



Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall

## **Entsorgung faserhaltiger Abfälle**

**Abschlussbericht**

Juli 2019

Die 93. Umweltministerkonferenz hat am 15. November 2019 in Hamburg dem Abschlussbericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ und seiner Veröffentlichung zugestimmt.

Die LAGA-Vollversammlung hat auf ihrer 113. Sitzung am 1. Oktober 2019 dem Abschlussbericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ zugestimmt.

## Inhaltsverzeichnis:

1.	Einführung .....	6
2.	Veranlassung/Auftrag .....	7
3.	Faserverstärkte Verbundwerkstoffe .....	10
4.	Carbonfasern.....	10
4.1.	Einsatz von Carbonfasern.....	10
4.2.	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe.....	11
4.3.	Carbon-Beton.....	12
4.4.	Anwendungsbereiche für Carbonfaser-Verbundwerkstoffe .....	13
5.	Carbonfaserhaltige Abfälle .....	16
5.1.	Produktionsabfälle .....	16
5.2.	End-of-Life-Abfälle .....	18
5.3.	Detektion von Carbonfasern .....	19
6.	Entsorgung von carbonfaserhaltigen Abfällen .....	19
6.1.	Vorbereitung zur Wiederverwendung.....	19
6.2.	Recycling .....	20
6.3.	Sonstige Verwertung/thermische Entsorgungsverfahren .....	21
6.4.	Deponierung .....	28
6.5.	Lagerung.....	29
7.	Empfehlungen zu carbonfaserhaltigen Abfallströmen.....	30
8.	Glasfasern .....	37
8.1.	Einsatz von Glasfasern .....	37
8.2.	Glasfaserverstärkte Kunststoffe .....	37
8.3.	Anwendungsbereiche für Glasfaser-Verbundwerkstoffe .....	38
9.	Glasfaserhaltige Abfälle.....	40
9.1.	Produktionsabfälle .....	40
9.2.	End-of-Life-Abfälle .....	41
10.	Entsorgung von glasfaserhaltigen Abfällen.....	42
10.1.	Vorbereitung zur Wiederverwendung.....	42
10.2.	Recycling .....	43
10.3.	Sonstige Verwertung/thermische Entsorgungsverfahren .....	43
10.4.	Beseitigungsverfahren .....	46
11.	Empfehlungen zu glasfaserhaltigen Abfallströmen .....	47
12.	Gesundheitsaspekte (CFK, GFK).....	50

## Abkürzungsverzeichnis:

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ATA	Abfalltechnik-Ausschuss
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
CC	Carbon-Composites oder Carbon-Verbundmaterialien
CC e.V.	Carbon-Composites e.V.
CF	Carbonfaser
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CLP	Classification, Labelling and Packaging (dt. Übersetzung: Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung)
DepV	Deponieverordnung
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
EBS	Ersatzbrennstoff
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HMV	Hausmüllverbrennungsanlage
ITAD	Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
JCFA	Japan Chemical Fibers Association
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LASI	Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik
Mg	Megagramm (entspricht Tonne)
MW	Megawatt
örE	Öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
PAN	Polyacrylnitril
Prepreg	Faser-Matrix-Halbzeug
SAV	Sonderabfallverbrennungsanlage
TU	Technische Universität
UBA	Umweltbundesamt
UMK	Umweltministerkonferenz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WHO	Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization)
ZRE	Zentrum Ressourceneffizienz

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Entwicklung des globalen Bedarfs an carbonfaserverstärkten Kunststoffen in Tsd. Mg 2010 bis 2022 (* Schätzungen; 09/2017).....	11
<b>Abbildung 2:</b> Verwendungsmöglichkeiten von Carbonfasern in Betonen.....	12
<b>Abbildung 3:</b> CC-Bedarf in Tsd. Mg nach Anwendungen (2016).....	13
<b>Abbildung 4:</b> Prognose des weltweiten CC-Bedarf in Tsd. Mg nach Anwendungen	15
<b>Abbildung 5:</b> Mikroskopische Aufnahmen von CFK während eines Aufheizungsprozesses.....	23
<b>Abbildung 6:</b> Aufteilung der GFK-Produktion in Europa auf Anwendungsindustrien (Stand: 2017).....	38

# 1. Einführung

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Einsatzes von Faserverbundwerkstoffen kommt der Frage einer ordnungsgemäßen und schadlosen Entsorgung eine stetig steigende Bedeutung zu. Aktuell ist die Entsorgung jedoch noch nicht für alle betreffenden Materialströme, vor allem für carbonfaserhaltige Kunststoffe und Betone, ausreichend sichergestellt. Zudem besteht bei faserhaltigen Abfällen weiterhin Klärungsbedarf zu Fragen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes.

Basierend auf einem Beschluss der LAGA bildet dieser Bericht den aktuellen Stand zum Einsatz und der Entsorgung faserhaltiger Werkstoffe ab und gibt in den Kapiteln 7 und 11 Empfehlungen für den weiteren Umgang mit diesen Materialien sowie zur Gestaltung der Produktverantwortung.

Die Empfehlungen dieses Berichts können nur vorläufigen Charakter haben, solange die noch laufenden Forschungsvorhaben nicht abgeschlossen sind. Der Ad-hoc-Ausschuss weist ausdrücklich darauf hin, dass zu zahlreichen Fragen zum Umgang mit faserhaltigen Werkstoffen und ihrer Entsorgung zusätzliche Untersuchungen erforderlich sind.

Mit Blick auf den zu erwartenden Anstieg des Aufkommens faserhaltiger Abfälle und die potenziellen Gesundheitsrisiken hält es der Ausschuss für dringlich geboten, zeitnahe Lösungen zu finden.

## 2. Veranlassung/Auftrag

Aufgrund negativer Erfahrungen mit carbonfaserhaltigen Abfällen, die in Müllverbrennungsanlagen zu Störungen im Anlagenbetrieb führten und erster Untersuchungsergebnisse über das mögliche Vorliegen von WHO-Fasern nach der Verbrennung von CFK-Abfällen in einer Sonderabfallverbrennungsanlage war die Entsorgung von gefährlichen Fasern in Abfallverbrennungsanlagen Gegenstand der 86. Sitzung des Abfalltechnik-Ausschusses (ATA) der LAGA im Januar 2016. Der ATA fasste zu TOP 3.3: Entsorgung von gefährlichen Fasern in Abfallverbrennungsanlagen folgenden Beschluss:

- 1. Der ATA ist der Auffassung, dass der Eintrag von Mineral- und Carbonfasern über Mischabfall-Sortimente in Hausmüllverbrennungsanlagen minimiert werden muss.*
- 2. Der ATA ist der Auffassung, dass eine Behandlung von Abfällen mit Carbonfasern in Hausmüllverbrennungsanlagen nicht geeignet ist, die Fasern zu zerstören.*
- 3. Der ATA empfiehlt der LAGA die Einrichtung eines Arbeitskreises mit dem Auftrag, die ordnungsgemäße Entsorgung mineral- und carbonfaserhaltiger Abfälle (insbesondere CFK, Glas- oder Steinwolle, keramische Fasern) systematisch zu untersuchen und Vorschläge für eine geeignete Entsorgung zu erarbeiten.*

Auf dieser Basis fasste die 106. LAGA-Vollversammlung am 13. April 2016 unter TOP 7.2 den folgenden Beschluss:

- 1. Die LAGA bittet den ATA um Einrichtung eines Ad-hoc-Ausschusses zur systematischen Untersuchung von Möglichkeiten, mineral- und carbonfaserhaltige Abfälle (insbesondere CFK, GFK, Glas- oder Steinwolle, keramische Fasern) ordnungsgemäß zu entsorgen und hierfür geeignete Vorschläge zu erarbeiten.*
- 2. Die LAGA bittet den ATA um Mitteilung, ob die Veröffentlichung der Untersuchungsergebnisse im Rahmen einer LAGA-Mitteilung für erforderlich gehalten wird.*
- 3. Zur Übernahme des Vorsitzes erklärt sich Baden-Württemberg bereit.*

Der ATA richtete auf diesen Grundlagen in der 87. ATA-Sitzung im Juni 2016 einen Ad-hoc-Ausschuss „Entsorgung von mineral- und carbonfaserhaltigen Abfällen“ (Kurzbezeichnung „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“) unter der Obmannschaft von Baden-Württemberg ein. Der Ausschuss erarbeitete unter der Mitarbeit der Länder BY, MV, RP, NI, NW, SH und ST sowie Vertretern des LASI und des UBA einen Abschlussbericht zur „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“. Diesen Bericht diskutierte der ATA auf seiner 91. ATA-Sitzung im Juni 2018 in Regensburg und fasste in diesem Zusammenhang unter TOP 3.4 folgenden Beschluss:

- 1. Der ATA dankt dem Obmann und dem gesamten Ad-hoc-Ausschuss für die bisher geleistete Arbeit und nimmt den Bericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ zur Kenntnis.*
- 2. Der ATA bittet den Ad-hoc-Ausschuss, die Kernaussagen des Berichts herauszuarbeiten und in einem gesonderten Papier der LAGA-Geschäftsstelle zuzuleiten, um dieses dem ATA im Umlauf vorzulegen und anschließend über die LAGA der UMK in 2018 zur Kenntnis zu geben.*
- 3. Der ATA erachtet es für sachgerecht, die offenen Vollzugsfragen einer erweiterten Betrachtung zu unterziehen. Der ATA bittet deshalb seinen Vorsitzenden, über die LAGA-Vollversammlung einen ACK-Umlaufbeschluss herbeizuführen, der die Weiterführung des Ad-hoc-Ausschusses um ein Jahr ermöglicht.*

Ein Zwischenbericht wurde der LAGA-Vollversammlung 2018 vorgelegt. Diese erachtete es als sachgerecht, die noch offenen Vollzugsfragen einer erweiterten Betrachtung zu unterziehen und den Zwischenbericht fortzuschreiben. Vor diesem Hintergrund erarbeitete der Ad-hoc-Ausschuss „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ diesen abschließenden Bericht.

Wegen der Vielzahl an Kombinationen von Fasern und Matrices ist eine umfassende Behandlung der Problematik in einem überschaubaren Zeitraum nicht möglich. Mit Blick auf die Diskussionen in der LAGA und die in der Fachliteratur angesprochenen aktuellen Entsorgungsprobleme konzentriert sich der vorliegende Bericht auf glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) und carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sowie damit verbundene Gesundheitsaspekte.

Das Thema „asbestfaserhaltige Abfälle“ wird im Rahmen des „nationalen Asbestdialoges“<sup>1</sup> derzeit ressortübergreifend diskutiert, der noch zu keinen abschließenden Ergebnissen gekommen ist. Aus diesem Grund wird auf die Arbeiten und Ergebnisse des „Nationalen Asbestdialogs“ verwiesen.

Einzelheiten zu den aus abfallwirtschaftlicher Sicht zu treffenden Maßnahmen können erst festgelegt werden, nachdem im Rahmen des nationalen Asbestdialoges konkrete Ergebnisse abgestimmt wurden. Der LAGA-Ad-hoc-Ausschuss musste die damit verknüpften Fragestellungen daher zurückstellen. Er empfiehlt der LAGA, sich in Anbetracht der umfangreichen Betroffenheit auch künftig intensiv an der Diskussion des „nationalen Asbestdialoges“ zu beteiligen.

---

<sup>1</sup> <http://www.bmas.de/DE/Presse/Meldungen/2016/asbestdialog.html> (abgerufen am 14.05.2018)

### **3. Faserverstärkte Verbundwerkstoffe**

Materialien, die mit Fasern verstärkt werden, nutzen die spezifischen Festigkeiten ausgewählter Fasern in Verbindung mit der sie umgebenden Matrix. Als Fasermaterial werden derzeit überwiegend Glasfasern und zunehmend Carbonfasern verwendet. Hinzu kommen textil- und naturfaserverstärkte Werkstoffe. Als Matrix am weitesten verbreitet sind Kunststoffe, hier vor allem Duroplaste, aber auch Thermoplaste oder Beton. Zudem kommen Verbunde von faserverstärkten Werkstoffen mit Metallen zum Einsatz.

### **4. Carbonfasern**

#### **4.1. Einsatz von Carbonfasern**

Zur Produktion von Carbonfasern werden überwiegend Produktionsverfahren auf Basis von Polyacrylnitril (PAN) eingesetzt. In wenigen Sonderbereichen finden zudem auf Pech basierende Carbonfasern Anwendung, die bei entsprechender Aufbereitung eine höhere Steifigkeit und bessere Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Der Marktanteil dieser Faserart wird jedoch im unteren einstelligen Prozent-Bereich geschätzt.<sup>2</sup> Der globale Bedarf an Carbonfasern (CF) ohne Matrixanteile betrug 2017 insgesamt etwa 70.000 Mg.

Der Großteil der hergestellten Carbonfasern wird zu Verbundwerkstoffen weiterverarbeitet, wobei die Fasern in eine Matrix eingebettet werden. Die Carbonfasern dienen dabei der Verstärkung dieser Matrices. Neben der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften werden im Bereich der Konsumentenprodukte oder in der Automobilindustrie Carbonfasern auch gezielt zur optischen Aufwertung der Produkte eingesetzt.

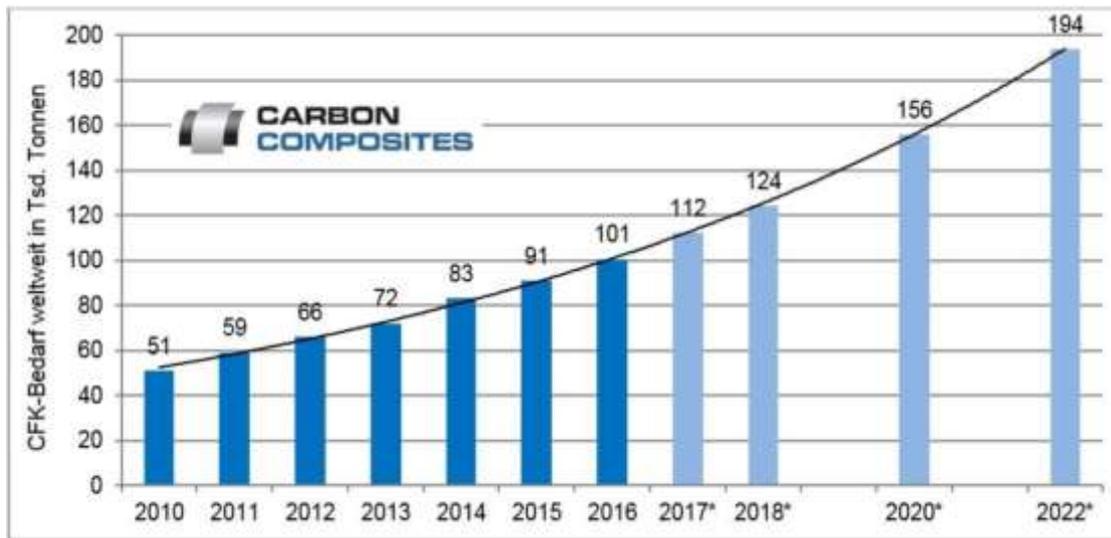
Der Vorteil von Carbonfasern gegenüber Glasfasern liegt in deren deutlich höherer Festigkeit. Nach Aussagen des Verbandes Carbon Composites e.V. kann beispielsweise durch einen Anteil von 10 % Kurzfasern in einem Kunststoff-Spritzgussteil dessen Festigkeit um 50 % erhöht werden. Die Zugabe von Glasfasern führe dagegen bei gleicher Menge nur zu einer Festigkeitssteigerung von 25 %.

---

<sup>2</sup> Auskunft BAuA, Telefonat mit Herrn Mayer-Plath am 28.02.2017

## 4.2. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe

Bei Carbonfaser-Verbundwerkstoffen kommt den Matrices aus Kunststoffen die größte Bedeutung zu, wobei hier zwischen thermoplastischen und duroplastischen Kunststoffen zu unterscheiden ist. Die Entwicklung des weltweiten Bedarfs an carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ist seit 2010 stark ansteigend (Abbildung 1) und stieg im Jahr 2016 auf **101.000 Mg**.



**Abbildung 1:** Entwicklung des globalen Bedarfs an carbonfaserverstärkten Kunststoffen in Tsd. Mg 2010 bis 2022 (\* Schätzungen; 09/2017)<sup>3</sup>

Der seit einigen Jahren steigende Einsatz von CFK ist in erster Linie durch die technische Notwendigkeit zur Erfüllung anspruchsvoller mechanischer oder physikalischer Eigenschaften erklärbar. Ebenso spricht die Effizienz bzw. Wirtschaftlichkeit beispielsweise durch die Reduktion des Gewichts eines Bauteils (z. B. verschärfte CO<sub>2</sub> Vorgaben für Autos, Flottenverbrauch in der Luftfahrt) für den Einsatz von CFK.

Laut Woidasky<sup>4</sup> sind jedoch die Fragen der Reparierbarkeit und Schadensidentifikation in CFK-Materialien noch nicht hinreichend geklärt. Schädigungen innerhalb des Laminatverbundes können u. U. schwierig erkennbar sein und im Gegensatz zu einer relativ einfachen Reparatur von metallischen Bauteilen ist diese bei Faserverbundbauteilen deutlich komplizierter bzw. unmöglich. Im Falle eines Schadens an diesen Verbundmaterialien müssen ganze Bauteile ausgetauscht oder spezielle Reparatur-

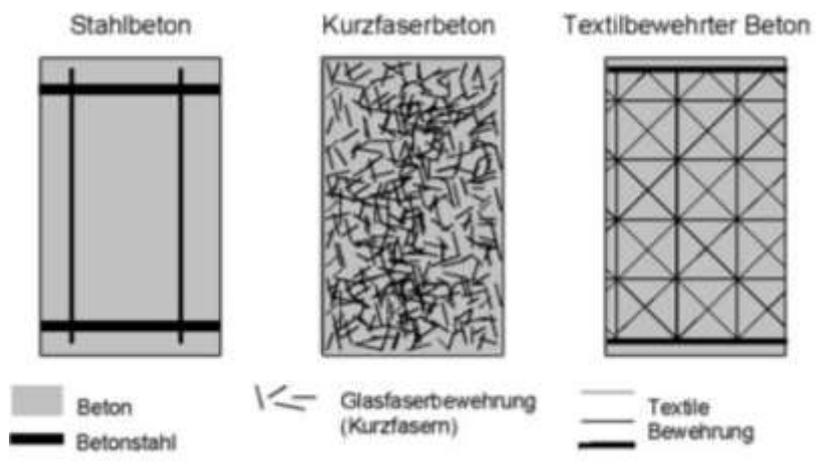
<sup>3</sup> M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten: Composites-Marktbericht 2017 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; September 2017, <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf> (abgerufen am 16.03.2017)

<sup>4</sup> J. Woidasky; Weiterentwicklung des Recyclings von faserverstärkten Verbunden in Recycling und Rohstoffe Band 6; TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky; Neuruppin; S. 241-259; 2013

verfahren angewendet werden. Es stellt sich die Frage, ob durch diese Umstände im Vergleich zu CFK-freien Bauteilen ein höheres Abfallaufkommen zu erwarten ist.

### 4.3. Carbon-Beton

Bei der Anwendung von Carbonfasern in Betonmatrix ist zwischen „Kurzfaserbeton“ und „textilbewehrtem Beton“ zu unterscheiden. In Abbildung 2 sind diese beiden Carbon-Beton-Ausführungen im Vergleich mit klassischem Stahlbeton exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 2:** Verwendungsmöglichkeiten von Carbonfasern in Betonen<sup>5</sup>

Vorteilhaft beim Einsatz von Carbonfasern als Bewehrungsmaterial (meist in Form von Matten und Stäben) in Beton sind die höhere Zugfestigkeit und Tragfähigkeit, die geringere Korrosionsanfälligkeit und dadurch mögliche Gewichts- und Materialeinsparung gegenüber Stahlarmierungen. Aufgrund dieser positiven Materialeigenschaften von Carbon können Bauteile aus Carbon-Beton besonders dünn hergestellt werden und machen hierdurch leichtere und schlankere Architekturformen möglich.

Aus den genannten Vorteilen resultiert ein hohes Potenzial zur Einsparung der Ressourcen Zement, Sand, Kies und Wasser bei der Herstellung von Betonbauten. Ein Materialwechsel von Stahl zu Carbon soll bei der Herstellung und Instandsetzung

<sup>5</sup> Kompetenzzentrum Textilbeton - RWTH Aachen: „Textilbeton: Was ist das?“ <http://www.textilbeton-aachen.de/information/textilbeton-was-ist-das/warum-textil/> (abgerufen am 16.03.2018)

von Betonbauwerken eine Reduktion des Energiebedarfs und folglich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um bis zu 50 % ermöglichen<sup>6</sup>.

#### 4.4. Anwendungsbereiche für Carbonfaser-Verbundwerkstoffe

Das bedeutendste Marktsegment für Carbonfaser-Verbundwerkstoffe, deren globaler Bedarf im Jahr 2016 bei 126.700 Mg lag, stellt derzeit die Luft- und Raumfahrt inkl. Verteidigung (30 %) gefolgt vom Fahrzeugbau (22 %) dar. Weitere bedeutende Sektoren sind Windenergie (13 %), Sport & Freizeit (12 %) und das Bauwesen (5 %) (Abbildung 3). Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Medizintechnik (v. a. Prothesen und Röntgenliegen).

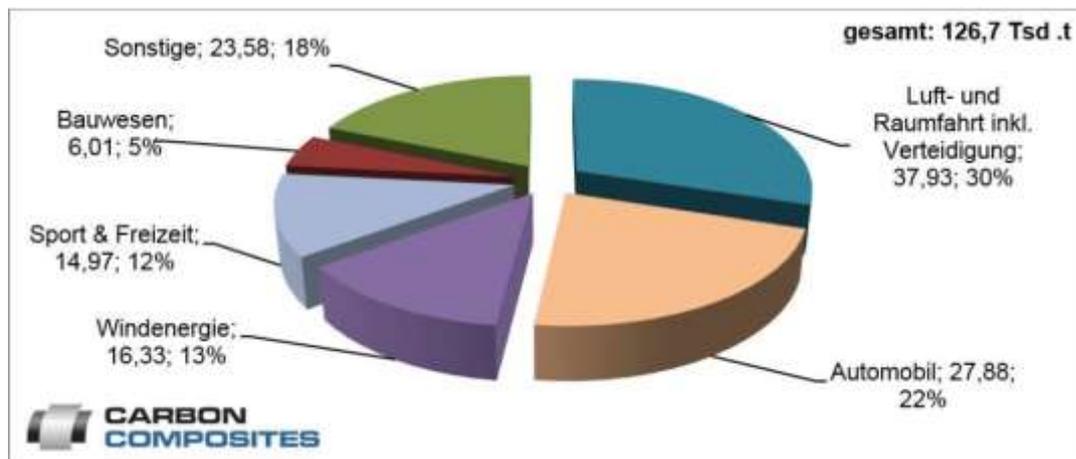


Abbildung 3: CC-Bedarf in Tsd. Mg nach Anwendungen (2016)<sup>7</sup>

In Europa werden etwa 35 % des weltweiten CC-Bedarfs produziert. Hier prägen neben der Luftfahrt vor allem die Bereiche Windenergie, Fahrzeugbau und Maschinenbau den Markt.

Mit dem A350 von Airbus und der 787 von Boeing existieren im Luftfahrtbereich bereits serienmäßig produzierte Großraum-Passagierflugzeuge deren Struktur zu über 50 % aus hochfesten Verbundwerkstoffen gefertigt wird<sup>8</sup>.

<sup>6</sup> Carbon Concrete Composite e.V.: „Eine neue Art des Bauens“, <https://www.bauen-neudenken.de/eine-neue-art-des-bauens/> (abgerufen am 19.03.2018)

<sup>7</sup> M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten: Composites-Marktbericht 2017 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; September 2017, <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf> (abgerufen am 16.03.2017)

Im Automobilsektor produziert BMW mit dem BMW-i3 ein Elektrofahrzeug mit einer vollständigen CFK-Karosserie. Bereits heute werden im Fahrzeugbau weltweit etwa 28.000 Mg Carbonfaser-Verbundmaterialien jährlich verarbeitet<sup>9</sup>.

Auch Rotorblätter neuerer Windenergieanlagen mit einer Leistung von  $\geq 5$  MW besitzen zur Verbesserung der Steifigkeit einen zunehmend höheren CFK-Anteil. Es wird abgeschätzt, dass derzeit ca. 10 % der Windenergieanlagen im deutschen Anlagenbestand Bauteile aus CFK beinhalten. Dabei variieren die verbauten Massen an Carbonfasern bei den einzelnen Herstellern stark. Unter der Annahme, dass 50 % der neu zugebauten Anlagen (ca. 1.500 pro Jahr) jeweils 4 Mg CFK enthalten, kann für Deutschland ein jährlicher CFK-Bedarf im Anwendungssegment „Windenergie“ von 3.000 Mg abgeschätzt werden.

Zunehmend werden CFK auch im Sport- und Freizeitsektor und hier in sogenannten Lifestyle-Produkten wie Fahrrädern, Tennisschlägern, Golfschlägern, Ski, Hi-Fi-Geräten und Reisekoffern eingesetzt (4.000 Mg/a in Europa). Hinzu kommen Bereiche wie Musik (z. B. Geigenbögen, Holzblasinstrumente) oder Medizin (z. B. Prothesen).

Der Einsatz von Carbon-Composites im Bauwesen betrug im Jahr 2016 weltweit rund 6.000 Mg, was einem Anteil am globalen CC-Bedarf in Höhe von 5 % entspricht<sup>10</sup>. Carbon-Beton und Kurzfaserbeton kommen derzeit nur in Spezialanwendungen wie beispielsweise zur Verstärkung bestehender Bauwerke im Rahmen von Instandsetzungs- oder Sanierungsarbeiten sowie im Neubaubereich bei Brücken und im Fassadenbau zum Einsatz. Es ist zu erwarten, dass der Einsatz von Carbonfaser-Beton zukünftig forciert wird.

Nach Daten des statistischen Landesamtes Rheinland-Pfalz wurden deutschlandweit im Jahr 2015 in der Produktgruppe „Carbonfasergelege, Carbonfasern, Erzeugnisse

---

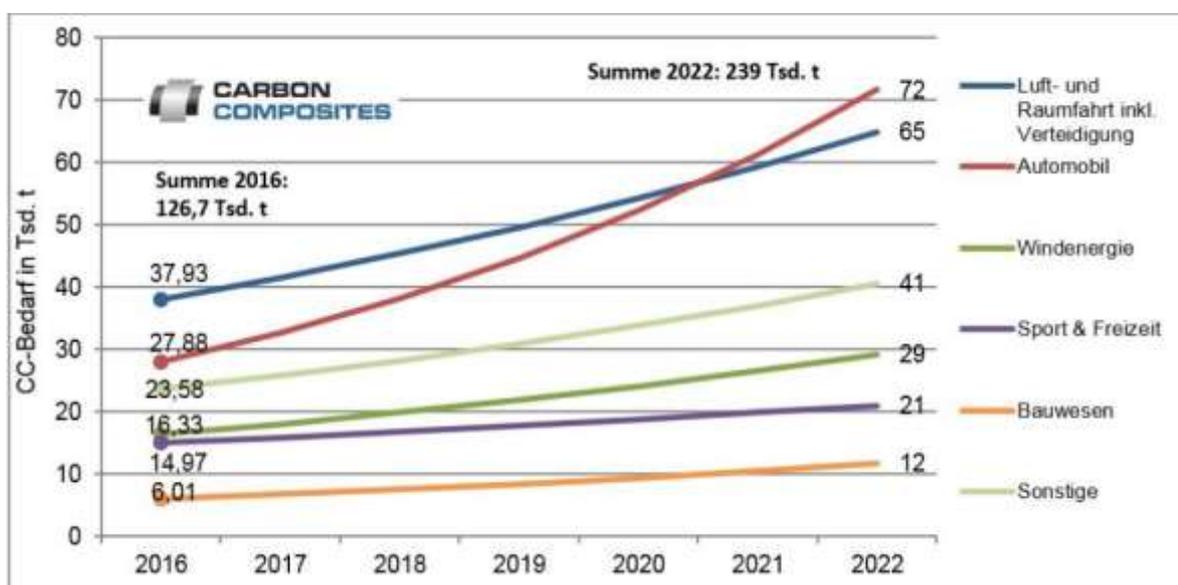
<sup>8</sup> VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 17: „Ressourceneffizienz im Leichtbau“, 2016

<sup>9</sup> M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten: Composites-Marktbericht 2017 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; September 2017, <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf> (abgerufen am 16.03.2017)

<sup>10</sup> M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten: Composites-Marktbericht 2017 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; September 2017, <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf> (abgerufen am 16.03.2017)

aus Carbonfasern, Erzeugnisse aus Graphitfasern,...“ Waren mit einer Gesamtmasse von **23.856 Mg** produziert.

Durch die Erschließung neuer Anwendungsbereiche ist auch in den kommenden Jahren mit hohen Zuwachsraten für Carbonfaser-Anwendungen zu rechnen. Carbon Composites e.V. prognostiziert annähernd eine Verdoppelung der weltweiten Jahresproduktion bis 2022 auf etwa 239.000 Mg (Abbildung 4), wobei carbonfaserverstärkte Kunststoffe innerhalb des CC-Segmentes den größten Anwendungsbereich darstellen.



**Abbildung 4:** Prognose des weltweiten CC-Bedarf in Tsd. Mg nach Anwendungen<sup>11</sup>

Teilweise werden Rotorblätter auch aus GFK-CFK-Verbundmaterialien hergestellt. Diese Bauweise wird regelmäßig bei Rotorblattlängen ab etwa 50 m angewandt. Auch im Automobilbau werden mit dem Ziel der Gewichtseinsparung vermehrt Verbundmaterialien eingesetzt. Die Entsorgungsmöglichkeiten dieser Materialien werden beim Produktdesign meist nicht berücksichtigt oder geprüft. Für die Mischlaminat aus Glas- und Carbonfaser gibt die Entsorgungswirtschaft aktuell keine Entsorgungswege an.

<sup>11</sup> M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten: Composites-Marktbericht 2017 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; September 2017, <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf> (abgerufen am 16.03.2017)

Für die Verwertung dieser Verbundmaterialien stellt die Trennung von GFK und CFK ein zentrales noch zu lösendes Problem dar. Erschwerend wirkt sich hierbei aus, dass sich der Verbund wegen der unterschiedlichen Harzsysteme im CFK-GFK-Verbund (Vinylester und Epoxid) nur ungleichmäßig auflösen lässt. Nach aktuellem Wissensstand kommt zu diesem Zweck lediglich die Pyrolyse in Betracht, die für beide Harzarten geeignet ist. Andere Verfahren, wie die Solvolyse, sind nur für ein Harzsystem geeignet und können somit nicht genutzt werden um den gesamten Verbund aufzulösen. Möglicherweise lässt sich dieses Verhalten jedoch nutzen, um Glas- und Carbonfasern wieder voneinander zu trennen. Dies wäre separat zu untersuchen.

## 5. Carbonfaserhaltige Abfälle

### 5.1. Produktionsabfälle

Da das Lebensende der auf dem Markt befindlichen Carbonfaser-Produkte häufig noch nicht erreicht ist, fallen nennenswerte Mengen carbonfaserhaltiger Abfälle derzeit lediglich als Produktionsabfälle am Standort von Produktionsstätten an.

Aufgrund der hohen Herstellungskosten für Carbonfasern werden Produktionsabfälle bereits so weit wie möglich vermieden. Da jedoch bei der Herstellung von carbonfaserhaltigen Produkten unvermeidliche Produktionsabfälle anfallen, wird sich die zunehmende Anwendungsverbretung zukünftig auch in der Abfallmenge widerspiegeln.

Bei der Fertigung von Carbonfaser-Bauteilen fallen trockene Fasern und in Matrix gebundene Fasern an. Insbesondere für die Bewertung der Recyclingfähigkeit von Carbonfasern ist diese Unterscheidung entscheidend.

In Europa entstehen bei der Herstellung von carbonfaserverstärkten Bauteilen jedes Jahr etwa 10.000 Mg/a Produktionsabfälle, wovon **3.000 bis 5.000 Mg/a in Deutschland** anfallen sollen<sup>12</sup>. Verglichen mit den in Deutschland jährlich gefertigten CFK-Produkten (23.800 Mg) erscheint diese Abfallmenge plausibel.

---

<sup>12</sup> CarboNXT GmbH: Telefonische Auskunft

Die Literaturangaben zu den Verschnittmassen weisen eine deutliche Varianz auf. *Hohmann et al.*<sup>13</sup> machen deutlich, dass die Verschnittmasse an carbonfaserhaltigen Abfällen bei der Produktion eines ein Kilogramm schweren CFK-Bauteils zwischen 0,84 kg (nicht verschnittoptimiert) und 0,15 kg (verschnittoptimiert) variiert. Für den CFK-Einsatz im Automobilbau nennt das *VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)*<sup>14</sup> Verschnitttraten von 20-30 %.

Bei den carbonfaserverarbeitenden Unternehmen existieren für die anfallenden Produktionsreste unterschiedliche Entsorgungskonzepte. Im Marktsegment Luftfahrt liefert die Fa. Airbus den in geringem Umfang anfallenden Trockenfaserverschnitt beispielsweise zur weiteren Verwertung an einen Hersteller von Orthesen. Die in ausgehärteten CFK-Bauteilen enthaltenen Carbonfasern werden mittels Pyrolyse vom Kunststoff getrennt und wiederum zur Herstellung eines neuen Faser-Matrix-Halbzeuges (Prepreg) genutzt. Da diese „Sekundärfaser-Prepregs“ jedoch nicht im strukturellen Bereich eingesetzt werden können, finden Sie in anderen Bereichen wie beispielsweise in der Kabinenverkleidung Anwendung. Auch die im Bereich Windenergie anfallenden carbonfaserhaltigen Abfälle werden mit dem Ziel des Faser-Recyclings i. d. R. der bisher einzigen in Deutschland auf die Trennung von Carbonfasern und Kunststoffmatrix spezialisierten Pyrolyseanlage der CarboNXT GmbH überlassen.

Die Firma BMW betrachtet „trockene Faserverschnitte“ hingegen als Nebenprodukt und lagert diese für den zukünftigen Einsatz ein (Stand 2017: etwa 4.000 Mg). In Matrix gebundene Carbonfasern werden nach Kenntnisstand des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses ausgehärtet und als Abfall über ein Entsorgungsunternehmen zur Entsorgung an ein Zementwerk außerhalb von Deutschland abgegeben.

Recherchen bei unterschiedlichen Verarbeitern von kleineren Mengen an CFK bestätigten die Vermutung, dass bei diesen Betrieben anfallende CFK-Abfälle teilweise als Abfälle zur Beseitigung den öRE überlassen werden, sodass eine Entsorgung gemeinsam mit Abfällen aus den Haushalten erfolgt<sup>15</sup>.

---

<sup>13</sup> A. Hohmann, B. Schwab, D. Wehner, S. Albrecht, R. Ilg, D. Schüppel, T. von Reden: „MAI ENVIRO. Vorstudie zur Lebenszyklusanalyse mit ökobilanzieller Bewertung relevanter Fertigungsprozessketten für CFK-Strukturen“, 2015, 116 pp.

<sup>14</sup> VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 17: „Ressourceneffizienz im Leichtbau“, 2016

<sup>15</sup> UBC GmbH Murr: Telefonische Auskunft, Mai 2017

Insbesondere staubende Abfälle, die Carbonfasern enthalten, erfordern besondere Sicherheitsmaßnahmen im Hinblick auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz. Eine Faserfreisetzung gilt es konsequent zu vermeiden. Dies gilt insbesondere, solange die Sorge im Raum steht, dass die Stäube Faserfragmente mit lungengängigem Format enthalten können. Müssen CFK-Formteile mechanisch bearbeitet werden, sind die Stäube mit geeigneten Anlagen abzusaugen und zu sammeln. Nicht vermeidbare und nicht anderweitig verwertbare Stäube (z.B. als Füllstoff in der Kunststoffverarbeitung) sollten verpackt oder mit geeigneten Bindemitteln (z.B. Zement) verfestigt und als Abfall beseitigt werden. Bei den Beseitigungsverfahren ist darauf zu achten, dass es nicht zu einer erneuten Faserfreisetzung kommt.

## **5.2. End-of-Life-Abfälle**

Während bei Produktionsabfällen häufig eine sortenreine Erfassung erfolgt, die grundsätzlich eine hochwertige Entsorgung der Abfälle ermöglicht, fallen End-of-Life-Abfälle meist als Gemisch an. Zudem besteht bei diesem Abfallstrom häufig keinerlei Kenntnis über die Menge an enthaltenen Carbonfasern in den einzelnen Abfallstoffen.

Da das Lebensende der meisten Carbonfaser-Produkte in der Regel noch nicht erreicht ist, spielen End-of-Life-Abfallströme mengenmäßig aktuell eine eher untergeordnete Rolle. Eine Zunahme dieses Abfallstroms ist in den kommenden Jahren jedoch zu erwarten<sup>16</sup>.

Im Zusammenhang mit sicherheitsrelevanten High-End-Consumer-Produkten aus Carbonfasern wie Fahrradrahmen und -lenkern ist davon auszugehen, dass das Abfallvolumen insgesamt gegenüber herkömmlichen Ausführungen (Stahl, Aluminium) ansteigen wird. Grund hierfür ist, dass mit der hohen Komplexität des Verarbeitungsverfahrens von Carbonfaser-Bauteilen die Anfälligkeit gegenüber Produktionsfehlern steigt. Da zudem die Schadenserkennung im Vergleich zu metallischen Werkstoffen schwieriger sowie die Reparaturfähigkeit geringer sind, wird bei Carbonfaser-Produkten nach Stürzen, Unfällen, etc. regelmäßig zum Austausch der ent-

---

<sup>16</sup> Goergen, C.: „Neuartige Organobleche aus recycelten Kunststofffasern“, Carbon Composites Magazin 2/2016

sprechenden Bauteile geraten<sup>17</sup>. Zwar existieren in verschiedenen Produktbereichen geeignete Reparaturverfahren und hierauf spezialisierte Unternehmen; eine flächendeckende Verbreitung sowie eine uneingeschränkte Anwendbarkeit bestehen jedoch nicht<sup>18</sup>.

Es ist davon auszugehen, dass zumindest ein Großteil der im Bereich „Sport und Freizeit“ in Verkehr gebrachten Kompositbauteile - im europäischen Markt etwa 4.000 Mg/a - am Ende der Produktlebensdauer/Produktnutzungsdauer als Abfall in Privathaushalten anfällt und mit dem Restabfall entsorgt wird.

Da Carbon-Beton derzeit nur in begrenztem Umfang in Spezialbereichen wie im Brückenbau Anwendung findet, konnten bei Recherchen des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses keine belastbaren Daten zu Abfallströmen und Abfallmengen von Carbon-Beton eruiert werden.

### **5.3. Detektion von Carbonfasern**

Nach Kenntnis des Ad-hoc-Ausschusses existiert derzeit kein einheitliches Messverfahren zur Detektion und Quantifizierung von Carbonfasern. Ein entsprechendes standardisiertes Messverfahren ist für die Bewertung möglicher Entsorgungsverfahren und zur Ermittlung der Fasereigenschaften sowie einer eventuellen Faserfreiheit zwingend erforderlich.

## **6. Entsorgung von carbonfaserhaltigen Abfällen**

### **6.1. Vorbereitung zur Wiederverwendung**

Die Vorbereitung zur Wiederverwendung stellt gemäß der Abfallhierarchie (§ 6 KrWG) nach der Vermeidung die vorrangig zu ergreifende Verwertungsmöglichkeit dar. Allerdings wird die Vorbereitung zur Wiederverwendung von carbon-

---

<sup>17</sup> C. Listmann (Redaktion BIKE – das Mountainbike Magazin): „Albtraum Lenkerbruch: Wie kann man sich schützen?“, [http://www.bike-magazin.de/service/bike\\_wissen/so-vermeiden-sie-dass-carbon-lenker-brechen/a27993.html](http://www.bike-magazin.de/service/bike_wissen/so-vermeiden-sie-dass-carbon-lenker-brechen/a27993.html) (abgerufen am 26.03.2018)

<sup>18</sup> CarboRep.de, <http://www.carborep.de/> (abgerufen am 26.03.2018)

faserhaltigen Abfällen nach den Recherchen des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses derzeit in Deutschland nicht umgesetzt.

## **6.2. Recycling**

### **6.2.1. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe**

Im Hinblick auf einen Aufschluss von CFK-Bauteilen und eine Rückgewinnung der Fasern ist bislang nur das Pyrolyseverfahren großtechnisch erprobt. In Deutschland ist derzeit ein Unternehmen am Markt, das sortenreine „CFK-Abfälle“ aus der gewerblichen Anwendung annimmt und die Fasern mittels Pyrolyse für eine weitere Verwertung freilegt. Hierbei handelt es sich um die Fa. CarboNXT GmbH im niedersächsischen Wischhafen. Die dortige Pyrolyseanlage verfügt über eine Kapazität von 1.000 bis 1.500 Mg/a und verwertet ausgehärtete CFK-Bauteile, die hauptsächlich aus der Luftfahrtindustrie stammen. Der Entsorgungspreis für die Abgabe von CFK-Abfällen zur pyrolytischen Behandlung beträgt derzeit – abhängig von diversen Faktoren – etwa 400 € pro Mg<sup>19</sup>. Für die Bereitstellung von Sekundär-Carbonfasern über die Pyrolyse fallen für die Fa. CarboNXT nach eigenen Angaben Kosten von insgesamt etwa 5.000 € pro Mg an. Dies liegt deutlich unterhalb des Preises für Neufasern (circa 20.000 €/Mg).

Das Produkt des Pyrolyseprozesses wird überwiegend als Kurzfasern oder als Mahlgut vermarktet. Nach Informationen, die dem Ausschuss vorliegen, werden in der Produktion statt Recyclingfasern aus der Pyrolyse oftmals Neufasern für CFK eingesetzt. Da ein tragfähiger Markt für Sekundärfasern bislang noch nicht vorhanden ist, wird die Pyrolyse als Verwertungsweg wenig beschränkt. Zum einen spricht dies für die fehlende Akzeptanz von Recyclingfasern auf dem Markt, zum anderen ist dies ein Indiz dafür, dass die Qualität von Recyclingfasern der Marktnachfrage noch nicht entspricht. Einen klaren Vorteil des wertstoffhaltenden Faserrecyclings stellt die erhebliche Energieeinsparung im Vergleich zur Herstellung von Neufasern dar. Für die Herstellung von CFK ist eine sehr hohe Energieintensität, vergleichbar mit der von Primäraluminium erforderlich.

---

<sup>19</sup> T. Rademacker (CarboNXT): Mündliche Auskunft auf der 3. Sitzung des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses „faserhaltige Abfälle“ am 22.02.2017 in Mainz

Die in Deutschland aktuell anfallenden Produktionsabfallmassen von etwa 3.000 bis 5.000 Mg/a können in der Pyrolyseanlage von CarboNXT derzeit nicht vollständig zur Recyclinganwendung aufbereitet werden. Mit dem zukünftig ansteigenden Aufkommen von End-of-Life-Abfällen wird die Kapazität einer einzelnen Pyrolyseanlage in jedem Fall bei weitem nicht ausreichen.

Das Zuführen von CFK-Abfällen zu einer Pyrolyseanlage ist nach Ansicht des Ausschusses sinnvoll, wenn die von der Kunststoffmatrix befreiten Carbonfasern auch sinnvoll stofflich verwertet werden können. Es besteht daher noch Bedarf, weitere Verwendungsmöglichkeiten für Sekundärfasern zu erschließen.

### **6.2.2. Carbon-Beton**

Bei der Trennung von Beton und Carbonbewehrung mit gängigen Aufbereitungstechniken erfolgt in jedem Fall ein gewisser Eintrag von Carbonfaserfragmenten in das mineralische Abbruchmaterial. Techniken und Verfahren zur sortenreinen Trennung der Carbonfaser-Bewehrung von der Betonmatrix mit dem Ziel einer hochwertigen und schadlosen Verwertung haben sich noch nicht ausreichend in großtechnischem Maßstab etabliert. Ob die Abtrennung von Carbonfasern ohne unerwünschte Verteilung dieser Fasern in die einzelnen Recyclingstoffströme technisch sowie wirtschaftlich überhaupt möglich ist, ist derzeit noch nicht absehbar. Die fortschreitende Entwicklung der Entsorgungstechnik, insbesondere die der elektrodynamischen Fragmentierung, ist im Auge zu behalten.

Der Einsatz von Carbon-Beton ist nur vertretbar, wenn die gesundheitliche Unbedenklichkeit nachgewiesen ist und die Frage der Entsorgung geklärt ist.

### **6.3. Sonstige Verwertung/thermische Entsorgungsverfahren**

Da die Vorteilhaftigkeit des Recyclings stark von den konkreten Umständen des hierfür erforderlichen Trennverfahrens (wie z. B. der Pyrolyse) und der späteren Verwendung der Sekundärfasern abhängt, kann die Verbrennung im Einzelfall auch

den vorteilhafteren Entsorgungsweg darstellen<sup>20</sup>. Daher werden momentan verschiedene Optionen zur thermischen Behandlung von CFK untersucht.

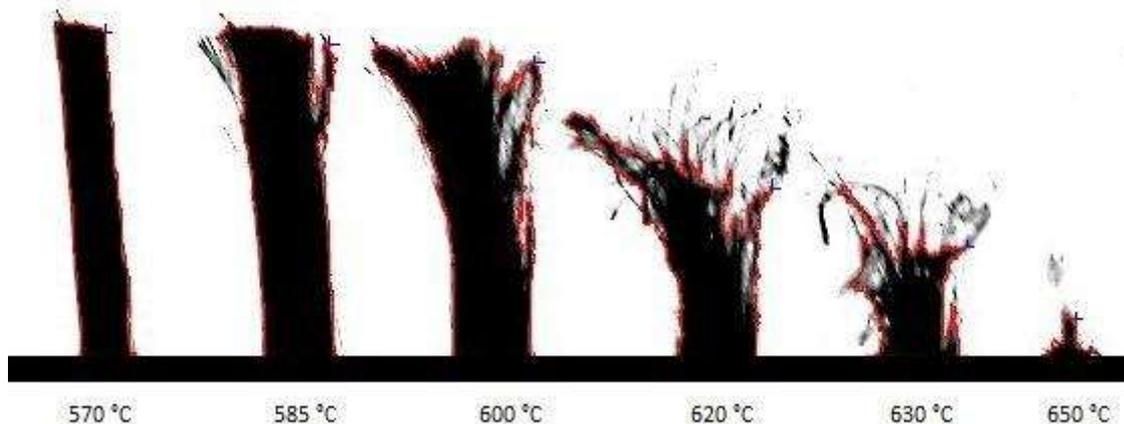
Thermische Verfahren kommen jedoch nur in Betracht, soweit die in bestimmten Behandlungsprozessen festgestellte WHO-Faser-Problematik (siehe Kapitel 12) jeweils grundsätzlich oder durch spezielle Verfahrensführung beherrscht werden kann. In diesem Zusammenhang wird auf das bis Ende 2019 laufende UFOPLAN-Vorhaben FKZ 3716 34 318 0 des Umweltbundesamtes zur systematischen Untersuchung der Verbrennung von CFK-Abfällen in großtechnischen Abfall(mit)verbrennungsanlagen verwiesen. Der 2018 aktualisierte Projektumfang sieht Untersuchungen an einer Hausmüllverbrennungsanlage, einer Sonderabfallverbrennungsanlage, einem Zementwerk und einem Kupolofen zur Carbidherstellung vor. Erste Ergebnisse aus den im Jahr 2018 an der HVM in Coburg und der Sonderabfallverbrennungsanlage in Biebesheim durchgeführten Verbrennungsversuchen liegen inzwischen vor. Bereits die vorläufige Auswertung der Versuche zeigt, dass die beiden Verfahrensalternativen nicht geeignet sind, eine sichere Entsorgung carbonfaserhaltiger Abfälle zu gewährleisten. Die Ergebnisse zu den Versuchen im Zementwerk und im Carbidofen werden voraussichtlich im 3. Quartal 2019 vorliegen.

### **6.3.1. Energetische Verwertung in Hausmüllverbrennungsanlagen und EBS-Heizkraftwerken**

Während eines Verbrennungsprozesses zerspleißen Carbonfasern und mit zunehmender thermischer Belastung reduziert sich deren Durchmesser (Abbildung 5).

---

<sup>20</sup> R. A. Witik, R. Teuscher, V. Michaud, C. Ludwig, J.-A. E. Månson (2013): "Carbon fibre reinforced composite waste: an environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 49, 89–99.



**Abbildung 5:** Mikroskopische Aufnahmen von CFK während eines Aufheizungsprozesses<sup>21</sup>

Die Zersetzung von Carbonfasern bzw. die Abnahme der Faserabmessungen ist dabei von verschiedenen Parametern wie Faserart, Atmosphäre, Sauerstoffgehalt, Temperatur und Verweilzeit abhängig. Carbonfasern können in sauerstoffhaltiger Atmosphäre zwar schon bei Temperaturen unter 800 °C vollständig verbrannt werden, jedoch setzt dies eine hinreichend große Verweilzeit in der heißen Zone voraus.

Da in HMV und EBS-Heizkraftwerken diese Voraussetzungen für eine vollständige thermische Zersetzung von Carbonfasern in der Regel nicht gegeben sind, werden Carbonfasern während des Verbrennungsvorgangs häufig nicht vollständig zerstört, sondern nur verkürzt und/oder aufgespalten. Inwieweit beim Verbrennungsprozess unter Umständen auch Fasern mit der kritischen Geometrie von WHO-Fasern entstehen, bleibt zu untersuchen.

Im Rahmen des o. g. UFOPLAN-Vorhabens wurden am Müllheizkraftwerk Coburg Versuchsfahrten mit einer gezielten Zugabe von etwa 100 kg Carbonfasermaterial pro Stunde (ca. 1 % des Gesamtinputs) durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass bei einer Aufgabe in dieser Menge die Carbonfasern nur unzureichend zerstört werden und quantitativ in den Verbrennungsrückständen, besonders in den Rostaschen, wiedergefunden werden können. Durch Einsatz einer Partikelgitternetzsonde konnte zumindest qualitativ die Anwesenheit von Carbonfasern im Rohgasstrom aus der Verbrennung nachgewiesen werden. Durch die sehr effiziente Staubabscheidung

<sup>21</sup> M. Limburg, P. Quicker (2015): „Entsorgung von Carbonfasern – Probleme des Recyclings und Auswirkungen auf die Abfallverbrennung“, [http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2016\\_eaa/2016\\_EaA\\_135-144\\_Quicker.pdf](http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2016_eaa/2016_EaA_135-144_Quicker.pdf) (abgerufen am 28.03.2018).

mittels Gewebefilter und den damit verbundenen niedrigen Staubwerten im Reingas von weniger als 1 mg/m<sup>3</sup> lassen sich am Kamin nur noch mit großem analytischen Aufwand einzelne Fasern nachweisen. Im Fokus der weiteren Betrachtungen sind daher vor allem die festen Rückstände aus der Verbrennung, die einen hohen Anteil an Carbonfasern aufweisen. Allerdings sind hier die Forschungsarbeiten zur Zuordnung der Faserlabmessungen (WHO-Fasern) noch nicht abgeschlossen.

Aufgrund der schlechten Verbrennungseigenschaften von Carbonfasern und ihrer elektrischen Leitfähigkeit kann der Anlagenbetrieb der Verbrennungsanlagen beeinträchtigt werden. Dies betrifft vorwiegend mögliche Störungen von elektrischen und elektronischen Geräten sowie Faserablagerungen in der Abgasreinigung. Folglich wird die Option der Entsorgung von CFK-Abfällen in HMV und EBS-Heizkraftwerken als ungeeignet angesehen. Diese Position vertritt auch die ITAD.

Auch die Betreiber dieser Anlagen lehnen die Annahme von carbonfaserhaltigen Abfällen regelmäßig ab. Es ist jedoch davon auszugehen, dass solche Abfälle sowohl aus gemischten Produktionsabfällen als auch aus Haushaltsabfällen vielfach unerkannt als Abfallgemische in HMV und EBS-Heizkraftwerke gelangen. Mittelfristig ist mit etwa 8 g Carbonfaser-Abfall pro Einwohner und Jahr aus Anwendungen im Consumer-Bereich zu rechnen, die über den Restabfall und somit über HMV oder EBS-Heizkraftwerke entsorgt werden. Auf die Mitbehandlung dieses kritischen Mengenstroms müssen sich die Betreiber von HMV und EBS-Heizkraftwerken einstellen. Eine Abschätzung zu den maximal verwertbaren CFK-Mengen konnten die Anlagenbetreiber auf Nachfrage nicht abgeben.

Ein separates Sammelsystem für carbonfaserhaltige Haushaltsabfälle würde den Bürgern eine Alternative zur Entsorgung über die Restabfalltonne bieten. Es könnte die Siedlungsabfall-Verbrennungsanlagen entlasten und die mit den Fasern einhergehenden Probleme reduzieren. Da aus privaten Haushalten derzeit nur geringe Mengen carbonfaserhaltiger Abfälle in die öffentliche Abfallentsorgung gelangen, wird eine getrennte Erfassung bei den öRE aktuell jedoch als unverhältnismäßig angesehen.

### **6.3.2. Verwertung in der Stahlschmelze**

Der für den Stahlerzeugungsprozess benötigte Primärkohlenstoff könnte bei der Stahlschmelze im Elektrolichtbogenofen zumindest zu einem gewissen Anteil durch

CFK-Abfälle bereitgestellt werden. Dabei kämen ganze CFK-Bauteile sowie Stäube oder Granulate (insbesondere für das Einblasen in die Schmelzkammer) in Frage.

Zum aktuellen Zeitpunkt liegen für eine fundierte Bewertung des Verwertungsweges der Mitverbrennung von CFK-Abfällen bei der Stahlherstellung in einem Elektrolichtbogenofen keine Informationen und Erfahrungen im großtechnischen Praxiseinsatz vor. Für diesen Verwertungsweg besteht weiterer Untersuchungsbedarf. In diesem Zusammenhang werden von der BAM und der RWTH Aachen (Prof. Dr. P. Quicker) Praxisversuche in einem Lichtbogenofen durchgeführt.

### **6.3.3. Verwertung im Calciumcarbid-Verfahren**

Eine Verwertung von CFK-Abfällen im sogenannten Calciumcarbid-Verfahren wird gegenwärtig nicht praktiziert. Angesichts der im Prozess durch den Einsatz von Tauchelektroden erreichten hohen Temperaturen (über 2.000 °C) stellt dieses Verfahren grundsätzlich jedoch einen möglichen Entsorgungsweg dar. Dabei könnten die CFK-Abfälle gleichzeitig als Energieträger und als Kohlenstoffquelle dienen.

Im Februar 2017 fanden bei einer Firma in Trostberg erste Versuche zum Einsatz von CFK-Abfällen bei der Calciumcarbid-Produktion statt<sup>22</sup>. Die Versuche in einem Technikumscarbidofen haben gezeigt, dass CFK-Materialien in gewissem Umfang im Carbidofen umgesetzt werden. Dem Ad-hoc-Ausschuss wurden auch erste Überlegungen der Carbidindustrie zur Prüfung dieses Entsorgungsweges vorgestellt. Für diesen Verwertungsweg besteht daher weiterer Untersuchungsbedarf. Im Rahmen des o. g. UFOPLAN-Vorhabens (FKZ 3716 34 318 0) sind Untersuchungen an einer großtechnischen Anlage vorgesehen. Bis zum Vorliegen entsprechender wissenschaftlicher Ergebnisse, kann die Mitverbrennung von CFK-Abfällen im Carbidofen nicht abschließend bewertet werden.

Mögliche Produkte der Calciumcarbid-Synthese sind insbesondere auch Düngemittel, welche auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden aufgebracht und somit aktiv in die Umwelt eingetragen werden. Sofern keine vollständige Faserzerstörung nachgewiesen und eine Freisetzung von WHO-Fasern nicht ausgeschlossen werden kann, ist dieser Verwertungsweg nicht zu empfehlen.

---

<sup>22</sup> Carbon Composites e. V., Aussage gegenüber dem LAGA-Ad-hoc-Ausschuss am 22. Februar 2017

Mitte Mai 2019 konnte mit den im o.g. UFOPLAN-Vorhaben vorgesehenen Versuchsfahrten begonnen werden, sodass Anfang des 3. Quartals 2019 mit ersten Ergebnissen hinsichtlich der Eignung des Carbidofens zur thermischen Entsorgung von carbonfaserhaltigen Abfällen zu rechnen ist.

#### **6.3.4. Mitverbrennung in Zementwerken**

Nach Recherchen des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses findet eine gezielte Verwertung von CFK-Abfällen in Zementwerken innerhalb Deutschlands nicht statt; lediglich ein osteuropäisches Zementwerk nimmt aktuell CFK-Abfälle zur Verwertung an. Als Gründe für die Nichtannahme wurden Bedenken hinsichtlich des Verbleibs von Fasern im Produkt sowie der Freisetzung mit dem Abgas genannt.

Für diesen Entsorgungsweg besteht aus Sicht des Ausschusses weiterer intensiver Untersuchungsbedarf. Da eine Verlagerung von Carbonfasern oder Carbonfaser-Fragmenten in die Zementprodukte derzeit nicht sicher ausgeschlossen werden kann, ist dieser Verwertungsweg aktuell kritisch zu bewerten. Bis zum Vorliegen der Ergebnisse des vom UBA beauftragten UFOPLAN-Vorhabens (FKZ 3716 34 318 0) kann eine Verbrennung von carbonfaserhaltigen Abfällen in Zementwerken nicht abschließend bewertet werden.

Aufgrund des Wechsels des im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens für die Versuche vorgesehenen Zementwerks und den damit verbundenen neuen genehmigungsrechtlichen Fragestellungen, konnten die Versuche, anders als geplant, Anfang 2019 noch nicht begonnen werden.

#### **6.3.5. Thermische Behandlung in Sonderabfallverbrennungsanlagen**

Bisherige Erkenntnisse deuten darauf hin, dass Carbonfasern auch während der Verbrennung in Sonderabfallverbrennungsanlagen nur teilweise zerstört werden und nach dem Verbrennungsprozess in der Schlacke weiterhin nachweisbar sind. Inwieweit die im Vergleich zur Hausmüllverbrennung vorherrschenden höheren Temperaturen und längeren Aufenthaltsdauern die Bildung und Verlagerung von WHO-Fasern in die Schlacken oder Filterstäube begünstigen, ist bislang nicht abschließend analysiert.

Die im Rahmen des laufenden UFOPLAN-Vorhabens im Jahr 2018 an der SAV Biebesheim durchgeführten Verbrennungsversuche haben gezeigt, dass bei einer eingesetzten Menge von ca. 110 kg carbonfaserhaltigen Abfalls pro Stunde (ca. 4 % des Gesamtinputs) nur eine unzureichende thermische Zerstörung der Carbonfasern erfolgt und diese teilweise unverbrannt in der Schlacke am Ende des Drehrohrs wiedergefunden werden konnten. Die scheinbar gegenüber der Siedlungsabfallverbrennung günstigeren Verbrennungsbedingungen, die insbesondere mit den höheren Temperaturen verbunden wurden, spiegeln sich in den vorläufigen Versuchsergebnissen nicht in einer verbesserten thermischen Zersetzung von Carbonfasern wider. In der Verbrennungsschlacke wurden sogar deutlich größere Fasermengen als in der Rostasche aus der Siedlungsabfallverbrennungsanlage nachgewiesen.

Hinsichtlich der Verlagerung der Fasern ins Abgas der Sonderabfallverbrennungsanlage liegen ähnliche Ergebnisse wie bei dem Müllheizkraftwerk Coburg vor. Aufgrund der auch in der SAV Biebesheim vorhandenen sehr guten Staubabscheidung werden über den Kamin nahezu keine Fasern emittiert.

Carbonfasern verursachen in Sonderabfallverbrennungsanlagen grundsätzlich dieselben betriebstechnischen Probleme und Störungen wie in H MV (siehe Kapitel 6.3.1). Im Gegensatz zur H MV werden die Rückstände der Sonderabfallverbrennung in der Regel allerdings nicht verwertet, sondern auf einer Sonderabfalldeponie entsorgt und somit aus dem Kreislauf ausgeschleust.

Bundesweit existiert lediglich eine Sonderabfallverbrennungsanlage (AVG Hamburg), die in beschränktem Umfang CFK-Abfälle annimmt. Aufgrund der Anlagentechnik (Elektrofilter) und der von Carbonfasern verursachten technischen Probleme ist die Menge auf maximal 250 Mg pro Jahr begrenzt.

Die Entsorgungskosten für eine Tonne carbonfaserhaltige Abfälle liegen dabei mit etwa 400 € auf einem vergleichbaren Niveau wie bei der stofflichen Verwertung der CFK-Abfälle mit Hilfe einer Pyrolyse. Folglich sieht der Ausschuss die mit der stofflichen Verwertung verbundenen Kosten nicht außer Verhältnis zu den Kosten der Abfallentsorgung über eine Sonderabfallverbrennungsanlage mit anschließender Ablagerung der Aschen auf einer Sonderabfalldeponie.

Angesichts der begrenzten Annahmemengen stellt die SAV keine ausreichende Entsorgungsmöglichkeit für Carbonfaserabfälle dar. Der Ausschuss weist darauf hin, dass die Carbonfasern in der Schlacke bisherige Aufbereitungsverfahren, die vor der Deponierung erfolgen, beeinträchtigen könnten.

## **6.4. Deponierung**

Eine Deponierung von carbonfaserhaltigen Abfällen - auch von Carbon-Beton - findet nach Kenntnis des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses aktuell in Deutschland nicht statt.

Für CFK-Abfälle scheidet eine Deponierung aufgrund des hohen Brennwertes der Kunststoffmatrix aus (Anhang 3 Nr. 2 Satz 11 DepV). Abweichendes könnte sich ergeben, wenn die Carbonfasern als gefährliche Fasern im Sinne von § 6 Absatz 6 Satz 2 Nr. 1 DepV eingestuft werden und der Nachweis erbracht wird, dass eine Abtrennung der Fasern technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist.

Die Deponierung „trockener“ Fasern ist dagegen nach der Deponieverordnung zulässig, da Carbonfasern als elementarer Kohlenstoff betrachtet werden können. Hierzu sind eine Anlieferung und der Einbau in geeigneten Behältnissen (z. B. Big-Bags) erforderlich. Gleichzeitig sollten die Faserabfälle analog dem Vorgehen bei asbesthaltigen Abfällen beim Einbau in die Deponie vor jeder Verdichtung, aber mindestens wöchentlich mit geeignetem Material abgedeckt werden (Anhang 5 Nr. 4 Ziffer 3 DepV). Auch bei der mechanischen Zerkleinerung zur Konfektionierung für den Transport und die Ablagerung sind Faserfreisetzungen durch geeignete Technologien zu vermeiden.

Angesichts des durchaus zu erzielenden positiven Marktpreises für trockene Fasern kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Beseitigungsmöglichkeit in der Praxis nicht genutzt wird.

Nach Einschätzung des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses existiert somit für CFK-Abfälle derzeit kein tragfähiges Verfahren zur gemeinwohlverträglichen Beseitigung.

Bei Abfällen aus Carbon-Beton stellt die Deponierung aus Sicht des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses derzeit noch die Entsorgungsmethode der Wahl dar, da im Falle der

Verwertung eine Verteilung von Carbonfasern im Stoffkreislauf und eine damit einhergehende Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit momentan nicht sicher ausgeschlossen werden können. Die Deponierung von Carbon-Beton ist auch bei Überschreitung der Zuordnungswerte der Deponieverordnung für die Parameter TOC und Glühverlust mit Zustimmung der zuständigen Behörde möglich, sofern die Überschreitung auf elementaren Kohlenstoff (hier Carbonfaser) zurückzuführen ist (Anhang 3 Nummer 2 Satz 11 DepV).

## 6.5. Lagerung

Mit Blick auf den bislang noch nicht ausgeräumten Verdacht kanzerogener Eigenschaften der CFK-Faserstäube sollte bis zum Abschluss weiterer Forschungsvorhaben – unter entsprechender Berücksichtigung des Brandschutzes – eine Lagerung der in der Matrix gebundenen Fasern in Monofractionen erfolgen. Dies ermöglicht nach der Schaffung geeigneter Verwertungs- und Beseitigungsverfahren eine Rückholbarkeit der CFK-Abfälle. Bei der Lagerung trockener Carbonfasern ist sicherzustellen, dass es zu keiner Faserfreisetzung kommt.

Bei der Lagerung von CFK-Abfällen ist eine entsprechende immissionsschutzrechtliche Genehmigung nach § 4 Absatz 1 BImSchG i. V. m. Anhang 1 zur Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) erforderlich. Für Anlagen zur zeitweiligen Lagerung von Abfällen (bis zu 1 Jahr) ist Nr. 8.12 und für Anlagen zum Lagern von Abfällen über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr ist Nr. 8.14 im Anhang 1 der 4. BImSchV einschlägig. Ab einer Lagerungsdauer von mehr als drei Jahren greifen die Anforderungen in der DepV für Langzeitlager. Da CFK-Abfälle diese Anforderungen nicht einhalten, ist eine Lagerung von mehr als drei Jahren nicht möglich.

Generell ist bei der Lagerung von faserhaltigen Materialien die Frage nach der Abfalleigenschaft zu klären. Dabei ist vor allem zu prüfen, ob die Nebenprodukteeigenschaft gemäß § 4 Abs. 1 Nr. 1 KrWG erfüllt ist. Unter anderem ist zu prüfen, ob die Weiterverwendung des Stoffes oder Gegenstandes sichergestellt ist. „Die bloße Möglichkeit oder nur mehr oder weniger langfristige Vorstellbarkeit einer Verwendung genügen nicht.“<sup>23</sup>

---

<sup>23</sup> Hans D. Jarass, Frank Petersen: Kommentar zum KrWG, §4 Rz.28

## **7. Empfehlungen zu carbonfaserhaltigen Abfallströmen**

### **(1) Beauftragung von Forschungsvorhaben zu Gesundheitsgefahren von Carbonfaserstäuben und deren Freisetzungverhalten**

- ⇒ Intensive Abstimmung mit den für Arbeitsschutz zuständigen Behörden.
- ⇒ Beauftragung von Forschungsvorhaben, die die Freisetzung von WHO-Fasern und deren krebserzeugende und allergene Wirkung untersuchen sowie die umweltgefährdende Wirkung von Carbonfaserstäuben detailliert betrachten.
- ⇒ Erstellung eines Maßnahmenkatalogs zum Arbeitsschutz beim Umgang mit carbonfaserhaltigen Materialien, Aschen, Schlacken und Sekundärfasern und zum Verhalten bei der Bearbeitung dieser Stoffe im Rahmen von Reparatur-, Recycling-, Verwertungs- und Beseitigungsmaßnahmen.

### **(2) Ermittlung des aktuellen Standes zur Entsorgung von carbonfaserhaltigen Abfällen**

- ⇒ Weiterführung der systematischen Untersuchung zum aktuellen Stand der Entsorgung carbonfaserhaltiger Abfälle.
- ⇒ Ökologische Bewertung der zur Verfügung stehenden Entsorgungsmöglichkeiten für carbonfaserhaltige Abfälle.

### **(3) Forschungsbedarf zu technischen Verwertungsverfahren von carbonfaserhaltigen Abfällen**

- ⇒ Erforschung, Entwicklung und Etablierung technischer und organisatorischer Verfahren zur Entsorgung von carbonfaserhaltigen Abfällen in den nachfolgenden Bereichen:
  1. Recyclingverfahren, die einen hochwertigen Rezyklateinsatz ermöglichen (z. B. Pyrolyse, Solvolyse, Elektrofragmentierung)
  2. Materialcharakterisierungen und Verfahren für den Einsatz rezyklierter Carbonfasern
  3. Verfahren zur vollständigen energetischen Verwertung
  4. Entwicklung eines Verfahrens zur sortenreinen Abtrennung von Carbonfasern aus Carbon-Beton-Abfällen

#### **(4) Getrennthaltung und separate Erfassung**

- ⇒ Eine Getrennthaltung carbonfaserhaltiger Abfälle ist insbesondere für die mengenmäßig relevanten Anwendungsgebiete (Produktionsabfälle, Luftfahrt, Militär, Seefahrt, Windenergieanlagen, Altfahrzeuge) erforderlich, damit diese Stoffströme mit Hilfe spezieller Verfahren umweltverträglich entsorgt werden können.
- ⇒ Information der betroffenen Wirtschaftsakteure, öRE sowie Aufsichtsbehörden über die Notwendigkeit der Getrennthaltung von carbonfaserhaltigen Abfällen.
- ⇒ Deutschland sollte sich bei der Überarbeitung der Altfahrzeug-Richtlinie bzw. der Altfahrzeug-Verordnung dafür einsetzen, dass carbonfaserhaltige Bauteile ausgebaut und getrennt entsorgt werden müssen.
- ⇒ Hersteller von carbonfaserhaltigen Produkten sollten gemäß § 25 Abs. 1 Nr. 1 KrWG zu einer Rücknahme verpflichtet werden:
  - Produktverantwortung für Rotorblätter von Windenergieanlagen
  - Rücknahme von für den privaten Endverbraucher produzierten Freizeitgeräten über den Handel

#### **(5) Kennzeichnung von Carbonfaser-Produkten**

- ⇒ Die Erkenntnisse und der Ergebnisbericht des LAGA Ad-hoc-Ausschusses "Kennzeichnung und Identifizierung von Kunststoffen" sollten im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Markierung/Kennzeichnung von carbonfaserhaltigen Produkten berücksichtigt werden.
- ⇒ Kennzeichnung von Carbonfaser-Materialien, um eine separate Entsorgung der anfallenden Abfälle zu ermöglichen.
- ⇒ Prüfung der Möglichkeiten einer chemischen, maschinenlesbaren Markierung von Carbonfaser-Materialien sowie deren ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit.
- ⇒ Aufnahme einer Markierungspflicht für carbonfaserhaltige Produkte in die einschlägigen europäischen Regelungen.

#### **(6) Sicherung einer hochwertigen Kreislaufführung**

- ⇒ Entwicklung geeigneter Maßnahmen und Technologien für eine hochwertige und schadlose Kreislaufführung von Sekundärfasern.

- ⇒ Schaffung ausreichender Kapazitäten zur sicheren Entsorgung von nicht-kreislauffähigen carbonfaserhaltigen Abfällen.
- ⇒ Selbstverpflichtung der Industrie zur Kreislaufführung von Produktionsabfällen.

## **(7) Festlegung separater Abfallschlüssel**

- ⇒ Festlegung nachfolgender separater Abfallschlüssel für carbonfaserhaltige Abfälle sowie Anpassung des Europäischen Abfallverzeichnisses und Aufnahme in die AVV (in einer neuen Gruppe in Kapitel 16 und in Gruppe 17 09), um eine getrennte Erfassung und Entsorgung sicherzustellen:

1. Carbonfasern:	16 12 01* / 16 12 02
2. Carbonfasern in Kunststoffmatrix:	16 12 03* / 16 12 04
3. Carbonfasern in mineralischer Matrix:	17 09 05* / 17 09 06

- ⇒ Bis geeignete spezifische Abfallschlüssel für Carbonfasern bzw. carbonfaserhaltige Verbundwerkstoffe in der Abfallverzeichnisverordnung zur Verfügung stehen, müssen hilfsweise andere Abfallschlüssel herangezogen werden, die am ehesten die Herkunft der Abfälle beschreiben. Dabei sollte der Zusatz „enthält Carbonfasern“ immer zwingend mitaufgeführt werden. Zur Harmonisierung des Vollzugs sollte der ATA-Erfahrungsaustausch zur AVV beteiligt werden.
- ⇒ Im aktuellen Vollzug können, bis zur Anpassung der Abfallverzeichnisverordnung, die nachfolgenden Abfallschlüssel verwendet werden.

### 1. Trockene Carbonfasern:

- 07 02 15 „Abfälle von Zusatzstoffen mit Ausnahme derjenigen, die unter 07 02 14 fallen“.
- 07 02 14\* „Abfälle von Zusatzstoffen, die gefährliche Stoffe enthalten“: Für den Fall, dass Carbonfasergelege als gefährlicher Abfall eingestuft werden sollen.

### 2. Carbonfasern in Kunststoffmatrix:

- 07 02 08\* „andere Reaktions- und Destillationsrückstände“: Dieser Abfallschlüssel sollte für Fasergelege mit noch nicht ausgehärteter Matrix (sogenannte Prepregs) verwendet werden. Alternativ kann auch der Abfallschlüssel 08 04 09\* „Klebstoff- und Dichtmassenabfälle, die or-

ganische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten“ verwendet werden.

- 07 02 13 „Kunststoffabfälle“: Dieser Abfallschlüssel sollte für ausgehärtete CFK-Abfälle aus der Produktion und End-of-Life-Abfälle angewendet werden, die als Monofraktion vorliegen.
- 17 09 04 „gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen: Dieser Abfallschlüssel kann Anwendung für End-of-Life-Abfälle finden. Hierzu zählen unter anderem Rotorblätter von Windkraftanlagen.
- 19 12 04 „Kunststoff und Gummi“: Dieser Abfallschlüssel kann angewendet werden, wenn es sich um zerkleinerte faserhaltige Abfälle aus einer Abfallbehandlung handelt.
- 19 12 11\* „sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, die gefährliche Stoffe enthalten“: Für den Fall, dass es sich um CFK-Stäube mit als gefährlich eingestuften Fasern handelt.

### 3. Carbonfasern in mineralischer Matrix:

Für die Einstufung von Carbonfasern in mineralischer Matrix (z. B. Carbon-Beton) können die folgenden Abfallschlüssel Anwendung finden:

- 17 01 07 „Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06 fallen“.
- 17 01 06\* „Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten“.

## **(8) Lagerung separat erfasster CFK-Abfälle bis zur Entsorgung (Interimslösung)**

⇒ Bis zur Schaffung und Etablierung geeigneter sowie ausreichender Verwertungswege sollten CFK-Abfälle, die nicht verwertet werden können, ohne Vorbehandlung als Monofraktion mit folgenden Rahmenbedingungen gelagert werden:

- Langzeitlagerung zeitlich auf maximal 3 Jahre begrenzt
- Lagerung sollte in witterungsgeschützten Hallen erfolgen

- Vermischung mit anderen Abfallströmen muss ausgeschlossen sein
  - Bei der Lagerung sind entsprechende Brandschutzvorkehrungen zu treffen
- ⇒ Sofern die angestrebte Verwertung von CFK-Abfällen nach einer Lagerdauer von max. 3 Jahren nicht durchführbar ist, müssen die Abfälle nach einer geeigneten Vorbehandlung (z. B. Pyrolyse) ordnungsgemäß und schadlos beseitigt werden.
- ⇒ Lagerung von Produktionsabfällen und End-of-Life-Abfällen aus dem Gewerbe in der Verantwortung der Hersteller.
- ⇒ Vermeidung einer Verbrennung von CFK-Abfällen (Monofractionen) in Hausmüllverbrennungsanlagen und Sonderabfallverbrennungsanlagen.
- ⇒ Der LAGA-Ad-hoc-Ausschuss spricht sich dafür aus, bei der Lagerung von carbonfaserhaltigen Abfällen eine Sicherheitsleistung in Höhe von 1.000 €/Mg<sup>24</sup> festzulegen.

## **(9) Voraussetzungen für den Einsatz von Carbon-Beton**

- ⇒ Nachweis, dass bei der Bearbeitung und dem Recycling von Carbon-Beton keine Gesundheitsrisiken hervorgerufen werden.<sup>25</sup>
- ⇒ Intensivierung der Forschungsaktivitäten zum Gesundheits- und Arbeitsschutz unter Beteiligung der BAuA.
- ⇒ Untersuchung möglicher negativer Einflüsse durch Abfälle aus Carbon-Beton auf das Baustoffrecycling und die Akzeptanz von Recyclingbaustoffen.
- ⇒ Der Einsatz von Carbon-Beton ist nur vertretbar, wenn die gesundheitliche Unbedenklichkeit nachgewiesen ist und die Frage der Entsorgung geklärt ist.
- ⇒ Nachvollziehbare und transparente Dokumentation des Einsatzes von Carbon-Beton in Bauwerken; Einführung eines Carbon-Beton-Registers.

---

<sup>24</sup> Für die Pyrolyse von CFK-Abfällen fallen (ohne Transport) Kosten in Höhe von etwa 400 €/Mg an. Die Kosten für eine anschließende Deponierung der Carbonfasern können sich an den Kosten für die Ablagerung von Glaswolle orientieren (bis zu 750 €/Mg)

<sup>25</sup> BAM plant aktuell Forschungsvorhaben zum Thema

## **(10) Öffentlichkeitsarbeit**

- ⇒ Organisation von Veranstaltungen, Fachtagungen und weitere Informationsmaßnahmen, die sich mit der Entsorgung von carbonfaserhaltigen Abfällen beschäftigen, durch die zuständigen Landesministerien (Umweltministerien), das BMU, UBA und Vertreter aus der Wissenschaft unter Beteiligung der Wirtschaft und der BAuA.
- ⇒ Entwicklung von Handlungshilfen/Leitlinien zum Umgang mit CFK-Abfällen für die öRE.

## **(11) Ökodesign**

- ⇒ Bereits in der Phase der Produktentwicklung: Prüfung, welche Anwendungen den Einsatz von Carbonfasern rechtfertigen.
- ⇒ Einsatz von Carbonfasern allein aus optischen Gründen vermeiden.
- ⇒ Produktgestaltung unter Berücksichtigung möglichst hochwertiger Verwertungsmöglichkeiten (Recycling statt minderwertige Anwendungen sekundärer Carbonfasern beispielsweise als Füllmaterial in unterschiedlichen Produkten (Downcycling)).

## **(12) Abgrenzungskriterium für Carbonfaserfreiheit**

- ⇒ Festlegung eines Abgrenzungskriteriums zwischen carbonfaserhaltigen und carbonfaserfreien Abfällen, ab dem ein Werkstoff als carbonfaserhaltig bezeichnet werden muss.
- ⇒ Als Abgrenzungskriterium sollte der Fasergehalt herangezogen und ein geeignetes Analyseverfahren etabliert werden.
- ⇒ Entwicklung eines einheitlichen Untersuchungskonzeptes, um bei Carbon-Beton die WHO-Faserfreiheit nachzuweisen.

## **(13) Umgang mit Stäuben bei der Bearbeitung von carbonfaserhaltigen Stoffen**

- ⇒ Stäube mit Carbonfasern sollten mit geeigneten techn. Anlagen abgesaugt und gesammelt werden.

- ⇒ Nicht vermeidbare und nicht anderweitig verwertbare Stäube sollten verpackt oder verfestigt und als Abfall beseitigt werden. Dabei sind erneute Faserfreisetzungen zwingend zu vermeiden.

## 8. Glasfasern

### 8.1. Einsatz von Glasfasern

Der Bedarf an glasfaserverstärkten Kunststoffen liegt europaweit seit 15 Jahren bei etwa 1 Mio. Mg jährlich<sup>26</sup>. Folglich ist inzwischen auch mit einem entsprechend hohen Abfallaufkommen zu rechnen.

Im Vergleich zu Carbonfasern sind Glasfasern deutlich weniger ressourcenintensiv bei ihrer Herstellung und sie sind auch nicht elektrisch leitfähig. Abfallseitig sind daher zwar große Mengen zu bewältigen, jedoch liegen für die Entsorgung dieses Abfallstroms weniger gravierende technische Schwierigkeiten vor. Nichtsdestoweniger stellen Zerkleinerungsprozesse aufgrund der Zähigkeit und Abrasivität des Materials eine technische Herausforderung dar.

### 8.2. Glasfaserverstärkte Kunststoffe

Im Jahr 2017 lag die GFK-Produktionsmenge in den europäischen Ländern bei insgesamt 1,12 Mio. Mg.<sup>27</sup> Dies entspricht einem Wachstum im Vergleich zum Vorjahr von 2,0 %. Hinzu kommen die in diesen Daten nicht enthaltenen kurzfaserverstärkten Thermoplaste (ca. 1,4 Mio. Mg) sowie mit dem Infusionsverfahren hergestellte GFK-Bauteile (ca. 300.000 Mg), für die eine genaue Erfassung der Produktionsmenge derzeit aus unbekanntem Gründen nicht möglich ist<sup>28</sup>. Die Gesamtmenge an europaweit produzierten glasfaserverstärkten Kunststoffen kann insgesamt auf eine Größenordnung von 2,8 Mio. Mg geschätzt werden.

Für circa 95 % aller Composite-Werkstoffe werden Glasfasern als Fasermaterial eingesetzt, sodass dieser Markt mengenmäßig den Markt für CFK (europaweit ca. 40.000 Mg im Jahr 2016) deutlich übertrifft.

---

<sup>26</sup> M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten: Composites-Marktbericht 2017 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; September 2017, <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf> (abgerufen am 16.03.2017)

<sup>27</sup> Vgl. ebd.

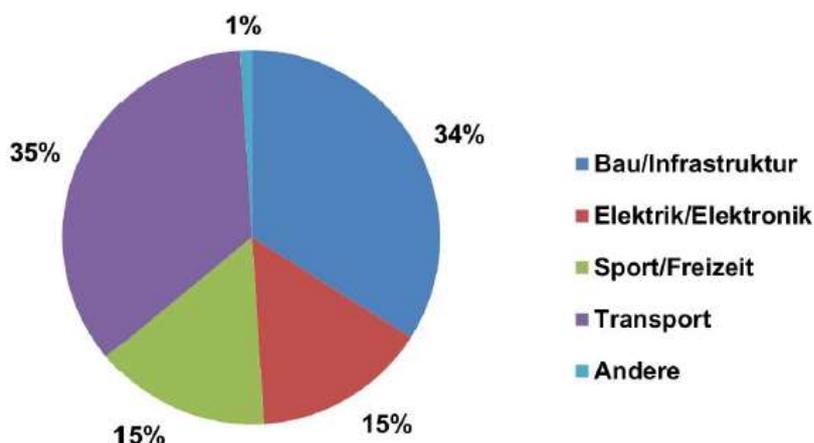
<sup>28</sup> M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten: Composites-Marktbericht 2017 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; September 2017, <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf> (abgerufen am 16.03.2017)

Im Gegensatz zu den hohen Zuwachsraten für Carbonfaser-Anwendungen (siehe Kapitel 4.2 und 4.4) wird für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) bis zum Jahr 2020 nur ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 5 % erwartet<sup>29</sup>. Allerdings übersteigt die prognostizierte Masse an produzierten GFK auch im Jahr 2020 noch die Menge an CFK deutlich.

In Deutschland kann in der Summe von rund 440.000 Mg an produzierten GFK-Produkten ausgegangen werden, was etwa 1/6 der europaweiten Produktion entspricht.

### 8.3. Anwendungsbereiche für Glasfaser-Verbundwerkstoffe

Typische Anwendungsbereiche für glasfaserverstärkte Kunststoffe sind der Automobil- und Bootsbau (Transportsektor insgesamt 35 %) sowie der Bau- und Infrastruktursektor (z. B. Windenergieanlagen), für die jeweils ein Drittel der gesamten GFK-Produktionsmenge hergestellt wird (Abbildung 6 ). Weitere bedeutende Anwendungsbereiche sind die Elektro- und Elektronikindustrie (15 %) sowie die Sport- und Freizeitindustrie (15 %).



**Abbildung 6:** Aufteilung der GFK-Produktion in Europa auf Anwendungsindustrien (Stand: 2017)<sup>30</sup>

Im Automobilbau kommen GFK üblicherweise bei der Produktion von Motorhauben, Kofferraumklappen und insbesondere bei Fahrzeughimmeln zum Einsatz. Dabei liegt

<sup>29</sup> VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 17: „Ressourceneffizienz im Leichtbau“, 2016

<sup>30</sup> M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten: Composites-Marktbericht 2017 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; September 2017, <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf> (abgerufen am 16.03.2017)

der Glasfaseranteil im Fahrzeughimmel zwischen 10 und 15 % und in Einzelfällen bei bis zu 60 %. Für den Einsatz im Motorraum wird im Mittel von 30 % Glasfaserzusatz ausgegangen.

GFK wird in relevantem Umfang für Rotorblätter von Windenergieanlagen verwendet. Diese Branche ist insbesondere aufgrund der öffentlichen Diskussion über Entsorgungsschwierigkeiten ausgedienter Windkraftanlagen sowie aufgrund der hohen Massenkonzentration von besonderer Bedeutung, wenngleich die Gesamtmasse verglichen mit der Automobilbranche eher von untergeordneter Bedeutung ist.

In Windenergieanlagen werden GFK hauptsächlich in den Rotorblättern und Maschinenhäusern verbaut. Der Bundesverband Windenergie e.V. schätzt die Masse der in Deutschland im Jahr 2016 zugebauten Rotorblätter auf etwa 47.000 Mg. Ausgehend von einem in heutigen Rotorblättern üblicherweise verbauten GFK-Anteil von 70 %<sup>31</sup> lässt sich anhand dieser Zahlen für die vergangenen Jahre ein GFK-Zubau in Deutschen WEA von rund 30.000 Mg ableiten.

Auch in der Elektrotechnik werden GFK in erheblichem Umfang eingesetzt. Einsatzbereiche sind hier GFK-Platten zur Leiterplattenherstellung, Gehäuse, Schaltschänke und Trennwände für elektrotechnische Ausrüstungen.

Statistiken des deutschen Boots- und Schiffbauverbandes (DBSV) gehen davon aus, dass in Deutschland jährlich etwa 1.700 große Boote (über 7,5 m Länge) sowie rund 16.500 Kleinboote importiert und in Verkehr gebracht werden. Aus inländischer Produktion gelangen jährlich weitere 1.200 große und 1.900 Kleinboote auf den Markt. Nach einer vorsichtigen Schätzung handelt es sich hier um eine GFK-Masse von etwa 10.000 Mg.

Da GFK im Bootsbau bereits seit Mitte der 1960er Jahre industriell eingesetzt wird, hat ein Teil der in der Anfangszeit hergestellten Produkte inzwischen das Ende der Lebensdauer erreicht, weil sie entweder technisch veraltet sind oder beschädigt wurden. Erhebliche Entsorgungsprobleme sind dabei bisher nicht bekannt geworden. Ein Verschleiß oder nachlassende Festigkeit sind in der Regel bei gut gepflegten

---

<sup>31</sup> VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 9: „Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen“, 2014, [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf) (abgerufen am 30.03.2018)

Produkten nicht zu beobachten. Unbeschädigte Boote können daher auch bei bereits weit zurückliegender Produktion noch lange im Einsatz bleiben.

## 9. Glasfaserhaltige Abfälle

Zur Masse des jährlich in Deutschland anfallenden GFK- Abfalls liegen dem LAGA-Ad-hoc-Ausschuss keine konkreten Zahlen vor. Als Annäherung können die in Deutschland produzierten GFK-Massen als Referenz dienen (440.000 Mg).

Um auf Grundlage dieser Zahlen die gesamte Abfallmasse abschätzen zu können, muss die unterschiedliche Lebensdauer der verschiedenen Glasfaser-Produkte beachtet werden. Zudem fallen nicht sämtliche in Deutschland produzierte Güter auch innerhalb Deutschlands als Abfall an. Im Gegenzug können auch im Ausland produzierte Produkte in Deutschland zum Abfall werden.

### 9.1. Produktionsabfälle

Der Großteil der von der Windenergiebranche erzeugten Glasfaserabfallmassen stammt aus den Produktionsprozessen für die Rotorblätter. Diese Massen werden für Deutschland auf rund 11.000 Mg pro Jahr geschätzt<sup>32</sup>.

In Matrix eingebettete Glasfaserabfälle fallen vornehmlich bei Fehlchargen als komplettes Bauteil an. Trotz intensiver Bemühungen der Hersteller zur Vermeidung von Fehlchargen können bei der Herstellung eines Rotorblattes Produktionsabfälle von etwa 30 Prozent der Produktmasse auftreten<sup>33</sup>.

Im Bootsbau fallen kaum trockene Fasern als Abfall an. Verschnitte und Reste werden weitestgehend wieder dem Produktionsprozess zugeführt. Bei der Produktion fallen darüber hinaus in Matrix gebundene Faserabfälle in der Größenordnung von 2-3 % der Endproduktmasse an. Dies sind insbesondere Abschnitte vom Besäumen

---

<sup>32</sup> A. Pehlken, H. Albers, F. Germer: „Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling“, [http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2017\\_rur/2017\\_RuR\\_247-260\\_Pehlken.pdf](http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2017_rur/2017_RuR_247-260_Pehlken.pdf) (abgerufen am 30.03.2018)

<sup>33</sup> R. Garcia Sanchez, A. Pehlken, M. Lewandowski: “On the sustainability of wind energy regarding material usage, ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering, 2014,

der Formteile sowie Ausschnitte (z. B. nachträgliches Ausschneiden von Lukenöffnungen). Diese Abfälle werden regelmäßig als Gewerbeabfall den Entsorgungsbetrieben überlassen und gelangen letztendlich in die vorhandenen Abfallverbrennungsanlagen bzw. EBS-Heizkraftwerke.

## 9.2. End-of-Life-Abfälle

Die Wiederverwendung von ausgebauten GFK-Teilen aus Automobilen (z. B. Stoßstange, Armaturenbrett) findet nach Kenntnis des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses nur vereinzelt statt. Zertifizierte Demontagebetriebe schreddern nach der Demontage einzelner werthaltiger Bestandteile wie Katalysator und Kabelbaum i. d. R. komplette Fahrzeuge. Die überwiegend in der Schredderleichtfraktion enthaltenen GFK-Bestandteile werden anschließend einer thermischen Verwertung zugeführt<sup>34</sup>.

Für das Jahr 2013 stellte das Umweltbundesamt Exporte von rund 1,57 Mio. Gebrauchtfahrzeugen fest<sup>35</sup>. Damit werden auch in diesen Fahrzeugen verbaute GFK-Teile ins Ausland verbracht und werden somit nicht in Deutschland entsorgt.

Auch ausgediente Leiterplatten aus Elektro- und Elektronikgeräten sowie Fehlchargen und Produktionsabfälle aus dem Elektronikbereich werden nach der Rückgewinnung der enthaltenen Edelmetalle thermisch verwertet.

Ein relevanter Anteil der in Deutschland in den vergangenen Jahren abgebauten Windenergieanlagen wurde zur weiteren Verwendung ins Ausland exportiert und kam folglich nicht bei den Entsorgungsbetrieben in Deutschland an. Gleiches gilt für die auf dem Gebrauchbootmarkt nicht mehr verkäuflichen Boote. Diese exportierten Massen werden in Deutschland statistisch nicht mehr als Abfall erfasst. Außerdem werden ausgediente Bootsrümpfe häufig zerkleinert und als Hausmüll oder gewöhnlicher Gewerbeabfall entsorgt. Aus den genannten Gründen ist nach dem aktuellen Kenntnisstand eine genaue Abschätzung der tatsächlich anfallenden GFK-Abfallmassen nicht möglich.

---

<sup>34</sup> Umweltbundesamt: „Altfahrzeuge in Deutschland“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/alfahrzeuge#textpart-1> (abgerufen am 30.03.2018)

<sup>35</sup> Umweltbundesamt: „Entwicklung von Lösungsvorschlägen, einschließlich rechtlicher Instrumente, zur Verbesserung der Datenlage beim Verbleib von Altfahrzeugen“, Texte 50/2017

Allerdings ist in den nächsten Jahren mit einem deutlichen Rückgang beim Export von in Deutschland abgebauten Windenergieanlagen zu rechnen, da in den Bestimmungsländern zwischenzeitlich eigene Produktionskapazitäten für entsprechende Anlagen bestehen. Aufgrund der steigenden Größe moderner Rotorblätter wird der Export abgebauter Rotoren auch unwahrscheinlicher.

Für die zur Entsorgung in Deutschland anfallenden Rotorblätter hat sich mit der kombinierten energetischen und stofflichen Verwertung in Zementwerken inzwischen ein geeignetes Entsorgungssystem etabliert. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Zerlegung der Rotorblätter in transportable und bearbeitbare Teilstücke dar (siehe Kapitel 10.3.1).

## **10. Entsorgung von glasfaserhaltigen Abfällen**

### **10.1. Vorbereitung zur Wiederverwendung**

Die Wiederverwendung von GFK-Teilen stellt, abgesehen von der Vermeidung, die oberste Hierarchiestufe des KrWG dar und sollte stets angestrebt werden.

Der LAGA-Ad-hoc-Ausschuss konnte als Beispiel für die Wiederverwendung glasfaserhaltiger Bauteile die als Ersatzteile deklarierten und auf Freiflächen „eingelagerten“ rückgebauten Windkraftanlagen identifizieren. Die demontierten Bauteile (Rotorblätter, Maschinenhäuser u.a.) sollen zu einem späteren Zeitpunkt defekte Bauteile an baugleichen Anlagen ersetzen. Begründet wird diese „Zwischenlagerung“ damit, dass die Bauteile bei den Herstellern bereits kurze Zeit nach Auslaufen der Produktion einzelner Baureihen nicht mehr als Ersatzteil lieferbar seien. Die Betreiber seien daher gezwungen, bei Schäden auf Gebrauchtteile zurückzugreifen, um die Anlagen weiter betreiben zu können. Ob die entsprechenden Voraussetzungen zur Verneinung der Abfalleigenschaft im Falle dieser Zwischenlagerung als Ersatzteile gegeben sind, ist im jeweiligen Einzelfall zu prüfen.

## 10.2. Recycling

Das Recycling von GFK-Bauteilen wird in Deutschland derzeit nicht praktiziert. Grund hierfür ist, dass Glasfasern unter ökonomischen Bedingungen nicht recycelt werden können. Nach Recherchen des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses werden Neufasern zu einem Preis von etwa 1 €/kg gehandelt. Dem gegenüber stehen Kosten für eine Trennung von Fasern und Kunststoffmatrix, die sich im Fall der Pyrolyse mit derzeit etwa 5 €/kg beziffern lassen. Aufgrund derzeit noch zu geringer Abfallmassen konnten sich wirtschaftliche Recyclingverfahren für GFK-Abfälle auf dem Markt noch nicht etablieren.

Eine wirtschaftliche Möglichkeit der Verwertung von „trockenem“ Glasfaserverschnitt stellt die Herstellung von Füllstoff dar, was jedoch nur ein Nischenmarkt ist<sup>36</sup>.

## 10.3. Sonstige Verwertung/thermische Entsorgungsverfahren

### 10.3.1. Verwertung von GFK im Zementwerk

Die kombinierte energetische und stoffliche Verwertung **in Zementwerken** stellt das derzeit sinnvollste Verwertungsverfahren für GFK-Abfälle dar. Dabei dient GFK gleichzeitig als Energieträger (Harz) und als Mineralstofflieferant (Glas).<sup>37</sup> Bei der Verbrennung im Drehrohrofen des Zementwerkes wird das Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) der Glasfasern vollständig in den hergestellten Zementklinker und somit in ein neues Produkt eingebunden. Ein Austreten der Glasfasern und Stäube ist somit nicht mehr möglich. Allerdings ist die in einem einzelnen Zementwerk verwertbare Menge an GFK-Abfällen begrenzt und u. a. nur dann möglich, wenn andere Silizium-Quellen (z.B. Gießereisande) substituiert werden.

In diesem Zusammenhang hat sich die Fa. Neocomp auf die Entsorgung von Rotorblättern aus Windkraftanlagen spezialisiert. Nach einer Zerlegung in transportfähige Einzelteile am Anfallort erfolgt in einer speziell konzipierten Anlage

---

<sup>36</sup> B. Otte (Otte-Kunststofftechnik GmbH): Telefonische Auskunft am 22.06.2017

<sup>37</sup> Fachtagung Re-source 2016: Ressourcenschonung – von der Idee zum Handeln: Kurzbericht zum Workshop 5 „Faserverbundkunststoffe – Möglichkeiten und Hemmnisse des Ökodesigns und des Recyclings“, 21./22. April 2016 in München).

die Aufbereitung von GFK-Abfällen zu Ersatzbrennstoffen. Anschließend wird dieser Ersatzbrennstoff der Zementindustrie zugeführt.

Die bestehende Aufbereitungsanlage in Bremen verfügt über eine genehmigte Kapazität von 80.000 Mg im Jahr<sup>38</sup>. Derzeit werden in dieser Anlage täglich rund 100 Mg Ersatzbrennstoffe aus GFK-Abfällen hergestellt<sup>39</sup>.

Um die langfristige Entsorgungssicherheit nicht von der Zementproduktion abhängig zu machen, sollte der Fokus bei der Entsorgung von GFK-Abfällen nicht ausschließlich auf die Verwertung in Zementwerken gelegt und stattdessen alternative Verwertungsverfahren etabliert werden.

### **10.3.2. Verwertung von Stäuben aus der mechanischen Bearbeitung von glasfaserhaltigen Bauteilen in Zementwerken**

Stäube aus der mechanischen Bearbeitung von GFK-Bauteilen sind vorwiegend äußerst leicht und feinkörnig, so dass sich bei Monofractionen ein nahezu fließfähiger Zustand einstellt. Aufgrund dieser ungünstigen mechanischen Eigenschaften scheidet eine direkte Verwertung oder Beseitigung in Verbrennungsanlagen ohne Vorbehandlung in der Regel aus. Wegen des hohen Heizwertes und des TOC ist eine Deponierung ebenfalls nicht möglich.

Versuche haben gezeigt, dass eine Pelletierung zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und des Ausbrandverhaltens nicht zielführend ist. Ein Abfallerzeuger in Mecklenburg-Vorpommern praktiziert erfolgreich eine Vorbehandlung in einer chemisch-physikalischen Behandlungsanlage (CPB-Anlage). Dabei wird der GFK-Staub mit schlammigen Abfällen vermischt und unter dem Abfallschlüssel (AS) 19 02 04\* an ein Zementwertwerk zur thermischen Verwertung abgegeben. Im Zuge der Behandlung wird neben einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften auch eine Optimierung des Heizwertes des an das Zementwerk abgegebenen Ersatzbrennstoffes erreicht. Die Einstufung als gefährlicher Abfall erfolgt jedoch allein wegen der Inhaltsstoffe des schlammigen Inputstromes. Bei der Verwendung von

---

<sup>38</sup> Neocomp GmbH, <http://www.neocomp.eu/de/Leistungen> (abgerufen am 02.04.2018)

<sup>39</sup> M. Lange (Neocomp GmbH): „Zero-Waste“-Konzept für Glasfaserverbundstoffe: neocomp entwickelt umweltgerechte Aufbereitungsanlage für GFK“, Pressemitteilung Nehlsen AG vom 16.09.2016, <https://www.nehlsen.com/unternehmen/presse/>

ausschließlich nicht gefährlichen Abfällen ist auch eine Einstufung als nicht gefährlicher Abfall z. B. unter AS 19 02 03 möglich.

### **10.3.3. Verbrennung in Hausmüllverbrennungsanlagen und EBS-Heizkraftwerken**

Eine energetische Verwertung in HMV oder EBS-Heizkraftwerken kommt für GFK-Abfälle nur in Betracht, wenn ein vollständiger Ausbrand der GFK-Bestandteile gewährleistet ist. Monofractionen können in Abfallverbrennungsanlagen nicht eingesetzt werden, da die während der Verbrennung schmelzenden Glasbestandteile sowohl bei einer Rostfeuerung als auch in Drehrohröfen den Verbrennungsprozess erheblich stören können.

Insofern ist eine Dosierung von GFK-Abfällen zum regulären Brennstoff in verträglicher Menge erforderlich. In den vorhandenen Abfallverbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle werden GFK-Abfälle daher derzeit in „homöopathischen Dosen“ zugeführt. Da hierzu in der Regel eine geeignete Aufbereitung (Zerkleinerung, Durchmischung) der GFK-Abfälle mit anderen Abfallarten erforderlich ist, treten vergleichsweise hohe Kosten und ein hoher Aufwand für die Entsorgung auf, die bei der Abwägung der Entsorgungslösungen zu berücksichtigen sind.

Insbesondere im Vergleich zur Verwertung von GFK in Zementwerken mit Einbindung von Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) im Zement sieht der LAGA-Ad-hoc-Ausschuss einen relevanten Nachteil bei der Verbrennung in HMV oder EBS-Heizkraftwerken.

Gesundheitlich bedenkliche Faserverkürzungen oder die Reduzierung des Durchmessers, wie dies bei Carbonfasern in Verbrennungsprozessen zu befürchten ist, konnten bei der thermischen Behandlung von GFK bislang nicht festgestellt werden.

## **10.4. Beseitigungsverfahren**

### **10.4.1. Deponierung**

Nicht in Kunststoffmatrix gebundene Glasfaserabfälle (Mineralwolle/Glasfasergewebe) werden aktuell in der Regel deponiert. Mit Ausnahme der entgegenstehenden Anforderungen aus der Abfallhierarchie (§ 6 KrWG) ist dies derzeit auch die günstigste Entsorgungsvariante für trockene Glasfasern.

Für GFK-Abfälle ist dagegen die Deponierung als Entsorgungsweg aufgrund des hohen Brennwertes der Kunststoffmatrix ausgeschlossen. Auch eine Verwertung als Deponieersatzbaustoff kommt aus dem gleichen Grund nicht in Betracht.

# 11. Empfehlungen zu glasfaserhaltigen Abfallströmen

## (1) Beauftragung von Forschungsvorhaben zu Gesundheitsgefahren von Glasfaserstäuben und deren Freisetzungverhalten

- ⇒ Im Rahmen der Beauftragung des Forschungsvorhabens zur Faserproblematik bei CFK, ist ergänzend die Untersuchung zu beauftragen, ob und ggf. welche vergleichbaren Gefahren bei der mechanischen Bearbeitung von GFK in Betracht zu ziehen sind, und hieraus ggf. ein Maßnahmenkatalog für den Arbeitsschutz abzuleiten.

## (2) Ermittlung des aktuellen Standes zur Entsorgung von Glasfaserabfällen

- ⇒ Systematische Untersuchung zum aktuellen Stand der Entsorgung glasfaserhaltiger Abfälle.
- ⇒ Ökologische Bewertung der zur Verfügung stehenden Entsorgungsmöglichkeiten für glasfaserhaltige Abfälle.

## (3) Forschungsbedarf zu technischen Verwertungsverfahren von glasfaserhaltigen Abfällen

- ⇒ Erforschung, Entwicklung und Etablierung technischer Verfahren zur Verwertung von GFK-Abfällen (z. B. Pyrolyse, Solvolyse) als Alternative zur Verwertung in Zementwerken.
- ⇒ Bei Vorliegen größerer Monochargen an thermoplastischem GFK-Abfall: Überprüfung der Möglichkeit eines Recyclings als GF-Kunststoff-Granulat oder als Füllstoff.

## (4) Getrennthaltung und separate Erfassung

- ⇒ Vermeidung der Vermischung von glasfaserhaltigen mit glasfaserfreien Kunststoffen, um das Recycling von glasfaserfreien und thermoplastisch verformbaren Kunststoffen nicht zu behindern.
- ⇒ Information der betroffenen Wirtschaftsakteure, öRE sowie Aufsichtsbehörden über die Vorteile der Getrennthaltung und separaten Erfassung bestimmter glasfaserhaltiger Abfälle, wie beispielsweise Rotorblätter aus Windenergieanlagen.

gen, Freizeitboote, Freizeitflugzeuge, Silos, Rutschen, Rohre etc.

## **(5) Kennzeichnung von GFK-Produkten**

- ⇒ Die Erkenntnisse und der Ergebnisbericht des LAGA Ad-hoc-Ausschusses "Kennzeichnung und Identifizierung von Kunststoffen" sollte im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Markierung/Kennzeichnung von glasfaserhaltigen Produkten berücksichtigt werden.
- ⇒ Kennzeichnung von Glasfaser-Materialien, um separate Erfassung der anfallenden Abfälle zu ermöglichen.
- ⇒ Prüfung der Möglichkeiten einer chemischen, maschinenlesbaren Markierung von Glasfaser-Materialien sowie deren ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit.
- ⇒ Aufnahme einer Markierungspflicht für glasfaserhaltige Produkte in die europäischen Regelungen.

## **(6) Festlegung separater Abfallschlüssel**

- ⇒ Festlegung nachfolgender separater Abfallschlüssel für glasfaserhaltige Abfälle sowie Anpassung des Europäischen Abfallverzeichnisses und Aufnahme in die AVV (in einer neuen Gruppe in Kapitel 16 und in Gruppe 17 09), um eine getrennte Erfassung und Entsorgung sicherzustellen:
  1. Glasfaserabfall: 10 11 03  
(existiert bereits)
  2. Glasfasern in Kunststoffmatrix: 16 12 05\* / 16 12 06
  3. Glasfasern in mineralischer Matrix: 17 09 07\* / 17 09 08
- ⇒ Bis geeignete spezifische Abfallschlüssel für Glasfasern bzw. glasfaserhaltige Verbundwerkstoffe in der Abfallverzeichnisverordnung zur Verfügung stehen, müssen hilfsweise andere Abfallschlüssel herangezogen werden, die am ehesten die Herkunft der Abfälle beschreiben. Dabei sollte der Zusatz „enthält Glasfasern“ immer zwingend mitaufgeführt werden. Zur Harmonisierung des Vollzugs sollte der ATA-Erfahrungsaustausch zur AVV beteiligt werden.
- ⇒ Im aktuellen Vollzug können, bis zur Anpassung der Abfallverzeichnisverordnung, die nachfolgenden Abfallschlüssel verwendet werden.

1. Glasfaserabfall (existiert bereits)
  - 10 11 03 „Glasfaserabfall“
2. Glasfasern in Kunststoffmatrix:
  - 07 02 13 „Kunststoffabfälle“: Dieser Abfallschlüssel sollte für ausgehärtete GFK-Abfälle aus der Produktion und End-of-Life-Abfälle angewendet werden, die als Monofraktion vorliegen.
  - 17 09 04 „gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen“: Dieser Abfallschlüssel kann Anwendung für End-of-Life-Abfälle finden. Hierzu zählen unter anderem Rotorblätter von Windkraftanlagen.
  - 19 12 04 „Kunststoff und Gummi“: Dieser Abfallschlüssel kann angewendet werden, wenn es sich um zerkleinerte faserhaltige Abfälle aus einer Abfallbehandlung handelt.
  - 19 12 11\* „sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, die gefährliche Stoffe enthalten“: Für den Fall, dass es sich um GFK-Stäube mit als gefährlich eingestuft Fasern handelt.

## 12. Gesundheitsaspekte (CFK, GFK)

Das krebserzeugende Potenzial einer Faser steigt mit zunehmender Länge und Biobeständigkeit sowie abnehmendem Durchmesser an. Besonders kritisch sind Fasern mit den Abmessungen

- länger als 5  $\mu\text{m}$ ,
- dünner als 3  $\mu\text{m}$  und
- Verhältnis von Länge zu Durchmesser größer als 3:1,

da nur sie in die tieferen Atemwege vordringen können. Fasern dieser Geometrie werden auch als WHO-Faser bezeichnet und können in das Lungengewebe eindringen.

Da der Durchmesser von Carbonfasern bei Temperaturen oberhalb von 650° C infolge von Oxidationsvorgängen auf unter 3  $\mu\text{m}$  reduziert werden kann, sind nach derzeitigem Kenntnisstand Stäube aus Brandereignissen von carbonfaserhaltigen Bauteilen als besonders kritisch einzustufen<sup>40</sup>.

Bei Brandereignissen sind bei Carbon-Beton-Bauteilen neben den Gefahren durch das Einatmen von potenziell freigesetzten WHO-Fasern auch die Folgen des Bauteilversagens aufgrund der Verringerung der Festigkeit zu berücksichtigen.

Nach der *DGUV Information FB HM-074*<sup>41</sup> liegen derzeit keine gesicherten Erkenntnisse über die gesundheitsgefährdenden Eigenschaften (insbesondere über die Kanzerogenität) von Carbon- und Graphitfasern vor. Ebenso sind noch keine Bewertungsmaßstäbe verfügbar. Es gibt jedoch Hinweise, dass sich **starre** Carbonfasern mit kritischen Abmessungen (WHO-Fasern) aufgrund ihrer mechanischen Einwirkung auf das Lungengewebe ähnlich auswirken können wie Asbestfasern<sup>42</sup>. Trockene Fasern könnten zudem ebenso wie Glas- und Mineralfasern Allergien und Kontaktdermatitis hervorrufen, weshalb im Umgang und bei der Verarbeitung sowie bei der

---

<sup>40</sup> CFK Valley Stade (2014): „Stellungnahme zum NDR Beitrag "Bundeswehr warnt vor Krebs durch Carbonfasern“, [https://cfk-valley.com/fileadmin/img/pressemeldungen/140925\\_Pressemitteilung\\_Stellungnahme\\_zum\\_NDR\\_Beitrag.pdf](https://cfk-valley.com/fileadmin/img/pressemeldungen/140925_Pressemitteilung_Stellungnahme_zum_NDR_Beitrag.pdf) (abgerufen am 27.03.2018)

<sup>41</sup> DGUV Information FB HM-074: „Bearbeitung von CFK Materialien“, Ausgabe 10/2014

<sup>42</sup> <http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-22065-2017-11-07.html> (aufgerufen am 20.04.2018)

Entsorgung insbesondere dem Recycling geeignete Arbeitsschutzmaßnahmen zu treffen sind<sup>43 44</sup>.

Carbonfaserstäube werden bislang analog den Faserstäuben nach Anhang I CLP-Verordnung in Kategorie 2 „Verdacht auf karzinogene Wirkung beim Menschen“ eingestuft<sup>45</sup>.

Die von Carbonfasern ausgehenden Gesundheits- und Umweltrisiken sollten unbedingt zeitnah untersucht werden.

---

<sup>43</sup> The Japan Chemical Fibers Association: “Safety Precaution for Handling of Carbon Fiber”, <http://www.protechcomposites.com/pages/Working-With-Carbon-Fiber.html> (abgerufen am 04.05.2018)

<sup>44</sup> Protech Composites: „Working with Carbon Fiber“, <http://www.protechcomposites.com/pages/Working-With-Carbon-Fiber.html> (abgerufen am 04.05.2018)

<sup>45</sup> DGUV Information FB HM-074: „Bearbeitung von CFK Materialien“, Ausgabe 10/2014