

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

Faserverbundwerkstoffe-Eigenschaften und Abbrandverhalten von Faserverbundwerkstoffen, speziell Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK) sowie erforderliche Maßnahmen

Teil2: Versuche

von
Dipl.-Ing. Dominique Max

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

182

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. 182

**Faserverbundwerkstoffe-Eigenschaften und Abbrandverhalten von
Faserverbundwerkstoffen, speziell Kohlefaserverbundwerkstoffe
(CFK) sowie erforderliche Maßnahmen**

Teil 2: Versuche

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe
April 2018

FA. Nr. 231 (1/2015)

ISSN 0170-0060

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: 182	Titel des Berichtes: Faserverbundwerkstoffe-Eigenschaften und Abbrandverhalten von Faserverbundwerkstoffen, speziell Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK) sowie erforderliche Maßnahmen		ISSN: 0170-0060
Autor: Dipl.-Ing. Dominique Max		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 231 (1/2015)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: April 2018			
Seitenzahl: 34	Bilder: 16	Tabellen: 5	Literaturverweise: 25
Kurzfassung: <p>Kohlenstofffasern, die in Verbundwerkstoffen (CFK) zum Einsatz kommen, können unter bestimmten Voraussetzungen in die Umgebung freigesetzt werden. Hier sind der Abbrand oder die mechanische Bearbeitung durch Werkzeuge zu nennen.</p> <p>Sind Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben in solchen Fällen beteiligt, so stellt sich die Frage einer möglichen Gefährdung. Es ist bekannt, dass künstliche (anorganische) Mineralfasern, denen Kohlenstofffasern zugeordnet werden, potenziell krebserregend sind, wenn sie in bestimmten Abmessungen vorliegen (WHO-Kriterien). Fasern, die diese Kriterien erfüllen, werden auch als „kritische Fasern“ bezeichnet. Im Ausgangszustand sind Kohlenstofffasern in der Regel nicht als kritische Fasern zu betrachten, jedoch können oben beschriebene Szenarien dazu führen, dass kritische Fasern entstehen. Entscheidend für die Einschätzung einer Gefährdung ist die Quantifizierung freigesetzter kritischer Fasern in der Luft.</p> <p>Kohlenstofffasern werden bei der Herstellung unter Schutzgasatmosphäre und hohen Temperaturen carbonisiert. Sie besitzen daher eine größere thermische Stabilität als der Kunststoff, der sie umgibt. Im Brandfall wird zunächst die Harzmatrix verbrennen und die Kohlenstofffasern freilegen und ggf. freisetzen. Eine qualitative Analyse der freigesetzten Faserkonzentration konnte aufgrund der meist mit Ruß überbelegten Filter nicht durchgeführt werden.</p> <p>Bei der mechanischen Bearbeitung wird das Bauteil gebrochen und die Fasern können gleichfalls freigesetzt werden. In den durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass neben Kohlenstofffasern auch Harzbruchstücke freigesetzt werden, die kritische Abmessungen besitzen können. Mittels quantitativer Analysen wurden die Trennverfahren der Feuerwehr hinsichtlich ihres Freisetzungsvermögens kritischer Fasern untersucht und die daraus ableitbaren Schutzmaßnahmen diskutiert.</p>			
Schlagwörter: Kohlenstofffaser, Kohlefaserverbundwerkstoff, Faserfreisetzung, WHO-Faser, thermische Einwirkung, mechanische Bearbeitung			

Inhaltsverzeichnis	
Berichtskennblatt	III
Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
0 Einleitender Hinweis	1
1 Einleitung	2
2 Versuche	4
2.1 Probestücke	4
2.2 Thermische Einwirkung	4
2.2.1 Versuchsaufbau	5
2.2.2 Probenahme	7
2.2.3 Versuchsergebnisse	7
2.3 Mechanische Einwirkung	12
2.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung	12
2.3.2 Probenahme und Auswertung	14
2.3.3 Versuchsergebnisse	15
3 Schutzmaßnahmen	20
4 Diskussion	23
5 Ausblick	26
Literaturverzeichnis	27
Anhang Verzeichnis	30

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.

Abkürzungsverzeichnis

BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (Spitzenverband)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EP	Epoxidharz
FwDV	Feuerwehr-Dienstvorschrift
GefStoffV	Gefahrstoff-Verordnung
KMF	Künstlich hergestellte Mineralfaser
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UKBW	Unfallkasse Baden-Württemberg

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Skizze eines zweiteiligen, geschlossenen Werkzeuges (grün) bei der Injektion von Harz (gelb) in die eingelegte Preform (schwarz)	2
Abbildung 2 Skizze Webart Leinwand	4
Abbildung 3: Versuchsraum links: Bild; rechts: Abmessungen sowie die Lage von Differenzdruckmessern des Typs Bidirektionale Sonde (Bi-Di), Thermoelemente (TE) und Entnahmesonde (Absaugung Filter)	6
Abbildung 4 Versuch 19: links oben (1): Zündung des Brenners; rechts oben (2): Abbrand des Kunststoffes (erste Minute); links unten (3): Abbrand von Kunststoffresten; rechts unten (4): Glühen der Kohlenstofffasern (vierte Minute) 8	
Abbildung 5 Versuch 19: links: Temperaturverlauf der Messstellen 1-3; rechts: Temperaturverlauf der Messstellen 1-3, Konzentrationsverlauf von O ₂ und CO ₂ sowie Zeitpunkt-Markierungen der Bilder (1-4) aus Abbildung 4	9
Abbildung 6 Versuch 19: Ausfransen des Kohlenstofffasergewebes am oberen Rand des Probekörpers	10
Abbildung 7 Kohlenstofffasergewebe (nach dem Versuch); Verkohlungsreste (roter Rahmen).....	10
Abbildung 8 nach der thermischen Beaufschlagung abgeschiedene Kohlenstofffaser auf Filterpapier; Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop	11
Abbildung 9 Skizze Versuchsstand für die Versuche mit mechanischer Bearbeitung	12
Abbildung 10 Rasterelektronische Untersuchung des beprobten Filters; Versuch Trennschleifer.....	16
Abbildung 11 Rasterelektronische Untersuchung eines Bruchstückes; Probenahme mit einem Klebestreifen; Versuch Kombischere	17
Abbildung 12 Rasterelektronische Untersuchung des beprobten Filters; Versuch Trennschleifer.....	18
Abbildung 13 Ergebnisse der Filterauswertung nach DGUV-Information 213-546 für neun Versuche, 1-3 Kombischere, 4-6 Säbelsäge, 7-9 TwinSaw®	19
Abbildung 14 Schematische Darstellung der Wärmeströme eines Mantelthermoelementes vom Typ K mit Inconel® Mantel in der verwendeten Versuchsanordnung (T1).....	32

Abbildung 15 Skizze Versuchsstand thermische Einwirkung mit Temperaturmessstellen	33
Abbildung 16 Versuch 18: Temperaturverläufe bei der thermischen Beaufschlagung von CFK-Bauteilen	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Eingesetzte Werkzeuge der Feuerwehr	13
Tabelle 2 Erläuterung der Kategorien (K1-K3) nach [13]	20
Tabelle 3 Expositions-kategorien nach TRGS 521 [14]	21
Tabelle 4 Schutzmaßnahmen (Auszug) nach TRGS 521 [14] in Abhängigkeit der Expositions-kategorie	22
Tabelle 5 Zuordnung ausgewählter Tätigkeiten zu Expositions-kategorien nach [18]	25

0 Einleitender Hinweis

In dem Bericht:

Bericht Nr. 177:

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

Teil I: Grundlagen

sind die Grundlagen zu den Untersuchungen hinsichtlich des Werkstoffes mit seinen Eigenschaften sowie mögliche Gefahren beschrieben, auf die in diesem Bericht nur kurz eingegangen wird. Für nähere Informationen wird auf den genannten Bericht verwiesen, der bei den bekannten Stellen (siehe S. 35) heruntergeladen werden kann.

1 Einleitung

Der Einsatz von Kohlenstofffasern in Verbundwerkstoffen (CFK) findet vielseitig Anwendung in der Praxis. Eine Beurteilung potenzieller Gefahren im Speziellen für Einsatzszenarien von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) soll einen Beitrag dazu leisten, die Sicherheit des Einsatzpersonals, aber auch aller anderer an einem solchen Szenario beteiligten Personen abzuschätzen.

Der Werkstoff CFK besteht aus zwei Komponenten, der Harzmatrix und den darin eingebetteten Kohlenstofffasern. Bei der Herstellung wird in einem zweiteiligen Werkzeug (siehe Abbildung 1) das meist mehrlagige Fasergewebe die sogenannte Preform eingelegt und geschlossen. Unter Druck wird dann das Harz injiziert.

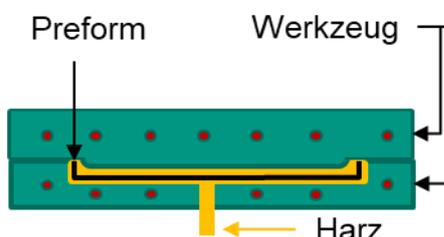


Abbildung 1 Skizze eines zweiteiligen, geschlossenen Werkzeuges (grün) bei der Injektion von Harz (gelb) in die eingelegte Preform (schwarz)

Ist der Verbundwerkstoff ausreichend ausgehärtet, wird das Werkzeug geöffnet, das Bauteil entfernt und seiner Verwendung zugeführt.

Im Allgemeinen wird die Gefährdung, die von faserförmigen Stoffen auf die Atemwege ausgehen kann, über die Anzahl kritischer Fasern nach der Weltgesundheitsorganisation (WHO), also Fasern die gewissen Abmessungen (Durchmesser kleiner $3\ \mu\text{m}$, Länge länger $5\ \mu\text{m}$ und Durchmesser-Längenverhältnis $> 3:1$) entsprechen, im betrachteten Szenario abgeschätzt.

Da die üblicherweise eingesetzten Kohlenstofffasern im Ursprungszustand diese Kriterien nicht erfüllen, also in der Regel dicker als $7\ \mu\text{m}$ sind, werden im Weiteren zwei Szenarien voneinander unterschieden, die einen Einfluss auf die Abmessung der Fasern haben.

Neben der möglichen Gefährdung für die Atemwege können Fasern, die auf die Haut gelangen können, zu mechanisch irritativen Effekten führen. Im vorliegenden Bericht wurde der Fokus auf die mögliche Gefährdung durch inhalative Aufnahme von Fasern gelegt.

Zunächst wird eine thermische Einwirkung (siehe 2.2), also der Abbrand von CFK-Bauteilen und anschließend die mechanische Zerstörung (siehe 2.3) des Werkstoffes, wie sie bei der Bearbeitung von Werkstoffen vorkommen untersucht.

Abschließend werden die Versuchsergebnisse (siehe 2.3.3) dargestellt und die möglichen Schutzmaßnahmen (siehe 3) diskutiert.

2 Versuche

In dem vorangegangenen Abschnitt sowie insbesondere in dem vorgenannten Bericht wurden die Eigenschaften von CFK-Werkstoffen in den jeweils maßgeblichen Situationen beschrieben. Im Folgenden wird die Versuchsdurchführung sowohl für die Abbildung einer thermischen als auch einer mechanischen Belastung beschrieben.

2.1 Probestücke

Bei den durchgeführten Versuchen mit thermischer als auch mechanischer Belastung wurden quadratische Probestücke (10 cm x 10 cm) mit Dicken von ca. 0,4 mm verwendet.

Die Harzmatrix der Probestücke bestand aus einem Epoxidharz mit dem Hauptbestandteil Bisphenol-A und einem Härter auf Basis von Polyoxypropylendiamin ebenfalls einem Epoxidharz.

In der Harzmatrix war ein achtlagiges Fasergewebe (Webart: Leinwand) mit einer Garnfeinheit von 200 tex eingebettet. Das Maß für die Garnfeinheit Tex gibt an, wieviel Gewicht das Garn in Gramm pro 1000 Meter Länge aufweist.

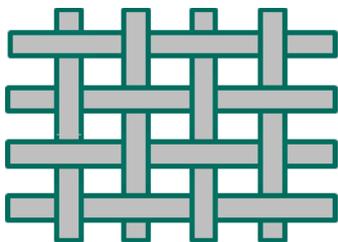


Abbildung 2 Skizze Webart Leinwand

Das verwobene Garn kann dabei aus mehreren tausend Filamenten bestehen. Der Filamentdurchmesser, der Durchmesser einer Faser, wird im Produktdatenblatt für die in den Probestücken verwendeten Fasern mit 7 μm [1] angegeben.

2.2 Thermische Einwirkung

Kohlenstofffasern werden durch Carbonisierung bei sehr hohen Temperaturen unter Schutzgasatmosphäre gehärtet [2]. Werden die Fasern jedoch in Verbindung mit Sauerstoff hohen Temperaturen ausgesetzt, so haben unterschiedliche Studien gezeigt, dass sich der Durchmesser verringern kann [3], [4].

Die genannten Untersuchungen wurden mit sogenannten Cone-Calorimetern untersucht. Bei dieser Versuchsart wird der Werkstoff durch einen elektrischen Strahler erwärmt, sodass brennbare Pyrolysegase entstehen, sich entzünden oder extern gezündet werden. Die dabei entstehenden Temperaturen werden in [4] mit ca. 600 °C angegeben. Bei Temperaturen von über 1 000 °C, wie sie bei einem Treibstoffbrand üblich sind wurden keine Untersuchungen hinsichtlich einer temperaturabhängigen Faserreduktion durchgeführt. Dies wurde zum Anlass genommen, Versuche bei hohen Temperaturen durchzuführen um den Faserabbau bei hohen Temperaturen quantifizieren zu können.

2.2.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchung der freigesetzten Faserelemente nach und während einer thermischen Belastung des Werkstoffes wurde in einem möglichst geschlossenen Versuchsraum durchgeführt. Aus diesem Grund wurde ein Versuchsraum (Abbildung 3) verwendet, der für Kleinversuche konzipiert wurde.

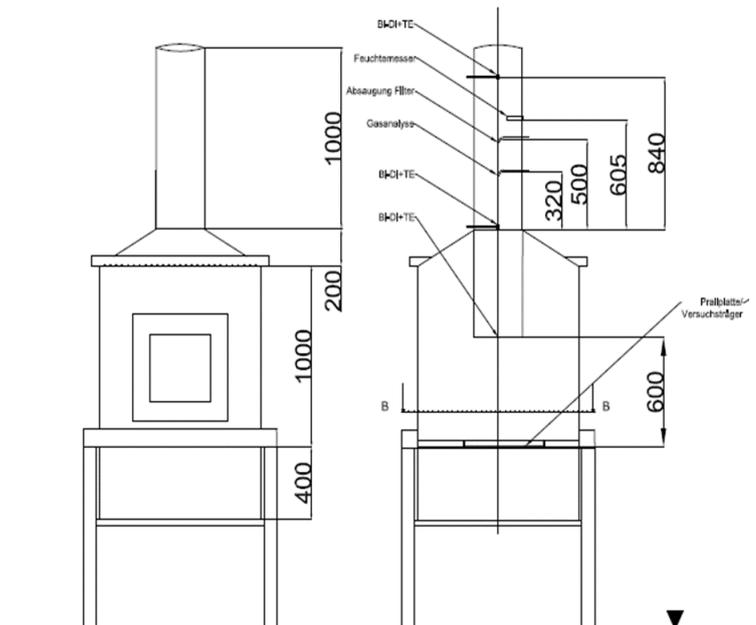


Abbildung 3: Versuchsraum links: Bild; rechts: Abmessungen sowie die Lage von Differenzdruckmessern des Typs Bidirektionale Sonde (Bi-Di), Thermoelemente (TE) und Entnahmesonde (Absaugung Filter)

Der untere, quaderförmige Teil des Versuchsraumes besitzt ein Volumen von ca. 1 m^3 (siehe Abbildung 15). Dieser geht in einen vierseitigen Pyramidenstumpf über. Hieran ist ein Abgasrohr mit einem Innendurchmesser von ca. 30 cm angeschlossen. An der Unterseite des Versuchsraumes befindet sich eine Zuluftöffnung.

Über die in Abbildung 3 dargestellte Tür mit Beobachtungsfenster wurden die Prüflinge eingebracht und die Versuchsdurchführung beobachtet.

Die Probe wurde mit einem Gasbrenner direkt beflammt, um möglichst hohe Temperaturen am Probekörper zu erzielen. Die Beflammung mit Gas (Propan nach DIN 51622 [5]) wurde gewählt, um eine möglichst rußarme Verbrennung zu erhalten. Diese sollte eine Überbelegung der Filter verhindern und dadurch die Auswertung der Filter erleichtern.

Der Gasbrenner wurde mit einer zweiten Gaslanze gezündet.

Während des Versuches, war die Rauchgasreinigungsanlage der Versuchshalle in Betrieb, wodurch ein stetiger, aufwärts gerichteter Luftstrom durch den Versuchsraum gewährleistet wurde.

2.2.2 Probenahme

Zur repräsentativen Entnahme von Partikeln wurde der Durchmesser des Probenentnahmerohres¹ so gewählt, dass die Geschwindigkeit des Entnahmestroms der Geschwindigkeit des Abgases im Abgasrohr entspricht. Hierfür wurde durch Bidirektionale Differenzdruckmesser die Geschwindigkeit im Abgasrohr bestimmt und die Absaugleistung der Pumpe über das Filter mit einem Schwebekörperdurchflussmesser gemessen und entsprechend angepasst. Das verwendete Filtergehäuse entsprach den Vorgaben der VDI 2066-Teil 1 [6].

In dem Filtergehäuse wurde ein Filterpapier mit einer Lochweite von 0,2 µm verwendet.

Die Filter bzw. zufällig ausgewählte Filterstücke wurden anschließend nach der Probennahme unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht.

2.2.3 Versuchsergebnisse

Der Abbrand von CFK unter den gegebenen Bedingungen lässt sich in zwei Phasen unterteilen. In der ersten Phase von ca. drei Minuten brennt die Kunststoffmatrix unter Flammen- und Rußbildung ab (vgl. Abbildung 4 Bild 2). In der zweiten Phase, nachdem der Kunststoff weitestgehend verbrannt ist, steht das Kohlenstoffasergewebe in der Flamme des Gasbrenners und es ist ein Glühen der Fasern zu beobachten (vgl. Abbildung 4 Bild 4).

¹ Lage: siehe Abbildung 15 im Anhang

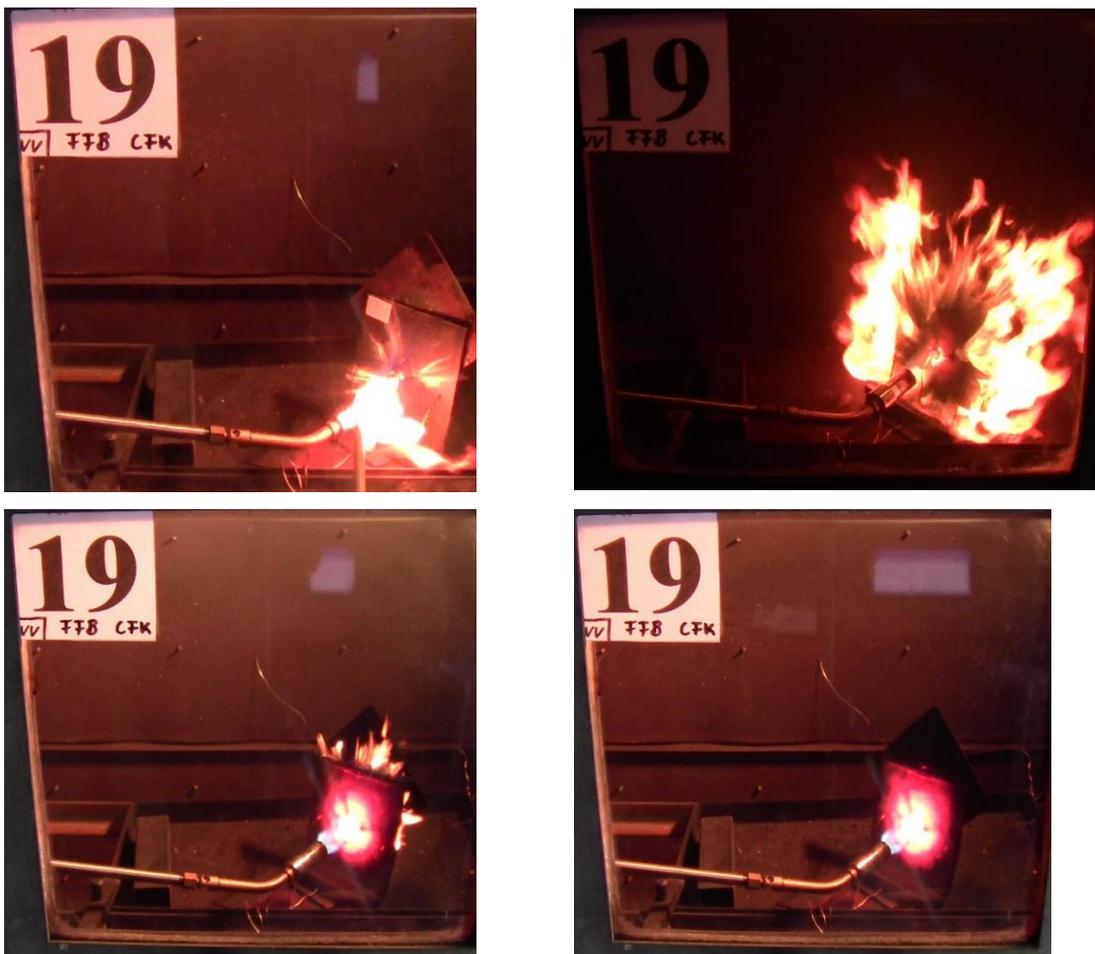


Abbildung 4 Versuch 19: links oben (1): Zündung des Brenners; rechts oben (2): Abbrand des Kunststoffes (erste Minute); links unten (3): Abbrand von Kunststoffresten; rechts unten (4): Glühen der Kohlenstofffasern (vierte Minute)

Die in Nähe der Bauteiloberfläche gemessene Temperatur liegt bei ca. 1 100 °C. Eine Abschätzung der Oberflächentemperaturen, die auf das Bauteil einwirkten, ist schwierig und wird in A1 näher diskutiert.

Die Temperaturverläufe (Messpunkte siehe Abbildung 15) sind in Abbildung 5 links über die gesamte Versuchsdauer, und rechts die Temperaturverläufe und die gemessenen Gaskonzentrationen in den ersten sechs Minuten dargestellt.

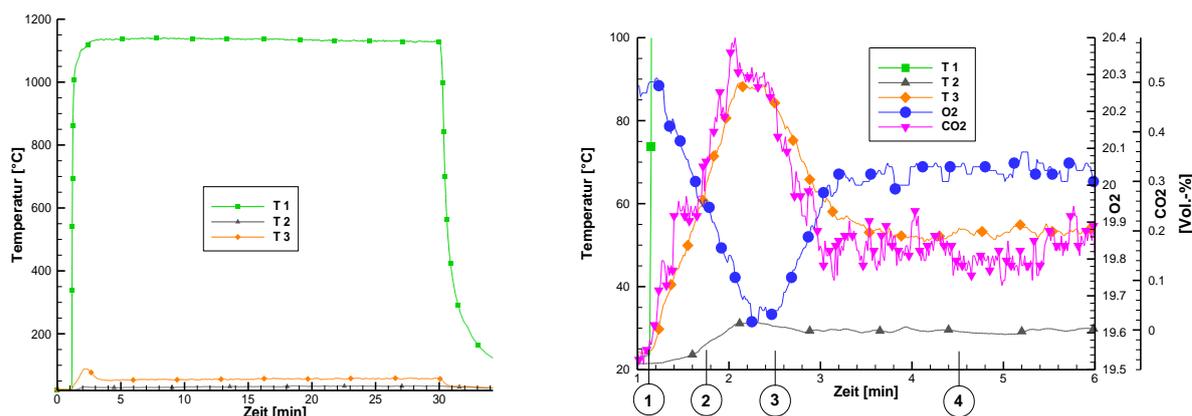


Abbildung 5 Versuch 19: links: Temperaturverlauf der Messstellen 1-3; rechts: Temperaturverlauf der Messstellen 1-3, Konzentrationsverlauf von O₂ und CO₂ sowie Zeitpunkt-Markierungen der Bilder (1-4) aus Abbildung 4

Der Temperaturverlauf von Messstelle T1 (in Oberflächennähe des Probekörpers) lässt darauf schließen, dass eine zeitlich konstante thermische Belastung auf das Bauteil aufgebracht wurde. Des Weiteren ist beim Verlauf der Messstelle T3 (im Schornstein) von der Zündung bis zu einem Peak in der zweiten Minute ein Temperaturanstieg mit anschließendem Temperaturabfall zu erkennen, welcher in einem Plateau ca. ab der vierten Minute mündet. Der Verlauf der CO₂-Konzentration folgt unter Berücksichtigung der Totzeit im Allgemeinen dem Verlauf der Temperatur im Schornstein (T3). Gleichzeitig mit dem Anstieg der CO₂-Konzentration ist ein Abfall der O₂-Konzentration zu beobachten.

Die Temperaturerhöhung, wie auch die Konzentrationsverläufe von O₂ und CO₂, lassen sich auf den Abbrand des Kunststoffes in den ersten Minuten des Versuches zurückführen. Die Beobachtungen und die gezeigten Bilder (siehe Abbildung 4) stärken diesen Eindruck.

Der moderate Anstieg der Temperatur mit dem anschließenden Plateau auf der Rückseite der Probe (T2) zeigt die isolierende Wirkung, die das Kohlenstoffasergewebe sowie die verkohlte Schicht besitzen.

Vereinzelt konnte am oberen Bauteilrand ein Ausfransen von Fasern aus dem Fasergewebe beobachtet werden (siehe Abbildung 6), welche bedingt durch die hohen Überströmgeschwindigkeiten heißer Rauchgase aus der Propanflamme aus dem Gewebe herausgelöst und mit dem Abgasstrom wegtransportiert wurden.

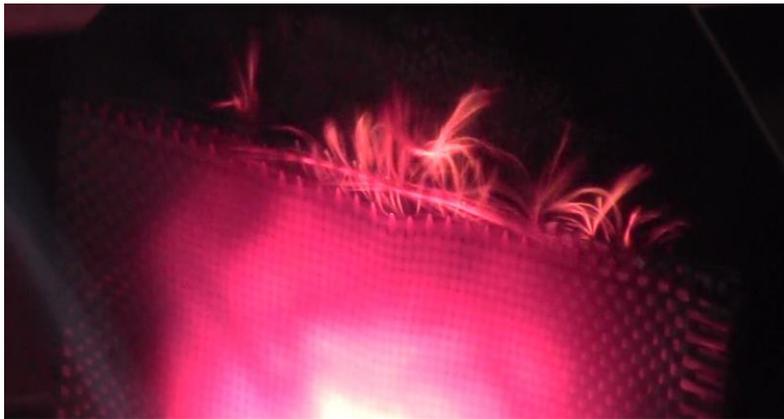


Abbildung 6 Versuch 19: Ausfranzen des Kohlenstofffasergewebes am oberen Rand des Probekörpers

Nach dem Versuch war das Kohlenstofffasergewebe (siehe Abbildung 7) teilweise noch vorhanden. Es sind stellenweise oberflächige Verkohlungsreste erkennbar, die mutmaßlich Reste des Kunststoffes sind. Es sind jedoch auch frei liegende Kohlenstofffasern vorhanden.



Abbildung 7 Kohlenstofffasergewebe (nach dem Versuch); Verkohlungsreste (roter Rahmen)

Die Beurteilung der Faserfreisetzung war in der gezeigten Versuchsanordnung schwierig. Es lassen sich nur qualitative Aussagen, jedoch keine quantitativen Aussagen treffen. Bei der Auswertung der Filter wurde in den meisten Fällen eine Überbelegung des Filters durch Ruß beobachtet.

Die Kohlenstofffaser in Abbildung 8 lag zufällig auf einer Rußschicht. In dieser Abbildung ist eine Reduktion des Faserdurchmessers zu erkennen. Jedoch ist die Faser zu dick, um als kritische Faser nach den Definitionen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) eingestuft zu werden.

Es sind Ablagerungen auf der Faser zu erkennen, die mutmaßlich auch Rußbestandteile enthalten. Grundsätzlich ist bei der Freisetzung von brandbeanspruchten Fasern damit zu rechnen, dass an diesen Ruß anhaftet.

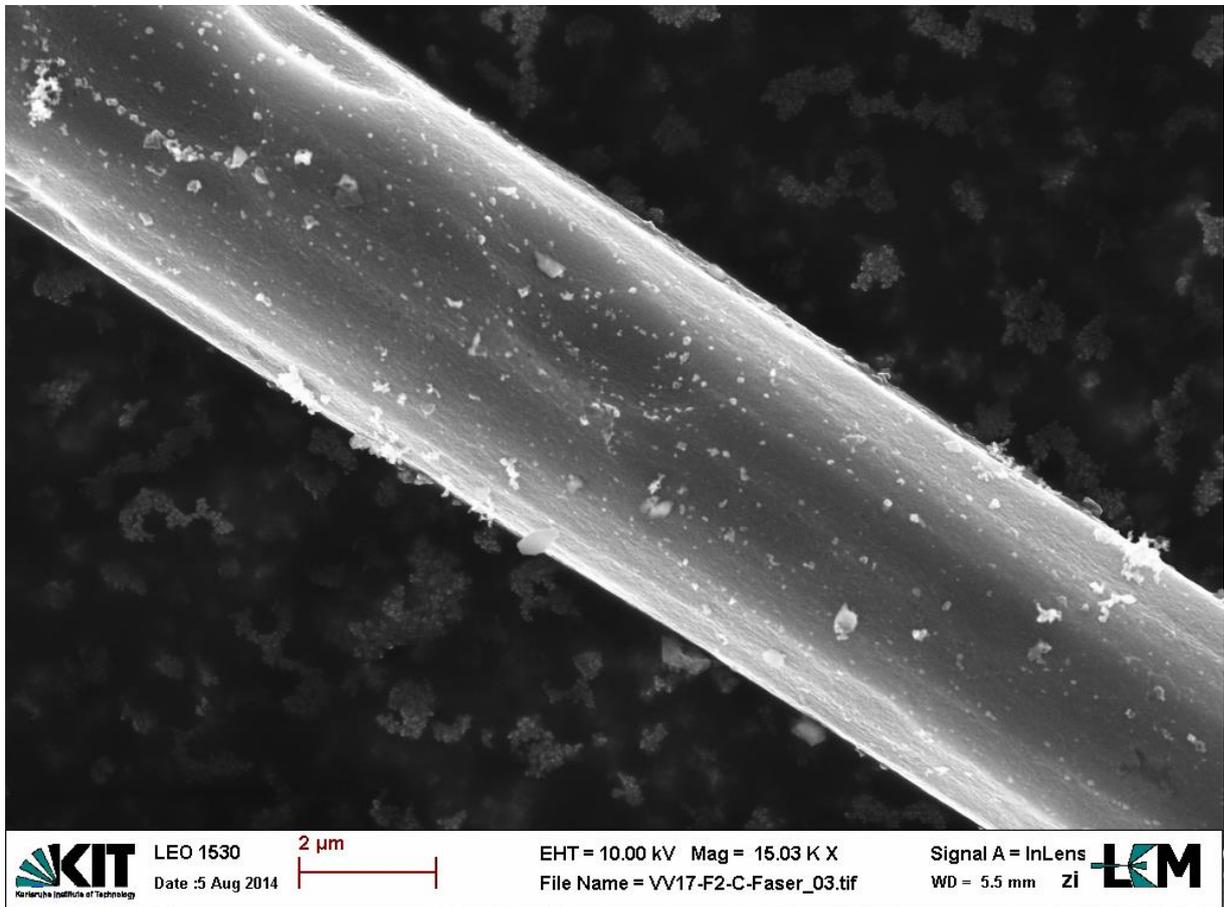


Abbildung 8 nach der thermischen Beaufschlagung abgeschiedene Kohlenstofffaser auf Filterpapier; Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop

2.3 Mechanische Einwirkung

Neben der thermischen Belastung können auch mechanische Bearbeitungs- und Trennverfahren den Faserdurchmesser beeinflussen und Fasern freisetzen. Im Falle von BOS-relevanten Szenarien könnte eine Freisetzung dieser Art das Schneiden von CFK-Bauteilen an einem verunfallten Fahrzeug bedingt sein.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist es, zunächst die Emission kritischer Fasern abzuschätzen.

2.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Für das angestrebte Forschungsziel wurde ein geschlossener Versuchsraum nach Abbildung 9 aufgebaut.

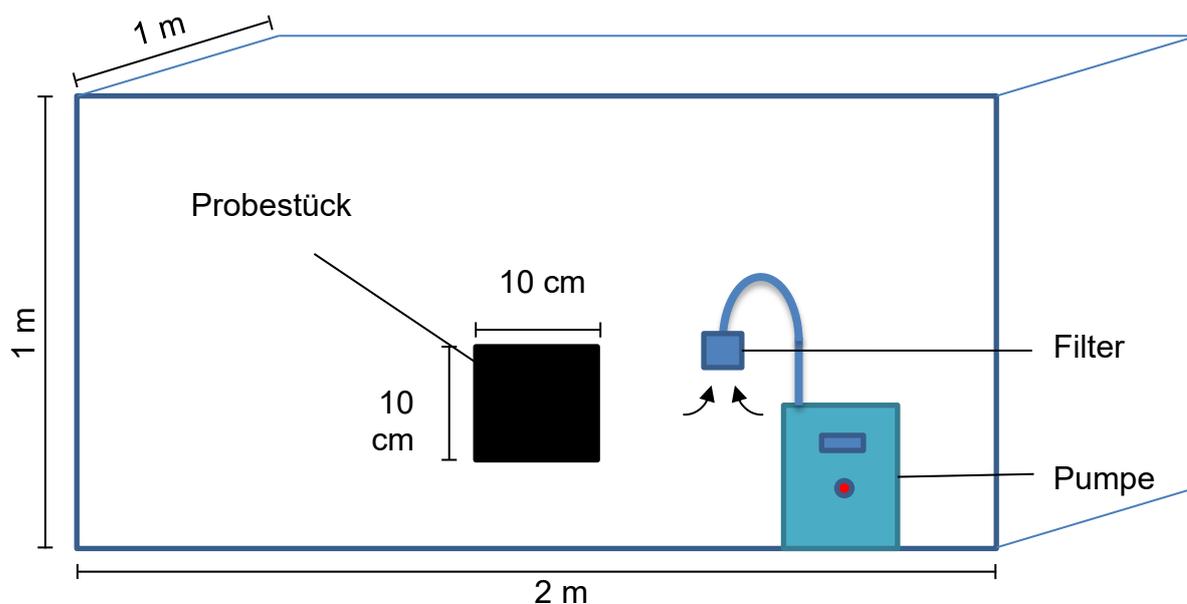
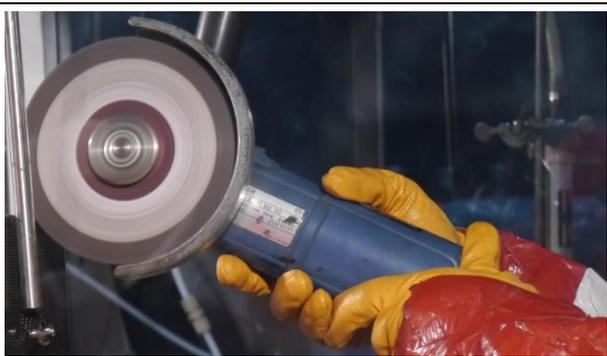


Abbildung 9 Skizze Versuchsstand für die Versuche mit mechanischer Bearbeitung

Im Versuchsraum wurden Probestücke mit folgenden Werkzeugen nach Tabelle 1 zum Schneiden bzw. Trennen der CFK-Probestücke verwendet:

Tabelle 1 Eingesetzte Werkzeuge der Feuerwehr

1		Trennschleifer	Qualitative Analyse
2		akkubetriebene Kombi- Schere	Qualitative Analyse und Quantitative Analyse nach DGUV-Information 213-546 ²
3		Säbelsäge (elektrischer Fuchsschwanz)	Qualitative Analyse und Quantitative Analyse nach DGUV-Information 213-546 ²

² Ehemals BGI 505-46 [7]

4		Trennschleifer mit zwei gegenläufigen Trennscheiben Markenname: TwinSaw®	Quantitative Analyse nach DGUV- Information 213-546 ²
---	---	--	--

Die Bearbeitungszeit der Probekörper betrug bei allen Werkzeugen weniger als fünf Minuten. Die Schnittanzahl und Schnittlänge wurde in etwa gleich gewählt.

2.3.2 Probenahme und Auswertung

Die Untersuchungen gliederten sich in zwei Phasen. In einer ersten Phase wurden qualitative Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden CFK-Probestücke bearbeitet und über ein Edelstahlrohr auf ein Filter freigesetzter Staub abgeschieden. Die Untersuchung der Filter beschränkte sich auf die zufällige Auswahl an Bildausschnitten und beliebiger Vergrößerung. Neben dem Absaugen über ein Filter wurden auf dem Boden des Versuchstandes liegende Bruchstücke mit einem Klebeband fixiert.

In einer zweiten Phase wurden Probenahmen durch den messtechnischen Dienst der Unfallkasse Baden-Württemberg mit einer anerkannten Probenahmetechnik (siehe Abbildung 9) nach DGUV-Information 213-546² durchgeführt. Das Ziel war eine quantitative Bestimmung kritischer Fasern, was für die Festlegung der Schutzmaßnahmen entscheidend ist.

Bei diesem Verfahren wird über ein goldbedampftes Filter mit einem definierten Volumenstrom abgesaugt. Das Filter wird anschließend mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) und einem energiedispersiven Röntgenmikroanalyse (EDXA) analysiert. Durch die EDXA kann die chemische Zusammensetzung eines Stoffes ermittelt werden. Diese lässt Schlüsse auf die Herkunft der Faser zu. Bei Stäuben, die bei der Bearbeitung von CFK-Probestücken entstehen, ist eine Unterscheidung zwischen Fasern, die Harzbruchstücke darstellen, und Fasern aus Bruchstücken der Kohlenstofffasern nicht möglich, da beide Stoffe kohlenstoffbasiert sind und ähnliche chemische Zusammensetzungen aufweisen.

Mit einem bestimmten Zählverfahren auf zufällig ausgewählten Bildausschnitten wird in Abhängigkeit der Anzahl ausgezählter Bildausschnitte, dem Probeluftvolumenstrom eine Faserkonzentration (Fasern/m³) ermittelt. Die Abweichung aufgrund der statistischen Streuung durch die zufällig ausgewählten Bildausschnitte kann mit einer Poisson-Statistik abgeschätzt werden.

Um eine entsprechend niedrige Nachweisgrenze zu erhalten, wurde eine Probenahmedauer von zwei Stunden gewählt.

2.3.3 Versuchsergebnisse

Bei den qualitativen Untersuchungen zeigte sich eine deutlich unterschiedliche Belegungsstärke der Filter mit Partikeln im Allgemeinen. So waren die Filter bei eher schnell arbeitenden Bearbeitungsverfahren (Trennschleifer und Säbelsäge) stärker belegt als langsamere Trennverfahren wie der Kombischere.

Kohlenstofffasern werden den künstlich hergestellten Mineralfasern (KMF), genauer den anorganischen Synthesefasern, zugeordnet [8]. Im Allgemeinen wird KMF unterstellt, dass diese im Gegensatz zu dem bekannten Asbest nicht in Längsrichtung brechen, sondern vorwiegend in Dickenrichtung. Dadurch werden deutlich gröbere Fasern erzeugt. In Abbildung 10 ist ein Kohlenstofffaserstück zu erkennen, mit der für die Faser charakteristischen, entlang der Längsachse geführten Oberflächenstruktur sowie dem messbaren Durchmesser (7 µm). Deutlich zu erkennen ist die senkrecht zur Längsachse verlaufende Bruchkante, die das beschriebene Bruchverhalten verdeutlicht.

Es ist dennoch nicht ausgeschlossen, dass Fasern in Längsrichtung aufbrechen, doch ist dies in der Tendenz selten zu beobachten.

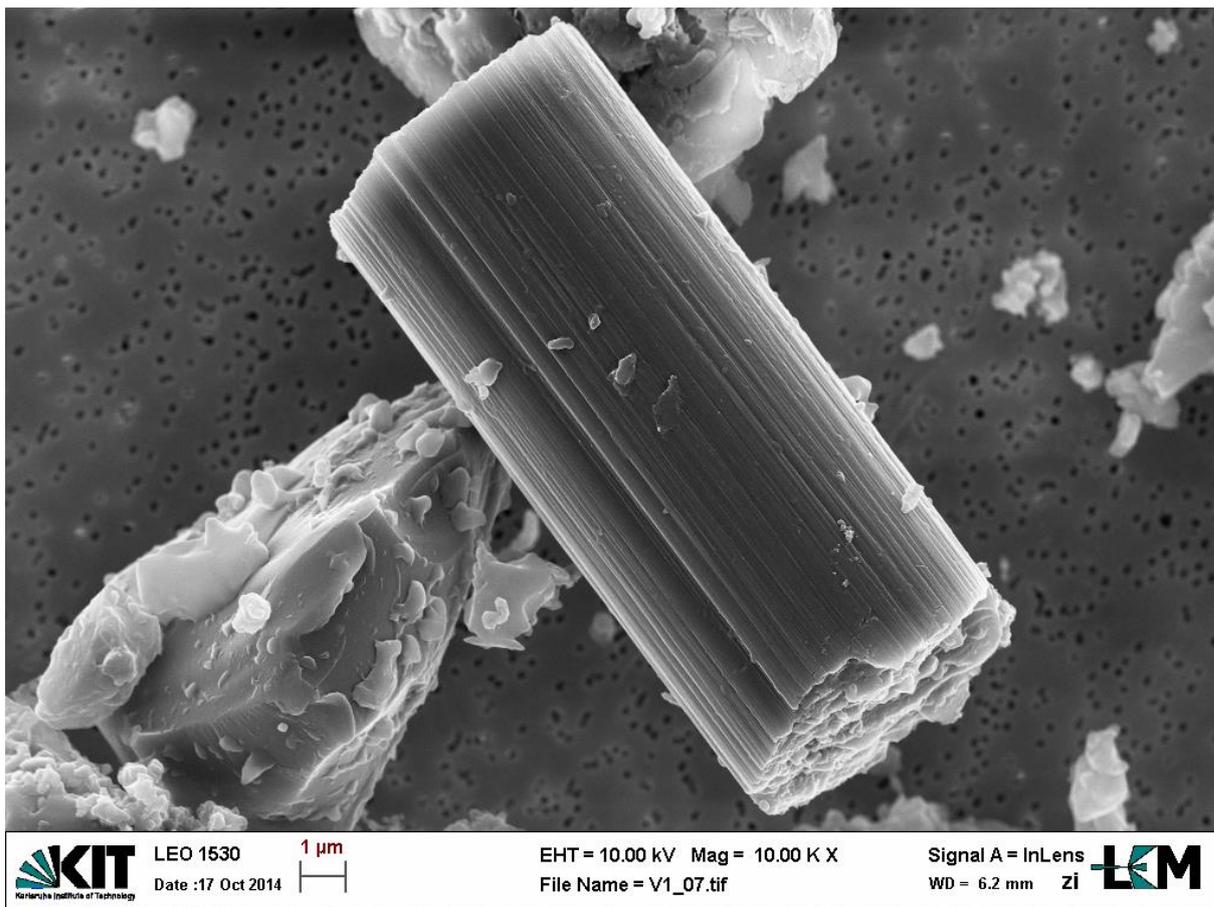


Abbildung 10 Rasterelektronische Untersuchung des beprobten Filters; Versuch Trennschleifer

Bei der Herstellung von CFK-Bauteilen wird, wie in der Einleitung bereits erwähnt, einem mehrlagigen CFK-Gewebe, in einem zweiteiligen Werkzeug unter Druck Harz injiziert. Werden aus der Matrix Bruchstücke der Fasern herausgebrochen, so werden der Faserform folgende, konvexe, aus Harz bestehende Zwickelstücke freigelegt. In Abbildung 11 sind beispielhaft konvexe Abdrücke von CFK-Fasern in der Matrix zu erkennen.

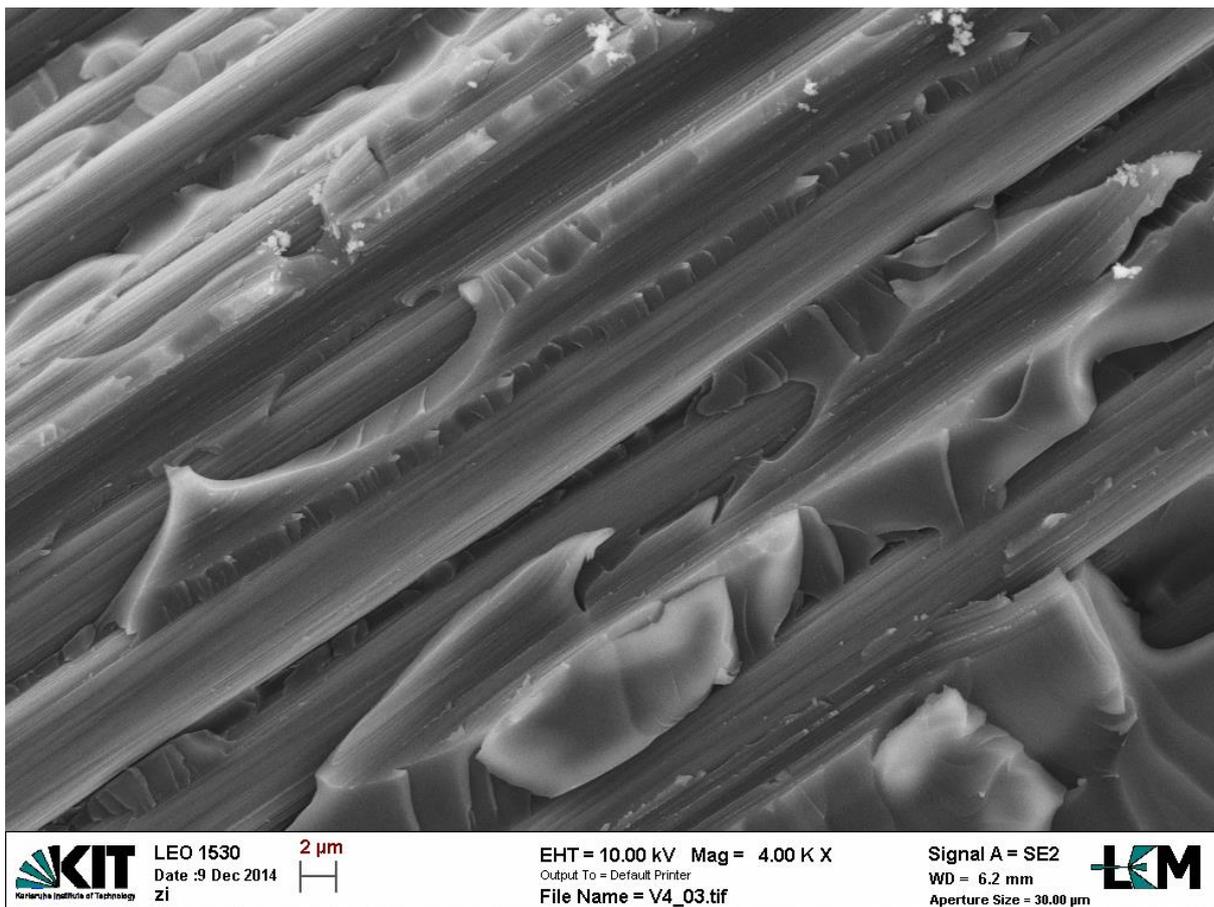


Abbildung 11 Rasterelektronische Untersuchung eines Bruchstückes; Probenahme mit einem Klebestreifen; Versuch Kombischere

Werden die Zwickelstücke herausgebrochen, so sind diese aufgrund ihrer länglichen, dünnen Form in der Lage, kritische Fasern zu erzeugen.

In Abbildung 12 ist ein Bruchstück zu erkennen, welches die kritischen Abmessungen besitzt. Mutmaßlich handelt es sich dabei um ein Harzbruchstück. Indizien dafür sind die zuvor angesprochene konvexe Form sowie die charakteristischen parallelen Einkerbungen. Es könnte sich daher um ein solches Zwickelstück handeln.

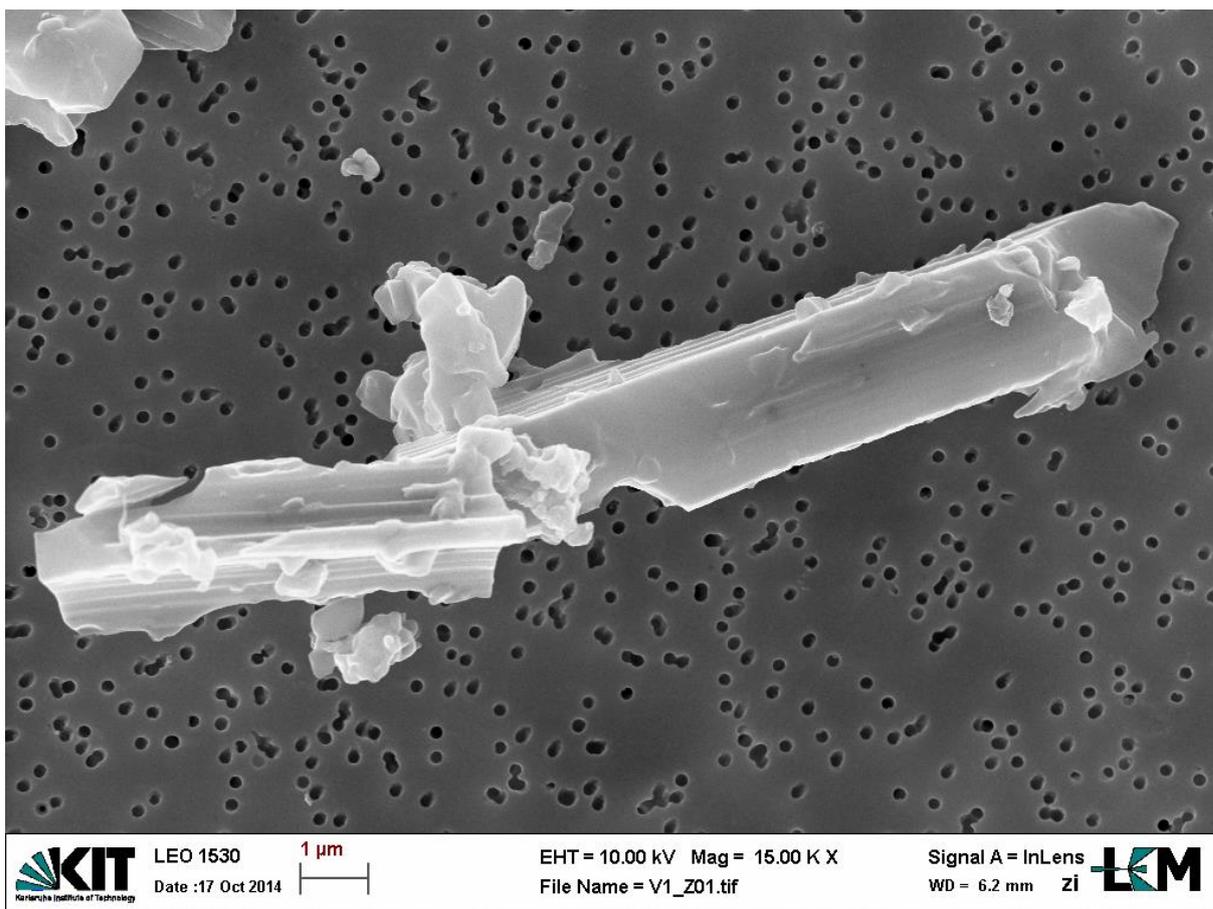


Abbildung 12 Rasterelektronische Untersuchung des beprobten Filters; Versuch Trennschleifer

Die qualitative Erfassung ([9], [10], [11] und [12]) kritischer Fasern zeigte ein Trennverfahren spezifisches Freisetzungspotential. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 zusammengestellt. Neben dem Messwert wird der obere 95 %-Vertrauensbereich dargestellt, welcher über die Poisson-Statistik bestimmt werden kann. Im Hintergrund sind die Expositionskategorien 1 (gelb), 2 (orange) und 3 (rot) farblich hinterlegt, auf die im Weiteren (Kapitel 3) näher eingegangen wird.

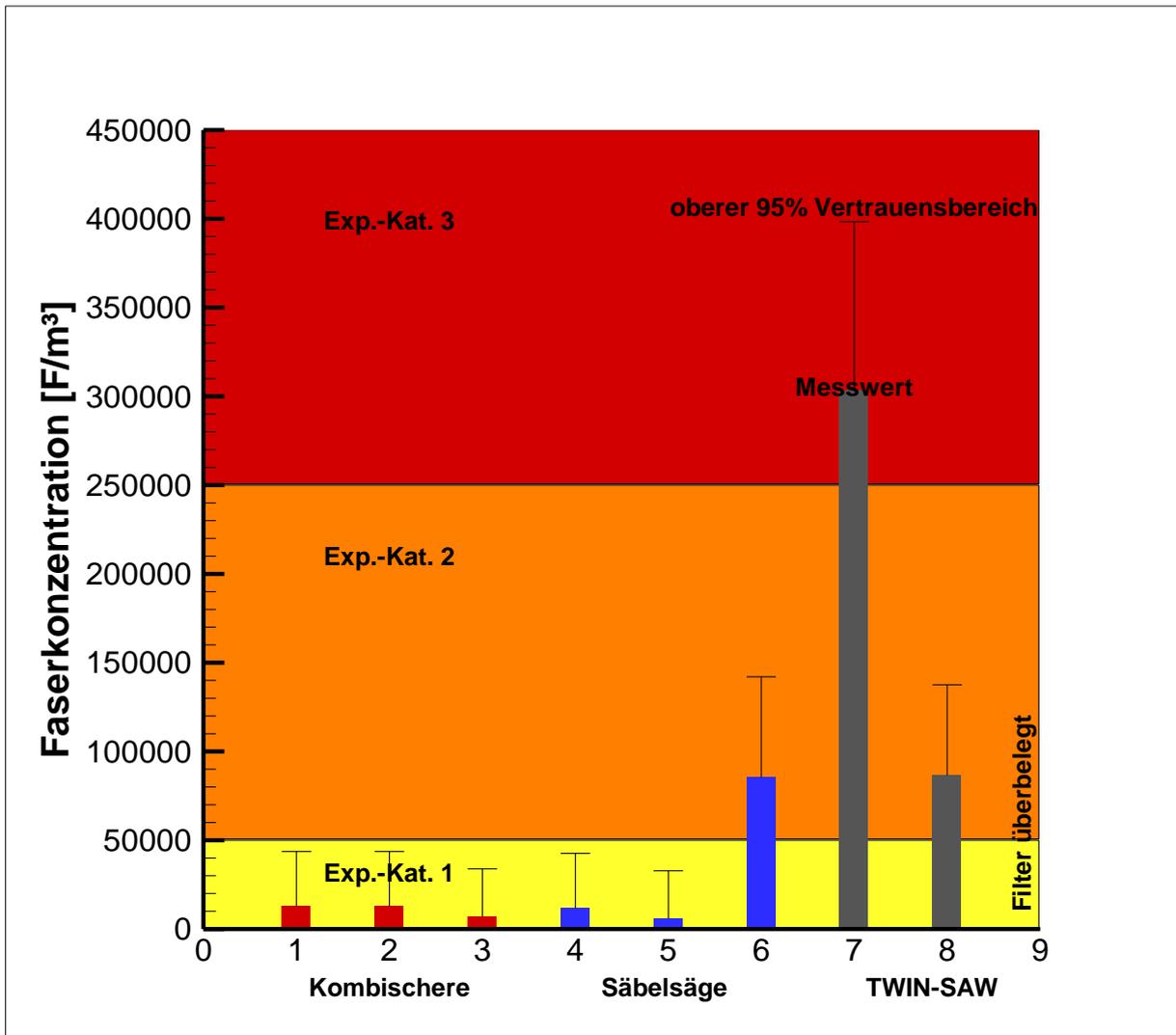


Abbildung 13 Ergebnisse der Filterauswertung nach DGUV-Information 213-546 für neun Versuche, 1-3 Kombischere, 4-6 Säbelsäge, 7-9 TwinSaw®

Für die Kombischere liegen alle drei Werte in derselben Größenordnung. Bei der Säbelsäge und der TwinSaw® sind hingegen Abweichungen feststellbar.

Diese Abweichungen können durch dem Verfahren systemimmanente Messunsicherheiten erklärt werden, wie z. B. der Präparation und dem Hantieren mit den belegten Filtern oder auch durch unterschiedliche Randbedingungen in der Versuchsdurchführung, wie z. B. Position der Pumpe im Versuchsraum oder unterschiedliche Schnittlänge bis hin zu Schwankungen bei der Probekörperbeschaffenheit.

Bei der TwinSaw® war ein Filter so stark mit Partikeln belegt, dass eine Auswertung mit dem zuvor vorgestellten Verfahren nicht möglich war.

3 Schutzmaßnahmen

In erster Betrachtung wurden vergleichend die einschlägigen Richtlinien und Verordnungen für den Arbeitsschutz herangezogen, um Schutzmaßnahmen abzuleiten.

Die TRGS 521³ [42] enthält generell anzuwendende Schutzmaßnahmen für den Umgang mit als krebserzeugend anzusehenden (K2) und potenziell krebserzeugenden (K3) Faserstäuben. Die Einstufung erfolgt in die einzelnen Stufen bzw. Kategorien (K1 bis K3) auf Grundlage des Anhanges IV der EG-Richtlinie 67/548/EWG gemäß [13].

K1	Stoffe, die auf den Menschen bekanntermaßen krebserzeugend wirken. Der Kausalzusammenhang zwischen der Exposition eines Menschen gegenüber dem Stoff und der Entstehung ist ausreichend nachgewiesen
K2	Stoffe, die als krebserzeugend für den Menschen angesehen werden sollten. Es bestehen hinreichende Anhaltspunkte zu der Annahme, dass die Exposition eines Menschen gegenüber dem Stoff Krebs erzeugen kann
K3	Stoffe, die wegen möglicher krebserregender Wirkung beim Menschen Anlass zur Besorgnis geben, über die jedoch ungenügend Informationen für eine befriedigende Beurteilung vorliegen. Aus geeigneten Tierversuchen liegen einige Anhaltspunkte vor, die jedoch nicht ausreichen um einen Stoff in Kategorie 2 einzustufen

Tabelle 2 Erläuterung der Kategorien (K1-K3) nach [13]

Kohlenstofffasern, deren Durchmesser kleiner drei Mikrometer ist, werden als sonstige anorganische Faserstäube den potentiell krebserzeugenden (K3) Faserstäuben zugeordnet. Hier ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass Kohlenstofffasern (bei üblichen Durchmessern größer drei Mikrometer) in ihrem Ausgangszustand, nach derzeitigem Stand nicht als gefährlicher Stoff im Sinne der einschlägigen Richtlinien zu betrachten sind.

Werden Maßnahmen entsprechend TRGS 521, in der jeweiligen Schutzstufe erfüllt, genügen diese den Forderungen aus der Gefahrstoffverordnung [11].

³ Technische Regeln für Gefahrstoffe 521: Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle

Daher wird im Weiteren auf den technischen Regeln aufgebaut, die entsprechend expositionsabhängige Schutzmaßnahmen definieren.

Die TRGS 521 definiert drei Expositionskategorien nach Tabelle 3, die hinsichtlich ihrer Faserkonzentration unterschieden werden.

Expositionskategorie 1	< 50 000 Fasern ⁴ /m ³
Expositionskategorie 2	50 000 Fasern ⁴ /m ³ bis 250 000 Fasern/m ³
Expositionskategorie 3	> 250 000 Fasern ⁴ /m ³

Tabelle 3 Expositionskategorien nach TRGS 521 [14]

Die gezeigte Einstufung nach Tabelle 3 sowie die Schutzmaßnahmen nach Tabelle 4 sind auch in der DGUV Information „Bearbeiten von CFK-Materialien“ [15] zu finden.

Schutzmaßnahmen des Arbeitsschutzes, die bei einer Exposition von Personen vorzusehen sind, werden in der Regel gestaffelt. So sind bei geringen Expositionen zunächst Grundmaßnahmen (Expositionskategorie 1) vorzusehen. Bei erhöhten Expositionen werden zusätzliche Maßnahmen vorgeschrieben, die eine präventive Wirkung haben sollen, in dem der Arbeitgeber den Beschäftigten die Möglichkeiten bietet, sich zu schützen und mögliche Maßnahmen zur Verfügung stellt (Expositionskategorie 2). Bei hohen Expositionen (Expositionskategorie 3) ist der Schutz zwingend erforderlich und der Umfang der Schutzmaßnahmen liegt auf höherem Niveau. Im Falle der TRGS 521 bedeutet dies unter anderem Atemschutz und Schutzanzug. In Tabelle 4 sind in Abhängigkeit der Expositionskategorie Schutzmaßnahmen auszugsweise aufgeführt.

⁴ Fasern oder Faserstäube im Sinne der TRGS 521 sind künstliche (an-) organische Mineralfasern die der Definition der WHO genügen

Tabelle 4 Schutzmaßnahmen (Auszug) nach TRGS 521 [14] in Abhängigkeit der Expositionskategorie

Expositionskategorie 1	Expositionskategorie 2	Expositionskategorie 3
		<ul style="list-style-type: none"> • Grundschutzmaßnahmen nach § 8 GefStoffV und TRGS 500 • Material darf nicht geworfen werden • Anfallende Staubablagerungen nicht mit Druckluft abblasen, sondern Industriestaubsauger benutzen • Abfälle möglichst staubdicht verpacken • Schutzhandschuhe aus Leder oder nitrilbeschichtete Baumwollhandschuhe
X	<ul style="list-style-type: none"> • Auf Wunsch der Beschäftigten Schutzbrille und Atemschutz zur Verfügung stellen • Anzahl exponierter Pers. auf Minimum beschränken • Waschgelegenheit vorsehen • Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung anbieten 	
X	X	<ul style="list-style-type: none"> • PSA Atemschutz Halbmasken mit FFP2 oder Filtergeräte TM 1P • Schutzbrillen (Überkopfarbeiten) • Atmungsaktiver Schutzanzug Typ 5

Für die Einstufung in die Expositionskategorie wird hier grundsätzlich der Wert des 95%-Vertrauensbereichs herangezogen.

Im Falle der Kombischere liegen alle drei Werte in der Expositionskategorie 1.

Die Säbelsäge liegt mit zwei Werten in der Expositionskategorie 1 und ein Wert liegt in der Expositionskategorie 2.

Lediglich die Bearbeitung mit der TwinSaw® lag bei einer Messung in der Expositionskategorie 3.

Neben der Einhaltung faserspezifischer Expositionsgrenzwerte muss der Allgemeine Staubgrenzwert (ASGW) eingehalten werden [11]. Dieser beträgt nach TRGS 900⁵ [16] für die alveolengängige Fraktion (A-Fraktion) 1,25 mg/m³ und für die einatembare Fraktion (E-Fraktion) 10 mg/m³. Die Staubbeladung der Luft wurde in den gezeigten Versuchen nicht untersucht.

⁵ Technische Regeln für Gefahrstoffe 900: Arbeitsplatzgrenzwerte

4 Diskussion

Es wurden CFK-Bauteile modellhaft mit einem Propanbrenner thermischer Belastung ausgesetzt. Das für CFK-Bauteile typische und auf die höher thermische Stabilität der Kohlenstofffasern gegenüber der Harzmatrix zurückzuführende Abbrandverhalten wurde beobachtet.

Der thermische Abbau von Kohlenstofffasern lässt sich auf Oxidationsprozesse zurückführen. Die beobachtete thermische Stabilität kann daher auch aus einem zu geringen Sauerstoffangebot auf der Oberfläche der Fasern herrühren.

Eine quantitative Untersuchung der Faserfreisetzungen kritischer Fasern war nicht möglich, so dass auf Untersuchungen der Bundeswehr zu verweisen ist [17]. Dabei wurden bei einem Abbrand von CFK-Bauteilen unter Zuhilfenahme von Kerosin personenbezogene Expositionsmessungen durchgeführt. Die dabei entstandene Faserbelastung wird mit 90 000 Fasern/m³ angegeben.

Es sind qualitative auf thermisch induzierte Abbaureaktionen auf der Faseroberfläche zurückzuführende Reduzierungen des Fasermaterials erkennbar, welche eine Reduktion des Faserdurchmessers verursachen.

Die gezeigten Versuche zur mechanischen Beanspruchung von CFK-Bauteilen können herangezogen werden, um die Emissionen kritischer Fasern während der Bearbeitung abzuschätzen. Eine reale Exposition von Personen kann hiervon deutlich verschieden sein. So sind Personen in der Regel nicht zwei Stunden (Probenahmedauer) im exponierten Bereich tätig. Des Weiteren können Umwelteinflüsse wie Winde, die zu einem Luftaustausch der Umgebungsluft führen, die Faserkonzentration in der Luft beeinflussen. Der Luftaustausch in den durchgeführten Untersuchungen war aufgrund des geschlossenen Versuchsraumes nicht vorhanden. Grundsätzlich waren alle verwendeten Werkzeuge geeignet, um die Probestücke zu bearbeiten. Die geometrische Struktur eines realen Bauteils, wie z. B. die Säule der Fahrzeugkarosserie kann, durchaus zu Schwierigkeiten führen, sodass hier eine abschließende Bewertung nicht durchgeführt werden kann.

Zur Einschätzung der Toxikologie von Fasern, sind die Faserabmessungen (WHO-Kriterien), die Faserbeständigkeit oder Biopersistenz der Faser im Zielorgan sowie die Dosis entscheidend. Die Einstufung der Kohlenstofffaser als potenziell krebserzeugend (K3) (s. o.) ist auf die unklare Biopersistenz der Faser im Körper

zurückzuführen. Eine abschließende Beurteilung der Biopersistenz ist daher durchzuführen.

Die gemessenen Freisetzungen kritischer Fasern sollte im Kontext einer kurzzeitigen Exposition, wie Sie in einem typischen Feuerwehreinsatz anzunehmen ist, bewertet werden. Die Wirkung von kritischen Kohlenstofffasern ist unter Annahme einer gleichen Biopersistenz (bisher noch nicht erwiesen) vermutlich dieselbe, wie sie durch „alte Mineralwolle“ erzeugt wird.

„Alte Mineralwolle“ muss von „neuer Mineralwolle“ aufgrund der unterschiedlichen Biopersistenz unterschieden werden. Untersuchungen zeigten, dass die Biopersistenz beschrieben mit der Halbwertszeit, „Alte Mineralwolle“ eine Biopersistenz von einigen hundert Tagen, „neue Mineralwolle“ eine Halbwertszeit von weniger als 40 Tagen aufweist [18].

„Alte Mineralwolle“ kann Faserstäube freisetzen, die als krebserzeugend eingestuft werden müssen. Bei Mineralwolle, die vor 1996 eingebaut wurde, ist davon auszugehen, dass alte Mineralwolle eingesetzt wurde [18]. Unter dem Begriff „alte Mineralwolle“ werden dabei alle biopersistenten künstlichen Mineralfasern zusammengefasst [14].

Gemäß des Zensus 2011 [19] gibt es in der Bundesrepublik Deutschland ca. 19 Millionen Gebäude mit Wohnraum, wovon ca. 15,7 Millionen (82 Prozent) vor 1996 erbaut wurden. Dabei sind Bausanierungen wie auch Nicht-Wohngebäude nicht berücksichtigt. Es kann des Weiteren nicht unterstellt werden, dass in allen Gebäuden alte Mineralwolle verwendet wurde. Das Risiko, während eines Feuerwehreinsatzes mit alter Mineralwolle in Verbindung zu kommen, ist dennoch durchaus gegeben. Entsprechend der Einteilung der Tätigkeiten in Expositionskategorien (vgl. Tabelle 3) können die folgenden Tätigkeiten mit alter Mineralwolle zu den Expositionskategorien zugeordnet werden. Die Zuordnung entstammt dem Bereich der Bauwirtschaft.

Tabelle 5 Zuordnung ausgewählter Tätigkeiten zu Expositionskategorien nach [18]

Arbeiten an Außenwänden, geneigten Dächern oder Flachdächern <ul style="list-style-type: none"> • ohne Demontage des Dämmstoffes • mit Demontage des Dämmstoffes (größer 20 m²) 	E1 E2
Arbeiten an Wärmedämmverbundsystemen oder vergleichbaren Systemen <ul style="list-style-type: none"> • mit Demontage des Dämmstoffes (größer 20 m²) 	E2

Vergleicht man die Expositionskategorien, so ist zu erkennen, dass bei großflächiger Demontage alter Mineralwolle ein höheres bzw. ein ähnliches Expositionsniveau zu erwarten ist, wie sie beispielsweise beim Bearbeiten der gezeigten CFK-Probestücke auftreten. Die Wahrscheinlichkeit, dass Feuerwehreinsatzkräfte mit alter Mineralwolle im Einsatzfall hantieren müssen ist (derzeit) aufgrund der geringen Verbreitung von CFK-Bauteilen ungleich höher einzuschätzen.

Die Regelungen nach TRGS 521 gelten nach [20] nicht für den Feuerwehreinsatz. Die Vorhaltung der entsprechenden Schutzmaßnahmen Atemschutz (P2 bzw. FFP2), Schutzbrille (partikeldicht) und Schutzhandschuhe ist dennoch empfehlenswert.

Eine zwingende Vorgabe der genannten Schutzmaßnahme im Falle der mechanischen Bearbeitung von CFK-Werkstoffen erfordert eine weitergehende Betrachtung unter Ermittlung der realen Exposition.

5 Ausblick

Die in den Untersuchungen verwendete Beflammungsmethode mit einem Injektorbrenner hat sich als nicht geeignet herausgestellt, um die temperaturabhängige Durchmesserreduktion von Fasern bei hohen Temperaturen zu untersuchen. Für solche Untersuchungen müsste eine andere Versuchsdurchführung gewählt werden. Bei weiteren Untersuchungen der thermischen Stabilität der Kohlenstofffasern sollte eine Beflammungsmethode verwendet werden, die eine gute Belüftung der Probe sicherstellt, um den kritischsten Fall im Hinblick auf eine höhere thermische Belastung abzubilden.

Für die Klärung der Frage der Biopersistenz von Kohlenstofffasern sind weitere toxikologische Untersuchungen erforderlich, um die Einstufung der Fasern hinsichtlich einer krebserregenden Wirkung klären zu können.

Um eine tatsächliche Exposition von Personen zu ermitteln, sollte in einem realen Szenario die Exposition personenbezogen ermittelt werden. Hierfür könnten z. B. Übungen zur technischen Hilfeleistung „Verkehrsunfall der Feuerwehr“ messtechnisch begleitet werden. Hierbei kann grundsätzlich die Belastung von Feuerwehreinsatzkräften abgeschätzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Toho Tenax Europe GmbH, „Produktprogramm und Eigenschaften für Tenax HTA Filamentgarn,“ Wuppertal, 04/2011.
- [2] AKV-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Handbuch Faserverbundkunststoffe, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.
- [3] B. Miguletz, „Diplomarbeit-Schnelle Ermittlung des Gefahrstofffreisetzungspotenzials beim Abbrand von CFK,“ Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg, Nürnberg, September 2010.
- [4] S. Feih und A. Mouritz, „Tensile Properties of Carbon Fibres and Carbon Fibre-polymer composites in Fires,“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 43, Nr. 5, pp. 765-772, 2012.
- [5] Normenausschuss Materialprüfung (NMP), „DIN 51622-Flüssiggase Propan, Propen, Butan, Buten und deren Gemische-Anforderungen,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 1985.
- [6] Normenausschuss Kommission Reinhaltung der Luft, „VDI 2066 Blatt 1- Messen von Partikeln Staubmessung in strömenden Gasen,“ Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, November 2006.
- [7] Fachausschuss Chemie, „BGI 505-46 Krebserzeugende Arbeitsstoffe-Anerkannte Analyseverfahren,“ Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin, April 2004.
- [8] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „UmweltWissen - Künstliche Mineralfasern,“ Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2008.
- [9] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „Analysebericht 2015 2004,“ Sankt Augustin, September 2015.
- [10] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „Analysebericht 2015 2250,“ Sankt Augustin, Oktober 2015.

- [11] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „Analysebericht 2016 1358,“ Sankt Augustin, August 2016.
- [12] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „Analysebericht 2016 42,“ Sankt Augustin, Februar 2016.
- [13] H. Blome, „BG/BGIA-Report Arbeitsschutzlösungen für ausgewählte Stoffe und Verfahren,“ Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) und Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz-BGIA, Sankt Augustin, 2006.
- [14] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), „Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 521 - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle,“ BauA, 2008.
- [15] DGUV Fachbereich Holz und Metall, „DGUV-Information Bearbeitung von CFK Materialien Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen bei der Bearbeitung von CFK Materialien,“ Fachbereich Holz und Metall der DGUV, Mainz, 2014.
- [16] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), „Technische Regeln für Gefahrstoffe 900- Arbeitsplatzgrenzwerte,“ Januar 2006 zuletzt geändert 2014.
- [17] S. Eibl und N. Scholz, „Besondere Gefährdung beim Abbrand von Carbon-Kunststoffasern,“ *BRANDSchutz*, pp. 423-427, 06 2014.
- [18] BG Bau Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, „Umgang mit Mineralwolle-Dämmstoffen (Glaswolle, Steinwolle),“ Fachverband Mineralwolleindustrie e.V. et. al., 04/2015.
- [19] Destatis Statistisches Bundesamt, „Zensus 2011 Gebäude und Wohnungen Bundesrepublik Deutschland am 9. Mai 2011,“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Mai 2013.
- [20] Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, „Staub-Gefährdung und Schutzmaßnahmen,“ in *Tagung der freiwilligen Feuerwehren*, Bergneustadt, November 2016.
- [21] T. Neumeyer, „Leichter in der Luft, im Wind und auf der Straße,“ *Kunststoffe*, Nr. 11, pp. 72-77, 2012.
- [22] General Flugsicherheit in der Bundeswehr, *Tagungsunterlagen- Neue Gefahren*

und deren Begegnung "Fiese Fasern" Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe CFK,
Köln, 2013.

- [23] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), „Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 519 - Asbest Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten,“ BAuA, 2014.
- [24] K. Langeheinecke, P. Jany und G. Thieleke, Thermodynamik für Ingenieure, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2012.
- [25] M. König, K. Sedlbauer und E. Böhm, „GB 121/1995-Technische Maßnahmen zur Verminderung der Risiken durch künstliche Mineralfasern (KMF) sowie Anforderungen an mögliche Alternativen,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1998.

Anhang Verzeichnis

A1. Temperaturen bei der thermischen Beaufschlagung.....	31
---	-----------

A1. Temperaturen bei der thermischen Beaufschlagung

Bei den Versuchen wurden folgende drei Mantelthermoelemente (T1-3) vom Typ K (Nickel-Chrom/ Nickel) und mit einer Ummantelung aus Inconel® mit einer Dicke von 1,5 mm an der jeweiligen Probe angebracht.

Bevor die gemessenen Temperaturen nach Abbildung 16 betrachtet werden, sollen die Unsicherheiten bzw. Ungenauigkeiten bei Temperaturmessung in der vorliegenden Anordnung diskutiert werden.

Bei Mantelthermoelementen werden, wie beispielhaft in Abbildung 14 dargestellt, zwei unterschiedliche Materialien bzw. Legierungen (hier: Nickel-Chrom und Nickel) an einem Punkt verschweißt. Eine Temperaturänderung der Schweißperle bewirkt eine Spannung (Thermospannung), die eine Aussage über die Schweißperlentemperatur zulässt. Für die Änderung der Schweißperlentemperatur sind hauptsächlich die üblichen thermischen Wärmeübertragungsphänomene Leitung, Konvektion und Strahlung verantwortlich.

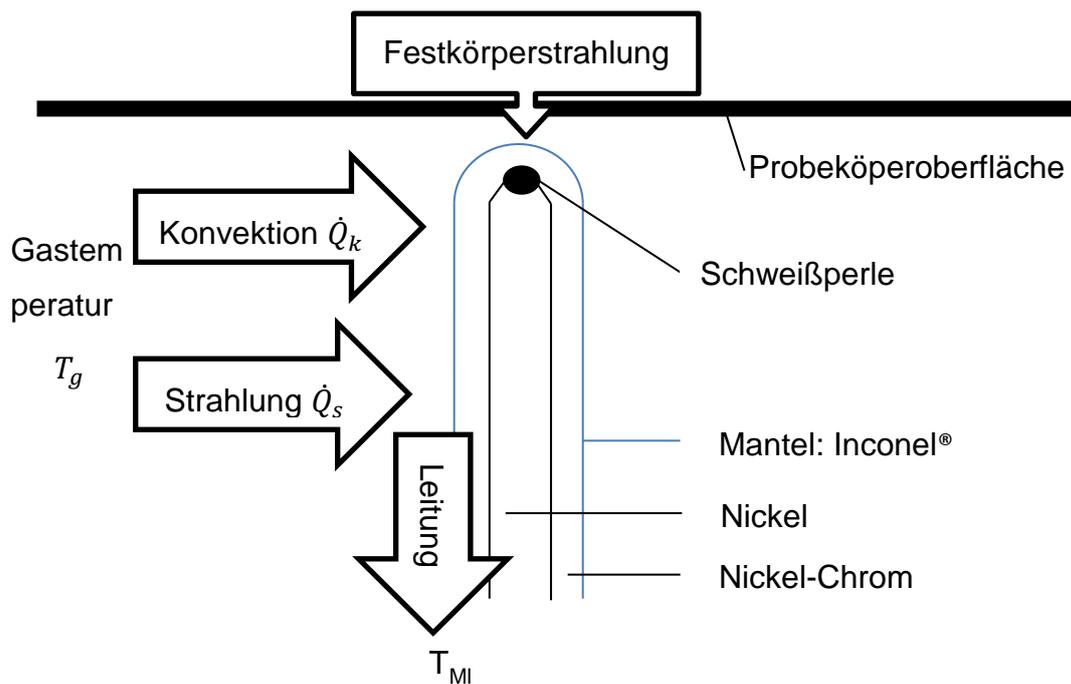


Abbildung 14 Schematische Darstellung der Wärmeströme eines Mantelthermoelements vom Typ K mit Inconel® Mantel in der verwendeten Versuchsanordnung (T_1)

Messungen mit einem Thermoelement Typ S in der Flamme (nicht in Bauteilnähe) lieferten einen Messwert von ca. 1 400 °C welcher als realistisch für die Temperatur innerhalb der Flamme zu betrachten ist.

Die Bilanzierung der Wärmeströme durch die in Abbildung 14 gezeigten Wärmeübertragungsphänomene ist aufgrund einer Vielzahl unbekannter Größen extrem schwierig, so dass hier die tatsächlich gemessenen Temperaturen nur als Tendenzen verstanden werden können.

In der Versuchsanordnung, wie sie in Abbildung 15 dargestellt ist, kamen folgende Thermoelemente zum Einsatz.

- T1: Probenoberfläche beflamnte Seite
- T2: Probenoberfläche Rückseite (nicht beflamnte Seite)
- T3: Mitte Absaugrohr Höhe Probenentnahme

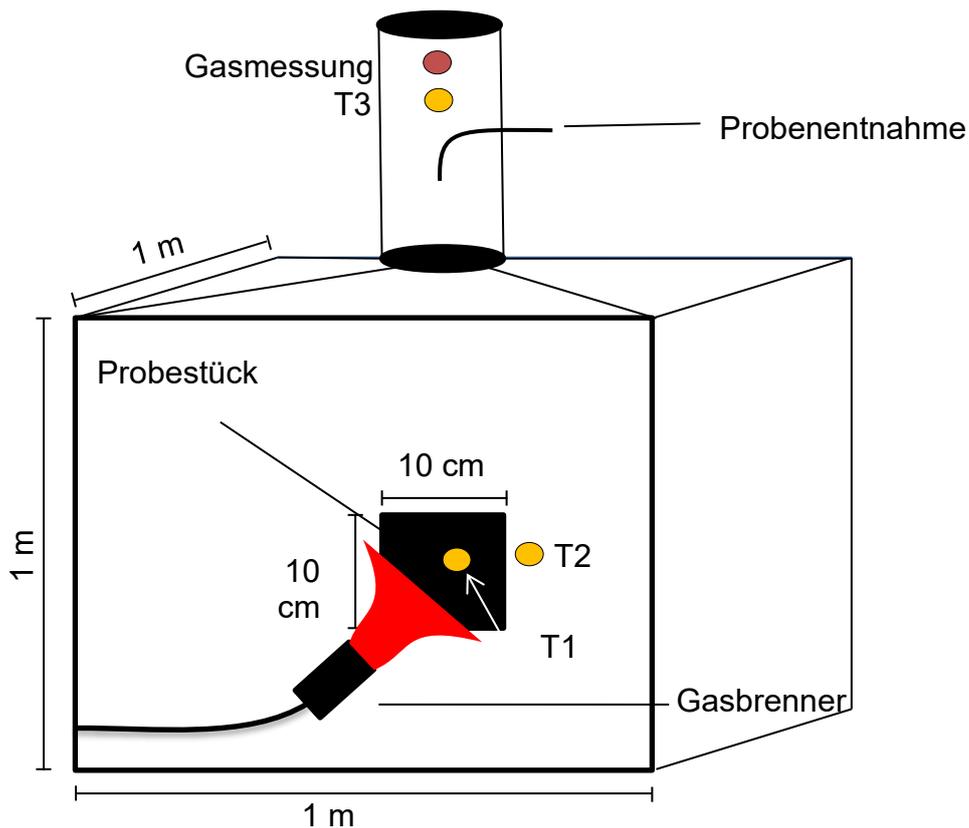


Abbildung 15 Skizze Versuchsstand: thermische Einwirkung mit Temperaturmessstellen

Die gemessenen Temperaturverläufe an den jeweiligen Messstellen werden in Abbildung 16 (bzw. Abbildung 5) dargestellt.

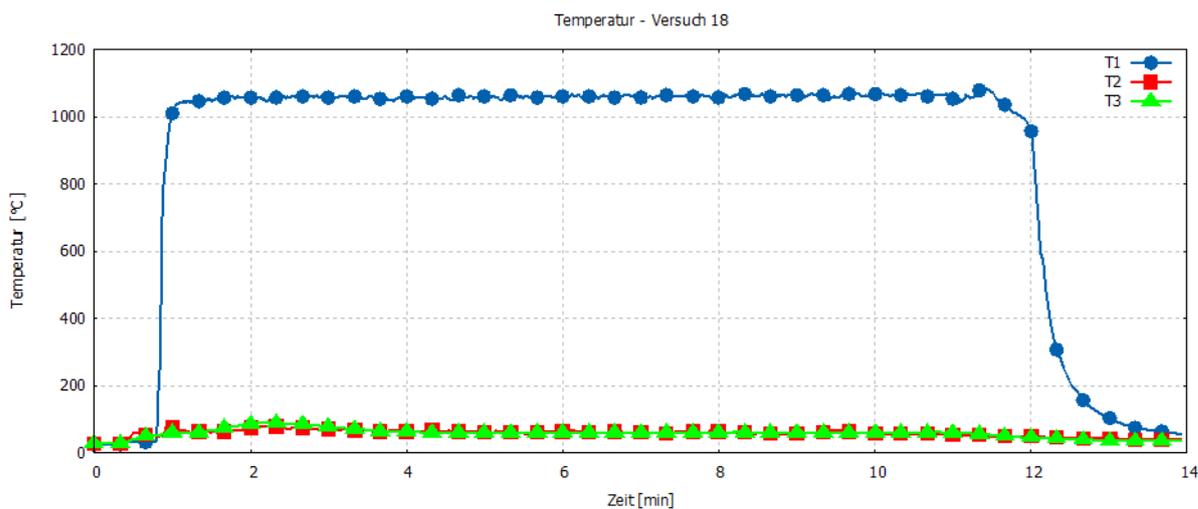


Abbildung 16 Versuch 18: Temperaturverläufe bei der thermischen Beaufschlagung von CFK-Bauteilen

Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Einflüsse und der daraus resultierenden messtechnischen Ungenauigkeiten kann von einer deutlich abweichenden realen Gastemperatur in Bauteilnähe ausgegangen werden.

H i n w e i s

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

<https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/forschung-idf/publikationen/imk-berichte/>

eingesehen werden.