

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

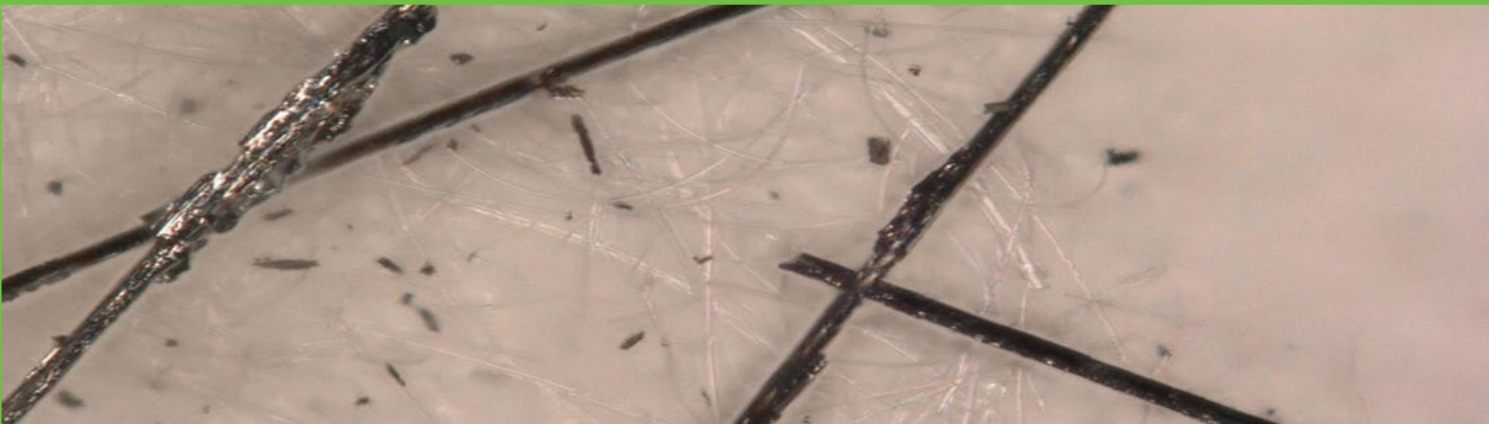
NanoCare
FK03XP0195



CFC – Carbon Fibre Cycle

Carbonfasern im Kreislauf – Freisetzungsverhalten und Toxizität bei
thermischer und mechanischer Behandlung

Poster-Abstracts



Übersicht der Poster

Nr.	Poster	Seite
P1	<p>Die DaNa Wissensplattform Materialsicherheit Katja Nau, Dana Kühnel, Harald F. Krug, Clarissa Marquardt, Andreas Mattern, Nadja Möller, Christoph Steinbach</p> <p>Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI)</p>	3
P2	<p>Design für Recycling von Carbonfasern: Solvolysese stabile Schichten für verbesserte Haftung und Verarbeitbarkeit von rCF Oliver Deußen, Thomas Gries</p> <p>Institut für Textiltechnik, RWTH Aachen</p>	4
P3	<p>Bestimmung des Einflusses von Materialstruktur und Schlichte auf das Zerkleinerungsverhalten von Carbon Fasern Jonathan Mahl, Manuela Wexler, Manuela Hauser, Werner Baumann, Dieter Stapf</p> <p>Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie (ITC)</p>	5
P4	<p>Thermische Entsorgung von Carbonfasern – Grundlagenuntersuchungen und Verwertungspotential Jonathan Mahl, Manuela Wexler, Manuela Hauser, Werner Baumann, Hans- Joachim Gehrman, Daniela Merz, Dieter Stapf</p> <p>Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie (ITC)</p>	6
P5	<p>Ganzheitliches CFK-Recycling mittels Pyrolyse Niels Ellermann, Johannes Guth</p> <p>Pyrum Innovations AG, Dillingen/Saar</p>	7

- P6 **CarboBreak - Conditions and mechanisms for releasing alveolar fibrous carbon fibre fragments** 8
 Anne Große¹, Romy Naumann¹, Marcel Hofmann¹, Dominic Kehren², Daphne Bäger², Sabine Plitzko²
¹Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI), Chemnitz 09125, Germany
²Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Berlin 10317, Germany
- P7 **MC4 - Multi-level Circular Process Chain for Carbon and Glass Fibre Composites** 9
 Romy Naumann, Marcel Hofmann, Anna Große, Johannes Leis
 Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI), Chemnitz 09125, Germany
- P8 **Nachhaltiger Fliegen durch Recycling- und Re-Use-Optionen -EcoFloor** 10
 Rebecca Emmerich
 RWTH Aachen, Institut für Textiltechnik
- P9 **Toxikologische Untersuchungen von Lungen-Zellkulturmodellen nach Carbonfaser-Exposition an der Luft-Flüssigkeitsgrenzschicht** 11-12
 Susanne Fritsch-Decker¹, Alexandra Friesen², Silvia Diabaté¹, Mathias Hufnagel², Andrea Hartwig², Carsten Weiss¹
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
¹Institut für Biologische und Chemische Systeme–Biologische Informationsprozessierung (IBCS-BIP)
²Institut für Angewandte Biowissenschaften (IAB)
- P10 **Untersuchung stofflich-energetischer Verwertungsoptionen für carbonfaserhaltige Abfälle** 13
 Kai Schlögel
 RWTH Aachen, LuF Technologie der Energierohstoffe

Abstracts

P1- Die DaNa Wissensplattform Materialsicherheit

Katja Nau, Dana Kühnel, Harald F. Krug, Clarissa Marquardt, Andreas Mattern, Nadja Möller, Christoph Steinbach

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI)

In Zeiten gesellschaftlichen Wandels hat die Wissenschaft eine besondere Verantwortung, evidenzbasierte Lösungen für die drängenden Herausforderungen unserer Zeit, wie z.B. den Klimawandel oder die Digitalisierung, zu liefern. Zu diesen Aufgaben gehört auch die Wissenschaftskommunikation, die den Dialog mit der Öffentlichkeit intensiviert, aktuelle Debatten versachlicht und über die Herausforderungen und Chancen neuer wissenschaftlicher Entwicklungen aufklärt.

Seit mehr als 20 Jahren wird weltweit zu Sicherheit und Risiken von Nanomaterialien geforscht. Bereits 2009 wurde die deutsche Online-Wissensplattform www.nanopartikel.info etabliert, um wissenschaftliche Ergebnisse zur Sicherheit von Nanomaterialien frühzeitig und wertneutral mit der Öffentlichkeit zu teilen. 2020 wurde diese Informationsplattform um innovative Materialien erweitert, um das Verständnis und das Bewusstsein für die Sicherheit solcher Materialien frühestmöglich zu schärfen.

Die DaNa4.0-Wissensbasis Materialien bietet derzeit sicherheitsrelevante Informationen zu 30 innovativen Materialien, einschließlich Nanomaterialien, in Bezug auf menschliche Gesundheit und Umweltauswirkungen. Ein monatlicher Spotlight-Artikel über aktuelle wissenschaftliche Veröffentlichungen sowie zahlreiche Querschnittsartikel zu Themen wie innovative Materialien für die Umweltsanierung oder als Inhaltsstoffe in Medizinprodukten ergänzen dieses Portfolio. Social-Media-Kanäle (Twitter, LinkedIn) runden die Wissensplattform ab, um eine möglichst große Reichweite für die Verbreitung valider Informationen zu erzielen.

Das BMBF fördert diese Initiative in verschiedenen Forschungsprojekten seit 2009 (DaNa, DaNa2, DaNa4.0).

P2-Design für Recycling von Carbonfasern: Solvolysestabile Schichten für verbesserte Haftung und Verarbeitbarkeit von rCF

Oliver Deußen, Thomas Gries

Institut für Textiltechnik, RWTH Aachen

Recycling carbonfaserverstärkter Kunststoffe beschränkt sich derzeit hauptsächlich auf das Downcycling zu Kurzfasern. Besonders das steigende Interesse an Wasserstofftanks und deren Recycling ermöglicht jedoch, Carbonfasern als hochwertige Endlosfasern zurückzugewinnen. Ein solvolysebasierter Prozess erlaubt dabei zusätzlich ein Rezyklieren der Matrix. Ein Problem, das es jedoch zu lösen gilt, ist, dass die Recyclingfasern durch fehlende Oberflächenaktivierung eine geringere Anhaftung zur Matrix aufweisen, sowie die unbeschichteten Fasern durch das folgende Abwickeln Schaden erfahren.

Beides kann durch eine solvolysebeständige Schichte behoben werden: Beim hier vorgestellten Grafting wird das Schichtepolymer, statt wie im Stand der Technik über eine hydrolysierbare Sauerstoffbrücke, mit einer stabilen C-C-Bindung auf der Oberfläche verankert.

Das ITA wählt einen plasmabasierten Grafting-to-Ansatz, indem bereits polymerisierte Ketten auf die Oberfläche aufgegraftet werden. So werden Reaktionszeiten erreicht, die mit den Faserproduktionsgeschwindigkeiten vereinbar sind. In Vorversuchen wurden mittels eines radikalischen Prozesses mit Polybutadien als Schichtepolymer mehr als 80% der aufgetragenen Schichte immobilisiert und widerstanden einer Solvolyse.

P3-Bestimmung des Einflusses von Materialstruktur und Schlichte auf das Zerkleinerungsverhalten von Carbonfasern

Jonathan Mahl, Manuela Wexler, Manuela Hauser, Werner Baumann, Dieter Stapf

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie (ITC)

Mit der stetig steigenden Nachfrage nach Carbonfasern (CF) bzw. carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) steigt die Menge an zu verwertenden CFK-Abfällen an deren Lebensende. Essentiell für alle optionalen Verwertungsprozesse ist die homogene und reproduzierbare Zerkleinerung von CF sowie die Kenntnis zu Abhängigkeiten des Zerkleinerungsverhaltens von den Materialeigenschaften der CF.

Dazu wurden im Rahmen des Projektes CarbonFibreCycle (CFC) verschiedene CF auf Basis von Polyacrylnitril und Mesophasenpech in einer Planeten-Kugelmühle bei ausgewählten spezifischen Energieeinträgen unter Variation von Drehzahl und Behandlungsdauer zerkleinert und das Zerkleinerungsverhalten den mechanischen Fasereigenschaften gegenübergestellt. In einer weiteren Versuchsreihe wurden die gleichen CF vor der mechanischen Beanspruchung pyrolysiert, um den Einfluss der Schlichte auf das Zerkleinerungsverhalten der CF zu bestimmen.

Die Untersuchung der gemahlten CF erfolgte lichtmikroskopisch, für die Quantifizierung wurde eine kommerziell verfügbare Software verwendet. Hierzu wurde eine Auswerteroutine entwickelt und quantifiziert, die die automatische Auswertung von bis zu 15.000 Objekten pro Probe ermöglicht.

P4-Thermische Entsorgung von Carbonfasern – Grundlagenuntersuchungen und Verwertungspotential

Jonathan Mahl, Manuela Wexler, Manuela Hauser, Werner Baumann, Hans-Joachim Gehrman, Daniela Merz, Dieter Stapf

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie (ITC)

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden vermehrt in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, als auch zur Verstärkung von Rotorblättern in modernen Windenergieanlagen (WEA) genutzt. Aufgrund ihrer hohen mechanischen Stabilität bei geringer Dichte ist durch deren Einsatz eine Gewichtsreduktion von Bauteilen gegeben, was neue Leichtbauanwendungen ermöglicht und sowohl Material- als auch Energieressourcen während der Produktlebenszeit schont.

Dem gegenüber steht ein hoher Energiebedarf und damit verbunden hohe Kosten bei der Herstellung von Carbonfasern und CFK-Bauteilen sowie erhöhte Abfallströme, die einer Verwertung zuzuführen sind. Der bisher einzig kommerziell verfügbare Recyclingprozess für CFK ist die Pyrolyse, wobei rezyklierte Carbonfasern (rCF) gegenüber Neufasern häufig Qualitätsverluste aufweisen. Eine energetische Verwertung von CFK ist in Verbrennungsanlagen nach Stand der Technik nicht möglich, da ein Großteil der Fasern den Brennraum nahezu unbeschädigt verlässt und in die Rückstände gelangt.

Systematische Grundlagenuntersuchungen zum thermischen Verhalten von ausgewählten Carbonfasern sollen zur Entwicklung eines tragfähigen und nachhaltigen Verwertungskonzepts beitragen. Durch die Charakterisierung von Massen-, Struktur- und Oberflächenveränderungen bei der thermischen Beanspruchung können Zusammenhänge zwischen Fasermorphologie und Abbauverhalten identifiziert und geeignete Prozessparameter zur vollständigen Zersetzung von Carbonfasern ermittelt werden. Grundlagenuntersuchungen zur Substitution von fossilen Reduktionsmitteln in Stahlrecyclingprozessen wurden durchgeführt.

Ausgehend von diesen Ergebnissen werden großtechnische Hochtemperaturprozesse betrachtet, die potentiell zur Verwertung carbonfaserhaltiger Materialien geeignet sein können.

P5-Ganzheitliches CFK-Recycling mittels Pyrolyse

Niels Ellermann, Johannes Guth

Pyrum Innovations AG, Dillingen/Saar

Pyrum Innovations ist Teil des Konsortiums des vom BMWi geförderten Projektes „Infinity“, welches sich den Aufbau, die Etablierung und Darstellung eines nachhaltigen Verfahrenskreislaufs für Carbonfaser-Verbundmaterialien unter Einsatz neuartiger Recyclingtechnologien, -materialien und Verarbeitungsverfahren sowie die Substitutionen des Carbonfaserprimärmaterials durch neue hochwertige Recyclingmaterialien zur signifikanten CO₂-Reduktion und Energieeinsparung im Leichtbau zum Ziel gesetzt hat.

Pyrum hat eine Pilotanlage im Labormaßstab konzipiert und aufgebaut, um mit einem energieeffizienten und faserschonenden Verfahren qualitativ hochwertige rCF aus getrockneten CFK-Abfällen zu gewinnen. Angewendet wird ein zweistufiges Pyrolyseverfahren, das neben dem Carbonfaser-Recycling erstmals ein stoffliches Recycling des gewonnenen Pyrolyseöls ermöglicht, welches als Rohstoffsubstitut in der chemischen Industrie eingesetzt werden soll. Bei den Carbonfasern zielt das Verfahren auf eine möglichst vollständige Entfernung von oberflächlichen Koksablagerungen ab, welche infolge des Pyrolyseprozesses entstehen. Hierbei soll eine Beschädigung der Fasern und eine damit einhergehende Minderung der mechanischen Eigenschaften verhindert werden. Die dadurch gewonnenen und leistungsfähigen rCF können anteilig Neufasern ersetzen.

P8-Nachhaltiger Fliegen durch Recycling- und Re-Use-Optionen -EcoFloor

Rebecca Emmerich

RWTH Aachen, Institut für Textiltechnik

Angesichts des globalen Wettbewerbs und der Auswirkungen globaler Umweltveränderungen muss die Luft- und Raumfahrtindustrie auf steigende Anforderungen in Bezug auf Kosteneffizienz und Umweltverträglichkeit der hergestellten Produkte reagieren. Dazu werden in Flugzeugen zunehmend kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) verwendet. Während deren Herstellung und am Ende der Lebensdauer entsteht jedoch ein Abfallstrom, aus dem recycelte Kohlenstofffasern zurückgewonnen werden, mit hohen mechanischen Eigenschaften. Dennoch wurden diese Fasern bisher nicht für Strukturbauteile verwendet, was bedeutet, dass ihre verbleibenden hohen mechanischen Eigenschaften nicht ausreichend genutzt werden. Im Rahmen des EcoFloor-Projekts wird die Verwendung von recycelten Kohlenstofffasern (rCF) für umweltfreundliche, stoßfeste Bodenplatten für Zivilflugzeuge untersucht. Ziel ist es, den Verbrauch fossiler Rohstoffe und die CO₂-Emissionen während der Produktions- und Nutzungsphase zu reduzieren.

In den Schichten des Sandwichaufbaus werden dazu verschiedene Materialien verwendet, die insgesamt nachhaltiger sind als die zuvor eingesetzten Materialien. In der Deckschicht werden Halbzeuge aus rCF eingesetzt, gefolgt von einer Korkschicht, während der Kern aus einem thermoplastischen Schaum besteht. Die Halbzeuge der Deckschichten werden aus Gelegen aus rCF-Bändern sowie aus Geweben aus rCF-Garnen hergestellt. Als Harzsystem werden herkömmlich Phenolharze verwendet, um diese zu substituieren wird nach alternativen biobasierten Harzen gesucht. In Verbindung mit der Korkschicht weist das fertige Bauteil eine verbesserte Schlagfestigkeit und akustische Eigenschaften auf. Während der Entwicklung der Halbzeuge werden die Prozessparameter für die Herstellung neuer Strukturen und die Vakuuminfusion festgelegt, um die von der Luft- und Raumfahrtindustrie geforderte Qualität zu erreichen. Die identifizierten Ansätze werden im Hinblick auf Faktoren bewertet, die die Effizienz der Komponentenherstellung im Vergleich zu herkömmlichen Herstellungsprozess im Autoklav mit Wabenkern zu verbessern. Das ermittelte Verfahren wird für den Entwurf und die Validierung einer Demonstratorbodenplatte verwendet, der aus dem neuartigen Sandwich besteht. Darüber hinaus werden weitere Konzeptideen für das Bauteil, sowie mögliche Re-Use-Möglichkeiten erarbeitet. Die Konzepte, denen die höchste Relevanz zugeordnet wird, werden hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit und ökologischem Einfluss bewertet und verglichen. Im weiteren Schritt kann eine Optimierung hinsichtlich der identifizierten Schwachpunkte durchgeführt werden.

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 20E2101C im Rahmen der Ausschreibung für Luft- und Raumfahrtforschung und -technologie gefördert. Wir möchten uns auch bei allen Teilnehmern für ihre aktive Mitarbeit bedanken.

P9-Toxikologische Untersuchungen von Lungen-Zellkulturmodellen nach Carbonfaser-Exposition an der Luft-Flüssigkeitsgrenzschicht

Susanne Fritsch-Decker¹, Alexandra Friesen², Silvia Diabaté¹, Mathias Hufnagel², Andrea Hartwig², Carsten Weiss¹

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

¹Institut für Biologische und Chemische Systeme–Biologische Informationsprozessierung (IBCS-BIP)

²Institut für Angewandte Biowissenschaften (IAB)

Carbonfasern (CF) werden vermehrt produziert, folglich auch recycelt und entsorgt. Hierbei können Partikel und Fasern, die inhalations-toxikologisch relevant sind, freigesetzt werden. Trotz des verstärkten Einsatzes in der Industrie sind bis heute die toxikologischen Wirkungen der Fasern nach thermischer und mechanischer Beanspruchung bzw. deren Freisetzung noch unzulänglich untersucht.

Ziel der biologischen Arbeiten im Rahmen des Projektes CarbonFibreCycle (CFC) war die toxikologische Charakterisierung von Carbonfasern-Stäuben in humanen Zellkultursystemen, die relevant für die Lunge sind (Epithelzellen, Makrophagen, Fibroblasten). Die Exposition erfolgte in einem Air-Liquid Interface (ALI) System, welches die Situation in der Lunge nach Inhalation realistischer abbildet (1). Hierbei wurden die Zellkulturen im Gegensatz zur in vitro Standardmethode, der submersen Inkubation, nicht über das Nährmedium, sondern direkt an der Luft-Flüssigkeitsgrenzschicht mit Carbonfasern (CF), welche zuvor mechanisch (mCF) oder thermisch mechanisch (tmCF) behandelt wurden, exponiert.

Innerhalb des CFC-Projektes konnte ein bronchiales Zellkulturmodell mit humanen Epithelzellen, Makrophagen und Fibroblasten in Mono-, Ko- und Triplekultur am ALI etabliert werden (2, 3) und gegenüber mechanisch oder thermisch mechanisch behandelten CF-Aerosolen exponiert werden. Dabei wurde kein Effekt nach einer 1-stündigen ALI Exposition an der Expositionsanlage mit mechanisch vorbehandelten CF und einer Nachinkubation von bis zu 23 h sowohl in BEAS-2B Monokulturen in BEAS2B/dTHP-1 (Epithelzellen/Makrophagen) Kokulturen als auch in BEAS2B/dTHP-1/CCD-33 Triplekulturen (Epithelzellen/Makrophagen/Fibroblasten) auf die Zellvitalität festgestellt werden. Auch induzierte die Exposition mit mCF keine Reduktion der Gesamtzellzahl in Mono- und Kokulturen, vielmehr konnte innerhalb des untersuchten Nachinkubationszeitraums (1h+0h, 1h+3h und 1h+24h) Zellwachstum festgestellt werden. Weiter konnte in BEAS-2B Monokulturen keine signifikante Freisetzung des pro-inflammatorischen IL-8 nachgewiesen werden, während in Kokultur zusammen mit Makrophagen eine zeitabhängige Freisetzung des Zytokins im Vergleich zu entsprechenden Kontrollen detektiert wurde. Nach einer 1 h Exposition gegenüber mCF, gefolgt von einer 23 h Nachinkubation, war in der Triplekultur eine deutlich stärkere inflammatorische Reaktion auf Proteinebene durch die Sekretion von IL-8 zu verzeichnen.

Die 1h Exposition der Mono- und Kokulturen mit tmCF Aerosolen gefolgt von einer Nachinkubation bis zu 23 h zeigte keinen Einfluss auf die Membranintegrität. Allerdings wurde eine Reduktion der Gesamtzellzahl im Vergleich zu entsprechenden Reinluftkontrollen festgestellt. Ferner führte die Deposition der tmCF sowohl BEAS-2B Monokulturen als auch in BEAS-2B/dTHP-1 (Epithelzellen/Makrophagen) Kokulturen zu einer signifikanten Freisetzung von IL-8 (4).

Zusammenfassend konnten Zellkulturen basierend auf einem humanen bronchialen Zellkultursystem erfolgreich gegenüber mechanisch bzw. mechanisch thermisch behandelten Faseraerosolen in der Expositionsanlage von Vitrocell® exponiert werden. Inflammatorische Effekte wurden in den untersuchten Zellkulturmodellen nachgewiesen, wobei in Kokulturen und Triplekulturen vorwiegend stärkere Effekte detektiert wurden. Dies unterstreicht die Notwendigkeit den Einfluss von Bearbeitungsprozessen von CF aber auch den Einfluss von zellulären Interaktionen in Ko- und Triplekulturen zur toxikologischen Risikobewertung hinzuzuziehen und weiter zu verfolgen.

- 1) Diabaté, S.; Armand, L.; Murugadoss, S.; Dilger, M.; Fritsch-Decker, S.; Schlager, C.; Béal, D.; Arnal, M.-E.; Biola-Clier, M.; Ambrose, S., Air-liquid interface exposure of lung epithelial cells to low doses of nanoparticles to assess pulmonary adverse effects. *Nanomaterials* 2021, 11, 65.
- 2) Friesen, A.; Fritsch-Decker, S.; Hufnagel, M.; Mülhopt, S.; Stapf, D.; Hartwig, A.; Weiss, C., Comparing α -Quartz-Induced Cytotoxicity and Interleukin-8 Release in Pulmonary Mono-and Co-Cultures Exposed under Submerged and Air-Liquid Interface Conditions. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, 23, 6412.
- 3) Friesen, A.; Fritsch-Decker, S.; Hufnagel, M.; Mülhopt, S.; Stapf, D.; Weiss, C.; Hartwig, A., Gene Expression Profiling of Mono-and Co-Culture Models of the Respiratory Tract Exposed to Crystalline Quartz under Submerged and Air-Liquid Interface Conditions. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, 23, 7773.
- 4) Friesen, A.; Fritsch-Decker, S.; Mülhopt, S.; Quarz, C.; Mahl, J.; Baumann, W.; Hauser, M.; Wexler, M.; Schlager, C.; Gutmann, B.; Krebs, T.; Goßmann, A. K.; Weis, F.; Hufnagel, M.; Stapf, D.; Hartwig, A.; Weiss, C.; Comparing the Toxicological Responses of Pulmonary Air-Liquid Interface Models upon Exposure to Differentially Treated Carbon Fibers. *International Journal of Molecular Sciences*. in press.

P10-Untersuchung stofflich-energetischer Verwertungsoptionen für carbonfaserhaltige Abfälle

Kai Schlögel, Peter Quicker

RWTH Aachen, LuF Technologie der Energierohstoffe

Beim Recycling von Carbonfasern (CF) ist ein Reststoffaufkommen an Kurzfasern unvermeidlich. Die Bedingungen in konventionellen thermischen Abfallbehandlungsanlagen reichen nicht für die vollständige Umsetzung dieser Reste aus. Betriebsstörungen und die Bildung lungengängiger Faserbruchstücke (sogenannter WHO-Fasern) sind die Folge. Das über die CU Leichtbau-Forschung vom BMWK geförderte AiF-Projekt CF Pyro verfolgt den Ansatz, CF-haltige Abfälle als Substitut für Reduktionsmittel in der Pyrometallurgie einzusetzen. Durch Experteninterviews mit Vertretern der CF-verarbeitenden Industrie und Pyrometallurgie wurden entsprechende Versuchsdesigns abgeleitet. Es wurden Brennstoffanalysen von 18 CF-haltigen Abfallarten und 5 fossilen Reduktionsmitteln sowie thermogravimetrische Analysen (TGA) unter Variation der Atmosphäre (Luft und O₂) Temperaturen (600-1.000 °C) und Haltezeiten (0-200 min) durchgeführt und die entstehenden gasförmigen Produkte mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) analysiert. Auf dieser Basis wurden Versuche an einem Elektrolichtbogenofen im Technikumsmaßstab konzipiert und Referenzzustände messtechnisch erfasst. Die weiteren Untersuchungen evaluieren das Umsetzungsverhalten repräsentativer CF-haltiger Abfallfraktionen in pyrometallurgischen Prozessen und die dabei potenzielle Freisetzung von WHO-Fasern.