

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

**Eigenschaften und Abbrandverhalten von Faserverbundwerkstoffen, speziell Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK), sowie erforderliche Maßnahmen**

**Teil I: Grundlagen**

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

177

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER  
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-  
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE  
VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder,  
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,  
Katastrophenschutz und Zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 177

**Eigenschaften und Abbrandverhalten von Faserverbundwerkstoffen, speziell Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK), sowie erforderliche Maßnahmen**

**Teil I: Grundlagen**

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

März 2015

FA. Nr. 222 (3/2012) und 225 (2/2013)

ISSN 0170-0060

## Berichtskennblatt

<b>Nummer des Berichtes:</b>  177	Titel des Berichtes: Eigenschaften und Abbrandverhalten von Faserverbundwerkstoffen, speziell Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK), sowie erforderliche Maßnahmen Teil I: Grundlagen		<b>ISSN:</b>  0170-0060
<b>Autor:</b> Dipl.-Ing. Dominique Max		<b>durchführende Institution:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
<b>Nummer des Auftrages:</b> FA. Nr. 222 (3/2012) und 225 (2/2013)		<b>auftraggebende Institution:</b> Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
<b>Abschlussdatum:</b> März 2015			
<b>Seitenzahl:</b> 44	<b>Bilder:</b> 3	<b>Tabellen:</b> 4	<b>Literaturverweise:</b> 54
<b>Kurzfassung:</b> <p>Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, kurz CFK werden in einer Vielzahl von Produkten verwendet. Sind diese Werkstoffe in ein Schadensereignis involviert werden Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) mit werkstoff-spezifischen Gefahren konfrontiert.</p> <p>Diesen Gefahren zuzuordnen sind das Einatmen potentiell gefährlicher, faserförmiger Partikel, die Verletzung der Haut durch nadelförmige Fragmente und eine mögliche Kurzschlussgefahr für elektrische Anlagen.</p> <p>Es lassen sich zwei Szenarien hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials unterscheiden. Bei einem Brand verbrennt zunächst der Kunststoff. Die Kohlenstofffasern bleiben bei entsprechend niedrigen Temperaturen stabil und werden erst bei höheren Temperaturen thermisch abgebaut. Erst dann können Kohlenstofffasern frei werden, die in die Lunge gelangen und dort potentiell schädigend wirken können.</p> <p>Bei der rein mechanischen Schädigung oder Bearbeitung wird der Durchmesser der Kohlenstofffasern nach heutigem Stand nicht wesentlich reduziert. Daher bleibt das Freisetzungspotential von kritischen Kohlenstofffasern tendenziell gering. Erfahrungen zeigten sich jedoch kritische Bruchstücke bei der mechanischen Einwirkung, die nicht teilweise nicht eindeutig der Kohlenstofffaser oder dem Kunststoff zuzuordnen sind.</p> <p>In beiden Szenarien fehlen grundsätzliche Expositionsmessungen, die für eine Beurteilung der Gefährdung und eine Empfehlung von Schutzmaßnahmen maßgebend sein könnten. Die Literatur gibt dennoch Hinweise auf mögliche Schutzmaßnahmen.</p> <p>Dieser Bericht stellt die theoretischen Grundlagen und mögliche Schutzmaßnahmen dar und dient als Einleitung in das Thema.</p>			
<b>Schlagwörter:</b> CFK, Composite, Kohlenstofffaser, Kunststoff, Atemschutz, Partikel, Brand, mechanische Schädigung, mechanische Bearbeitung			

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>BERICHTSKENNBLATT</b>	<b>III</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>IV</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>VII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>VIII</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b>	<b>2</b>
2.1 Anwendung und Perspektive von CFK	2
2.2 Eigenschaften, Aufbau und Struktur	4
2.2.1 Matrix	4
2.2.2 Kohlenstofffaser	4
2.2.2.1 Faserhalbzeuge	5
2.2.3 Fertigungsprozess	5
2.3 Brandeigenschaften von CFK-Werkstoffen	7
2.3.1 Thermisches Verhalten von Kohlenstofffasern	8
2.3.2 Rauch- und Gasfreisetzung der Matrix	9
2.4 Löschmethoden	10
2.5 Werkstoffspezifische Gefahren durch CFK	11
2.5.1 Wirkung von Fasern auf die menschliche Gesundheit	11
2.5.2 Einwirkungen auf die Haut (dermal)	11
2.5.3 Inhalation von Partikeln	11
2.5.3.1 Fasertoxikologie	12
2.5.4 Asbest	13
2.5.5 Kohlenstofffasern	13
2.5.6 Brandrauch	14
2.5.7 Einfluss von Kohlenstofffasern auf elektrische Anlagen	14
<b>3 GEFAHRENSZENARIEN UND FASERFREISETZUNG</b>	<b>15</b>

<b>3.1 Szenario 1: mechanische Deformation und Bearbeitung ohne Wärmeeintrag</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Szenario 2: Wärmeeintrag auf das Bauteil</b>	<b>16</b>
<b>4 SCHUTZMAßNAHMEN</b>	<b>18</b>
<b>4.1 Szenario 1: mechanische Deformation und Bearbeitung ohne Wärmeeintrag</b>	<b>19</b>
<b>4.2 Szenario 2: Wärmeeintrag auf das Bauteil</b>	<b>19</b>
<b>4.3 Unterbindung der Faserfreisetzung</b>	<b>19</b>
<b>4.4 Kontaminierte persönliche Schutzausrüstung</b>	<b>20</b>
<b>5 ZUSAMMENFASSUNG/FAZIT</b>	<b>22</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>23</b>
<b>ANHANG</b>	<b>28</b>
<b>ANHANG 1. BEISPIELE FÜR CFK IN DER ANWENDUNG</b>	<b>29</b>
<b>ANHANG 2. ERGEBNISSE VON UNTERSUCHUNGEN [27] ZUR EFFEKTIVITÄT VON LÖSCHMITTELN</b>	<b>30</b>
<b>ANHANG 3. ZUSAMMENSTELLUNG DURCHGEFÜHRTER TOXIKOLOGISCHER UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>31</b>
<b>ANHANG 4. TABELLARISCHE AUFLISTUNG MÖGLICHER SCHUTZMAßNAHMEN</b>	<b>35</b>

### **Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen**

**Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.**

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Verbrennungsprozesses von CFK-Formteilen nach [17] .....	8
Abbildung 2: Schematische Darstellung der menschlichen Atemwege .....	11
Abbildung 3 WHO Definition kritischer Fasern nach [10] .....	13

## Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club e. V.
AFFF	filmbildendes Schaummittel (Aqueous Film Forming Foam)
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Class-A	Class-A Schaummittel
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EP	Epoxidharz
FFFP	filmbildendes Fluorproteinschaummittel (Film Forming Fluoroprotein)
FwDV	Feuerwehr-Dienstvorschrift
HG	Hydrogel
KMF	Künstlich hergestellte Mineralfaser
PAN	Polyacrylnitril (Ausgangsmaterial für Kohlenstofffaser)
PKP	Kaliumhydrogencarbonat basiertes BC-Löschpulver (Purple-K Powder)
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
RTM	Resin-Transfer-Moulding (Harzinjektionsverfahren)
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
WHO	World-Health-Organisation (Weltgesundheitsorganisation)



# 1 Einleitung

Anforderungen an neue Produkte hinsichtlich ihres Beitrags zur Energieeffizienz steigen stetig. Diese Entwicklung begründet die Anwendung von leichten Verbundwerkstoffen. Faserverstärkte Kunststoffe, die sich durch eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig niedrigem Gewicht auszeichnen, gewinnen somit zunehmend an Bedeutung. Diese Eigenschaft macht diese Werkstoffe unter anderem für den Mobilitätssektor sehr attraktiv.

Die faserverstärkten Kunststoffe bzw. Composites werden in erster Linie durch den verwendeten Faserstoff voneinander unterschieden. Die mit am gebräuchlichsten Faserverbundbauteile sind GFK (glasfaserverstärkte Kunststoffe) und CFK (carbonfaserverstärkte Kunststoffe), wobei im Rahmen dieses Forschungsprojekts nur der Werkstoff CFK betrachtet wird.

Durch die zunehmende Verbreitung dieser Werkstoffe können sich die bekannten Gefährdungspotentiale im Rettungs- und Feuerwehreinsatz verschieben. Das Ziel dieses Vorhabens ist es, mögliche Gefahren aufzuzeigen und die Grundlagen bereitzustellen, damit die Gefährdungen besser abgeschätzt und damit Gegenmaßnahmen zu deren Verringerung entwickelt bzw. angewandt werden können. Der vorliegende Bericht stellt somit die Grundlagen und Problemstellungen dar, die mit CFK verbunden sind, und ist als eine Einleitung in das Forschungsthema zu verstehen.

Im folgenden Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen dargestellt, die mit Gefahren durch CFK-Werkstoffe zusammenhängen.

Die Kapitel 3 und 4 sind als unabhängige Teile gedacht, die Gefahrenszenarien beschreiben und Schutzmaßnahmen vorschlagen.

## **2 Theoretische Grundlagen**

Die folgenden Ausführungen bilden die Basis für die Beurteilung und Einschätzung potentieller Gefahren.

### **2.1 Anwendung und Perspektive von CFK**

CFK wird in erster Linie als Ergänzung zu herkömmlichen Werkstoffen, wie zum Beispiel Stahl oder Aluminium benutzt. Der Anteil an der Gesamtstruktur wie zum Beispiel bei Flugzeugen steigt stetig. So besitzt der Airbus A350 bereits einen CFK-Anteil an der Primärstruktur von über 50 Gewichtsprozent (s. Anhang 1) [1]. Bei verschiedenen militärischen Fluggeräten kann der CFK-Anteil noch größer sein [2].

Im Automobilbereich sind CFK-Bauteile bisher größtenteils auf sogenannte Premium-Fahrzeuge und den Motorsport begrenzt.

Die Europäische Union fordert eine Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Flotten-Emission (bis 2015), wodurch der Druck zur Herstellung verbrauchsarmer Fahrzeuge steigt. Eine Möglichkeit zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist die Zunahme der Elektromobilität. Die deutsche Bundesregierung hat das Ziel vorgegeben, bis 2020 eine Million und bis 2030 sechs Millionen Elektrofahrzeuge auf deutsche Straßen zu bringen [3]. Jedoch sind elektrische Energiespeicher mit den angestrebten hohen Energiedichten und Reichweiten bisher relativ groß und schwer. Durch leichtere Fahrzeugkarossen könnte dieser Nachteil bedingt ausgeglichen werden, um brauchbare Reichweiten für E-Fahrzeuge zu erzielen [4]. Ein Modellprojekt in diesem Zusammenhang ist die Produktion des elektrisch betriebenen BMW i3, dessen Fahrgastzelle aus CFK besteht und der in Serienproduktion bereits in Stückzahlen jenseits der 10.000 pro Jahr zur Zeit der Abfassung dieses Berichts gefertigt wird.

Aber nicht nur bei der Elektromobilität könnte eine Gewichtsreduktion der Fahrzeuge sinnvoll sein. Aufgrund der gestiegenen Erwartungen der Nutzer an Komfort und Sicherheit ist eine Gewichtszunahme bei neuen Fahrzeugen zu erkennen. Durch den Einsatz von CFK könnten Gewichtseinsparungen ohne weitreichende Abstriche in Sachen Komfort und Sicherheit auch bei konventionell betriebenen Fahrzeugen ermöglicht werden.

Der aktuelle Trend im Automobilbau geht hin zu einem intelligenten Materialmix aus verschiedenen Leichtbaumaterialien wie hochfester Stahl, Aluminium, Magnesium und Kunststoff [4].

In Windkraftanlagen werden CFK-Werkstoffe in Rotorblättern eingesetzt, um durch die Gewichtseinsparung einen besseren Wirkungsgrad zu erzielen [1].

Auch in der Freizeitindustrie, bei Sportbooten, Sportflugzeugen, Sportgeräten und vielen weiteren Anwendungen wird CFK eingesetzt.

Im Bauwesen wird der hoch zugfeste CFK-Werkstoff als verstärkende Lamellen auf Stahlbetonbauteile aufgebracht, um deren Festigkeit zu erhöhen (Beispiel: [5]).

Den vorgenannten Vorzügen von CFK stehen jedoch zurzeit Nachteile entgegen. Zu nennen sind hier zum Beispiel die vergleichsweise hohen Produktionskosten [4]. Diese könnten jedoch zukünftig durch steigende Stückzahlen und eine Optimierung der Herstellverfahren sinken.

Der energieintensive Herstellungsprozess von Kohlenstofffasern kann je nach Bilanzraum zu einer ungünstigen Ökobilanz führen [6]. Potentiale für eine weitere Verbesserung der Ökobilanz bestehen in der Verwendung elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien beim Herstellungsprozess der Kohlenstofffaser, in einer steigenden Nutzungsdauer des Produkts oder durch den Einsatz recycelter Kohlenstofffasern [7].

Neben ökonomischen und ökologischen Fragen sind Fragen der Kerbfestigkeit des Werkstoffes nach Schäden offen. Diese erkannte Unsicherheit wird zurzeit durch erhöhte Sicherheitszuschläge in Form von Überdimensionierung und damit im Regelfall dickeren Bauteilen ausgeglichen. Hierdurch wird das Leichtbaupotential von CFK gegenüber anderen Werkstoffen wieder geschmälert [8].

Obwohl CFK bisher nur vereinzelt eingesetzt wird, werden sich die Berührungspunkte mit diesem Werkstoff für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) in Zukunft häufen, weshalb eine Auseinandersetzung mit diesem Werkstoff, seinen Eigenschaften und möglichen Gefahren sinnvoll erscheint.

## **2.2 Eigenschaften, Aufbau und Struktur**

Der Verbundwerkstoff CFK besteht aus zwei Komponenten, der Matrix (Kunststoff) und den darin eingebetteten Kohlenstofffasern, welche im Wesentlichen die Festigkeit des Verbundes herstellen.

### **2.2.1 Matrix**

Die Matrix von CFK-Werkstoffen besteht überwiegend aus duroplastischen Kunststoffen (ca. 90% [1]). Duroplaste zeichnen sich durch ihre irreversible Härtungsreaktion aus, wodurch sie auch bei hohen Temperaturen starr und nicht plastisch verformbar sind.

Die gebräuchlichsten Harze bei der Herstellung von Verbundwerkstoffen für die Luftfahrtindustrie (1998, [9]) sind den Duroplasten zuzuordnende Epoxidharze (EP). Diese Harze zeichnen sich durch ihre Steifigkeit und leichte Verarbeitbarkeit aus. Epoxidharze gehören zu den sogenannten Reaktionsharzen und werden mit Härtern (Amine) durch Polyaddition zu einem Duroplast vernetzt. Die in den Härtern vorhandenen Polyamine sind erhöht gesundheitsgefährdend und besitzen deutlich wassergefährdende Eigenschaften, wodurch beim Umgang bereits während des Herstellungsprozesses besondere Vorsicht geboten ist.

Neben Epoxidharzen können weitere Harze wie die thermoplastischen Polyamide (PA), Polyetheretherketone (PEEK), Polypropylen (PP) und die duroplastischen Phenolharze (PF) zum Einsatz kommen. Thermoplastische Harze zeigen zudem ein Potential für Produktionsverfahren mit kurzen Zykluszeiten, was ihren Einsatz in Zukunft wahrscheinlicher macht [4].

### **2.2.2 Kohlenstofffaser**

Kohlenstofffasern, auch Carbonfasern (kurz C-Faser) genannt werden den künstlich hergestellten Mineralfasern (KMF) [10], genauer den künstlich hergestellten anorganischen, polykristallinen Fasern [11] zugeordnet. Das Ausgangsmaterial (Precursor) kann aus drei unterschiedlichen Materialien bestehen. Das am häufigsten eingesetzte Material ist mit 86 Prozent Polyacrylnitril (PAN) gefolgt von Cellulose (11 Prozent) und Pech (vier Prozent) (2012, [12]).

PAN wird in der Regel aus Rohöl synthetisiert. Das Endprodukt besteht aus 90-94 Prozent Acrylnitril. Die Fasern durchlaufen einen sehr zeit- und energieintensiven Herstellungsprozess, bei dem sie zunächst bei 220 bis 300 °C stabilisiert und anschließend bei 600 bis 1800 °C carbonisiert werden. Hochfeste und ultrahochfeste Fasern werden anschließend einer Graphitierung bei 2000 bis 3000 °C unter Schutzgasatmosphäre unterzogen [12].

In der Regel werden Faserdurchmesser zwischen sechs und acht Mikrometer hergestellt und eingesetzt [9], es sind aber auch Faserdurchmesser kleiner drei Mikrometer technisch möglich [11].

Die Fasern werden anschließend als Endlosfasern zu sogenannten Filamentgarnen weiterverarbeitet. Diese werden in tragenden Primärbauteilen verwendet [13].

Es können jedoch auch kurze Einzelfasern je nach Verwendungszweck des Verbundwerkstoffes in räumlich geordneter oder in räumlich ungeordneter Weise als Verstärkungsmaterial vorhanden sein.

#### 2.2.2.1 Faserhalbzeuge

Aus Filamentgarnen werden unterschiedliche Faserhalbzeuge hergestellt. Diese sind Gewebe, Geflechte und Gelege. Die Faserhalbzeuge werden zu Vorformlingen, meist aus mehreren Lagen bestehend, sogenannten Preforms weiterverarbeitet. Die einzelnen Lagen können gegeneinander in einem bestimmten Winkel verdreht werden, um ein möglichst isotropes Werkstoffverhalten zu erzielen.

Neben Kohlenstofffaserhalbzeugen können auch Hybridfaserhalbzeuge gefertigt werden, bei denen das Fasermaterial kombiniert wird (z.B. Glasfaser und Kohlenstofffaser).

Faserverstärkte Kunststoffe eröffnen dem Planer eine Vielzahl von Gestaltungsmöglichkeiten. Neben der Wahl der Ausgangsstoffe für Matrix und Fasermaterial kann er über die Parameter Faserorientierung und Faservolumengehalt den Werkstoff seinen Bedürfnissen anpassen. Diese werden auf den jeweiligen Modelllastfall zugeschnitten.

#### 2.2.3 *Fertigungsprozess*

Ein zentraler Punkt bei der Planung eines CFK-Formteils ist die Wahl eines geeigneten Fertigungsprozesses, der von der Formteilgeometrie abhängt [12].

In der automobilen Serienfertigung kommt das Hochdruck Resin Transfer Moulding (HD-RTM)-Verfahren zum Einsatz, auf das im Weiteren näher eingegangen wird [1]. Bei dem RTM-Verfahren wird zunächst das textile Halbzeug (Preform) in ein zweiteiliges Werkzeug eingelegt, dessen Innenflächen vorher mit einem Trennmittel versehen wurden [12]. Dann wird das Werkzeug geschlossen und ein Harzsystem wird unter Druck in das Werkzeug/Faserhalbzeug injiziert. Die Aushärtung des Formteils erfolgt bei einer Temperatur zwischen 60 und 100 °C [4]. Anschließend kann das Formteil entnommen werden [12].

CFK-Formteile können auch aus vorimprägnierten Halbzeugen, so genannten Prepregs hergestellt werden.

Neben diesem Verfahren kommen auch Handlaminier-, Autoklav- und Direktverfahren zum Einsatz.

In 2.2 wurde der Werkstoff CFK hinsichtlich seines Aufbaus, seiner Struktur und seines Herstellungsprozesses näher beschrieben. Diese Informationen sind wesentlich für das Verständnis des Verhaltens bei Brandeinwirkung (siehe 2.3), der Gefährdung und der szenarienabhängigen Faserfreisetzung (siehe 2.5 und 3) sowie die in Frage kommenden Löschmethoden (siehe 2.4) für eine effiziente Brandbekämpfung.

### **2.3 Brandeigenschaften von CFK-Werkstoffen**

CFK Verbundwerkstoffe brennen zunächst mit den typischen Merkmalen eines Kunststoffbrandes [14]. Dabei brennen in erster Linie die brennbaren Zersetzungsdämpfe, die aufgrund eines Wärmestroms entstehen, der auf den Werkstoff einwirkt. Dabei kann im Inneren des Werkstoffs Überdruck entstehen, der zu einem Aufquellen führen kann [15], [16]. Der innere Druck kann zur Ablösung von Faserschichten führen [17].

Duroplaste brennen wegen ihres Vernetzungsgrades ohne zu Erweichen oder zu Fließen. Bei Wärmeeinwirkung verkohlt die Oberfläche und beginnt zu Glühen oder zu Glimmen [16], [17]. Die Verkokungseigenschaften eines Kunststoffes haben Einfluss auf dessen Entzündungseigenschaften, seine Wärmefreisetzungsrates, seine Rauchfreisetzung und auf die Freisetzung toxischer Gase. Epoxidharze (EP) neigen aufgrund ihrer chemischen Struktur zu einer geringeren Verkokung als andere duroplastische Kunststoffe und besitzen daher schlechtere Brandeigenschaften gegenüber anderen duroplastischen Kunststoffen, die eher zur Verkokung neigen.

Kohlenstofffasern sind thermisch bis ca. 650 °C stabil und die Kunststoffmatrix, heutzutage noch üblicherweise EP (vgl. 2.2.1), zersetzt sich bei ca. 400 °C [14]. Aufgrund der unterschiedlichen, temperaturabhängigen Zersetzungsprozesse wird bei einer Erwärmung des Werkstoffes zunächst die Matrix zersetzt. Daher besteht die oberste, der Wärmequelle zugewandte Schicht (verkohlte Schicht, siehe Abbildung 1) eines brennenden CFK-Formteils überwiegend aus Kohlenstofffasern und verkohlten Resten der Matrix. Diese Schicht ist sehr porös und wirkt wie eine Wärmedämmung, wodurch sich der Brand infolge der Verringerung des Ausgasens brennbarer Zersetzungsprodukte kurzzeitig abschwächen kann [15]. Abbildung 1 zeigt den schichtartigen Aufbau des Verbrennungsprozesses von CFK-Formteilen.

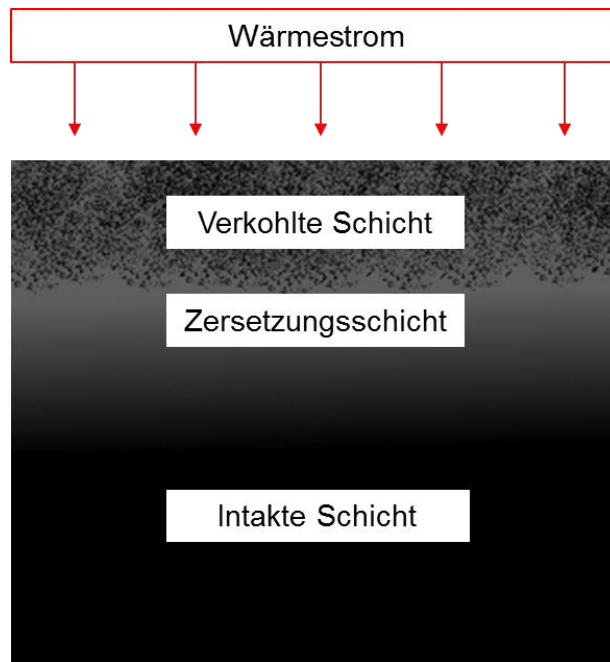


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Verbrennungsprozesses von CFK-Formteilen nach [17]

Die Zersetzungsschicht (Abbildung 1) durchläuft das Formteil, bis es die wärmeabgewandte Seite erreicht und das gesamte Formteil aus Verkohlungsresten besteht [17].

Neben der Stoffzusammensetzung sind auch der Fasergehalt und die Faseranordnung für das Brandverhalten von Bedeutung. Ein erhöhter Fasergehalt reduziert die Rauchmenge, die ein CFK-Formteil freisetzen kann, da der Gehalt organischer Materialien, die Rauch produzieren geringer wird [17]. Untersuchungen von Eibl [20] an CFK Probestücken mit unterschiedlichen Faseranordnungen zeigten den komplexen Einfluss der Faseranordnung auf die Wärme-freisetzungsrates, die Rauch- und Rußmenge.

### **2.3.1 Thermisches Verhalten von Kohlenstofffasern**

Kohlenstofffasern werden während ihres Herstellungsprozesses bei über 1000 °C unter Schutzgasatmosphäre carbonisiert, in der Regel mit Stickstoff als inertem Schutzgas (vgl. 2.2.2). Die Faser oxidiert dabei nicht. Ändern sich die Randbedingungen und es steht genügend Sauerstoff bei etwa 650 bis 700 °C (vgl. S. 7) zur Verfügung, kann es zu einer Oberflächenoxidation kommen, die einen Abbauprozess der Kohlenstofffaser in Gang setzt [21], [22]. Der Abbauprozess, der bei gleichen, räumlichen Bedingungen zu einer gleichmäßigen, flächigen Zersetzung des Fasermaterials führt, verkleinert die Durchmesser von Kohlenstofffasern. Das Maß der Zersetzung mit dem die Kohlenstofffaser abgebaut wird hängt dabei im Wesentlichen von dem Sauerstoffangebot, der Temperatur und der Dauer des Prozesses ab über die eine Oberflächenoxidation aufrecht erhalten werden kann, welche nicht



selbstständig abläuft und einen externen Wärmestrom benötigt [21]. Der Abbau, der sich in Versuchen [23], [24] gezeigt hat konnte 25 Prozent seines Ausgangsdurchmessers und mehr betragen. Der Faserabbau bei entsprechend großer thermischer Belastung stoppt nicht bei einer bestimmten Dicke und kann auch zu einer kompletten Zersetzung der Faser führen [25]. Dünne Fasern können leicht brechen, wodurch feinere Bruchstücke entstehen [24].

### **2.3.2 Rauch- und Gasfreisetzung der Matrix**

EP sind die gebräuchlichsten Harze bei der Herstellung von CFK-Formteilen. Bei der thermischen Zersetzung von CFK-Formteilen mit EP wurden neben Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) auch Carbonylsulfid (COS), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Phenol, Diphenylether, Anilin und Bisphenol A nachgewiesen. Die freigesetzten CO- und CO<sub>2</sub>-Mengen steigen bei der Zersetzung der Matrix stark an und fallen in der anschließenden Glutbrandphase auf ein annähernd konstantes Niveau ab [22]. Die Freisetzungsgrade von CO und CO<sub>2</sub> sind damit abhängig von der Art der Verbrennung [17].

Neben den genannten Gasen können auch andere toxische Gase, wie Blausäure (HCN), Chlorwasserstoff (HCl) und aromatische Kohlenwasserstoffe freigesetzt werden [26].

## 2.4 Löschmethoden

Bei dem Versuch den Brand von CFK-Bauteilen eines B2-Bombers auf dem Gelände eines Luftwaffenstützpunktes der USA im Februar 2008 zu bekämpfen traten Probleme zu Tage die in dieser Form noch nicht bekannt waren. Die Löschdauer und der Löschmittelbedarf waren signifikant höher als vorhergesehen. Noch Tage nach dem Unfall und nach mehreren Lösversuchen war ein Glutbrand erkennbar. Daraufhin wurde die Studie von Pickett und Kollegen [27] durchgeführt, die erste Hinweise gibt, welche Effektivität verschiedene Lösstechniken und Löschmittel (Löschmittelzusätze) bei der Brandbekämpfung von CFK-Bränden haben.

Die untersuchten Lösstechniken unterschieden sich bei den Löszeiten im Mittel kaum.

Die Löszeiten (s. Anhang 2) der wasserbasierten Löschmittel (AFFF, FFFP und Class-A) sind sehr ähnlich. Die des untersuchten BC-Löschpulvers (PKP) sind deutlich kürzer, da jedoch praktisch kein Kühleffekt vorhanden ist, kam es bei Versuchen zu erneuten Entzündungen des Bauteils. Hydrogel besaß die vergleichsweise beste Kühlwirkung.

Eine vergleichende Betrachtung mit der Löschwirkung von Wasser fehlt in dieser Studie. Es gibt aber bisher keine Hinweise darauf, dass Wasser zum Löschen von CFK-Bränden ungeeignet ist. Lediglich der Löschwasserbedarf könnte sich entsprechend den Erfahrungen (siehe oben) erhöhen.

Obwohl beim Einsatz von Löschmittelzusätzen eine potentiell bessere Löschwirkung erzielt werden kann gibt es Gründe gegen das Ausbringen von Schaum. Ein Schaumteppich verdeckt scharfkantige Bruchstücke, stellt unter Umständen eine Umweltgefahr dar und erschwert im speziellen Flugunfalluntersuchern eine Beurteilung des Unfallherganges, da unter anderem Wrackteile verdeckt werden [28].

Generell sollte beim Einsatz von Löschmittelzusätzen der Nutzen einer besseren Löschwirkung gegenüber den ökologischen und einsatzpraktischen Folgen abgewogen werden.

Die Lösstechnik scheint den Ergebnissen der oben genannten Studie zur Folge kaum einen Einfluss auf den Löscherfolg zu haben. Das Löschen ohne Löschmittelzusätze oder mit anderen in der Feuerwehr eingesetzten Löschmittelzusätzen wie Mehrbereichsschaummittel (MBS) wurde nicht untersucht. Mit einem erhöhten Löschmittelbedarf sollte beim Bekämpfen von CFK-Bränden gerechnet werden.

## 2.5 Werkstoffspezifische Gefahren durch CFK

In bestimmten Szenarien, die im Weiteren 3 erläutert werden, können faserförmige Partikel aus CFK-Formteilen austreten. Diese stellen, als Fremdkörper, der auf einen Körper wirkt, eine Herausforderung für dessen Gesundheit dar.

### 2.5.1 Wirkung von Fasern auf die menschliche Gesundheit

Man kann zwei Haupteinwirkungswege von Fasern auf die menschliche Gesundheit identifizieren, über die Haut (dermal) und über die Atmung (inhalativ). Die Schwere der gesundheitlichen Beeinträchtigungen hängt dabei von den Faserdimensionen und deren Steifigkeit ab [9].

### 2.5.2 Einwirkungen auf die Haut (dermal)

Können sich Kohlenstofffasern auf ungeschützter Haut anlagern, kann es zu kurzweiligen mechanisch irritativen Effekten kommen [29]. Fasern, die in Kontakt mit Schleimhäuten z. B. im Augenbereich kommen können dort, durch die gleichen Effekte, Reizungsprozesse initiieren [30].

Kohlenstofffasern können der Haut Verletzungen zufügen indem sie in die Haut eindringen. Diese Verletzungen können Entzündungsprozesse hervorrufen. Eindringene Fasern müssen chirurgisch entfernt werden [14].

### 2.5.3 Inhalation von Partikeln

Beim Einatmen gelangen in der Luft enthaltene Fremdkörper zum Beispiel Staub oder Pollen in die Atemwege (Abbildung 1) und dringen so in unterschiedliche Bereiche des Atemtraktes ein.

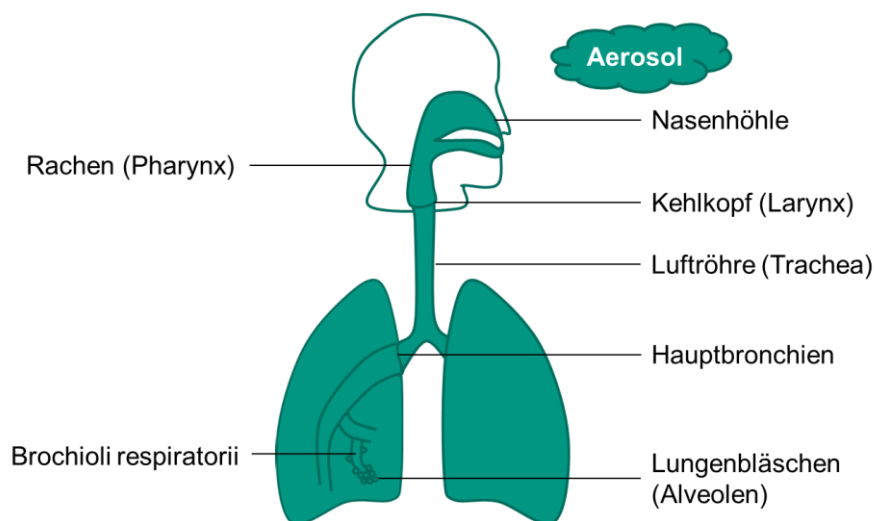


Abbildung 2: Schematische Darstellung der menschlichen Atemwege

Dabei können Partikel aufgrund von größenabhängigen Ablagerungsprozessen, die wesentlich durch das Atemmuster beeinflusst werden, nicht in den gesamten Atemtrakt eindringen. Es können nur kleine Teilchen bis zu den Lungenbläschen vordringen. Größere Teilchen werden in den oberen Atemwegen, in erster Linie im Nasenbereich abgeschieden und entsorgt [31].

Fasern die im Atemtrakt abgeschieden werden, können zu Reizungen der Schleimhäute führen [30]. An Fasern können Verunreinigungen haften, im Brandfall zum Beispiel Verbrennungsprodukte, die mit der Faser in den Atemtrakt gelangen und eine zusätzliche Reizung hervorrufen können [14].

Bei einer Faser (Länge  $\gg$  Durchmesser) ist der wesentliche Parameter für die Eindringtiefe, der aerodynamische Durchmesser<sup>a</sup>. Dieser beträgt für lange Fasern ungefähr dreimal seines Faserdurchmessers [32]. Fasern, die einen Durchmesser größer drei Mikrometer besitzen können aufgrund ihres großen aerodynamischen Durchmessers nicht bis in die tieferen Lungenwege (WHO-Definition vgl. Abbildung 3) vordringen [33].

#### 2.5.3.1 Fasertoxikologie

Die Toxikologie einer Faser wird durch vier Parameter wesentlich beeinflusst und beurteilt, der Faserdimension, der Faserbeständigkeit (Biopersistenz), der Dosis im Zielorgan und der chemischen Zusammensetzung [34].

Dringen Fremdkörper bis zu den Lungenbläschen (Alveolen) vor, werden diese durch Fresszellen (Alveolarmakrophagen) aufgenommen, abgebaut und verfrachtet. Diese haben einen Durchmesser von etwa 10 bis 15 Mikrometer [9]. Übersteigt die Größe beziehungsweise die Länge des Fremdkörpers die Ausmaße der Fresszelle wird der Reinigungsprozess verlangsamt und die Verweilzeit in der Lunge erhöht sich [33].

Fasern die dort längere Zeit verweilen, können zur krankhaften Neubildung von Bindegewebe (Fibrose) und zu Lungenkrebs führen [33].

Aufgrund der oben aufgeführten Einflüsse werden die besonders kritischen Fasern entsprechend Definition der WHO (World Health Organization) nach Abbildung 3 definiert.

---

<sup>a</sup> Der aerodynamische Durchmesser ist der geometrische Durchmesser einer Kugel mit der Dichte 1 g/cm<sup>3</sup> der eine äquivalente Sinkgeschwindigkeit in laminar strömender oder ruhender Luft besitzt wie der entsprechende, betrachtete Partikel beliebiger Form [32]

#### Kritische Fasern (WHO-Definition):

- Länger 5µm
- Dünner 3µm
- Verhältnis Länge/Durchmesser >3

Abbildung 3 WHO Definition kritischer Fasern nach [10]

Nach derzeitigen Erkenntnissen stehen nur Fasern die obige, geometrischen Kriterien erfüllen im Verdacht krebserregend zu wirken [11]. Der bekannteste Fasertyp dieser Art ist die „Asbestfaser“.

#### **2.5.4 Asbest**

Asbest ist ein Sammelbegriff für faserförmige, silikatische Mineralien, die bis in die 1980er Jahre als Baumaterial in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen eingesetzt wurden. Typisch für diese Mineralien ist eine leichte Spaltbarkeit der Fasern in Längsrichtung wodurch sehr feine (Massivfaser-Asbest: Durchmesser 0,1-0,2 Mikrometer [10]) und dadurch hoch lungengängige Fasern freigesetzt werden können.

Die Krankheiten die durch das Einatmen von Asbest entstehen sind die krankhafte Vermehrung von Bindegewebe in der Lunge (Asbestose), Lungenkrebs und Tumoren des Brust- und Bauchfells (Mesotheliome). Dabei ist vor allem die lange Latenzzeit mit 10-60 Jahren hervorzuheben. Das Risiko an einer asbestinduzierten Krankheit zu erkranken hängt vor allem von der Dauer und Höhe der Belastung ab [35].

#### **2.5.5 Kohlenstofffasern**

Im Vergleich zu Asbest spalten sich Künstliche Mineralfasern (KMF), zu denen auch Kohlenstofffasern zählen (vgl. 2.2.2) nicht in Längsrichtung auf [29]. Zudem sind ihre Ausgangsdurchmesser deutlich größer als der kritische Faserdurchmesser, wodurch Kohlenstofffasern im Gebrauchszustand nicht als kritisch zu betrachten sind [10].

Zurzeit fehlen Daten zur Beurteilung der Biopersistenz von Kohlenstofffasern, die zur Beurteilung der Gefährdung (vgl. 2.5.3.1) entscheidend sind.

In Anhang 3 sind einige Untersuchungen aus der Literatur angegeben, die jedoch im Rahmen dieses Berichts nicht abschließend bewertet werden können. Es lässt sich die Tendenz erkennen, dass die toxikologischen Wirkungen reiner Kohlenstofffasern geringer ist gegenüber Asbest [9]. Es gibt bisher keine Hinweise auf ähnliche Erkrankungen bei Personen die mit Kohlenstofffasern umgehen. Neben weiteren Untersuchungen der Kurzzeitfolgen

fehlen Studien zu den möglicherweise auftretenden Langzeitschäden die auftreten könnten [17], [36].

### **2.5.6 Brandrauch**

Die in 2.3.2 aufgeführten Gase und Dämpfe, die während eines Brandes entstehen können, beeinträchtigen die Gesundheit zusätzlich. Neben den einzelnen stoffspezifischen Auswirkungen, auf die nicht im Einzelnen eingegangen wird können Synergieeffekte zwischen den Brandrauchbestandteilen auftreten.

### **2.5.7 Einfluss von Kohlenstofffasern auf elektrische Anlagen**

Kohlenstofffaserverbundbauteile sind im Gebrauchszustand nicht elektrisch leitfähig [29]. Werden CFK-Formteile bearbeitet, zerstört oder verbrannt können elektrisch leitfähige Kohlenstofffasern freigesetzt werden, die in elektrischen Anlagen zu Kurzschlüssen führen können [14], [29], [37], [38]. Freigesetzte Faserstücke können luftgetragen noch in großer Entfernung zum Freisetzungsort zu Schäden in elektrischen Anlagen führen [38].

Im Gegensatz dazu kamen Bell und Kollegen [25] (s. a. [9], [39], [28]) zu dem Schluss, dass im Brandfall der Anteil potentiell gefährlicher Fasern (Länge größer einem Millimeter) an der freigesetzten Fasermenge sehr gering ist und daher kein erhebliches Schadenpotential auf elektrische Anlagen besteht. Die Beurteilung der Gefahren von Kohlenstofffasern auf elektrische Anlagen ist somit nicht einheitlich, jedoch sollte diese Gefahr nicht außer Acht gelassen werden.

In 2.5 werden die potentiellen Gefahren, die bei CFK-Formteilen auftreten können, aufgezählt und erläutert.

Hinsichtlich einer inhalativen Exposition ist als ein kritischer Parameter der Durchmesser faserförmiger Partikel zu betrachten, der maßgebend für die Lungengängigkeit ist. Hinsichtlich seines Ausgangszustands (siehe 2.2) liegt dieser bei Kohlenstofffasern zwischen fünf und acht Mikrometer. Fasern, die in die Lunge eindringen und dort zu Schäden führen können, benötigen einen geringeren Durchmesser von kleiner drei Mikrometer (s. S. 12). Hier gilt es vor allem Szenarien zu untersuchen, die einen Einfluss auf den Durchmesser haben.

### **3 Gefahrenszenarien und Faserfreisetzung**

In 2.5 wurden werkstoffspezifisch bedingte mögliche Gefahren von CFK-Formteilen insbesondere bei Exposition der Teile gegenüber erhöhten Temperaturen wie zum Beispiel beim Brand erläutert. Im Weiteren werden die für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) in erster Linie relevanten Szenarien beschrieben. Diese lassen sich hinsichtlich ihrer Expositionsart entsprechend der nachstehend gewählten Einteilung unterscheiden.

#### **3.1 Szenario 1: mechanische Deformation und Bearbeitung ohne Wärmeeintrag**

Unter diesem Szenario werden alle mechanischen Deformationen verstanden, die ohne gleichzeitige Wärmezufuhr ablaufen.

Darunter fallen unter anderem Fahrzeugcrashes, bei denen die Harzmatrix bricht und Bruchstücke frei werden können. Beim Hilfeleistungseinsatz können weitere mechanische Belastungen auftreten:

Bei der mechanischen Bearbeitung, unter anderem beim Sägen oder Schneiden von CFK-Bauteilen können während des Bearbeitungsprozesses Harz- und Faserstücke in die Luft gelangen.

Unfallfahrzeuge mit CFK-Karosserieteilen können bei der mechanischen Bearbeitung (Schneiden, Drücken und Reißen) eine erhebliche Menge Staub freisetzen [40].

Beckert und Eibl [30] untersuchten Faserstäube, die bei der Bearbeitung (Sägen, Bohren und Schleifen) von CFK-Platten (Dicke: 2 mm) entstanden. Dabei wurden keine Faserbruchstücke gefunden, deren Durchmesser kleiner drei Mikrometer war und somit keine Bruchstücke, die als kritisch (vgl. Abbildung 3) eingestuft werden müssten. Die Faserdurchmesser der Kohlenstofffasern blieben konstant (fünf Mikrometer), wodurch die Bruchstücke als nicht lungengängig zu betrachten sind. Dies deckt sich mit Aussagen von Kwan (aus [39]), der mehrere Bearbeitungsverfahren untersucht hat. Nur bei der Bearbeitung mit dem Laserschneidverfahren konnten bei seiner Untersuchung lungengängige Partikel in erhöhtem Umfang nachgewiesen werden.

Bei künstlichen Mineralfasern wie den für die Herstellung von CFK-Formteilen verwendeten besteht die Tendenz, in Dickenrichtung zu brechen und nicht aufzuspleißen (vgl. 2.5.5). Dadurch wird der kritische Parameter Faserdurchmesser bei üblichen mechanischen Beanspruchungen nicht in erheblichem Maße reduziert wodurch das Freisetzungspotential kritischer Kohlenstofffasern tendenziell geringer ist. Eine Freisetzung kritischer Fasern kann

jedoch nicht ausgeschlossen werden. Erfahrungen haben gezeigt, dass zusätzlich auch Harzbruchstücke, z. B. die aus schmalen Zwischenräumen des Fasergeleges stammen, faserförmige Bruchstücke erzeugen, die kritische Abmessungen besitzen [41].

Eine Einschätzung von Expositionskonzentrationen im Raumvolumen bei den zu betrachtenden Situationen ist aufgrund der dünnen Datenlage jedoch bisher nicht möglich.

Für Szenario 1 kann festgehalten werden, dass sich der für die gesundheitsgefährlichen Eigenschaften von Fasern entscheidende Parameter Faserdurchmesser der Kohlenstofffaser nach dem heutigen Stand wahrscheinlich nicht entscheidend verändert. Jedoch können faserförmige Harzbruchstücke kritische Abmessungen besitzen.

### **3.2 Szenario 2: Wärmeeintrag auf das Bauteil**

Der Durchmesser von Kohlenstofffasern kann sich durch thermische Einwirkung verringern (vgl. 2.3.1) [22], [23]. Damit können unter bestimmten Bedingungen Fasern generiert werden, die lungengängig sind und im Sinne der WHO (siehe Abbildung 3) als kritisch eingestuft werden müssen [14]. Dieser Prozess ist dabei vor allem von der Intensität und Dauer der thermischen Beanspruchung und den Randbedingungen abhängig.

Eine Vergleichsstudie von Inthavong und Kollegen [42] untersuchte anhand einer Computer Fluid Dynamics (CFD)-Simulation das Ablagerungsverhalten von brandbeanspruchten Glasfasern und Kohlenstofffasern in einem Modell des menschlichen Atemtraktes. Dabei wurde angenommen, dass das Modellaerosol aus Kohlenstofffasern mit Durchmessern von im Mittel 3,7 Mikrometer besteht. Die Glasfasern in einem zweiten Modellfall waren einem fiktiven Brand unterhalb der Schmelztemperatur von ca. 1200 °C ausgesetzt, wodurch der Durchmesser unverändert bei ca. 12 Mikrometer blieb. Im Ablagerungsverhalten ergaben sich durch die Dichteunterschiede (Kohlenstofffaser 1830 kg/m<sup>3</sup>, Glasfaser 2560 kg/m<sup>3</sup>) und die verschiedenen Durchmesser Abweichungen. Im Modell drangen nur Glasfasern mit einer Länge von ca. 10 Mikrometer in die Lunge ein. Bei Kohlenstofffasern konnten Fasern mit einer Länge von bis zu 100 Mikrometern in die Lunge eindringen, also auch Fasern, die von Fresszellen nicht mehr abgebaut werden können (vgl. 2.5.3.1). Faserfraktionen mit einer Länge größer 100 Mikrometer lagerten sich vorwiegend im Nasenbereich ab.

Brown und Kollegen [19] halten es für wahrscheinlich, dass gefährliche Fasern nur selten und in geringem Maße entstehen, da der thermische Abbau von Fasern nicht bei einer bestimmten, zum Beispiel kritischen Faserdicke stoppt. Es kann durchaus sein, dass die Faser komplett zersetzt wird (vgl. 2.3.1). Scholz und Eibl [24] konnten jedoch in einem Freilandversuch



feststellen, dass Faserbruchstücke in einem Treibstoffbrand mit CFK-Bauteilen freigesetzt werden, die den WHO-Kriterien genügen.

Die freigesetzte Fasermenge steigt mit größer werdender Überströmgeschwindigkeit der Luft, welche die Fasern mechanisch aus dem Formteil löst. Mit einer signifikanten Freisetzung von Kohlefasern mit kritischen Abmessungen ist somit vor allem dann zu rechnen, wenn hohe Temperaturen, genügend Sauerstoff und entsprechend hohe Überströmgeschwindigkeiten vorhanden sind [21].

Die freigesetzte Fasermenge hängt auch vom Matrixmaterial ab. Je mehr die Matrix dazu neigt zu verkohlen (s. 2.3) desto weniger Fasern werden freigesetzt [17].

Neben der Freisetzung während des Brandes ist auch nach dem Brand an der kalten Brandstelle bei dem Umgang mit Brandrückständen von CFK-Formteilen eine erhöhte Freisetzung kritischer, lungengängiger Fasern zu erwarten [24].

Aber auch für das Szenario der thermischen Beanspruchung von CFK-Formteilen fehlt die Grundlage für die Bewertung des Expositionsniveaus und daher auch für eine abschließende Betrachtung der Gefährdung.

In Kapitel 3 wurden die beiden relevanten Szenarien mit den jeweils maßgebenden Mechanismen beschrieben, die einen Beitrag zur Gefährdung leisten können.

Die Literatur liefert ein heterogenes Bild von der quantitativen und qualitativen Freisetzung und der daraus resultierenden Gefährdung durch Kohlenstofffasern. Daher besteht in diesem Bereich weiterer Forschungsbedarf.

## 4 Schutzmaßnahmen

Auf die in 2.5 dargestellten potentiellen Gefahren und die entsprechenden in Kapitel 3 dargestellten Freisetzungsszenarien muss mit angepassten Schutzmaßnahmen reagiert werden, um ein gefahrenarmes Vorgehen von Einsatzkräften zu ermöglichen.

Ein Erkennen von CFK-Bauteilen im Gebrauchszustand ist nicht möglich, da diese Bauteile oft lackiert sind und sich von anderen lackierten Werkstoffen nicht unterscheiden. Daher sollte im Einsatzfall davon ausgegangen werden, dass CFK-Bauteile in nicht vernachlässigbarem Umfang in Unfallfahrzeugen insbesondere neuerer Modelljahre verbaut sind.

Das Maß einer potentiellen Gefährdung hängt vom Anteil der CFK-Materialien ab. Dieser ist in der Luftfahrt aufgrund der höheren Gesamtmasse tendenziell größer als im Automobilbereich (s. Anhang 1). Dies sollte bei der Beurteilung der Situation berücksichtigt und das Vorgehen sollte dementsprechend angepasst werden.

Kommt es zu einem Flugunfall, sollten die Richtlinien und Hinweise der Bundeswehr („Hilfe bei Flugunfällen“, [43]) angewandt werden.

Generell sind Grundschutzmaßnahmen im Einsatz sinnvoll. So empfiehlt es sich, die Raumordnung (Arbeitsbereich, Absperrbereich) nach FwDV 3 [44] einzuhalten und die Personenanzahl im direkten Arbeitsbereich möglichst zu begrenzen. Die Abstände sind dabei der Unfallsituation anzupassen. Spezifische, aufgrund der Faserfreisetzung aus CFK-Werkstoffen erstellte Regeln über Abstände bestehen nicht. Bei der Raumordnung ist auch auf die Windrichtung zu achten.

Der potentiellen Gefahr durch Schäden an elektrischen Anlagen durch elektrisch leitfähige Kohlenstofffasern (vgl. 2.5.7) sollte durch ausreichenden Abstand oder Abschaltung dieser Anlagen entgegengewirkt werden.

Beim Umgang mit Wrackteilen sollte so wenig Staub wie möglich aufgewirbelt werden. Das Werfen solcher Teile sollte untersagt werden [36], [45].

Ein ausreichender Schutz der Haut vor Reizungen und Verletzungen (vgl. 2.5.2) sollte getragen werden, durch reißfeste und durchstichsichere Kleidung und Handschuhe.

Die Auswahl der persönlichen Schutzausrüstung (PSA) folgt dem Maß der Gefährdung. Im Falle einer Faserfreisetzung sind die Faktoren Expositionshöhe und Dauer entscheidend. Da für die relevanten Szenarien keine verlässlichen Daten dieser Parameter vorhanden sind (vgl. Kapitel 3) werden im Folgenden abgeleitete Maßnahmen vorgeschlagen.

#### **4.1 Szenario 1: mechanische Deformation und Bearbeitung ohne Wärmeeintrag**

Dieses Szenario kann typischerweise der Kategorie des Hilfeleistungseinsatzes zugeordnet werden. Hier greift die FwDV 3 [44], die den Erfordernissen des Einsatzes entsprechende persönliche Schutzausrüstung vorschreibt.

In einem Untersuchungsbericht der ADAC Unfallforschung [40], [46], [47] wird beim Schneiden eines BMW i3 mit CFK-Chassis, beziehend auf Herstellerangaben empfohlen Staubfilter der Filterklasse FFP3 einzusetzen.

Zusätzlich wird das Tragen staubdichter Schutzbrillen empfohlen [28].

#### **4.2 Szenario 2: Wärmeeintrag auf das Bauteil**

Kommt es zum Brand eines CFK-Bauteils, erfordert dies für vorgehende Einsatzkräfte zwangsweise persönliche Schutzausrüstung nach den Einsatzstandards des Löscheinsatzes, unter anderem in Form von umluftunabhängigem Atemschutz.

Ist der Brand erloschen besteht weiterhin die Gefahr einer Faserfreisetzung (vgl. 3.2), weshalb das Tragen von Staubmasken (z.B. Filterklasse P3 oder FFP3) empfohlen wird [14], [24], [28]. An kalten Brandstellen besteht unabhängig des Brandgutes CFK die Gefahr Partikel einzuatmen, an denen schädliche Stoffe (vgl. auch 2.3.2) angelagert sind. Daher kann es sinnvoll sein bei Tätigkeiten auf kalten Brandstellen mit größerer Ausdehnung ( $> 1 \text{ m}^2$  nach [48]), sofern diese in den Aufgabenbereich der BOS fallen sollten, partikelfilternde Halbmasken der Filterklasse P3 zu benutzen [48].

Eine staubdichte Brille schützt zusätzlich die Augenpartie vor freigesetzten, potentiell reizenden Partikeln [14].

#### **4.3 Unterbindung der Faserfreisetzung**

Der Einsatz eines feinen Wassernebels kann ein erstes Mittel zur Kontrolle von Stäuben im Allgemeinen darstellen [28]. Ein Abscheiden einatembarer (größerer) Stäube ist möglich. Ob alveolengängige Partikelfractionen und damit auch lungengängige, kritische Fasern durch einen Wassernebel gebunden werden ist nicht bekannt und kann daher nicht als vorausgesetzt betrachtet werden. Damit ist dieses einsatztaktische Mittel nicht unbedingt geeignet einen Schutz vor lungengängigen Fasern herzustellen [41].

Das Ausbringen eines Teppichs aus Löschschaum kann des Weiteren Asche und Verbrennungsrückstände binden [36], [45]. Dem Löschschaum stehen jedoch Nachteile (vgl. 2.4) gegenüber, die berücksichtigt werden sollten.

Das Aufbringen eines Faserbindelackes kann zu einer Reduzierung der Faserkonzentration führen (von 90 000 Fasern/m<sup>3</sup> auf 50 000 Fasern/m<sup>3</sup>) [24]. Diese Lacke finden Anwendung in der Asbestsanierung. Eine weitere Möglichkeit Fasern zu binden sind das Ausbringen eines Acryl-Bohnerwachses [36], [45]. Die vorgenannten Stoffe sollten nur bei erhöhtem Freisetzungspotential ausgebracht werden und erscheinen zum Beispiel auf Verkehrsflächen und kleinen Schadensereignissen als eher nicht praktikabel.

Neben den genannten Möglichkeiten kann das Abdecken von Bauteilen mit rissfesten Planen und Folien eine Faserfreisetzung vermindern [36].

#### **4.4 Kontaminierte persönliche Schutzausrüstung**

An der persönlichen Schutzausrüstung von Einsatzkräften können Schadstoffe haften; darunter können auch Rauchpartikel und Fasern aus CFK-Werkstoffen sein. Eine Verschleppung dieser Fasern sollte vermieden werden. Der Verschleppung könnte durch das Tragen von Einwegschutanzügen vorgebeugt werden [24]. Kontaminierte Kleidung sollte wenn möglich an der Einsatzstelle abgelegt und staubdicht verpackt werden. Entsprechende Ersatzkleidung muss dafür bereitgestellt werden. In der Raumordnung sollte ein zentraler Zugang und Ausgang eingerichtet werden, der von den Einsatzkräfte benutzt werden sollte [36], [45]. An diesem Punkt könnte eine erste Dekontamination durchgeführt werden.

In einer Studie von Mayfield und Kollegen [49] wurden verschiedene Möglichkeiten der Dekontamination von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) untersucht, die Rauchgasen eines CFK-Brandes ausgesetzt waren. Die Studie liefert Hinweise, dass das Waschen mit Wasser neben der Reinigung mit einer Fusselbürste die geeignetsten Verfahren sind, um PSA von partikelförmigen Verunreinigungen zu reinigen. Organisch-chemische Verunreinigungen blieben dabei unberücksichtigt.

In Kapitel 4 wurden mehrere Maßnahmen erläutert, die beim Umgang mit CFK-Werkstoffen im Unglücksfall sinnvoll sein können. Diese Maßnahmen können nur als erste Näherung betrachtet werden. Der vorgeschlagene Maßnahmenkatalog (siehe Anhang 4) erhebt weder einen Anspruch auf Vollständigkeit noch darauf, dass die Maßnahmen in der beschriebenen Form und Wirksamkeit ausreichend sind. Es fehlen vor allem Expositionsmessungen in einsatzpraktischen Situationen, die als Grundlage zur Definition von Schutzmaßnahmen verwendet werden könnten. Im Arbeitsschutz gibt es für faserförmige Stäube Regeln, die entsprechende PSA bei Arbeitsplatzexpositionen vorschreiben. Für Kohlenstofffasern können zum Beispiel die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 521 [50] herangezogen

werden [11]. Die in diesem Regelwerk, festgelegten Grenzwerte und Maßnahmen könnten die Grundlage für die Beurteilung der Gefährdung und Eignung der PSA für den Einsatz im Zusammenhang mit den hier behandelten CFK-Werkstoffen bilden.

Es sollte bei der Anwendung von Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden, dass durch die Maßnahme selbst, vor allem beim Tragen von Atemschutz, die Belastung der Einsatzkraft zunimmt. Des Weiteren sind damit auch Anforderungen an die körperliche Eignung der Einsatzkraft verbunden. Die Überprüfung einer möglichen Abschwächung der Maßnahmen hinsichtlich des Atemschutzes erscheint daher sinnvoll. Die Abschwächung ist mit dem Hintergrund wahrscheinlich, dass in der Regel im Einsatzfall von kurzzeitigen Expositionen kritischer Fasern und im Falle einer mechanischen Bearbeitung eher von geringen Expositionsniveaus auszugehen ist.

Zudem sind die Aussagen von Medizinern, inwieweit auch bei der Inhalation einzelner Fasern ein (Langzeit-) Risiko entsteht, uneinheitlich.

## **5 Zusammenfassung/Fazit**

Es wurden die wesentlichen Eigenschaften, das Werkstoffverhalten in bestimmten Szenarien und die werkstoffspezifischen Gefahren die im Zusammenhang mit CFK-Formteilen auftreten können, erläutert.

Hinsichtlich des toxikologischen Potentials von Kohlenstofffasern lässt sich vermuten, dass sich dieses von dem weitgehend bekannten / untersuchten Potential von zum Beispiel kristallinem Quarz oder Asbest tendenziell hinzu einer geringeren Gefährdung unterscheidet. Es fehlen jedoch hierzu abschließende Beurteilungen von Experten.

In beiden Szenarien, der mechanischen Deformation und der Beanspruchung durch Wärme von CFK-Materialien können kritische, faserförmige Bruchstücke freigesetzt werden. Speziell bei Bränden ist mit einer erhöhten Freisetzung kritischer Fasern zu rechnen.

Der wesentliche Parameter für die Beurteilung der resultierenden Gefährdung, die Expositionshöhe, bleibt jedoch unbekannt und muss bei weiteren Untersuchungen betrachtet werden.

Die im Bericht genannten Maßnahmen rühren aus Erkenntnissen der Luftfahrt her und wurden aus diesen abgeleitet. Eine kritische Überprüfung der Wirksamkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen und ihrer einsatzpraktischen Anwendung, z.B. im Zusammenhang mit der Lage „Verkehrsunfall“ sollte durchgeführt werden.

In jedem Falle sollten Einsatzkräfte für potentielle Gefährdungen durch CFK-Materialien sensibilisiert werden und zur eigenen Absicherung die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Gefahrenminimierung durchführen solange keine weiter belastbaren Daten vorliegen, welche eine Abminderung der Schutzmaßnahmen begründen ließen.

## Literaturverzeichnis

- [1] NEUMEYER, THOMAS: Leichter in der Luft, im Wind und auf der Straße. In: *Kunststoffe* (2012), Nr. 11, S. 72–77
- [2] GENERAL FLUGSICHERHEIT IN DER BUNDESWEHR: „Fiese Fasern“ Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe (CFK). In: *Neue Gefahren und deren Begegnung*. Köln, 2013
- [3] BUNDESREGIERUNG: *Regierungsprogramm Elektromobilität*. Berlin, 2011
- [4] BLOCH, ALEXANDER ; DRALLE, JENS ; HEYNE, DANI ; PETERS, MARCUS ; ÜBLER, JOCHEN: Die Leichtigkeit des Seins. In: *auto motor und sport* (2011), Nr. 20, S. 120–128
- [5] STARK, BERND: Beispiele für die Anwendung von Eurocode-Nachweisen im Rahmen von Brandschutzkonzepten. In: ZEHFUß, J. (Hrsg.): *Braunschweiger Brandschutztage*. Braunschweig : Insitut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz iBMB, 2014, S. 191–208
- [6] Leichter fahren ist nicht so schwer. In: *LANXESS Magazin politiX* (2013), Nr. 30. April
- [7] E-MOBIL BW ; FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG: *Leichtbau in Mobilität und Fertigung - Ökologische Aspekte*, 2012
- [8] MEIER, CHRISTIAN: SO SCHWER IST 'S MIT DEM LEICHTGEWICHT. In: *Bild der Wissenschaft online* (2011), Nr. 9, S. 90
- [9] GANDHI, SANJEEV ; LYON, RICHARD E.: *Health Hazards of Combustion Products From Aircraft Composite Materials DOT/FAA/AR-98/34*, 1998
- [10] ZIMMER, LAURENZ ; AXMANN, MICHAEL: *UmweltWissen-Künstliche Mineralfasern*. Augsburg, 2008
- [11] BLOME, HELMUT: *BG / BGIA-Report Arbeitsschutzlösungen für ausgewählte Stoffe und Verfahren*. Sankt Augustin : Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG); Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, 2006 — ISBN 3883837113
- [12] AVK INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE: *Handbuch Faserverbund- kunststoffe*. 3. Aufl. : Vieweg+Teubner Verlag, 2010 — ISBN 9783834808813

- [13] ZEPF, H.-P.: *Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix*. Renningen Malsheim : expert-Verlag, 1997
- [14] SCHOLZ, NORBERT ; EIBL, SEBASTIAN: Fiese Fasern? In: *Flugsicherheit* (2008), Nr. 1, S. 19–23
- [15] QUINTIERE, JAMES G. ; WALTERS, RICHARD N. ; CROWLEY, SEAN: *Flammability Properties of Aircraft Carbon-Fiber Structural Composite*, DOT/FAA/AR-07/57, 2007
- [16] HUBBARD, JOSHUA A ; BROWN, ALEXANDER L ; DODD, AMANDA B ; GOMEZ-VASQUEZ, SYLVIA ; RAMIREZ, CIRO J: *Carbon fiber composite characterization in adverse thermal environments SAND2011-2833*. Albuquerque (USA), 2011
- [17] MOURITZ, A.P. ; GIBSON, A.G.: *Fire Properties of Polymer Composite Materials* : Springer, 2006 — ISBN 9781402053559
- [18] TROITZSCH, JÜRGEN: *Brandverhalten von Kunststoffen*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1981
- [19] BROWN, ALEXANDER L ; DODD, AMANDA B ; PICKETT, BRENT M: *Intermediate-scale Enclosure Fire Tests for Understanding Aircraft Composite Fire Environments SAND2013-9522*. Albuquerque (USA), 2013
- [20] EIBL, SEBASTIAN: Influence of carbon fibre orientation on reaction-to-fire properties of polymer matrix composites. In: *Fire and Materials* (2012), Nr. November 2011, S. 309–324
- [21] HERTZBERG, TOMMY: Dangers relating to fires in carbon-fibre based composite material. In: *Fire and Materials* Bd. 29 (2005), Nr. 4, S. 231–248
- [22] MIGULETZ, BEATRICE: *Schnelle Ermittlung des Gefahrstoff-freisetzungspotenzials beim Abbrand von CFK Diplomarbeit*, Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg, 2010
- [23] FEIH, S. ; MOURITZ, A.P.: Tensile properties of carbon fibres and carbon fibre–polymer composites in fire. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 43, Elsevier Ltd (2012), Nr. 5, S. 765–772
- [24] EIBL, SEBASTIAN ; SCHOLZ, NORBERT: Besondere Gefährdung beim Abbrand von Carbon-Kunststoffen. In: *BRANDSchutz* (2014), Nr. 6, S. 423–427
- [25] BELL, VERNON L: *Potential Release of Fibers From Burning Carbon Composites*, 1980



- [26]MOURITZ, A P: *Fire Safety of Advanced Composites for Aircraft B2004/0046*, 2006
- [27]PICKETT, BRENT M ; DIERDORF, DOUGLAS S. ; WELLS, STEVEN P.: *Firefighting and emergency response study of advanced composites aircraft Objective 2: Firefighting Effectiveness of Technologies and Agents on Composite Aircraft Fires*, 2011
- [28]COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT ; CHIEF FIRE & RESCUE ADVISER: Polymer Composites. In: *Fire and Rescue Service - Operational guidance Aircraft Incidents*. Norwich : The Stationary Office (TSO), 2011, S. 273–282
- [29]DGUV FACHBEREICH HOLZ UND METALL: *DGUV-Information Bearbeitung von CFK Materialien-Entwurf 05/2014*, 2014
- [30]BECKERT, DIETER ; EIBL, SEBASTIAN: Faserverstärkte Kunststoffe. In: *Soldat und Technik*, Soldat und Technik (2004), S. 33–36
- [31]BIEBER, CHRISTIANE: *Innere Medizin*. Stuttgart : Thieme Verlag, 2013
- [32]SENATSKOMMISSION ZUR PRÜFUNG GESUNDHEITSSCHÄDLICHER ABREITSSSTOFFE: *MAK- und BAT-Werte-Liste 2012*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2012
- [33]LIPPMAN, MORTON: Biophysical Factors Affecting Fiber Toxicity. In: WARHEIT, D. B. (Hrsg.): *Fiber Toxicology*. San-Diego : Academic Press, 1993, S. 259–298
- [34]LOCKEY, JAMES E. ; ROSS, CLARA S.: Health Effects of Man-Made Fibres. In: STELLMAN, J. M. (Hrsg.): *Encyclopedia of Occupational Health and Safety*. Genf : International Labor Organization, 2014
- [35]STROH, KATHARINA ; WAGNER, CLAUDIA ; AXMANN, MICHAEL: *UmweltWissen - Praxis Asbest*. Augsburg, 2013
- [36]LUFTWAFFENUNTERSTÜTZUNGSKOMMANDO: BesAn LwUKdo 203-8004-Schutz und Sicherheitsbestimmungen bei der Untersuchung und Bergung von Luftfahrzeugen nach Flugunfällen (1999)
- [37]GEBHARDT, ANDREAS ; SCHNEIDER, MARCO ; HANDTE, JAKOB: CFK-Zerspannung Absaugproblematik drängt zum Handeln. In: *MM Compositeworld* (2013), Nr. Juli, S. 12–14

- [38]WOODWARD, M.E.: Managing Fibre Hazards at Aircraft Incidents. In: *Fire Engineers Journal* (1997), S. 34–38
- [39]LUCHTEL, DANIEL L.: Carbon/Graphite Toxicology. In: WARHEIT (Hrsg.): *Fiber Toxicology*. San Diego : Academic Press, 1993
- [40]UNGER, THOMAS: *Schneidversuche für die Rettung am BMW i3 mit Carbon-Karosserie*. Landsberg/Lech, 2014
- [41]MATTENKLOTT, MARKUS: Persönliche Kommunikation. Sankt Augustin, Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung; markus.mattenkloTT@dguv.de
- [42]INTHAVONG, KIAO ; MOURITZ, ADRIAN P. ; DONG, JINGLIANG ; TU, JI YUAN: Inhalation and deposition of carbon and glass composite fibre in the respiratory airway. In: *Journal of Aerosol Science* Bd. 65, Elsevier (2013), S. 58–68
- [43]GENERAL FLUGSICHERHEIT IN DER BUNDESWEHR: *Hilfe bei Flugunfällen*. Köln, 2010
- [44]AFKzV - AUSSCHUSS FEUERWEHRANGELEGENHEITEN  
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG: *FwDV 3 - Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz*, 2008
- [45]USA ; GUIDE, ADVANCED COMPOSITES LEADERS: *Mishap Risk Control Guidelines For Advanced Aerospace Materials Environmental, Safety, And Health Concerns For Advanced Composites*, 1996
- [46]WÖHRLE, CHRISTOPH: Verzögern Carbon-Bauweise und Elektro-Antrieb die Rettung? In: *BRANDSchutz* (2014), Nr. 10, S. 746–748
- [47]ADAC UNFALLFORSCHUNG: Ist Carbon zu knacken? In: *ADAC Motorwelt* (2014), Nr. 9, S. 22
- [48]GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT: VDS 2357-Richtlinien zur Brandschadensanierung Bd. 06 (2014), Nr. 06
- [49]MAYFIELD, HOWARD T ; PICKETT, BRENT M ; SHELLEY, TIMOTHY J ; DRIVE, BARNES ; AIR, TYNDALL ; BASE, FORCE: *FIREFIGHTING AND EMERGENCY RESPONSE Objective 4 : Post Fire Decontamination of Personal Protection Equipment*, 2011

- [50] AUSSCHUSS FÜR GEFAHRSTOFFE (AGS): *Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 521 - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle*, 2008
- [51] *4C Alfa Romeo-Home*. URL [4C.alfaromeo.com/de](http://4C.alfaromeo.com/de). - abgerufen am 2014-01-01
- [52] *CCX / Koenigsegg*. URL [koenigsegg.com/models/ccx](http://koenigsegg.com/models/ccx). - abgerufen am 2014-01-01
- [53] *Innovation*. URL [cars.mclaren.com/home/models\\_link/mclaren-650s-spider/innovation](http://cars.mclaren.com/home/models_link/mclaren-650s-spider/innovation). - abgerufen am 2014-01-01
- [54] ANDREWS, JOHN: Post Crash Managment. In: *Flugsicherheit* (2010), Nr. 01, S. 10–13

## **Anhang**

<b>ANHANG 1. BEISPIELE FÜR CFK IN DER ANWENDUNG .....</b>	<b>29</b>
<b>ANHANG 2. ERGEBNISSE VON UNTERSUCHUNGEN [27] ZUR EFFEKTIVITÄT VON LÖSCHMITTELN .....</b>	<b>30</b>
<b>ANHANG 3. ZUSAMMENSTELLUNG DURCHGEFÜHRTER TOXIKOLOGISCHER UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>31</b>
<b>ANHANG 4. TABELLARISCHE AUFLISTUNG MÖGLICHER SCHUTZMAßNAHMEN..</b>	<b>35</b>

## Anhang 1. Beispiele für CFK in der Anwendung

Hersteller	Modell	Beschreibung	CFK-Gewicht	Quelle
<i>Automobil:</i>				
Audi	R8 GT	-	28 kg	[4]
Alfa Romeo	4C	CFK-Chassis	65 kg	[51]
Koenigsegg	CCX	CFK-Alu Verbund Chassis	72 kg	[52]
McLaren	650S Spyder	CFK-Monozelle	75 kg	[53]
<i>Luftfahrt (militärisch):</i>				
Hawker Siddeley	Harrier GR5	-	600 kg	[54]
-	Eurofighter	-	8 000 kg	[2]
<i>Luftfahrt (zivil):</i>				
Airbus	A380	-	60 000 kg	[54]
Airbus	A350	-	65 000 kg	[2]
Boeing	787	-	70 000 kg	[54]

## Anhang 2. Ergebnisse von Untersuchungen [27] zur Effektivität von Löschmitteln

<b>Löschmittel</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Zu- mischung</b>	<b>Löschzeit<sup>b</sup> [sec]</b>	<b>Temperatur<sup>b</sup> [°C]</b>
filmbildendes Schaummittel	AFFF (Aqueous Film Forming Foam)	3 %	16	437,8
filmbildendes Fluorprotein- schaummittel	FFFP (Film Forming Fluoroprotein)	3 %	20	433,7
Class-A Schaummittel	Class-A	0,5 %	18	324,7
Löschpulver	PKP (Purple-K Powder)	-	4,5	460,2
Hydrogel	HG	-	16,6	267

---

<sup>b</sup> Die Werte wurden aus den Versuchsdaten (i.d.R. vier Versuche pro Löschmittel) gemittelt

### Anhang 3. Zusammenstellung durchgeführter toxikologischer Untersuchungen

Aus	Autor, Jahr	Titel	Beschreibung	Ergebnis
Gahndi, 1998 [9] (S. 9 ff.)	Thoms-on, 1989	Conference on Occupational Health Aspects of Advanced Composite Technology in Aerospace Industry, Health Effects and Exposure Considerations, S. 164-176		Tierversuche lassen vermuten, dass PAN-Fasern keine Langzeit-Gesundheitsrisiken darstellen unter üblichen Arbeitsplatzbedingungen. Die Gesundheitsrisiken beschränken sich auf Reizungen der Haut und der oberen Atemwege, wenn die Belastung auf große Faserdurchmesser (6-8 µm) beschränkt ist.
	Martin, 1989	An Evaluation of the Toxicity of Carbon Fiber Composites for lung Cells In Vitro and In Vivo, Environmental Research 49 (2), S. 246-261	Erste Tierstudie (Ratten), die sich auf die Cytotoxikologische Antwortreaktion fokussiert auf mechanisch freigesetzte Aerosole aus Composites.  Typisierung des Aerosols: Durchmesser variierten zwischen 7-11 µm. Der durchschnittliche Durchmesser lag bei 2,7 µm	Die Ergebnisse zeigen, dass vier CFK-Formteile eine minimale Toxizität aufweisen, wovon zwei, die mit einem aromatischen Amin ausgestattet waren, eine deutlich höhere, toxische Wirkung als die „Kontroll“-Formteile besaßen.  Dieses Ergebnis ist im Einklang mit der kanzerogenen Wirkung von aromatischen Aminen wie z.B. 4,4' Methylenedianilin (MDA)

<b>Aus</b>	<b>Autor, Jahr</b>	<b>Titel</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Ergebnis</b>
Gahndi, 1998 [9] (S. 9 ff.)	Owen, 1990	Subchronic inhalation Toxicology of Carbon Fibers, Journal of Occupational Medecine, 28, S. 373-376	Ratten wurden 7 µm dicken PAN-Fasern über vier Monate ausgesetzt.	Es wurden keine pulmonaren Entzündungen, Lungenbeeinträchtigungen oder fibröse Auswirkungen entdeckt.
	Thomson, 1990	Nonrespirability of Carbon Fibers in Rats From Repeated Inhalation Exposure, Chemical Research, Development, and Engeneering Center, Aberdeen Proving Ground, MD, AD-A228	Es wurden Fasern mit einem Durchmesser von 3,5 µm und einer Länge von 3,5 mm untersucht	Es wurden keine Veränderungen der physiologischen Abwehrreaktion gefunden. Die Makrophagen des Lungengewebes zeigten bei der Untersuchung mit Elektronenmikroskopie keine Fasern.  Die toxikologische Aussagekraft der Studien von Owen und Thomson ist zweifelhaft, da nur nicht lungengängige Fasern untersucht wurden.
	Waritz, 1990	Chronic Inhalation of 3 µm Diameter Carbon Fibers, The Toxicologist, 10 (1) p. 70	Tierexperimente mit PAN-Fasern der einatembaren Fraktion (D~3µm, L 10-60 µm)	Es wurden keine Fasern im Lungengewebe gefunden. Eine histopathologische Untersuchung ergab keine fibrösen Effekte oder Veränderungen der pulmonaren Funktionalität.



<b>Aus</b>	<b>Autor, Jahr</b>	<b>Titel</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Ergebnis</b>
Gahndi, 1998 [9] (S. 9 ff.)	Warheit , 1990	Acute Inhalation Toxicity Studies in Rats with a Respirable Sized Experimental Carbon Fiber: Pulmonary Biochemical and Cellular Effects, American Occupational Hygiene, 38, S. 769-776	Tierversuche mit Fasern (pechbasiert) mit einatembaren Durchmessern (D 1-4 µm). Kontrollversuche mit PAN-Fasern (D 4,4 µm)	Die Kohlefasern verursachten leichte, dosisabhängige Entzündungsreaktionen. Die faserinduzierten Entzündungen wurden innerhalb von 10 Tagen abgebaut. Übereinstimmend mit Waritz wurden keine signifikanten pulmonaren Funktionsveränderungen oder Anzeichen einer Fibrose, weder bei PAN- noch bei pechbasierten Fasern gefunden. Der Autor folgert daher, dass im Gegensatz zu silikatbasierten Asbestfasern Kohlenstofffasern keine pulmonare Fibrose hervorrufen.
-	Whitehead, 2003	Lung function and airway inflammation in rats following exposure to combustion products of carbon graphite/epoxy composite material: comparison to a rodent model of acute lung injury, Toxicology 183, S. 175-197	-	-

<b>Aus</b>	<b>Autor, Jahr</b>	<b>Titel</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Ergebnis</b>
E-Mobil BW, 2012 [7] (S. 45)	Luchtel , 1989	Response of the Rat Lung to respirable Fractions of Composite Fiber-Epoxy Dusts, Environmental Research 48, S. 57-69	In Rattentests wurde die Toxizität von Faserstücken aus mechanischer Zerkleinerung von CFK-Werkstoffen untersucht. Diese wurden Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (negativ) und kristallinem Quarz (positiv) als Kontrollgruppen gegenübergestellt.	Generell wurde eine CFK-Toxizität beobachtet, die geringer war als bei Quarz, jedoch war sie größer als die Negativkontrolle von Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , bei der keine nachteiligen Reaktionen auftraten.
Mouritz, 2006 [17] (S. 372)	Zhang, 2001	The Effects of Carbon Fibre and Carbon Fibre Composite Dusts on Bronchoalveolar Lavage Component of Rats, Journal of Occupational Health, 43: S. 75-79	In Rattenversuchen wurde die Toxizität von Kohlenstofffasern und Stäuben aus CFK-Formteilen getestet und mit Quarz und Chrysotil verglichen. Dafür wurde Sekret durch eine bronchioalveolare Lavage gewonnen und untersucht.	Nach einer Versuchsdauer von einem Monat wurden noch Kohlenstofffasern in Makrophagen nachgewiesen, die jedoch morphologisch intakt waren.  Kein Hinweis auf pulmonare Fibrosen.  Die getesteten CFK-Proben wiesen eine geringere Toxizität gegenüber Quarz und Chrysotil auf.

## Anhang 4. Tabellarische Auflistung möglicher Schutzmaßnahmen

<b>Maßnahmenkatalog Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffe</b>	
1. Erkennen von CFK-Formteilen äußerlich nicht möglich; Vorhandensein annehmen 2. Nach Anzeichen eines Brandes suchen 3. Wetterbedingungen beachten (Windrichtung); mögliche Verfrachtung von Fasern 4. Bereiche Absperren (Raumordnung); Einen Zu- und Ausgang einrichten 5. Personal im Arbeitsbereich auf Minimum beschränken 6. Elektrische Anlagen möglichst in ausreichender Entfernung zu Unfallort betreiben/ oder ausschalten (Kurzschlussgefahr) 7. Schnittkanten beachten; wenn möglich abdecken	
<b>Szenario 1: z.B. Brand</b>	<b>Szenario 2: z.B. mechanische Bearbeitung</b>
<b>Während des Brandes:</b>	8. Vorgehen mit PSA: Filtermaske (Filterklasse FFP3) Staubdichte Brille
8. Vorgehen mit PSA (Löscheinsatz): u.a. umluftunabhängigem Atemschutz 9. Freisetzung von Rauch und Fasern Beobachten und eventuell Anlieger informieren 10. Löschen des Brandes 11. Kontrolle mit Wärmebildkamera ob Brand erloschen ist; Glutbrandgefahr	
<b>Nach Erlöschen des Brandes:</b>	
12. Vorgehen mit PSA: Filtermaske (Filterklasse FFP3) Staubdichte Brille eventuell Einwegschutzanzug 13. Unterbinden der Faserfreisetzung mit Bohnerwachs, Bindelack, Schaumteppich oder Abdecken mit reißfesten Planen/Folien	
14. Bei Handhabung von Wrackteilen Staubbildung möglichst vermeiden 15. Gegebenenfalls Dekontamination mit geeigneten Mitteln (z.B. Wasser) einrichten; Verfrachtung von Fasern sollte verhindert werden 16. Kontaminierte Kleidung ablegen und staubdicht verpacken; Ersatzkleidung vorhalten	

## **Hinweis**

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

**<http://www.ffb.kit.edu/>**

und des

**Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge**

**<http://www.idf.sachsen-anhalt.de/>**

eingesehen werden.