

Für das Recycling von Betonen mit alternativen Bewehrungen wurden bereits einige Ansätze erforscht, dennoch bestehen erhebliche Wissenslücken und weiterer Forschungsbedarf mit vielfältigen Schwerpunkten ist gegeben. Insbesondere die Skalierung der Recyclingverfahren auf die industrielle Anwendung steht noch aus.

Für textile Bewehrungen konnte für beschichtete Bewehrung eine gute Trennung der Materialien in verschiedenen Untersuchungen gezeigt werden. Hierfür kamen hauptsächlich im Rückbau bereits etablierte Zerkleinerungsverfahren in Form von Brechern und Mühlen zum Einsatz. Die Wahl des Zerkleinerungsverfahrens ist jedoch im Hinblick auf die spätere Wiederverwendung zu treffen. Eine generelle Empfehlung kann auf Basis der gesichteten Literatur nicht gegeben werden. Auch eine gute Separation der Fraktionen konnte erzielt werden. Zudem konnten einige mögliche Verwertungsverfahren der alternativen Bewehrungen identifiziert werden. Bei den meisten Verfahren ist jedoch eine weitere Aufbereitung der Bewehrungsfraction durch Trennung der Epoxidharzmatrix von der eigentlichen Faser notwendig. Sowohl Pyrolyse als auch Solvolyse sind hierzu grundsätzlich geeignet. Weitere Untersuchungen zur Aufbereitung textiler Bewehrungen mit dem Ziel eines baupraktisch umsetzbaren Aufbaus einer Aufbereitungsanlage sollten erfolgen. Weitere bereits im Rückbau von Stahlbeton eingesetzte Aufbereitungs- und Sortierverfahren sollten in den Untersuchungen betrachtet und durch Verfahren aus anderen Bereichen ergänzt werden.

Insbesondere eine Wiederverwertung der teuren und unter hohem Energieeinsatz hergestellten Carbonfasern wird angestrebt. Allerdings befinden sich die meisten der hierzu untersuchten Verfahren derzeit noch in der Entwicklung. Theoretisch möglich sind jedoch verschiedene Anwendungsmöglichkeiten wie die Verwendung in Recyclinggarnen, Vliesen, Kurzfasern oder als Partikelbewehrung für Kunststoffe oder Betone. Die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren ist in Zusammenhang mit den jeweils erforderlichen Aufbereitungsschritten zu untersuchen. Für textile Bewehrungen aus anderen Materialien liegen deutlich weniger Forschungsergebnisse vor. Dies lässt sich durch die kostengünstigeren Ausgangsmaterialien sowie das derzeit verstärkte Interesse an einer Bewehrung aus Carbon begründen.

Zur Aufbereitung kurzfaserbewehrter Betone gibt es bisher ebenfalls wenige Untersuchungen. Hier ist vor allem die Trennung der Fraktionen weiter zu untersuchen. Zudem sollten zukünftig auch die Möglichkeiten der weiteren gemeinsamen Verwertung der Verbundbaustoffe betrachtet werden, da eine mögliche Trennung der Fraktionen mit herkömmlichen Verfahren mit einer feinen Aufbereitung der Betonfraktion einhergeht. Hier sind jedoch neben technischen Aspekten auch mögliche Auswirkungen auf die Umwelt zu untersuchen.

Eine Bewertung der gesundheitlichen Risiken beim Rückbau von Betonen mit alternativen Bewehrungen konnte auf Basis der vorliegenden Forschungsergebnisse nicht abschließend getätigt werden. Allerdings deutet die gesichtete Literatur für die betrachteten alternativen Bewehrungen (mit Ausnahme von Carbonfasern auf Pechbasis) darauf hin, dass unter mechanischer Beanspruchung keine Gefährdung durch WHO-Fasern zu erwarten ist. Unter hoher Temperaturbeanspruchung können sich bei Carbonfasern jedoch WHO-Fasern ausbilden. Auch für quarzhaltige Stäube ist eine über die Gefährdung beim Rückbau von Stahlbeton hinausgehende Gefährdung bislang nicht bekannt.

Um das Abbruchmaterial einfacher definieren zu können, empfiehlt die LAGA [91] das Einführen von Abfallschlüsselnummern für Abbruchmaterial aus Carbonbeton. Auch für Abbruchmaterialien mit anderen alternativen Bewehrungen erscheint eine solche Einführung sinnvoll. Des Weiteren sind Grenzwerte zur Sortenreinheit der Recycling-Fraktionen von Betonen mit alternativen Bewehrungen zu definieren. So ist beispielsweise im Hinblick auf mögliche Gesundheits- und Umweltgefährdungen festzulegen, welcher Anteil der jeweiligen Bewehrung in Recyclinggesteinskörnung verbleiben darf.

Generell sollte insbesondere bei diesen neuen innovativen Baustoffen die Chance genutzt werden, den Grundsatz „Design for Recycling“ umzusetzen und somit bereits in der Planung des Neubaus Bauteile auf ein späteres Recycling auszurichten. Dies sollte direkt in der Normung und auch bei Zulassungen von Anfang an berücksichtigt werden.

Die vorliegende Studie zeigt, dass vielversprechende Ansätze zur Kreislaufführung alternativer Bewehrungen vorhanden sind, jedoch weiterhin große Wissenslücken und daher großer Forschungsbedarf bestehen. Gespräche mit Recycling- und Bauunternehmen haben ergeben, dass der Einsatz von alternativen Bewehrungen, insbesondere von Carbonbewehrung, derzeit einen großen Stellenwert einnimmt, das Recycling der Bewehrung aber bislang keine bzw. nur eine untergeordnete Rolle in den praktischen Überlegungen spielt. In den Gesprächen hat sich jedoch der Wunsch nach weiteren Anreizen für ein erfolgreiches Recycling von Seiten der Politik herauskristallisiert.

Die Kreislaufführung von Betonen mit alternativen Bewehrungen erscheint auf Basis der durchgeführten Untersuchungen möglich. Insbesondere für Textilbetone erscheint eine Auftrennung und Aufbereitung der einzelnen Fraktionen umsetzbar. Die Recyclingmöglichkeiten von kurzfaserbewehrten Betonen sind im Hinblick auf eine mögliche Auftrennung der Fraktionen und eine gemeinsame Weiterverwertung des Betonbruchs zu untersuchen. Um die derzeit noch offenen Fragen zu klären, sollte jedoch weitere intensive Forschung betrieben werden. Hier ist auch eine Einbindung der Industrie zu empfehlen, um praktisch umsetzbare Verfahren zu entwickeln.

Autorenschaft

Carla Neuhaus M.Sc.:

Konzeption, Literatursichtung, Experteninterviews, Manuskripterstellung

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn:

Konzeption, Einwerbung von Fördermitteln, Validierung, Manuskriptüberarbeitung

Die Autoren bedanken sich bei ihren Kolleginnen, Kollegen und Studierenden am KIT Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (KIT-IMB/MPA/CMM), namentlich Jan Höffgen M.Sc., Matthias Mohs M.Sc., Manuel Bauer, Samuel Burger, Antonia Wolf, Emily Zeller, und Tobias Zowada M.Sc. für ihre Unterstützung bei der Erstellung des vorliegenden Berichts.

Literaturverzeichnis

- [1] Dehn, F.; Wiens, U.: Beton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2022 – Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung, 111. Jahrgang [2022]. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2022, S. 1-174.
- [2] Scheerer, S.: Was ist Textilbeton? In: Beton- und Stahlbetonbau 110 [2015], S1, S. 4-7. <https://doi.org/10.1002/best.201400104>.
- [3] Kirsten, M.; Freudenberg, C.; Cherif, C.: Carbonfasern, der Werkstoff des 21. Jahrhunderts. In: Beton- und Stahlbetonbau 110 [2015], S1, S. 8-15. <https://doi.org/10.1002/best.201400105>.
- [4] Solidian GmbH: Solidian – nicht korrosive Verstärkungen für zukünftige Generationen, 2021, <https://solidian.com/de/> [Zugriff am: 31.07.2022].
- [5] Deutsche Basalt Faser: Deutsche Basalt Faser GmbH – Offizielle Webseite, 2022, <https://www.deutsche-basalt-faser.de/> [Zugriff am: 31.07.2022].
- [6] Curbach, M.; May, S.; Müller, E. et al.: Verstärken mit Carbonbeton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2022 – Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung, 111. Jahrgang [2022]. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2022, S. 761-804.
- [7] Younes, A.; Seidel, A.; Rittner, S. et al.: Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile. In: Beton- und Stahlbetonbau 110 [2015], S1, S. 16-21. <https://doi.org/10.1002/best.201400101>.
- [8] Büttner, T.F.: Zur Dauerhaftigkeit polymergetränkter AR-Glas Bewehrungen in Textilbeton, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Dissertation, 2012.
- [9] Wolf, K.; Merkel, A.: Spinnverfahren für recycelte Carbonfasern -Phase 1 – Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem AZ: 29910 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Dietenheim Ausgabe September 2014.
- [10] Wolf, B.; Glomb, D.S.; Kustermann, A. et al.: Untersuchung des Zug- und Verbundverhaltens von Basaltfaserverstärkter Kunststoff-Stabbewehrung in Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau 114 [2019], Heft 7, S. 454-464. <https://doi.org/10.1002/best.201900019>.
- [11] Urbanski, M.; Lapko, A.; Garbacz, A.: Investigation on Concrete Beams Reinforced with Basalt Rebars as an Effective Alternative of Conventional R/C Structures. In: Procedia Engineering 57 [2013], S. 1183-1191. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.149>.
- [12] TU Dresden: C3-V1.2-I-a: Erstellung und Überprüfung von Sicherheits- und Bemessungskonzepten für Carbonbeton zur Erstellung eines normativen Regelwerkes – Bild: Sven Hofmann, 2022, <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/TRC-C3/C3-vorhaben/C3-V1.2> [Zugriff am: 31.07.2022].
- [13] Armastek: Unternehmenshomepage, 2022, <https://armastek.de/> [Zugriff am: 31.07.2022].
- [14] DIBt – Deutsche Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung / Allgemeine Bauartgenehmigung – CARBOfit® – Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton. Z-31.10-182 Ausgabe Dezember 2021.
- [15] DIBt – Deutsche Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton). Z-31.10-182 Ausgabe November 2016.
- [16] DIBt – Deutsche Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/ Allgemeine Bauartgenehmigung – Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Nenndurchmesser: 8, 12, 16, 20, 25 und 32 mm. Z-1.6-238 Ausgabe Juli 2019.
- [17] Holschemacher, K.; Dehn, F.; Müller, T. et al.: Grundlagen des Faserbetons. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2017 – Spannbeton, Spezialbetone, 106. Jahrgang [2017]. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2017, S. 382-472.
- [18] High, C.; Seliem, H.M.; El-Safty, A. et al.: Use of basalt fibers for concrete structures. In: Construction and Building Materials 96, 2022, 96, 37-46.
- [19] Tejin Carbon Europe GmbH: Unternehmenshomepage, 2022, <https://www.tejincarbon.com/de/produkte/tenaxr-kohlenstofffaser/tenaxr-kurzfasern?r=1&cHash=00908e414e6dc711f655245d9bb811bf> [Zugriff am: 31.07.2022].

- [20] Rindler GmbH: Unternehmenshomepage, <https://rindler-gmbh.at/de> [Zugriff am: 31.07.2022].
- [21] STW: Schwarzwälder Textil-Werke – Heinrich Kautzmann GmbH – Unternehmenshomepage, <https://stw-faser.de/de/> [Zugriff am: 31.07.2022].
- [22] Dehn, F.; Fischer, O.; Orgass, M.: Polypropylenfaserbeton – [PP-Faserbeton]. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2017 – Spannbeton, Spezialbetone, 106. Jahrgang [2017]. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2017, 473–489.
- [23] DIN EN 14889-2: Fasern für Beton- Teil 2: Polymerfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität; Ausgabe November 2006.
- [24] Yin, S.; Tuladhar, R.; Shi, F. et al.: Use of macro plastic fibres in concrete: A review. In: Construction and Building Materials 93 (2015), S. 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105>.
- [25] Nußbaum, G.; Vißmann, H.-W.: Faserbeton, Schriftenreihe Spezialbetone Heft 2, Verl. Bau + Technik, Düsseldorf, 1999.
- [26] DIBt – Deutsche Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – „Basalt MiniBars“ für die Verwendung in Beton. Z-3.79-2126 Ausgabe Januar 2018.
- [27] DIBt – Deutsche Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – Basalt-Mikrofasern „Rockfiber“ für die Verwendung in Beton. Z-3.79-2158 Ausgabe September 2019.
- [28] Iyer, P.; Kenno, S.Y.; Das, S.: Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Made with Basalt Filament Fibers. In: Journal of Materials in Civil Engineering 27 (2015), Heft 11. [https://doi.org/10.1061/\[ASCE\]MT.1943-5533.0001272](https://doi.org/10.1061/[ASCE]MT.1943-5533.0001272).
- [29] Jun, W.; Ye, Z.: Experimental Research on Mechanical and Working Properties of Non-dipping Chopped Basalt Fiber Reinforced Concrete. In: Yun nan shi fan da xue; Institute of Electrical and Electronics Engineers (eds.): 2010 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII 2010) – Kunming, China, 26 – 28 November 2010. IEEE, Kunming, China, 2010, pp. 635–637.
- [30] John, V.J.; Dharmar, B.: Influence of basalt fibers on the mechanical behavior of concrete – A review. In: Structural Concrete 22 (2021), Heft 1, S. 491-502. <https://doi.org/10.1002/suco.201900086>.
- [31] Fiore, V.; Scalici, T.; Di Bella, G. et al.: A review on basalt fibre and its composites. In: Composites Part B: Engineering 74 (2015), S. 74-94. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.034>.
- [32] Bheel, N.: Basalt fibre-reinforced concrete: review of fresh and mechanical properties. In: Journal of Building Pathology and Rehabilitation 6 (2021), Heft 1. <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00107-4>.
- [33] Lauff, P.; Pugacheva, P.; Rutzen, M. et al.: Evaluation of the Behavior of Carbon Short Fiber Reinforced Concrete (CSFRC) Based on a Multi-Sensory Experimental Investigation and a Numerical Multiscale Approach. In: Materials (Basel, Switzerland), Vol. 14 (2021), Iss. 22. <https://doi.org/10.3390/ma14227005>.
- [34] Fischer, O.; Volkmer, D.; Lauff, P. et al.: Zementgebundener kohlenstofffaserverstärkter Hochleistungswerkstoff [Carbonkurzfaserbeton]. Technische Universität München; Universität Augsburg, Forschungsinitiative Zukunft BauF 3178, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2019.
- [35] Hambach, M.: Hochfeste multifunktionale Verbundwerkstoffe auf Basis von Portlandzement und Kohlenstoffkurzfasern. Augsburg, Universität Augsburg, Dissertation, 2016.
- [36] Lieboldt, M.: Feinbetonmatrix für Textilbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), S1, S. 22-28. <https://doi.org/10.1002/best.201400100>.
- [37] Curbach, M.; Jesse, F.: Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 1, S. 9-16. <https://doi.org/10.1002/best.200800653>.
- [38] Schneider, K.; Butler, M.; Mechtcherine, V.: Carbon Concrete Composites C 3 – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 12, S. 784-794. <https://doi.org/10.1002/best.201700058>.

- [39] DIN EN 206: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Ausgabe Juni 2021.
- [40] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz) – KrWG, 2012.
- [41] Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung – Mantelverordnung. In: Bundesministerium der Justiz (Hrsg.): Bundesgesetzblatt Teil I, 2021, S. 2598-2752.
- [42] Baden-Württemberg, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Verwertung von Baustoffrecyclingmaterial; Verlängerung der Geltungsdauer der „Vorläufige(n) Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“, Stuttgart Ausgabe September 2019.
- [43] Baden-Württemberg, Ministerium für Umwelt und Verkehr: Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial, Stuttgart Ausgabe April 2004.
- [44] Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV) – AVV, 2001.
- [45] Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen – Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV, 2017.
- [46] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung) – DepV. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009.
- [47] DIN 18007 – Entwurf: Abbrucharbeiten. Deutsche Norm, Ausgabe Januar 2022.
- [48] Müller, A.: Baustoffrecycling – Entstehung – Aufbereitung – Verwertung. Springer Fachmedien Wiesbaden. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018.
- [49] Kopf, F.; Kortmann, J.: Großtechnische Umsetzung von Abbruch-, Rückbau- und Recyclingversuchen an Carbonbetonbauteilen. In: Zentrum für Bau- und Infrastrukturmanagement; Lehrstuhl für Bauwirtschaft und Baubetrieb; Lehrstuhl für Infrastruktur- und Immobilienmanagement (Hrsg.): Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen – Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik – Beiträge zum 29. BBB-Assistententreffen vom 06. bis 08. Juni 2018 in Braunschweig, Braunschweig, 2018, S. 162-169.
- [50] Gehbauer, F.: Baubetriebsplanung und Grundlagen der Verfahrenstechnik im Hoch-, Tief- und Erdbau. Reihe V, Heft 27 Band I, B. Universität Friedericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe Ausgabe 2009.
- [51] DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton. Ausgabe Juli 2008.
- [52] Wang, R.; Yu, N.; Li, Y.: Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. In: Construction and Building Materials 242 [2020], S. 118164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>.
- [53] DIN 4226-101: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen. Ausgabe August 2017.
- [54] DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. Ausgabe September 2010.
- [55] E DIN 1045-2: E DIN 1045-2:2022-07, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton. Entwurf, Ausgabe Juni 2022.
- [56] Martens, H.; Goldmann, D.: Recyclingtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [57] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB 04. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV R1 – Regelwerke Heft 613, FGSV-Verl., Köln, 2008.
- [58] Kimm, M.; Gerstein, N.; Schmitz, P. et al.: On the separation and recycling behaviour of textile reinforced concrete: an experimental study. In: Materials and Structures 51 [2018], Heft 5. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1249-1>.

- [59] Norambuena-Contreras, J.; Thomas, C.; Borinaga-Treviño, R. et al.: Influence of recycled carbon powder waste addition on the physical and mechanical properties of cement pastes. In: *Materials and Structures* 49 (2016), Heft 12, S. 5147-5159. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0850-4>.
- [60] Nguyen, H.; Carvelli, V.; Fujii, T. et al.: Cement mortar reinforced with reclaimed carbon fibres, CFRP waste or prepreg carbon waste. In: *Construction and Building Materials* 126 (2016), S. 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.044>.
- [61] Mastali, M.; Dalvand, A.; Sattarifard, A.: The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. In: *Composites Part B: Engineering* 112 (2017), S. 74-92. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.029>.
- [62] Kimm, M.; Pico, D.; Gries, T.: Investigation of surface modification and volume content of glass and carbon fibres from fibre reinforced polymer waste for reinforcing concrete. In: *Journal of hazardous materials*, Vol. 390 (2020), p. 121797. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121797>.
- [63] Hengstermann, M.: Entwicklung von Hybridgarnen aus recycelten Carbonfasern und Polyamid 6-Fasern für thermoplastische Verbundbauteile mit hohem Leistungsvermögen. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2019.
- [64] Merkel, A.; Wolf, K.: Spinnverfahren für recycelte Carbonfasern -Phase 2 – Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem AZ: 29910-2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Dietenheim Ausgabe September 2016.
- [65] Kortmann, J.: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton. Dissertation. Technische Universität Dresden, Baubetriebswesen und Bauverfahrenstechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.
- [66] Hofmann, M.; Gulich, B.: Verarbeitung von rezyklierten Carbonfasern für die Herstellung von Verbundbauteilen. In: *Lightweight Design* 6 (2013), Heft 2, S. 20-23. <https://doi.org/10.1365/s35725-013-0161-4>.
- [67] Hofmann, M.; Wenzel, D.; Gulich, B. et al.: Development of Nonwoven Preforms Made of Pure Recycled Carbon Fibres (rCF) for Applications of Composite Materials. In: *Key Engineering Materials* 742 (2017), S. 555-561. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.742.555>.
- [68] Meiners, D.; Eversmann, B.: Recycling von Carbonfasern. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Goldmann, D. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*. TK-Verl., Neuruppin, 2014, S. 371-378.
- [69] Kimm, M.; Bhat, S.; Gries, T.: Recycling von Textilbeton. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Senk, D. (Hrsg.): *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. TK Verlag, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2020, S. 356-373.
- [70] Job, S.; Mativenga, P.; Shuaib, N.A. et al.: „Composites Recycling – Where are we now?“. *Composites UK* Ausgabe Juli 2016.
- [71] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: *Faserverbundbauweisen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [72] Stockschräder, J.; Quicker, P.; Baumann, W. et al.: Thermal treatment of carbon-fibre-reinforced polymers (Part 2: Energy recovery and feedstock recycling). In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, Vol. 40 (2021), Iss. 6, pp. 685-697. <https://doi.org/10.1177/0734242X211038192>.
- [73] Stockschräder, J.; Quicker, P.; Thiel, C. et al.: Behandlung von Carbonfaserhaltigen Abfällen in Hausmüllverbrennungsanlagen. In: *MÜLL und ABFALL* (2018), Heft 5, S. 220-227. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2018.05.03>.
- [74] Limburg, M.; Quicker, P.: Entsorgung von Carbonfasern – Probleme des Recyclings und Auswirkungen auf die Abfallverbrennung –. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): *Energie aus Abfall*. Berliner Abfallwirtschafts- und Energie-konferenz. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2016, S. 135-144.

- [75] Quicker, P.; Stockschläder, J.: Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen. Abschlussbericht, Dessau-Roßlau Ausgabe Oktober 2021.
- [76] Wexler, M.; Baumann, W.; Doninger, T. et al.: Optionen der Carbonfaserverwertung in industriellen Hochtemperaturprozessen. Conference Paper. Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, 10.-11. Juni 2021At: Berlin [Zugriff am: 06.07.2022], 2021.
- [77] Walther, T.: CFK-Einsatz in der Calciumcarbidproduktion. Vortragsfolien, 2019.
- [78] Bhat, T.; Fortomaris, D.; Kandare, E. et al.: Properties of thermally recycled basalt fibres and basalt fibre composites. In: Journal of Materials Science 53 [2018], Heft 3, S. 1933-1944. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1672-7>.
- [79] Tirillò, J.; Sarasini, F.; Di Fausto, L. et al.: Recycled basalt fibres; fracture toughness evaluation and strength regeneration. In: European Society for Composite Materials; Panepistēmion Patrōn (eds.): 18th European Conference on Composite Materials [ECCM-18] – Athens, Greece, 25-28 June 2018. Curran Associates Inc, 2018.
- [80] Artemenko, S.E.; Arzamastsev, S.V.; Shatunov, D.A. et al.: Basalt plastics – new materials for road construction. In: Fibre Chemistry 40 [2008], Heft 6, S. 499-502. <https://doi.org/10.1007/s10692-009-9094-1>.
- [81] Kowalik, T.; Ubysz, A.: Effect of the addition of waste basalt fibers on concrete shrinkage. In: E3S Web of Conferences 263 [2021], S. 1024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301024>.
- [82] Cherif, C. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau – Techniken – Verfahren – Materialien – Eigenschaften. Springer, Berlin, 2011.
- [83] Farinha, C.B.; Brito, J. de; Veiga, R.: Assessment of glass fibre reinforced polymer waste reuse as filler in mortars. In: Journal of Cleaner Production 210 [2019], S. 1579-1594. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.080>.
- [84] Mastali, M.; Dalvand, A.; Sattarifard, A.R.: The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers. In: Journal of Cleaner Production 124 [2016], S. 312-324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.148>.
- [85] García, D.; Vegas, I.; Cacho, I.: Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete. In: Construction and Building Materials 64 [2014], S. 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.068>.
- [86] Yazdanbakhsh, A.; C. Bank, L.; Chen, C.: Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete. In: Construction and Building Materials 121 [2016], S. 278-284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.165>.
- [87] Job, S.: Recycling glass fibre reinforced composites – history and progress. In: Reinforced Plastics 57 [2013], Heft 5, S. 19-23. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(13\)70151-6](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(13)70151-6).
- [88] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall: Entsorgung faserhaltiger Abfälle – Abschlussbericht, 2019.
- [89] Tošić, N.; Peralta Martínez, D.; Hafez, H. et al.: Multirecycling of polypropylene fibre reinforced concrete: Influence of recycled aggregate properties on new concrete. In: Construction and Building Materials 346 [2022]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128458>.
- [90] Goerlitz, J.: Literatur- u. Machbarkeitsstudie zum Recycling nichtmetallisch bewehrter Betonbauteile. Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Masterarbeit, 2022.
- [91] LAGA: Entsorgung faserhaltiger Abfälle – Abschlussbericht [2019].
- [92] Koch, A.; Rübmann, D.J.; Kersch, C.: Recycling von Carbonbeton: Vorstellung der aktuellen Vorarbeiten. In: TUDALIT e.V. (Hrsg.): 7. Anwendertagung Textilbeton 2015, 2015.
- [93] Kimm, M.; Gerstein, N.; Weiler, L. et al.: Characterization of Separability of Carbon Textile Reinforced Concrete for Increased Material Sustainability. In: Santhanam, M. (Hrsg.): Advances in Construction Materials and Systems – Proceedings Vol. 4, RILEM ProceedingsPRO 118. RILEM, Paris, op. 2017.

- [94] Jäckel, H.-G.; Hamann, D.; Krampitz, T. et al.: CF-bewehrter Beton – Idealer Baustoff und eine Recycling-Herausforderung. In: recovery (2022), Heft 02, S. 14-23.
- [95] Kunieda, M.; Ueda, N.; Nakamura, H.: Ability of recycling on fiber reinforced concrete. In: Construction and Building Materials 67 (2014), S. 315-320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.060>.
- [96] Österreichische Bautechnik Vereinigung: Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton. Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2015.
- [97] Neuhaus, C.: Untersuchungen zur quantitativen Detektion von Kunststofffasern im Beton. Masterarbeit. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe Ausgabe Juli 2017.
- [98] Seifert, S., Thome, V., Karlstetter, C: Elektrodynamische Fragmentierung – Eine Technologie zur effektiven Aufbereitung von Abfallströmen. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. TK-Verl., Neuruppin, 2014, S. 431-438.
- [99] Deilmann, C.; Reichenbach, J.; Krauß, N. et al.: Materialströme im Hochbau – Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Schriftenreihe Zukunft Bauen Band 06, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, 2017.
- [100] Pimenta, S.; Pinho, S.T.: Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook. In: Waste management (New York, N.Y.), Vol. 31 (2011), Iss. 2, pp. 378-392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019>.
- [101] Woidasky, J.: Weiterentwicklung des Recyclings von faserverstärkten Verbunden – Recycling von faserverstärkten Verbunden, 2013.
- [102] Yang, J.; Liu, J.; Liu, W. et al.: Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen-oxygen atmosphere. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 112 (2015), S. 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.017>.
- [103] Hyde, J.R.; Lester, E.; Kingman, S. et al.: Supercritical propanol, a possible route to composite carbon fibre recovery: A viability study. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (2006), Heft 11, S. 2171-2175. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.12.006>.
- [104] Persico, L.; Giacalone, G.; Cristalli, B. et al.: Recycling Process of a Basalt Fiber-Epoxy Laminate by Solvolysis: Mechanical and Optical Tests. In: Fibers 10 (2022), Heft 6, S. 55. <https://doi.org/10.3390/fib10060055>.
- [105] Weh, A.; Di Monti Sopra, F.: Aufschluß von Abfallströmen unter Nutzung gepulster Hochspannungs-Technologie – Workshop Wertstoff-Recycling. (Vortragsfolien), Hanau.
- [106] Orzol, C.H.M.; Ohlmeyer, M.; Krampitz, T. et al.: Voruntersuchungen zur elektrohydraulischen Zerkleinerung von CFRP für das Carbonfaser-Recycling. In: Chemie Ingenieur Technik 89 (2017), Heft 12, S. 1773-1781. <https://doi.org/10.1002/cite.201700024>.
- [107] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen – (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2021.
- [108] Ausschuss für Gefahrstoffe – AGS-Geschäftsführung – BAuA: Das Technische Regelwerk zur Gefahrstoffverordnung -Allgemeines – Aufbau – Übersicht – Beachtung der Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) – TRGS 001. Ausschuss für Gefahrstoffe – AGS-Geschäftsführung – BAuA, 2006.
- [109] Ausschuss für Gefahrstoffe – AGS-Geschäftsführung – BAuA: Technische Regeln für Gefahrenstoffe – Quarzhaltiger Staub – TRGS 559. Ausschuss für Gefahrstoffe – AGS-Geschäftsführung – BAuA, 2020.
- [110] BG Bau: Handlungsanleitung – Staub bei Abbruch- und Rückbauarbeiten.
- [111] Ausschuss für Gefahrstoffe: Technische Regeln für Gefahrstoffe – Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle – TRGS 521. Ausschuss für Gefahrstoffe, 2008.

- [112] Mattenklott, M.; van Gelder, R.: Carbonfasern und carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) – Teil 1: Charakterisierung, Exposition, Bewertung und Schutzmaßnahmen. In: Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 79 (2019), Heft 9, S. 317-322.
- [113] Ausschuss für Gefahrstoffe: Technische Regeln für Gefahrstoffe – Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe – TRGS 905. Ausschuss für Gefahrstoffe, 2016.
- [114] Deutsche Forschungsgemeinschaft: MAK- und BAT-Werte-Liste 2022 – Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Mitteilung 58 Ausgabe 2022.
- [115] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: Liste der krebserzeugenden, mutagenen und reproduktionstoxischen Stoffe (KMR-Liste) Ausgabe August 2021.
- [116] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: GESTIS-Stoffdatenbank, 2022, <https://www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank> [Zugriff am: 22.07.2022].
- [117] European Chemicals Agency: Liste der Beschränkungen – Annex XVII to REACH, 2022, https://echa.europa.eu/de/substances-restricted-under-reach?p_p_id=disslists_WAR_disslistsportlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&disslists_WAR_disslistsportlet_javax.portlet.action=search-DissLists [Zugriff am: 23.07.2022].
- [118] Ausschuss für Gefahrstoffe – AGS-Geschäftsführung – BAuA: Technische Regeln für Gefahrstoffe – Asbest – Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten – TRGS 519. Ausschuss für Gefahrstoffe – AGS-Geschäftsführung – BAuA, 2014.
- [119] Fachbereich Holz und Metall der DGUV: Bearbeitung von CFK Materialien – Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen. DGUV-Information Ausgabe Oktober 2014.
- [120] Flanagan, M.E.; Loewenherz, C.; Kuhn, G.: Indoor Wet Concrete Cutting and Coring Exposure Evaluation. In: Applied Occupational and Environmental Hygiene 16 (2001), Heft 12, S. 1097-1100. <https://doi.org/10.1080/104732201753339587>.
- [121] Akbar-Khanzadeh, F.; Brillhart, R.L.: Respirable crystalline silica dust exposure during concrete finishing (grinding) using handheld grinders in the construction industry. In: The Annals of occupational hygiene, Vol. 46 (2002), Iss. 3, pp. 341-346. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mef043>.
- [122] Azarmi, F.; Kumar, P.; Mulheron, M.: The exposure to coarse, fine and ultrafine particle emissions from concrete mixing, drilling and cutting activities. In: Journal of hazardous materials, Vol. 279 (2014), pp. 268-279. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.003>.
- [123] Soo, J.-C.; Tsai, P.-J.; Chen, C.-H. et al.: Influence of compressive strength and applied force in concrete on particles exposure concentrations during cutting processes. In: The Science of the total environment, Vol. 409 (2011), Iss. 17, pp. 3124-3128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.016>.
- [124] Kumar, P.; Morawska, L.: Recycling concrete: An undiscovered source of ultrafine particles. In: Atmospheric Environment 90 (2014), S. 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.035>.
- [125] Hillemann, L.; Stintz, M.; Streibel, T. et al.: Charakterisierung von Partikelemissionen aus dem Trennschleifprozess von kohlefaserverstärktem Beton (Carbonbeton). In: Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 78 (2018), Heft 6, S. 230-240.
- [126] Bäger, D.; Simonow, B.; Kehren, D. et al.: Pechbasierte Carbonfasern als Quelle alveolengängiger Fasern bei mechanischer Bearbeitung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). In: Gefahrstoffe 79 (2019), 01-02, S. 13-16. <https://doi.org/10.37544/0949-8036-2019-01-02-15>.
- [127] Kehren, D.; Simonow, B.; Bäger, D. et al.: Release of Respirable Fibrous Dust from Carbon Fibers Due to Splitting along the Fiber Axis. In: Aerosol and Air Quality Research 19 (2019), Heft 10, S. 2185-2195. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.03.0149>.

- [128] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschung – Voraussetzungen und Mechanismen einer Freisetzung alveolengängiger faserförmiger Carbon-faser-Bruchstücke (CarboBreak) – Projektnummer F 2476, 2022, <https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Forschung/Forschungsprojekte/f2476.html> [Zugriff am: 08.07.2022].
- [129] Eibl, S.: Besondere Gesundheitsgefährdung durch CFK im Brandfall. In: Lightweight Design 8 (2015), Heft 1, S. 26-29. <https://doi.org/10.1007/s35725-014-1007-4>.
- [130] Schiller, B.: Stark wie Stein mit Basaltfasern – Mineralischer Stoff für Entwässerungsrinnen und nachhaltiges Bauen, 2021, <https://www.ingenieurbau-online.de/deutsches-ingenieurblatt/archiv/fachartikeldetail/stark-wie-stein-mit-basaltfasern> [Zugriff am: 15.06.2022].
- [131] Kogan, F.M.; Nikitina, O.V.: Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibers in relation to their fibrogenic and carcinogenic action. In: Environmental health perspectives, 102 Suppl 5 (1994), pp. 205-206. <https://doi.org/10.1289/ehp.94102s5205>.
- [132] McConnell, E.E.; Kamstrup, O.; Musselman, R. et al.: Chronic Inhalation Study of Size-Separated Rock and Slag Wool Insulation Fibers in Fischer 344/N Rats. In: Inhalation Toxicology 6 (1994), Heft 6, S. 571-614. <https://doi.org/10.3109/08958379409003042>.
- [133] Militký, J.; Kovačič, V.; Rubnerová, J.: Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers. In: Engineering Fracture Mechanics 69 (2002), Heft 9, S. 1025-1033. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(01\)00119-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(01)00119-9).
- [134] Deutsche Bauchemie e.V.: Jahresbericht 2021/2022 Ausgabe Juni 2022.

Impressum

Herausgeber

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien
angesiedelt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
c/o UBW Service GmbH
Türlestrasse 2, 70191 Stuttgart
Homepage: www.thinktank-irs.de
LinkedIn: THINKTANK industrielle Ressourcenstrategien

Ausführende Stelle

- › Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- › Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB)
Abteilung Baustoffe und Betonbau
- › Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe (MPA)
- › Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM)
Prof. Dr.-Ing. F. Dehn, Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Autoren

- › C. Neuhaus M.Sc.
- › Prof. Dr.-Ing. F. Dehn

Stand

Juli 2022

Grafische Konzeption, Illustration, Satz

unger+ kreative strategien GmbH, Stuttgart, www.ungerplus.de

Copyright

Wiedergaben in jeglicher Form, auch in Auszügen, müssen mit Quellenangaben gekennzeichnet werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wurde mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg und des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert.

Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien ist gefördert aus Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT