

# MatResource

Die Förderinitiative des BMBF zu Materialien im Kontext von Ressourcen,  
Recycling, Substitution, Katalyse und Korrosionsschutz

**TAGUNGSBAND ZUM BMBF-FORUM MatResource**  
MITTWOCH, 24. SEPTEMBER 2014

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



MatResource

# IMPRESSUM

---

Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.  
Senckenberganlage 10  
60325 Frankfurt

Telefon: +49-69-75306-750  
Telefax: +49-69-75306-733

E-Mail: [dgm@dgm.de](mailto:dgm@dgm.de)  
Internet: <http://www.dgm.de>

Vertretungsberechtigter Vorstand:  
Prof. Dr. Hans-Jürgen Christ (Vorsitzender)  
Dr. Ulrich Hartmann (1. stellvertretender Vorsitzender)  
Dr. Jörg Esslinger (2. stellvertretender Vorsitzender)

Registergericht:  
Amtsgericht Frankfurt  
Registernummer: VR 11655  
UST-Id. DE 111 292 466

Inhaltlich Verantwortlicher gemäß § 6 MDStV:  
Dr.-Ing. Frank O. R. Fischer

Bankverbindung  
Commerzbank Frankfurt  
Konto Nr: 06 100 478 00  
BLZ: 500 800 00  
SWIFT-BIC: DRESDEFFXXX  
IBAN: DE85 5008 0000 0610 0478 00

Haftungsausschluss:  
Der Inhalt des Tagungsbandes wurde mit größter Sorgfalt und nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Gleichwohl übernehmen weder die oben angeführten Verantwortlichen noch die jeweiligen Autoren eine Haftung für die Vollständigkeit oder Richtigkeit der in Text und Dateien enthaltenen Angaben.  
Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es trotz des Anspruches der Aktualität möglich sein kann, dass sich Angaben nicht auf dem neuesten Stand befinden. Über Hinweise hierzu sind wir jederzeit dankbar.  
Es wird auch darauf hingewiesen, dass durch das Bereitstellen der Informationen kein Beratungsverhältnis begründet wird.

Urheberrecht:  
Das Copyright für von uns veröffentlichte oder selbst erstellte Inhalte bleibt ausschließlich bei der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e. V.

Verwendetes Bildmaterial: © Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V.  
(sofern nicht anders angegeben).

# VORWORT

Das Bewusstsein darüber, dass viele Ressourcen, die die Grundlage unseres wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Wohlstands bilden, endlich sind, ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gewachsen. Die begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Energierohstoffen wird vielen unmittelbar an der Tankssäule oder beim Bezahlen der Stromrechnung bewusst. Weniger offensichtlich und trotzdem ebenso weitreichend sind die Folgen von Versorgungsengpässen bei einer Vielzahl weiterer essentieller Industrierohstoffe. Wer führt schon eine marginale Preissteigerung bei Handys auf die Produktionskapazitäten von Indium zurück? Neben den ökonomischen Aspekten ziehen ein ungebremseter Konsum und der damit einhergehende Ressourcenverbrauch auch weitere Konsequenzen nach sich. So hat der Ressourcenverbrauch unmittelbare Auswirkungen auf die Ökosysteme. Über den mitunter umweltschädlichen Abbau der Rohstoffe, die Aufarbeitung, Veredelung, Produktion bis hin zur Entsorgung entstehen entlang der Nutzungskette von Konsum- und Industriegütern an vielen Stellen negative Folgen für Mensch, Natur oder Klima. All dies sind Gründe, um mit vorhandenen Ressourcen weitsichtiger umzugehen. Die effiziente Nutzung von Ressourcen aus ökonomischen, ökologischen und auch sozialen Gründen ist daher eine Zukunftsaufgabe, die sich die Bundesregierung gestellt hat. Mit weniger mehr erreichen: Diese Faustregel unterstützt den Weg hin zu einer ressourceneffizienten, umweltfreundlichen Industrie und Gesellschaft.

Gerade in einem rohstoffarmen und von Rohstoffimporten abhängigen Land wie Deutschland sollten frühzeitig Strategien entwickelt werden, wie mit dieser Problematik umgegangen werden kann. Vor diesem Hintergrund ist sowohl die effiziente Nutzung von Rohstoffen als auch die Substitution und die Schließung von Stoffkreisläufen durch Recycling eine Herausforderung der Zukunft. Gleichzeitig ist diese Entwicklung nicht nur als Bedrohung zu betrachten. Am Beispiel der Automobilindustrie wird deutlich, dass mit konsequenter Forschung und Entwicklung auf Versorgungsengpässe reagiert werden und parallel ein Wettbewerbsvorteil aufgebaut werden kann. Es ist sicher kein Zufall, dass ein Großteil der Innovationen zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren aus (energie-)rohstoffarmen Ländern wie Deutschland und Japan stammen. Diese konsequente Innovationsorientierung gilt es auf andere Industriebereiche, die auf knappe Ressourcen angewiesen sind, zu übertragen. Ressourcenschonende Bauteile und Komponenten, wie seltenerdfreie Magnete, edelmetallfreie Katalysatoren oder korrosionsbeständige Windkraftanlagen „made in Germany“ könnten schon bald eine wichtige Säule für den Industriestandort Deutschland bilden. Da rund 70 % aller technischen Innovationen direkt oder indirekt von den Eigenschaften der verwendeten Materialien abhängen, ist davon auszugehen, dass im gezielten Einsatz neuer oder verbesserter Materialien erhebliche Effizienz- und Innovationspotenziale liegen. Materialinnovationen bieten ein hohes Potenzial, industrielle Prozesse auf allen Wertschöpfungsebenen mit erheblich höherer Leistung bei gleichzeitig reduziertem Ressourceneinsatz zu führen. Die Ressourceneffizienz ist deshalb ein zentrales Handlungsfeld im Rahmenprogramm „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft - WING“.

## Das BMBF-Forum der Förderinitiative MatRessource

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat mit der Förderinitiative MatRessource ein Programm aufgelegt, das Bezug zu den aktuellen Fragen der Ressourcenknappheit und Forschungsfragen zu deren Vermeidung oder Umgehung aufweist. Die ersten Projekte sind im April 2012 gestartet. Weitere Projekte folgten im Laufe der Jahre 2012 und 2013. Insgesamt werden nach den beiden ersten Ausschreibungsrunden 33 Verbundprojekte gefördert. 2014 wurde eine weitere Ausschreibungsrunde gestartet. Die Fördermaßnahme „Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und Gesellschaft – MatRessource“ des BMBF unterstützt die Erforschung und Entwicklung innovativer Technologien und Verfahren zur besseren Nutzung von Ressourcen durch Materialinnovationen. Die Gesamtfördersumme des BMBF liegt aktuell bei rund 52 Mio. Euro. Weitere 30 Mio. Euro der Projektbudgets stammen aus der Industrie. Insgesamt werden in der ersten Ausschreibung 170 Projektpartner zu folgenden Themenfeldern gefördert:

- Substitution und Materialeffizienz, Nanocycling
- Verringerung der Abhängigkeit von strategischen Metallen und Erhöhung der spezifischen Materialausbeuten. Recycling von Nanomaterialien
- Korrosionsschutz
- Verlängerung der Standzeiten von Bauteilen und Anlagen, Effizienzsteigerung bei der Energieerzeugung, Verringerung von Umweltbelastungen
- Katalyse und Prozessoptimierung
- Sicherung der Rohstoffversorgung, Ressourceneinsparung durch Erhöhung von Katalysatorstandzeiten, Prozessoptimierung

Im BMBF-Forum MatRessource der Fördermaßnahme „Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und Gesellschaft – MatRessource“ stellen die 33 Projektverbünde sich, ihre Projekte und deren Zwischenergebnisse vor. Unter Beteiligung des BMBF werden der Öffentlichkeit in drei parallelen Vortragssträngen – jeweils zu den Themen Substitution und Materialeffizienz, Katalyse und Korrosionsschutz – Aspekte der Projekte der MatRessource präsentiert. Die Vortragsveranstaltung wird durch Übersichtsvorträge, die eine strategische Einordnung der Ressourceneffizienz vornehmen, eingerahmt. So wird beispielsweise der Frage nachgegangen, wie Ressourceneffizienz im industriellen Kontext bewertet und gemessen werden kann. Diese Frage und weitere Impulse für eine kontinuierliche Weiterentwicklung dieses Zukunftsthemas werden in einer Podiumsdiskussion aufgegriffen. Nicht zuletzt soll das BMBF-Forum Matressource auch als Treffpunkt für die interessierte Fachöffentlichkeit aus allen beteiligten Disziplinen dienen. Das Vernetzungsforum bietet in geselliger Atmosphäre die Gelegenheit für das Knüpfen von Kontakten und die Diskussion von F&E-Ansätzen vor den Postern der Projektverbünde. Der zweite Tag des Forums ist der Weiterentwicklung der Förderlinie Matressource gewidmet. An diesem nicht-öffentlichen Vormittag erörtern die Projektbeteiligten unter Beteiligung der Forschungsförderer und weiterer geladener Fachexperten zukünftige Perspektiven der Matressource.

Ihr MaRKT-Team

# INHALT

---

<b>MatRessource – Ressourcen-effizienz durch Materialinnovationen</b>	<b>4</b>
<b>Förderinitiative MatRessource</b>	<b>4</b>
<b>Das Begleitprojekt MaRKT</b>	<b>4</b>
<b>Programmübersicht zum BMBF-FORUM MatRessource 2014</b>	<b>5</b>
<b>PROJEKTÜBERSICHT MatRessource</b>	<b>8</b>
<b>BioLast</b>	<b>10</b>
Optimierung von chemischen Verbundsystemen für Langzeitstabilität und Erdbebensicherheit durch Anwendung bioinspirierter Prinzipien	
<b>EDMIN</b>	<b>12</b>
Entwicklung von Oxidationskatalysatoren mit minimiertem Edelmetall-Gehalt für die Abgasreinigung von Non-Road-Maschinen	
<b>ekoDiSc</b>	<b>14</b>
Entwicklung eines korrosionsbeständigen Diamant-Siliciumcarbid-Werkstoffsystems für die Energietechnik	
<b>GallEff</b>	<b>16</b>
Verbesserung der Galliummaterialeffizienz bei der Galliumarsenidsubstrat- und LED-Herstellung	
<b>GussTough</b>	<b>18</b>
Substitution von Seltenen Erd-Metallen zur Entwicklung kaltzäher duktiler Gusseisenwerkstoffe	
<b>IKOSEZ</b>	<b>20</b>
Innovative korrosionsbeständige Ofenwandkonstruktionen von Hochtemperaturanlagen für die Verbrennung von Sekundärbrennstoffen, insbesondere in der Zement- und Kalkindustrie	
<b>IP-Werkzeugstahl</b>	<b>22</b>
Alternative Legierungskonzepte für Werkzeugstähle: Substitution von sonderkarbidbildenden Elementen durch intermetallische Phasen	
<b>KomMa</b>	<b>24</b>
Nanoskalige Seltenerd-freie Magnete und Magnetkomposite	
<b>KorrMat</b>	<b>26</b>
Korrosionsbeständige Materialien für die Biomassevergasung	
<b>KOWIND</b>	<b>28</b>
Entwicklung einer neuartigen Technologie zum Korrosionsschutz an Offshore-Windenergieanlagen	
<b>KoWUB</b>	<b>30</b>
Neuartige Korrosionsschutzsysteme für zukünftige Karosseriekonzepte	
<b>MeinDMaP</b>	<b>32</b>
Materialeffiziente einlauffähige Dichtungen für Maschinen und Pumpen	
<b>MultiKAT</b>	<b>34</b>
Ressourceneffizienz und unkonventionelle „All-Polyethylene“-Nanocomposite für den Leichtbau durch Tandem-Katalyse, kompartimentierte Multizentren-Katalysatoren und mesoskopische Formreplikation	
<b>NanoEmission</b>	<b>36</b>
Untersuchung des Emissionsverhaltens von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung	
<b>NanoPOP</b>	<b>38</b>
Mikrobielle Synthese und Recycling von Hybrid Palladium-Nanokatalysatoren und ihre Anwendung für die Behandlung von persistenten Umweltschadstoffen	

<b>nanoRec</b>	40
Harte Werkstoffe und Verschleißschutzschichten erhöhter Lebensdauer auf der Basis von neuartigen und recycelten Nanomaterialien	
<b>PROFORMING</b>	42
Ressourcen- und Energieeffiziente Reaktionen für die Chemische Industrie – PROzessinnovationen für die HydroFORMylieruNG	
<b>RADIKAL</b>	44
Ressourcenschonende Werkstoffsubstitution durch additive & intelligente FeAl-Werkstoff-Konzepte für angepassten Leicht- und Funktionsbau	
<b>RAVE-K</b>	46
Ressourcensparende Aufbau- und Verbindungstechnik für edelmetallhaltige Kontaktwerkstoffe der Niederspannungstechnik	
<b>RecyTiC</b>	48
Ressourcenschonende Werkstoffkonzepte für TiC-haltige Verschleißkomponenten	
<b>REffKat</b>	50
Entwicklung von ressourceneffizienten Autoabgaskatalysatoren mit deutlich reduziertem Gehalt an Edelmetall und Seltenerdmetall	
<b>RepaKorr</b>	52
Reparatursysteme und -konzepte für Korrosionsschutzbeschichtungen von Offshore-Windenergieanlagen	
<b>ResKorr</b>	54
Entwicklung ressourceneffizienter Korrosionsschutzschichten für hochbeanspruchte Komponenten in der alternativen Energieerzeugung	
<b>s-AmOx</b>	56
Entwicklung von sekundären Antimonoxiden für den Einsatz in Kunststoffartikeln	
<b>SKY</b>	58
Technologieplattform „Schaltbare Katalysatoren für Flüssigphasenprozesse“	
<b>Stahl-Schnecke</b>	60
Kupfer- und zinnfreie Schneckenradgetriebe hoher Effizienz und Leistungsdichte – technologische Substitution von Bronze durch Stahl	
<b>SubSEEMag</b>	62
Substitution von Selten Erden Elementen in hochfesten und duktilen Magnesiumwerkstoffen	
<b>SubsTungs</b>	64
Substitution von Wolfram in Verschleißschutzschichten	
<b>SusHy</b>	66
Sustainable Hydrogen – Edelmetallfreie Katalysatoren für die Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energiequellen	
<b>TS-Protect</b>	68
Thermisch gespritzte und solvothermal verdichtete Schutzschichten in Müllverbrennungsanlagen und Biomassekraftwerke	
<b>VANTOM</b>	70
Durch Korrosionsschutz von Reststoffen zu chemischen Produkten und Energie	
<b>VOKos</b>	72
Effizienzsteigerung durch verfahrenstechnische optimierende Korrosionsschutzkonzepte in Verbrennungsanlagen mit heterogenen Festbrennstoffen	
<b>Notizen</b>	74

# MatResource – RESSOURCEN-EFFIZIENZ DURCH MATERIALINNOVATIONEN

Ressourceneffizienz bedeutet die nachhaltige Nutzung von Ressourcen bei gleichzeitiger Verringerung der Umweltbelastung.

Die Steigerung der Ressourceneffizienz verfolgt also folgende Ziele:

- Verringerung des Ressourceneinsatzes (Input)
- Verringerung stofflicher Emissionen (Output)
- Steigerung der Nutzenproduktivität eingesetzter Ressourcen

## Ressourceneffizienz durch Materialinnovationen

Im Rahmen der Fördermaßnahme „Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und Gesellschaft - MatResource“ werden Projekte gefördert, in denen eine Erhöhung der Ressourceneffizienz durch eine der folgenden Strategien erzielt wird:

- Ersetzen von kritischen/seltenen Elementen
- Steigerung der Energie- und Materialeffizienz
- Kreislaufführung (Recycling)
- Verlängerung der Lebensdauer und
- Optimierung von chemischen Prozessen

## Die folgenden drei Schwerpunkte werden adressiert:

- Substitution und Materialeffizienz
- Korrosionsschutz
- Katalyse und Prozessoptimierung

Weitere Publikationen zum Thema Ressourceneffizienz und inhaltliche Beschreibungen aller im Rahmen von MatResource geförderten Projekte finden Sie auch auf [www.matresource.de](http://www.matresource.de).

## FÖRDERINITIATIVE MatResource

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat mit der Förderinitiative MatResource ein Programm aufgelegt, das Bezug zu den aktuellen Fragen der Ressourcenknappheit und Forschungsfragen zu deren Vermeidung oder Umgehung aufweist.

Die ersten Projekte sind im April 2012 gestartet. Weitere Projekte folgten im Laufe der Jahre 2012 und 2013. Insgesamt werden nach den beiden ersten Ausschreibungsrunden 33 Verbundprojekte gefördert. 2014 wurde eine weitere Ausschreibungsrunde gestartet. Die Projektliste wird entsprechend dem Start weiterer Projekte ergänzt.

Die Fördermaßnahme „Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und Gesellschaft – MatResource“ des BMBF unterstützt die Erforschung und Entwicklung innovativer Technologien und Verfahren zur besseren Nutzung von Ressourcen durch Materialinnovationen. Durch die Forschungsprojekte soll die Abhängigkeit von Rohstoffimporten dauerhaft verringert, die internationale Wettbewerbsfähigkeit durch Senkung der Energie- und Materialkosten verbessert und die Umwelt entlastet werden.

Die Gesamtfördersumme des BMBF liegt aktuell bei rund 52 Mio. Euro. Hinzu kommen weitere ca. 30 Mio. Euro aus der Industrie.

Es werden 170 Projektpartner zu folgenden Themenfeldern gefördert:

- Substitution und Materialeffizienz, Nanocycling  
Verringerung der Abhängigkeit von strategischen Metallen und Erhöhung der spezifischen Materialausbeuten. Recycling von Nanomaterialien
- Korrosionsschutz  
Verlängerung der Standzeiten von Bauteilen und Anlagen, Effizienzsteigerung bei der Energieerzeugung, Verringerung von Umweltbelastungen
- Katalyse und Prozessoptimierung  
Sicherung der Rohstoffversorgung, Ressourceneinsparung durch Erhöhung von Katalysatorstandzeiten, Prozessoptimierung

## DAS BEGLEITPROJEKT MaRKT

Zur Begleitung der MatResource Projekte wird das Projekt MaRKT gefördert, das die themenübergreifende Vernetzung aller Verbundprojekte übernimmt.

Dieses Begleitprojekt wird von den Partnern DGM (Federführung), DECHEMA und GfKORR durchgeführt. Ziel ist es, die Ergebnisse der wissenschaftlichen Projekte aus der Förderinitiative innerhalb und außerhalb bestmöglich zu vernetzen und die Projekte bei der Verbreitung ihrer Ergebnisse zu unterstützen.

Für Rückfragen wenden Sie sich bitte an das Sekretariat.

Für Fragen zu den Verbundprojekten finden Sie die Kontaktdaten unter [www.matresource.de](http://www.matresource.de).

### Das Begleitprojekt MaRKT

Dipl.-Ing. Fahima Fischer  
[matresource@dgm.de](mailto:matresource@dgm.de)  
T +49 (0)170 4159816

# PROGRAMMÜBERSICHT

## ZUM BMBF-FORUM MatRessource 2014

08:00	<i>Registrierung der Teilnehmer im Maschinenhaus, Magdalenenstraße 12, 64289 Darmstadt</i>		
08:30	Begrüßung und Eröffnung <b>MinR'in Liane Horst</b> , Referat 511, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn <b>Dr.-Ing. Karen Otten</b> , Projektträger Jülich, Jülich <b>Dr.-Ing. Tanja Eckardt</b> , Heraeus Holding GmbH, Hanau, Mitglied im Fachbegleitkreis MatRessource		
09:00	Übersichtsvortrag „Ressourceneffizienzbewertung“ <b>Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Stauber</b> , Mitglied im Fachbegleitkreis MatRessource Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS		
09:20	Übersichtsvortrag „Ganzheitlichen Messung von Ressourceneffizienz auf Produktebene“ <b>Dr. Markus Berger</b> , Technische Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz		
09:40	Übersichtsvortrag „Motive und Ansatzpunkte für ressourceneffizientes Handeln“ <b>Prof. Dr. Mario Schmidt</b> , Hochschule Pforzheim, Direktor des Instituts für Angewandte Forschung, Leiter des Instituts für Industrial Ecology		
10:00	<i>Kaffeepause und Raumwechsel</i>		
	<b>Substitution und Materialeffizienz</b>	<b>Katalyse</b>	<b>Korrosionsschutz</b>
10:30	Verbesserung der Gallium-Rohstoffeffizienz bei der Herstellung von roten und gelben LEDs auf Basis neuartiger Galliumarsenid – Substrate  <b>Stefan Eichler</b> , Freiburger Compound Materials GmbH und Christoph Klomp, OSRAM OPTO SEMICONDUCTOR (GallEff)	Bioinspirierte Prinzipien und Materialien für Verbundsysteme  <b>Ruth Schwaiger</b> , Karlsruher Institut für Technologie (Bio-Last)	Entwicklung eines korrosionsbeständigen Diamant-Silicium-carbid-Werkstoffsystems für die Energietechnik  <b>Andreas Schrüfer</b> , EagleBurgmann Germany (EkoDiSc)
10:50	Ressourcensparende Aufbau- und Verbindungstechnik für edelmetallhaltige Kontaktwerkstoffe der Niederspannungstechnik  <b>Michael Bender</b> , umicore Ag & Co. KG (RAVE-K)	Edelmetallfreie Katalysatoren für die Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energiequellen – Sustainable Hydrogen  <b>Jens Busse</b> , Evonik Industries AG (SusHy)	Entwicklung ressourceneffizienter Korrosionsschutzschichten für hoch beanspruchte Komponenten in der alternativen Energieerzeugung  <b>Ulrich Krupp</b> , Hochschule Osnabrück (RESKORR)
11:10	Nanoskalige Seltenerd-freie Magnete und Magnetkomposite  <b>Michael Krispin</b> , Siemens AG (KomMa)	Mikrobielle Synthese und Recycling von Hybrid Palladium-Nanokatalysatoren und ihre Anwendung für die Behandlung von persistenten Umweltschadstoffen  <b>Michael Bunge</b> , Universität Giessen (NanoPOP)	Neuartige Korrosionsschutzsysteme für warmumgeformte Blechbauteile  <b>Bernd Schuhmacher</b> , ThyssenKrupp Steel Europe AG (KOWUB)
11:30	<i>Kaffeepause</i>		
11:50	Entwicklung von sekundären Antimonoxyden für den Einsatz in Kunststoffartikeln  <b>Florian Binz</b> , RWTH Aachen (s-AmOx)	Ressourceneffizienz und „All-Polyethylene“-Nanocomposite für den Leichtbau durch Tandem-Katalyse, kompartimentierte Multizentren-Katalysatoren und meso-skopische Formreplikation  <b>Rolf Mülhaupt</b> , Universität Freiburg (multiKAT)	Einfluss der Laufzeitfaktoren auf die Ressourceneffizienz von sekundärbrennstoffbetriebenen Hochtemperaturanlagen  <b>Klaus Kassau</b> , Refratechnik Cement GmbH (IKOZEZ)

12:10	<p>Untersuchung des Emissionsverhaltens von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung</p> <p><b>Peter Quicker</b>, RWTH Aachen (NanoEmission)</p>	<p>Schaltbare Katalysatoren für Flüssigphasenprozesse –Minimierung von Nebenprodukten, lösungsmittelarme Produktion und Rezyklierung von Katalysatoren</p> <p><b>Rüdiger Borrmann</b>, RWTH Aachen (SKY)</p>	<p>Thermisch gespritzte und solvothermal verdichtete Schutzschichten in Müllverbrennungsanlagen und Biomassekraftwerken</p> <p><b>Silke Wöllmer</b>, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (TS-Protect)</p>
12:30	<i>Mittagspause</i>		
14:00	<p>Ressourcenschonende Werkstoffkonzepte für TiC-haltige Verschleißkomponenten</p> <p><b>Horst Hill</b>, Deutsche Edelstahlwerke GmbH (RecyTiC)</p>	<p>Entwicklung von Oxidationskatalysatoren mit minimiertem Edelmetall-Gehalt für die Abgasreinigung</p> <p><b>Simon Steigert</b>, HJS Emission Technology GmbH &amp; Co. KG (EDMIN)</p>	<p>Werkstoffe für Anwendungen unter korrosiven Atmosphären in der Biomassevergasung</p> <p><b>Almut Wiltner</b>, Fraunhofer-Institut IFAM (KorrMat)</p>
14:20	<p>Substitution von Wolfram in Verschleißschutzschichten</p> <p><b>Cornel Schreuders</b>, Durum Verschleißschutz GmbH (SubsTungs)</p>	<p>Bessere Abgaskatalysatoren mit weniger Edelmetall</p> <p><b>Martin Votsmeier</b>, Umicore AG &amp; Co. KG (REFFKAT)</p>	<p>Effizienzsteigerung durch verfahrenstechnisch optimierende Korrosionsschutzkonzepte in Verbrennungsanlagen mit heterogenen Festbrennstoffen</p> <p><b>Ragnar Warnecke</b>, GKS - Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH (VOKos)</p>
14:40	<p>Harte Werkstoffe und Verschleißschutzschichten erhöhter Lebensdauer auf der Basis von neuartigen und recycelten Nanomaterialien</p> <p><b>Cornel Schreuders</b>, Durum Verschleißschutz GmbH (nanoRec)</p>	<p>Ressourcen- und Energieeffiziente Reaktionen für die chemische Industrie – PROzessinnovationen für die HydroFORMylieruNG</p> <p><b>Marc Oliver Kristen</b>, Evonik Industries AG (PROFORMING)</p>	<p>Werkstofflösungen gegen Vanadatkorrosion in reduzierenden Bedingungen</p> <p><b>Mathias Galetz</b>, Dechema Forschungsinstitut (VANTOM)</p>
15:00	<i>Kaffeepause</i>		
	<b>Substitution und Materialeffizienz</b>	<b>Substitution und Materialeffizienz</b>	<b>Korrosionsschutz</b>
15:30	<p>Ressourcenschonende Werkstoffsubstitution durch additive &amp; intelligente FeAl-Werkstoff-Konzepte für angepassten Leicht- und Funktionsbau</p> <p><b>Andreas Weisheit</b>, Fraunhofer-Institut ILT (RADIKAL)</p>	<p>Materialeffiziente einlauffähige Dichtungen für Turbinen und Pumpen</p> <p><b>Frank Reining</b>, hollomet GmbH (MEINDMAP)</p>	<p>Entwicklung einer neuartigen Technologie zum Korrosionsschutz an Offshore-Windenergieanlagen</p> <p><b>Jan Berger</b>, Evonik Industries AG (KOWIND)</p>
15:50	<p>Substitution von Selten-Erden-Elementen in umformbaren Magnesiumwerkstoffen</p> <p><b>Oliver Vogt</b>, MgF Magnesium Flachprodukte GmbH (SubSEEMag)</p>	<p>Kupfer- und zinnfreie Schneckenradgetriebe hoher Effizienz und Leistungsdichte – technologische Substitution von Bronze durch Stahl</p> <p><b>Daniel Chmill</b>, Bonfiglioli Vectron GmbH (Stahlschnecke)</p>	<p>Entwicklung von Inspektions- und Reparaturkonzepten für Korrosionsschutzsysteme an Offshore-Windenergieanlagen</p> <p><b>Andreas Momber</b>, Muehlhan AG (RepaKorr)</p>

16:10	<p>Alternative Legierungskonzepte für Werkzeugstähle: Substitution von sonderkarbidbildenden Elementen durch intermetallische Phasen</p> <p><b>Alexander Zimmermann</b>, RWTH Aachen (IP Werkzeugstahl)</p>	<p>Substitution von Selten Erd-Metallen zur Entwicklung kaltzäher duktiler Gusseisenwerkstoffe</p> <p><b>Dierk Hartmann</b>, Hochschule Kempten (GussTough)</p>	
16:30	<i>Kaffeepause</i>		
17:00	<p>Podiumsdiskussion „Ressourceneffizienz“</p> <p>Im Rahmen der Podiumsdiskussion werden zentrale Fragen rund um das Thema Ressourceneffizienz mit Vertretern des Fachbegleitkreises MatRessource, der Förderinitiative MatRessource sowie mit eingeladenen Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Industrie erörtert. Die Podiumsdiskussion soll die Bedeutung der Ressourceneffizienz für den Industriestandort Deutschland verdeutlichen. Dazu werden 5 Fragen den Diskussionsteilnehmer gestellt und erörtert. Auch die Zuhörer haben in der zweiten Hälfte des Podiumsgesprächs Gelegenheit, Fragen zu stellen.</p> <p><b>Fragen zur Podiumsdiskussion „Ressourceneffizienz“:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Was ist unter Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und Gesellschaft zu verstehen?</li> <li>2. Ist die deutsche Industrie ausreichend auf die Herausforderung der Steigerung der Ressourceneffizienz vorbereitet?</li> <li>3. Welche volkswirtschaftliche Bedeutung kommt der Ressourceneffizienz in Deutschland im internationalen Wettbewerb zu?</li> <li>4. Ist die Steigerung der Ressourceneffizienz eine weitere Chance für Deutschland, im internationalen Kontext eine Vorreiterrolle einzunehmen?</li> <li>5. Was muss die Industrie, die Wissenschaft und die öffentliche Hand leisten, damit es zur Steigerung der Ressourceneffizienz kommt?</li> </ol> <p><b>Moderation:</b> Mitglieder des Fachbegleitkreises  <b>Teilnehmer der Podiumsdiskussion „Ressourceneffizienz“</b>  <b>Dr. Markus Berger</b>, Technische Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz  <b>Dr. Volker Steinbach</b>; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  <b>Prof. Dr. Heidi Foth</b>; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg – Medizinische Fakultät – Institut für Umwelttoxikologie  <b>Dr. Ralf Zuber</b>; Umicore AG &amp; Co.KG  <b>Prof. Dr. Armin Reller</b>; Leiter Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie, Fraunhofer ISC, Würzburg  <b>Prof. Dr. Mario Schmidt</b>, Hochschule Pforzheim, Leiter des Instituts für Industrial Ecology</p>		
18:00	<p><b>Vernetzungsforum</b></p> <p>Zum Abschluss des Tages folgt die Posterschau und Prämierung der besten 3 Poster durch Übergabe von Urkunden durch den Fachbegleitkreis.</p> <p>Kriterien zur Beurteilung der Poster:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verständliche Darstellung der wissenschaftlichen Arbeiten</li> <li>▪ Qualität der Präsentation (Übersichtlichkeit, Attraktivität)</li> <li>▪ Originalität der Arbeiten (Neuigkeit, Idee)</li> <li>▪ Aufgezeigtes Nachhaltigkeitspotential</li> </ul>		
21:00	<p>Die Teilnehmer erhalten so noch die Gelegenheit, den ersten Tag zur reflektieren und sich weiter zu vernetzen. Für das leibliche Wohl ist gesorgt.</p>		

# PROJEKTÜBERSICHT MatResource

Hier finden Sie Informationen zu den aktuell geförderten Projekten.

Zu folgenden Projekten liegen uns Informationen vor:

<b>BioLast</b>	Optimierung von chemischen Verbundsystemen für Langzeitstabilität und Erdbbensicherheit durch Anwendung bioinspirierter Prinzipien
<b>EDMIN</b>	Entwicklung von Oxidationskatalysatoren mit minimiertem Edelmetall-Gehalt für die Abgasreinigung von Non-Road-Maschinen
<b>EkoDiSc</b>	Entwicklung eines korrosionsbeständigen Diamant-Siliciumcarbid-Werkstoffsystems für die Energietechnik
<b>GallEff</b>	Verbesserung der Galliummaterialeffizienz bei der Galliumarsenidsubstrat- und LED-Herstellung
<b>GussTough</b>	Substitution von Seltenen Erd-Metallen zur Entwicklung kaltzäher duktiler Gusseisenwerkstoffe
<b>IKOSEZ</b>	Innovative korrosionsbeständige Ofenwandkonstruktionen von Hochtemperaturanlagen für die Verbrennung von Sekundärbrennstoffen, insbesondere in der Zement- und Kalkindustrie
<b>IP-Werkzeugstahl</b>	Alternative Legierungskonzepte für Werkzeugstähle: Substitution von sonderkarbidbildenden Elementen durch intermetallische Phasen
<b>KomMa</b>	Nanoskalige Seltenerd-freie Magnete und Magnetkomposite
<b>KorrMat</b>	Korrosionsbeständige Materialien für die Biomassevergasung
<b>KOWIND</b>	Entwicklung einer neuartigen Technologie zum Korrosionsschutz an Offshore-Windenergieanlagen
<b>KoWUB</b>	Neuartige Korrosionsschutzsysteme für zukünftige Karosseriekonzepte
<b>MeinDMaP</b>	Materialeffiziente einlauffähige Dichtungen für Maschinen und Pumpen
<b>MultiKAT</b>	Ressourceneffizienz und unkonventionelle „All-Polyethylene“-Nanocomposite für den Leichtbau durch Tandem-Katalyse, kompartimentierte Multizentren-Katalysatoren und mesoskopische Formreplikation
<b>NanoEmission</b>	Untersuchung des Emissionsverhaltens von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung
<b>NanoPOP</b>	Mikrobielle Synthese und Recycling von Hybrid Palladium-Nanokatalysatoren und ihre Anwendung für die Behandlung von persistenten Umweltschadstoffen
<b>nanoRec</b>	Harte Werkstoffe und Verschleißschutzschichten erhöhter Lebensdauer auf der Basis von neuartigen und recycelten Nanomaterialien

<b>PROFORMING</b>	Ressourcen- und Energieeffiziente Reaktionen für die Chemische Industrie - PROzessinnovationen für die HydroFORMylieruNG
<b>RADIKAL</b>	Ressourcenschonende Werkstoffsubstitution durch additive & intelligente FeAl-Werkstoff-Konzepte für angepassten Leicht- und Funktionsbau
<b>RAVE-K</b>	Ressourcensparende Aufbau- und Verbindungstechnik für edelmetallhaltige Kontaktwerkstoffe der Niederspannungstechnik
<b>RecyTiC</b>	Ressourcenschonende Werkstoffkonzepte für TiC-haltige Verschleißkomponenten
<b>REffKat</b>	Entwicklung von ressourceneffizienten Autoabgaskatalysatoren mit deutlich reduziertem Gehalt an Edelmetall und Seltenerdmetall
<b>RepaKorr</b>	Reparatursysteme und -konzepte für Korrosionsschutzbeschichtungen von Offshore-Windenergieanlagen
<b>ResKorr</b>	Entwicklung ressourceneffizienter Korrosionsschutzschichten für hochbeanspruchte Komponenten in der alternativen Energieerzeugung
<b>s-AmOx</b>	Entwicklung von sekundären Antimonoxiden für den Einsatz in Kunststoffartikeln
<b>SKY</b>	Technologieplattform „Schaltbare Katalysatoren für Flüssigphasenprozesse“
<b>Stahl-Schnecke</b>	Kupfer- und zinnfreie Schneckenradgetriebe hoher Effizienz und Leistungsdichte - technologische Substitution von Bronze durch Stahl
<b>SubSEEMag</b>	Substitution von Selten Erden Elementen in hochfesten und duktilen Magnesiumwerkstoffen
<b>SubsTungs</b>	Substitution von Wolfram in Verschleißschutzschichten
<b>SusHy</b>	Sustainable Hydrogen - Edelmetallfreie Katalysatoren für die Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energiequellen
<b>TS-Protect</b>	Thermisch gespritzte und solvothermal verdichtete Schutzschichten in Müllverbrennungsanlagen und Biomassekraftwerke
<b>VANTOM</b>	Durch Korrosionsschutz von Reststoffen zu chemischen Produkten und Energie
<b>VOKos</b>	Effizienzsteigerung durch verfahrenstechnische optimierende Korrosionsschutzkonzepte in Verbrennungsanlagen mit heterogenen Festbrennstoffen

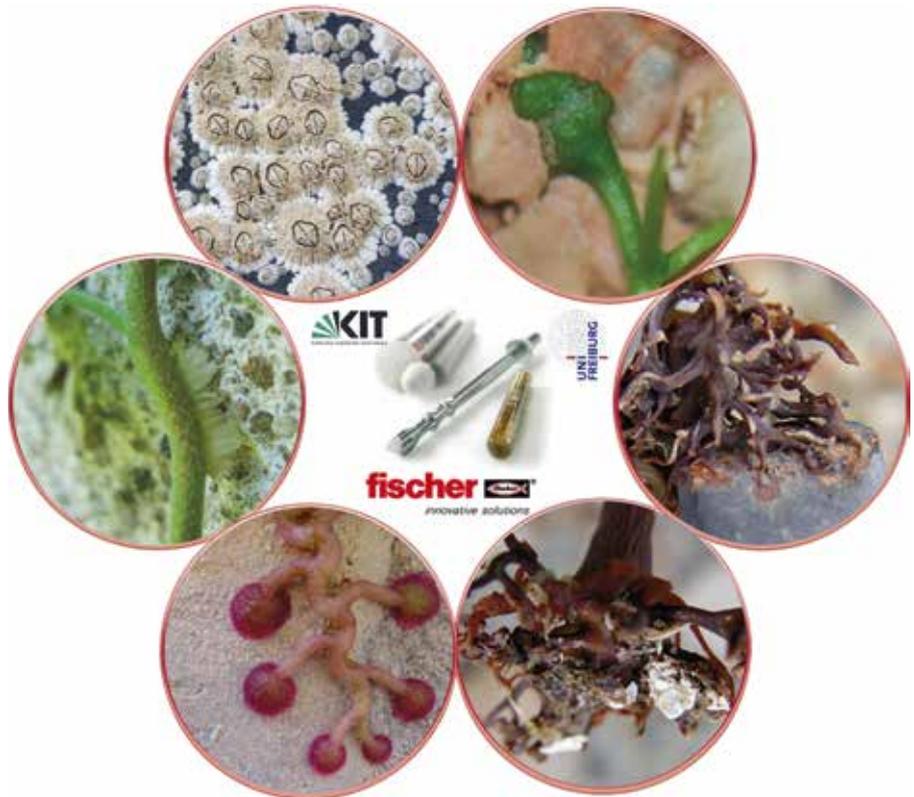
## Optimierung von chemischen Verbundsystemen für Langzeitstabilität und Erdbebensicherheit durch Anwendung bioinspirierter Prinzipien

Im Bausektor fallen weltweit 30% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen und 40% des globalen Ressourcenverbrauchs an. Vor diesem Hintergrund kommt zukünftig dem Thema „Nachhaltiges Bauen“ eine enorme Bedeutung zu. Eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs kann dabei einerseits über schlankere und leistungsfähigere Bauteile und andererseits über eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Bauwerke erfolgen. In beiden Fällen werden leistungsfähigere und effizientere Befestigungsmittel benötigt.

Für Schwerlastbefestigungen werden häufig chemische Verankerungssysteme eingesetzt, da Sie einfach in der Anwendung sind und hohen Belastungen standhalten. Schwerlastbefestigungen erweisen sich andererseits als besonders kritisch in Bezug auf Verschleiß und vorzeitiges Versagen, da dies in der Regel mit Gefahr für Leib und Leben verbunden ist.

Die Dauerhaftigkeit chemischer Verankerungen kann von den folgenden Bedingungen jedoch stark beeinflusst werden:

- Bei chemischen Verankerungen tritt unter Belastung typischerweise ein sehr langsames Kriechen auf. Dieses Kriechen kann bei ungeeigneten Systemen über einen langen Zeitraum zu einem Versagen führen.
- Bei Erdbeben werden Befestigungen einer extremen zyklischen Laständerung unterworfen, dies kann bereits nach wenigen Zyklen zum Versagen der Verankerung führen.



v.r.o.: Affenkamm Haftpad Kork, Braunalge Verankerung 01, Braunalge Verankerung 02, Efeu Haftpad Concrete, Seepocken Stein, Quelle: Universität Freiburg/Plant Biomechanics Group Freiburg; Wilder Wein Haftpad Concrete, Quelle: Karlsruher Institut für Technologie/IAM; FHB II, Quelle: fischerwerke GmbH & Co. KG

Ziel des Vorhabens ist es, in einem von der fischerwerke GmbH & Co. KG koordinierten interdisziplinären Forschungsprojekt mit wissenschaftlichen Partnern aus der Biologie/Bionik, Materialforschung, Polymerchemie und Polymerphysik chemische Verbundsysteme mit Hilfe bioinspirierter Methoden hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität und Toleranz gegenüber dynamischer Belastung im Erdbebenfall zu ertüchtigen.

Die Biologie bietet viele Beispiele für hoch effiziente, der jeweiligen Funktion hervorragend angepasste Haft- bzw. Verankerungssysteme, die unter sehr unterschiedlichen Umweltbedingungen und bei häufig wechselnden Lasten (Wind oder Wasser) mit hoher Zuverlässigkeit und großer Fehlertoleranz permanente Anhaftung gewährleisten. Die biologischen Systeme zeichnen sich durch eine dauerhaft hohe Versagenssicherheit, Mechanismen zur Rissinhibition und Selbstheilung sowie sehr gute Dämpfungseigenschaften und ein gutmütiges Versagensverhalten aus. Ziel des FuE-Vorhabens ist es, die diesen

Eigenschaften zu Grunde liegenden Funktionsprinzipien zu identifizieren, die Übertragbarkeit innovativer Prinzipien anhand von Modellsystemen zu testen und schließlich nach biologischem Vorbild optimierte Verbundsysteme zu entwickeln.

### Koordinator:

Dr. Joachim Schätzle, fischerwerke GmbH & Co. KG

### Projektpartner:

- fischerwerke GmbH & Co. KG
- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg – Freiburger Materialforschungszentrum (FMF)
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für Angewandte Materialien (IAM) – Werkstoff- und Biomechanik (IAM-WBM)

**Laufzeit:** 01.09.2013 bis 31.08.2016

**FKZ:** 03X3587

# Optimierung von chemischen Verbundsystemen für Langzeitstabilität und Erdbbensicherheit durch Anwendung bioinspirierter Prinzipien «BioLast»

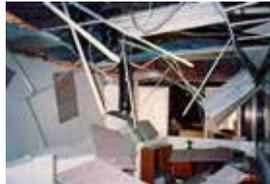
fischerwerke GmbH & Co. KG; Universität Freiburg FMF: Plant Biomechanics Group, Botanischer Garten; Institut für Makromolekulare Chemie; Experimentelle Polymerphysik; KIT: Institut für Angewandte Materialien



## Projekthintergrund

### Motivation

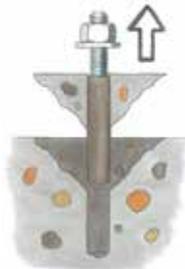
30% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen und 40% des weltweiten Ressourcenverbrauchs entfallen auf den Bausektor. Angesichts schwindender Ressourcenvorkommen und wachsenden Umweltproblemen kommt dem Thema "Nachhaltiges Bauen" eine enorme Bedeutung zu. Eine verbesserte Langzeitstabilität und Erdbbensicherheit von Schwerlastbefestigungen kann die Nutzungsdauer von Bauwerken erhöhen und damit einen wichtigen Beitrag zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs leisten.



Zerstörung infolge eines Erdbebens

### Zielstellung

Ziel des interdisziplinären Forschungsprojekts "BioLast" mit Partnern aus Industrie, Biologie/Bionik, Materialforschung, Polymerchemie und Polymerphysik ist die Verlängerung der Lebensdauer und eine verbesserte Toleranz gegenüber seismischer Belastungen der chemischen Verbundsysteme mit Hilfe bioinspirierter Methoden.

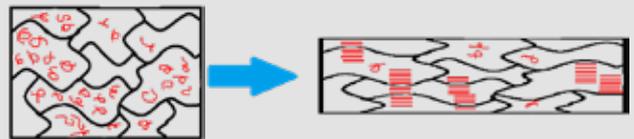


Kombiniertes Versagen von Mörtel/Beton eines chemischen Verbundsystems

## Entwicklung bioinspirierter Modellsysteme

### Belastungsinduzierte gerichtete Kristallisation

Nach dem Vorbild der Natur sollen im Material bei Belastung selbstverstärkende Prozesse stattfinden. Dies kann durch deformationsinduzierte gerichtete Kristallisation erreicht werden. Nach Auswahl eines geeigneten Modellsystems bestehend aus einem amorphen Polymethacrylat-Netzwerk gefüllt mit kristallisierbarem Polyethylenoxid konnte gezeigt werden, dass es tatsächlich zur Nukleation bei Verformung kommen kann. Auch konnte eine Vorzugsorientierung der dabei erhaltenen Kristallite induziert werden.



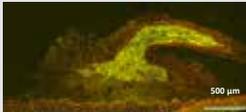
Schema eines amorphen Polymernetzwerks (schwarz) gefüllt mit kristallisierbarem Material (rot). Vor der Ver Streckung liegt die kristallisierbare Komponente amorph vor (gebogene Striche) und die Probe ist isotrop. Beim Ver Strecken kann es zur Nukleation kommen, die im Idealfall eine gerichtete Kristallisation bewirkt (gerade Striche).

## Ideengeber aus der Biologie

### Pflanzliche Haft- und Verankerungssysteme

Kletterpflanzen und Meeresalgen besitzen adaptive Haftsysteme, die auch bei häufig wechselnden Lasten eine dauerhafte Verankerung im Substrat gewährleisten. Die Funktionsprinzipien dieser Systeme werden durch Analyse des strukturellen Aufbaus und der mechanischen Eigenschaften identifiziert und ihre Übertragbarkeit auf das technische System geprüft. Bisherige Untersuchungen am Modell-Haftsystem einer Passionsblume (*Passiflora discophora*) zeigen:

- Gerichtetes Zellwachstum und eine Kleberschicht gewährleisten eine optimale Verzahnung zwischen Haftstruktur und Substrat.
- Die Haftstruktur setzt sich aus unterschiedlichen Gewebetypen (Materialien) zusammen, was voraussichtlich einen großen Einfluss auf ihre mechanischen Eigenschaften hat.
- Das Gesamthaftsystem besitzt mehrere Verankerungspunkte, die über elastische Achsen miteinander verknüpft sind. Dies ermöglicht eine adaptiven Lastverteilung.



Das Modell-Haftsystem der Passionsblume *Passiflora discophora*. (A) Gesamthaftsystem mit mehreren Haftpads, welche mittels elastischer Achsen mit dem Spross verbunden sind. (B, C) Verankerung der Haftpads in Hohlräumen zeigt die hohe Adaptivität des Systems. (C) Querschnitt durch das Haftpad in B (entlang gestrichelter Linie). Der gesamte Hohlraum ist vollständig vom Pad-Gewebe ausgefüllt. Es sind unterschiedliche Gewebetypen und Zellstrukturen unterscheidbar.

Schnitt durch ein Haftpad im Fluoreszenzmikroskop. Der zentrale Teil ist verholzt (Gelbfärbung). Der enge Formschluss mit dem Substrat durch kleine Zellen und eine Kleberschicht (grüne Färbung) wird deutlich.

### Biomaterialien

Anhand einer Literaturrecherche wurden projektrelevante biologische Prinzipien zur mechanischen Materialoptimierung identifiziert:

- Rissinhibition durch Materialien mit Steifigkeitsgradienten wie z.B. im Schnabelbereich des Tintenfisches
- Hohe Zähigkeit durch Hart-Weich-Kompositmaterialien wie z.B. das Perlmutter von Muscheln

## Mechanische Charakterisierung und Simulation

### Mechanische Charakterisierung

Die mechanische Charakterisierung der Haftscheiben der *Passiflora discophora* mittels Eindruckversuchen zeigt einen deutlichen Gradienten in den mechanischen Eigenschaften der verschiedenen mikrostrukturellen Bereiche. Der zentrale Bereich II ist viermal steifer und fast zehnmal härter als der Randbereich I. Dies lässt sich auf die Verholzung des zentralen Gewebes zurückführen.



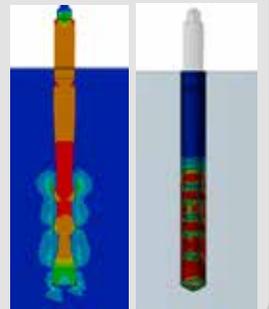
Schnitt durch eine trockene Haftscheibe der *Passiflora discophora* nach dem Eindruckversuchen. Die Eindrücke wurden mit einem Stempel mit kreisförmigem Querschnitt durchgeführt und sind insbesondere in Bereich II deutlich zu sehen.

	Elastizitätsmodul (MPa)	Härte (MPa)	Zellgröße (µm)
Bereich I	685 ± 70	17 ± 4	4.0 ± 0.7
Bereich II	2765 ± 669	116 ± 28	3.4 ± 0.2
Bereich III	1314 ± 507	65,2 ± 26,2	-

### Simulation der Dauerfestigkeit

Simulation der Lasteinleitung technischer Systeme als Grundlage zur Bewertung biologischer Verankerungsprinzipien auf ihre technische Übertragbarkeit.

- Ermittlung der optimalen Geometrie von Ankerstange und Bohrloch
- Ermittlung der idealen mechanischen Mörtelkennwerte



Links: FE-Simulation der Spannungsverteilung einer Ankerstange in Beton  
Rechts: FE-Simulation der Spannungsverteilung im Mörtel



## Ausblick

- Mechanische Untersuchung an biologischen Vorbildsystemen
- Weiterentwicklung der bioinspirierten Modellsysteme
- Charakterisierung durch anwendungsnahe Testverfahren
- Nachweis der verlängerten Lebensdauer und Erdbbensicherheit der neuen bioinspirierten chemischen Verankerungssysteme

## Entwicklung von Oxidationskatalysatoren mit minimiertem Edelmetall-Gehalt für die Abgasreinigung von Non-Road-Maschinen

Die Minderung von Schadstoff- und Treibhausgasemissionen ist ein Schwerpunkt der Umwelt- und Verkehrspolitik der Bundesrepublik Deutschland. Erfolge in der Verbesserung der Luftqualität werden seit Ende der 70er und Anfang der 80er Jahre durch Einführung und Fortschreibung von Abgasrichtlinien erzielt. Die gestiegenen Anforderungen an die Effizienz der Abgasnachbehandlung macht eine Weiterentwicklung von Abgasnachbehandlungssystemen erforderlich. Da diese Systeme große Mengen an seltenen und teuren

Edelmetallen (Platin, Palladium, Rhodium) benötigen, ist aus Kostengründen und auch aus Gründen der anzustrebenden Ressourcenschonung eine Senkung des Edelmetalleinsatzes bei Katalysatoren zwingend erforderlich.

Der Dieselmotor ist aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit und seiner Leistungsdichte weltweit als Antriebsquelle insbesondere auch von Arbeitsmaschinen wie Baggern, Staplern, Kränen und ähnlichen Maschinen, die meist ohne Kennzeichen betrieben werden, etabliert.

Hier überzeugt der Dieselmotor durch seine Robustheit und seiner hohen Effizienz. Um in der Zukunft die hohen und weiter steigenden gesetzlichen Anforderungen an den Schadstoffausstößen erfüllen zu können, ohne dass die Kosten weiter steigen, ist eine Reduzierung des Edelmetalleinsatzes bei den Abgaskatalysatoren erforderlich.

Im Rahmen des Vorhabens sollen Katalysatoren entwickelt werden, die gegenüber dem heutigen Stand der Technik deutlich weniger Edelmetall benötigen. Neben der Anforderung, möglichst effiziente Katalysatoren herzustellen, wird besonderes Augenmerk auf die Alterungsbeständigkeit der Systeme gelegt, damit deren Funktionalität auch den steigenden Lebensdaueranforderungen gerecht werden kann. Mit dieser neuen Generation von Katalysatoren wird eine Edelmetallreduzierung um 30% angestrebt. Dies soll durch die interdisziplinäre, wissensbasierte Zusammenarbeit zwischen einer Hochschule, einem Katalysatorhersteller und einem Abgasanlagen-Hersteller erreicht werden.



Typische Non-Road-Anwendung: Bagger. Zukünftig mit Abgasnachbehandlungssystem;  
Quelle: HJS Emission Technology GmbH & Co. KG

### Koordinator:

Dipl.-Ing. Simon Steigert, HJS Emission Technology GmbH & Co. KG

### Projektpartner:

- HJS Emission Technology GmbH & Co. KG
- Heraeus Precious Metals GmbH & Co. KG
- Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Lehrstuhl Reaktionstechnik

**Laufzeit:** 01.05.2013 bis 30.04.2016

**FKZ:** 03X3580

# Entwicklung von Oxidationskatalysatoren mit minimiertem Edelmetall-Gehalt für die Abgasreinigung von Non-Road-Maschinen (Kennwort: EDMIN)

Heraeus Precious Metals GmbH & Co. KG (HPM): Dr. Rainer Kiemel, Dr. Christian Breuer, Dr. Santiago Casu  
 TU Bergakademie Freiberg (TUBAF): Christoph Wagner, Sebastian Brüning, M. Consuelo Revilla Nebreda, Andreas Pacher, Prof. Sven Kureti  
 HJS Emission Technology (HJS): Simon Steigert, Dr. Bettina Baier, Sandra Arndt, Rafael Rienks, Klaus Herkel

### Projektrahmen:

Auch für sogenannte Arbeitsmaschinen (NRMM), die überwiegend nicht auf der Straße eingesetzt werden, meist also kein Nummernschild haben, werden Verbrennungsmotoren eingesetzt. In der Regel sind dies Dieselmotoren (Verbrauchsvorteil, Drehmoment, geringere Entzündlichkeit der Diesels, usw.). Der Gesetzgeber verschärft auch für diese Motoren die Emissionsvorschriften. Es ist daher erforderlich, insbesondere für zukünftige Maschinen verstärkt Katalysatoren einzusetzen, um die Emissionsziele (für Kohlenmonoxid, CO; Kohlenwasserstoffe, HC; Stickoxide, NO<sub>x</sub>; und Rußpartikel, PM) zu erreichen.

Bei den oft großen Motoren, weisen auch die Katalysatoren ein entsprechendes Volumen auf. Als aktive Komponente kommt überwiegend das Edelmetall Platin (Pt) zum Einsatz. Pt ist ein sehr teurer Rohstoff und nur in endlicher Menge vorhanden. Mit der sukzessiven Umsetzung höherer Emissionsziele werden daher weltweit nennenswerte Edelmetallmengen aufzubringen sein. Das Projekt EDMIN arbeitet aus Gründen der Ressourceneffizienz, aber auch zur Reduzierung der Bauteilkosten daran, den erforderlichen Platin-Gehalt durch neuartige Technologien zu reduzieren.

### Praxisbeispiel:

NRMM mit 112 kW Motorleistung (152 PS), Motor-Hubraum: 6,5 L, Typische Katalysatorgröße für Stufe VI / Stufe V Emissionen: 4,2 L. Heutige Edelmetallbelastung: 45 g/ft<sup>3</sup> bzw. 6,7 g Pt pro Katalysator.

Pt-Wert: 235 €



### Projektziele:

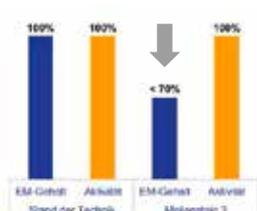


Abb. 1: EDMIN-Zielstellung: Edelmetall-Minderung unter Aufrechterhaltung der Katalysatoraktivität auch gegenüber thermischer und chemischer Alterung.

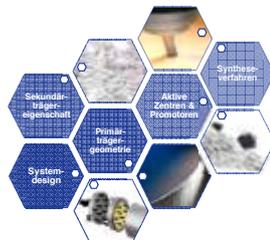


Abb. 2: EDMIN-Arbeitsfelder: Multi-Parameter-Raum der Emissionskatalyse - Auffindung und Ausnutzung von Struktur-Aktivitäts-Beziehungen, um den Nachteilen einer EM-Minderung entgegenzuwirken.

### Exemplarische Arbeiten:

#### Ansatz:

- Erhöhung der thermischen Alterungsstabilität – auch bei verringertem Gesamt-EM-Gehalt – durch Dotierung mit Palladium (Pd).

#### Aufgabenstellung:

- Bei aktuellen Technologien der Pt-Pd-Formulierung wirkt eine partielle Substitution des Pt oftmals stark der auch im Bereich NRMM zwingend erforderlichen Bildung von NO<sub>2</sub> (zur Regeneration eines Partikelfilters/ zur effizienten katalytischen Stickoxidminderung) entgegen.

NO<sub>2</sub> Umsatz bei unterschiedlichen Pd Anteilen (Rest: Pt) Quelle: SAE 2011-01-1134 (2011)

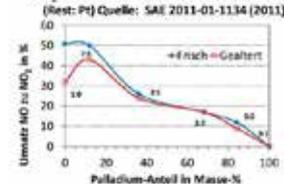


Abb. 3: Stand der Technik bei Pt-Pd-Katalysatoren

#### Messbedingungen:

SV: 30.000 h<sup>-1</sup>; 200 ppmv NO;  
 260 ppmv C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 90 ppmv C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>;  
 8 % CO<sub>2</sub>; 8 % H<sub>2</sub>O; 8 % O<sub>2</sub>; Rest N<sub>2</sub>  
 Alterung: 750 °C, 72 h, 10 % H<sub>2</sub>O

### Arbeitsmethoden:



Abb. 4: Katalysatorbohrkern im Reaktor



Abb. 5: Anlage zur Aktivitätsmessung an Katalysatorwaben



Abb. 6: Einsatzort einer Baumaschine für Tests unter Realbedingungen

#### Iterativer Entwicklungsprozess

- Entwicklung und Beschichtung neuer Katalysatorformulierungen im Labormaßstab durch HPM.
- Messung der Katalysatoraktivität in einem synthetischen Abgas durch die TU-Freiberg (siehe rechts).
- Konditionierung der Katalysatorwaben und Ermittlung des Einflusses auf das Konvertierungsverhalten (hydrothermale Alterung über 16h bei 750°C, 10% H<sub>2</sub>O in Luft).
- Einsatz physikalisch-chemischer Charakterisierungsmethoden zur Ermittlung der Katalysator-Struktur.
- Ableitung von **Struktur-Aktivitäts-beziehungen**.
- Iterative Entwicklung verbesserter Katalysatoren.

#### Bewertung in der Anwendung

- Sukzessive Evaluierung der Ergebnisse in anwendungsnahen Prüfstandtests durch HJS.

### Aktuelle Projektergebnisse:

Durch neuartige Edelmetall-Vorstufen und spezielle Fertigungsprozeduren konnte der übliche Abfall der NO<sub>2</sub>-Bildung bei der Verwendung von größeren Anteilen an Palladium deutlich minimiert werden. Dies eröffnet die Möglichkeiten, höhere Palladiumanteile zu verwirklichen und zugleich die Gesamtedelmetallbelastung bei gleichbleibender thermischer Alterungsstabilität zu senken.

#### Bohrkerngeometrie

- Länge: 50 mm
- Durchmesser: 23 mm

#### Konditionierung:

- V<sub>Pressluft</sub> = 30 L/min
- T = 500 °C
- t = 10 min

#### Messbedingungen:

- T = 500 - 100 - 500°C
- Heizrate: 1,7 K/min
- V<sub>gas</sub> = 30 L/min
- 500 ppmv NO
- 150 ppmv CO
- 50 ppmv C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>
- 10 % CO<sub>2</sub>
- 10 % H<sub>2</sub>O
- 6 % O<sub>2</sub>
- Rest N<sub>2</sub>

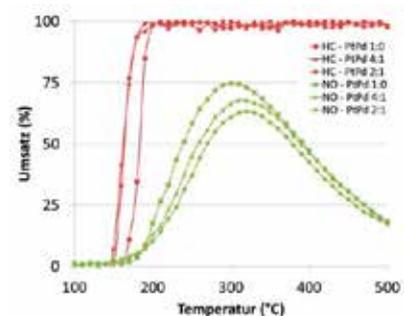


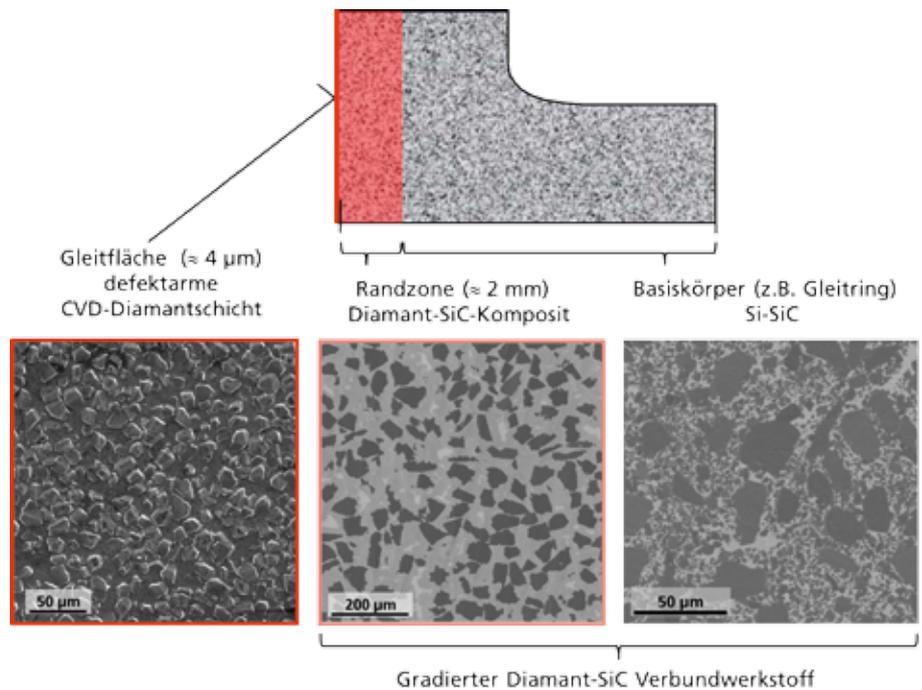
Abb. 7: Zwischenergebnis – Umsatz an HC (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) und Stickstoffmonoxid (NO) der bei Variation des Pt:Pd-Massenverhältnisses an Katalysatoren im Frischzustand.

### Ausblick/Nächste Schritte:

- Verifizierung der ersten, vielversprechenden Ergebnisse in Hinblick auf Reproduzierbarkeit und Alterungsverhalten (thermisch, chemisch).
- Charakterisierung der neuartigen Katalysatoren und Erarbeitung eines kinetischen Modells zum Verständnis der Reaktions-Mechanismen.
- Übertragung von erfolgreichen Labormustern auf anwendungsrelevante Katalysatorgrößen mittels produktionsnahen Verfahren.
- Vergleich der ersten verbesserten Katalysatoren auf einem Motorenprüfstand mit Realabgas und anwendungsnahen Testzyklen.
- Vorbereitung von Demonstratorsystemen mit dem Ziel, diese in realen Feldanwendungen zu testen und zu beobachten.

## Entwicklung eines korrosionsbeständigen Diamant-Siliciumcarbid-Werkstoffsystems für die Energietechnik

Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und mechanische und tribologische Eigenschaften nicht nur der Funktionsflächen sondern auch der gesamten Bauteile in mediengeschmierten keramischen Gleitlagern und Gleitringdichtungen sind entscheidend für einen ressourceneffizienten Einsatz. Bisher ist der Einsatz von SiC- und Si-SiC-Werkstoffen – auch der beschichteten – speziell in der Energietechnik und in der chemischen Industrie noch unbefriedigend. Aufbauend auf einem Werkstoffsystem DiaCer® (diamantbeschichtete Keramiken) wurden für Gleitringdichtungen marktfähige Produkte (DiamondFace®) hergestellt, die eine zufriedenstellende Leistungsfähigkeit für viele tribologische Anwendungen erreichten, jedoch für korrosive Bedingungen und hier insbesondere für Heißwasserbedingungen, wie sie im Bereich der Energietechnik häufig anzutreffen sind, nicht die ausreichende Beständigkeit und Lebensdauer erreichten. Eine wesentliche Ursache für das Versagen unter diesen Bedingungen ist die Unterwanderungs- bzw. Spannungsrisskorrosion am Interface Keramik – Diamantschicht. Um diese zu verhindern, ist das Ziel des Verbundvorhabens die Entwicklung und Erprobung eines neuen Werkstoffsystems DiaDiSC, das aus einem neuartigen gradierten Diamant-SiC Verbundwerkstoff und einer extrem dichten CVD-Diamantschicht besteht und das den hohen Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit unterschiedlicher Komponenten, z. B. bei der Energieerzeugung, genügt. Mit dieser Weiterentwicklung im Hinblick auf eine möglichst universelle



Das Werkstoffsystem DiaDiSC

Korrosionsbeständigkeit sowie der zusätzlichen Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Bauteilen durch die dichte inerte Diamantschicht soll das Projektziel erreicht werden. Die durch die Diamantschicht erreichte Reibwertverminderung senkt wegen des geringeren Energieumsatzes wiederum das Korrosionspotential und erhöht die Energieeffizienz der tribochemisch beanspruchten Lager- und Dichtungsbaueteile. Dabei gilt es auch nachzuweisen, dass sich mit diesem Werkstoffsystem entsprechende Komponenten, die dann auch für viele andere korrosiven Anwendungen einsetzbar sind, wirtschaftlich realisieren lassen.

### Koordinator:

Dr. Andreas Schrüfer, EagleBurgmann Germany GmbH & Co. KG

### Projektpartner:

- EagleBurgmann Germany GmbH & Co. KG
- KSB AG
- CONDIAS GmbH
- Schunk Kohlenstofftechnik GmbH
- ASMEC GmbH
- Cera System Verschleißschutz GmbH
- Forschungsinstitut für mineralische und metallische Werkstoffe (FEE), Edelsteine/Edelmetalle GmbH
- Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS
- Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST
- Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

**Laufzeit:** 01.06.2013 bis 31.05.2016

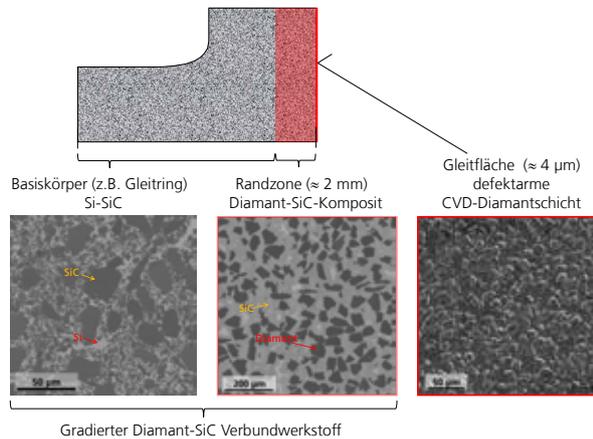
**FKZ:** 03X3583

# Entwicklung eines korrosionsbeständigen Diamant-Silicium-carbid-Werkstoffsystems für die Energietechnik - EkoDiSc

J. Otschik, A. Schrüfer, M. Grasmüller, EagleBurgmann Germany; M. van Geldern, A. Kühl, KSB AG; H. Albert, T. Müller, CeraSystem Verschleißschutz; R. Weiß, A. Lauer, Schunk Kohlenstofftechnik; L. Ackermann, H.-G. Kaiser, FEE; T. Matthée, M. Fryda, CONDIAS; T. Chudoba, K. Mayekar, ASMEC; M. Herrmann, B. Matthey, Fraunhofer IKTS; M. Armgardt, M. Höfer, L. Schäfer, Fraunhofer IST; B. Blug, M. Hörner, G. Moras, T. Hollstein, Fraunhofer IWM

## Problem

Bisher verfügbare DiaCer®-Werkstoffe (diamantbeschichtete Keramiken) haben eine zufriedenstellende Leistungsfähigkeit für viele tribologische Anwendungen erreicht. Allerdings reichen für korrosive Bedingungen (insbesondere Heißwasser) die Beständigkeit und Lebensdauer z. B. für Gleitringdichtungen, Lager und Ventile nicht aus. Eine wesentliche Ursache für das Versagen ist hier die Unterwanderung- bzw. Spannungsrisskorrosion am Interface Keramik – Diamantschicht.



Das Werkstoffsystem »diamantbeschichteter Diamant-SiC-Kompositwerkstoff«

## Lösung

Entwicklung eines neuen Werkstoffsystems »DiaDiSc«

1. gradiertes SiC-Diamantkompositwerkstoff mit 40 - 50 Vol.-% Diamant im Randzonenbereich
2. extrem defektarme, dünne polykristalline Diamantschichten auf dem neuen Kompositwerkstoff; über den hohen Diamantanteil des Substratwerkstoffs wird eine stabile korrosionsbeständige dreidimensionale Grenzfläche mit besonders gutem Schutz vor Unterwanderung erreicht
3. Qualifizierung durch Herstellung, Charakterisierung und Erprobung von Gleitringen, Gleitlagern und Dichtscheiben aus dem neuen Werkstoffsystem unter korrosiven Bedingungen
4. Aufklärung der Korrosionsmechanismen und eine Modellbildung, die die Korrosionsmechanismen mit den Belastungsparametern verknüpft und zu einer zuverlässigen Lebensdauerabschätzung führt

## Ergebnisse



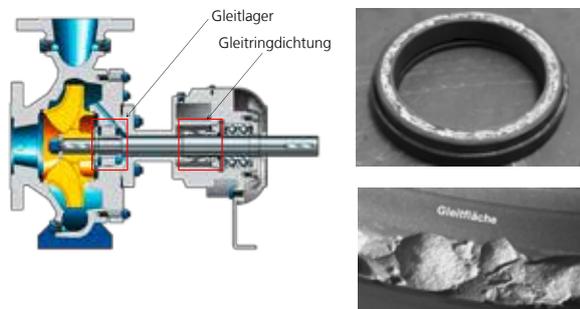
Korrosionsangriff in Heißwasser auf einen unbeschichteten Diamant-SiC-Kompositwerkstoff

Modellierung unterstützt das Werkstoffdesign und erklärt Mechanismen der Tribokorrosion; hier: Bildung von SiOH u. SiH mit Bindungsbruch durch H<sub>2</sub>O

FEM-Simulation des korrodierenden Diamant-SiC-Kompositwerkstoffs: Rissbildung und Rissausbreitung unter Last

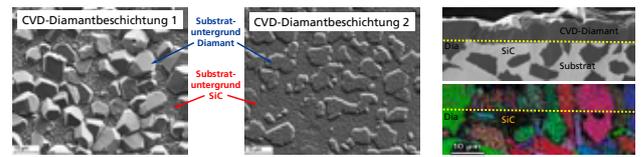
## Anwendungen und Schadensbilder

Gleitlager, Gleitringdichtungen, Ventile und Dichtscheiben in Heißwasserpumpen und Chemieanlagen



Schnittbild Heißwasserpumpe (HPK-L, Fa. KSB AG) mit Gleitringdichtung und Gleitlager (links)  
Schäden an Gleitringdichtungen und Gleitlagern sind die häufigsten Versagensursachen bei Pumpen: BMBF-Projekt ReMain, 2010, Fkz: 02PG1221  
Beispiele: Korrosion an SiC-Gleitring (rechts oben), Elektrokorrosion (rechts unten)

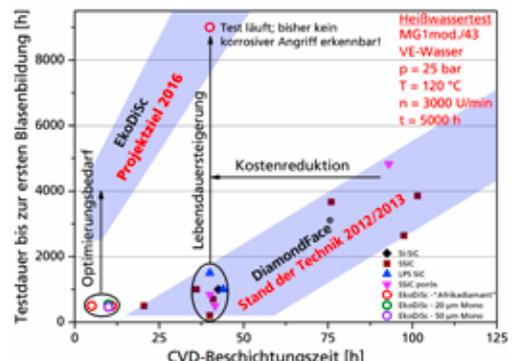
Gefördert mit Mitteln des BMBF im Rahmen der Ausschreibung »Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und Gesellschaft – MatRessource«, Förderkennzeichen: 03X3583



Steuerung der Morphologie der CVD-Diamantschicht auf der SiC- und Diamantphase der Kompositwerkstoffe durch die Wachstumsbedingungen im CVD-Prozess

Ideale epitaktische Verankerung der Diamantschicht an die Substratdiamanten

Aktuelle Bauteilversuche zeigen, dass das Projektziel erreicht werden sollte



## Verbesserung der Galliummaterialeffizienz bei der Galliumarsenidsubstrat- und LED-Herstellung

Das wesentliche Projektziel liegt in der Entwicklung von Verfahren zum effektiven und ressourcenschonenden Materialeinsatz von Gallium in Galliumarsenid-Halbleitersubstraten (GaAs) mit Durchmessern zwischen 100 und 150mm, sowie deren Einsatz zur Herstellung von energiesparenden Leuchtdioden.

Gallium ist Schlüsselrohstoff für die Optoelektronik (u.a. LEDs, Laserdioden), integrierte Schaltungen (analog und digital), einschließlich der Hochfrequenztechnik in allen satellitengestützten Systemen. Es spielt eine zunehmende Rolle für Entwicklungen auf dem Gebiet magnetischer Werkstoffe sowie für Dünnschicht-Solarzellen. Die von der Europäischen Kommission berufene „Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials“ stuft Gallium als ein Metall mit hoher wirtschaftlicher Bedeutung sowie hohen Versorgungsrisiken für die EU ein.

Im Projekt werden neue Ansätze für alle Herstellungsschritte eines Galliumarsenid-Substrates von der Kristallzüchtung über das Kristalltrennen bis

hin zum Oberflächenfinish hinsichtlich des Materialeinsatzes erforscht. So wird die Realisierung eines Substrates mit einem Durchmesser von 150mm und einer verringerten Dicke von etwa  $450\mu\text{m}$  angestrebt. Für die Weiterverarbeitung solcher materialeffizienten Substrate müssen die Technologien für die Herstellung von Leuchtdioden wie Epitaxie und Chipprozessierung, entscheidend verbessert werden. Auf das Handling der extrem dünnen GaAs-Wafer muss besonderes Augenmerk gelegt werden, um eine wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse realisieren zu können.

Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Analyse der Abfallströme aus der Fertigung und der Versuch Gallium mittels effizienter Recycling-Methoden zurückzugewinnen.

Die Projektpartner optimieren die Wertschöpfungskette vom Rohmaterial bis hin zur fertigen Leuchtdiode. Die zwei Industriepartner werden durch ein Fraunhofer-Institut THM unterstützt, das neue Kristalltrennverfahren zur effizienten Materialausnutzung entwickelt.



Quelle: Fotolia

### Koordinator:

Dr. rer. nat. Stefan Eichler, Freiburger Compound Materials Gesellschaft mit beschränkter Haftung

### Projektpartner:

- Freiburger Compound Materials Gesellschaft mit beschränkter Haftung
- OSRAM Opto Semiconductors Gesellschaft mit beschränkter Haftung
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)

**Laufzeit:** 01.02.2013 bis 31.01.2016

**FKZ:** 03X3568

# Verbesserung der Rohstoffeffizienz bei der Herstellung von Galliumarsenid-Substraten und LED's (Galleff)

## Projektpartner:

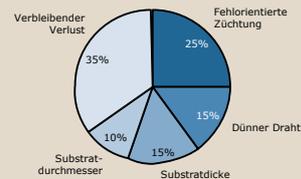
- Freiburger Compound Materials GmbH
- OSRAM Opto Semiconductors GmbH
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme



## Projektziel:

Senkung des spezifischen Galliumverbrauches bei der Herstellung von Galliumarsenidsubstraten und von LED's

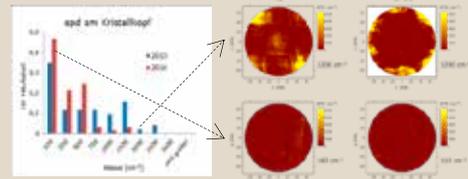
- Hochfehlorientierte Kristallzüchtung 150mm Si-dotiert nach dem VGF-Verfahren (bis zu 15° Abweichung von der (100)-Orientierung)
- Verringerung des Drahtdurchmessers bei Drahtsägen (175µm → 120µm)
- Einsatz dünner Substrate (675µm → 550µm)
- Erhöhung des Substratdurchmesser der LED-Technologie (100mm → 150mm)



## Teilergebnisse Substratherstellung:

Züchtung von fehlorientierten 150mm Kristallen mit niedriger Versetzungsdichte

- Herstellung fehlorientierter Keime
- Optimierung der aktiven (Heizer) und passiven (Isolation) Ofenaufbauten für die VGF Kristallzüchtung
- Anpassung der Technologieschritte für fehlorientierte Kristalle bis zum Sägen (Orientierung, Flat/Notch-Schleifen)
- Recycling von Hilfsstoffen (Boroxid, Tiegel, ...)



Sägen von off-orientierten Kristallen mit dünnem Draht (175µm → 140µm)

- Optimierung der Prozessparameter und Einführung der Mehrfachkristalltrennung
- Herstellung dünner 150mm Wafer (550µm)
- Recycling von SiC und Glykol
- Analyse der Temperaturverteilung im Trennraum



Politur/Endreinigung

- Optimierung der Politur fehlorientierter Silizium-dotierter Wafer
- Silizium-arme (Oberflächenkontamination) Endreinigung



## Nächste Schritte Substratherstellung:

- Ausbeuteerhöhung in der Kristallzüchtung
- Verringerung des Drahtdurchmessers bei Drahtsägen (140µm → 120µm)
- Verbesserung der Recyclingtechnologien (Slurry, Abwasser, ...)

## Teilergebnisse LED-Technologie:

Senkung des spezifischen Galliumverbrauches bei der Herstellung von LED's

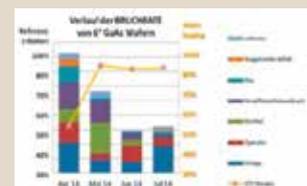
- Erhöhung des Substratdurchmesser der LED-Technologie von 100mm auf 150mm erfordert eine Anpassung der Einzelprozessschritte wie Phototechnik, Wafer-Bonden, Metallisierung, Plasma und Chemie
- Epitaktisches Wachstum auf 150 mm GaAs Wafern und kompletter Prozessfluss zur Herstellung einer Dünnschicht LED wurde auf 150mm Wafern qualifiziert und zur Pilotserienreife gebracht.
- Pilotserienreife erfolgt unter Verwendung von 675µm dicken GaAs Substraten.
- Bruchrate konnte mit dem Hochlauf der Pilotserie deutlich reduziert werden.



## Nächste Schritte LED-Technologie:

Einsatz dünner Substrate: (675µm → 550µm)

- Erste Versuche mit 550µm dicken GaAs Substraten zeigen eine hinreichende Prozessfähigkeit
- Untersuchungen hinsichtlich Bruchstabilität in größerem Volumen geplant für 2015



# GussTough

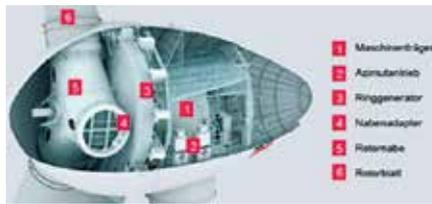
## Substitution von Seltenen Erd-Metallen zur Entwicklung kaltzäher duktiler Gusseisenwerkstoffe

### Resourcenunabhängigkeit für Mobilität und Energie

Duktiles Gusseisen wird seit vielen Jahren für die Herstellung hochbelasteter Bauteile im Maschinen- und Fahrzeugbau verwendet, da dieses Material ein hervorragend ausbalanciertes Verhältnis zwischen Werkstoff-/ Bauteileigenschaften und Kosten aufweist. In Deutschland wurden im Jahre 2011 etwa 1,73 Mio. Tonnen Gusseisen mit Kugelgraphit mit einem Produktionswert von etwa 3,14 Mrd. EURO, wobei die Fahrzeugtechnik mit 750.000 Tonnen und der Maschinenbau mit 544.000 Tonnen den größten Anteil haben. Die Einstellung der hier geforderten Materialeigenschaften erfordert den Einsatz von Cer, das als Seltenes Erd-Metall zur Gruppe der bezüglich Marktverfügbarkeit und wirtschaftlicher Bedeutung von der EU als extrem kritisch eingestuft Rohstoffe gehört.

Ohne den Einsatz von Cer wäre nach derzeitigem Stand der Technik die Weiterentwicklung von Windenergieanlagen in Leistungsklassen höherer Energiedichte gefährdet, der in Deutschland höchst kompetente Industriezweig „Werkzeugmaschinen“ könnte seine technologische Kompetenz und seine weltweite Marktstellung nicht weiter entwickeln und absichern, die Entwicklung von Leichtbauwerkzeugteilen wäre massiv behindert.

Die zentrale Zielsetzung des Verbundforschungsvorhabens GussTough ist daher die Substitution von Seltenen Erden aus dem Herstellprozess für Bauteile aus duktilen Gusseisenwerkstoffen. Gleich-



Wesentliche Elemente einer Windenergieanlage sind als Gussteile ausgeführt. Im Bild: Gondelquerschnitt Enercon E-126 / 7.580 kW.

zeitig wird eine geschlossene Wertschöpfungskette entwickelt, die die mit dieser Substitution unmittelbar verknüpften Potenziale einer bisher nicht realisierbaren Werkstoffoptimierung erschließt.

Das Projekt GussTough legt zur Problemlösung einen ganzheitlichen Forschungsansatz zugrunde. Es werden optimierte Werkstoffsysteme entwickelt, die in der Kombination der Cer-Substitution mit einer festen, aber hochzähen metallischen Matrix eine innovative Werkstofffunktionalität bezogen auf Anwendung und Einsatz bieten. Die Grundforderung nach ökologischer und ökonomischer Effizienz hinsichtlich der verwendeten Einsatzmaterialien muss über die Entwicklung einer optimal angepassten stofflichen Verwertung der Prozessabfälle gewährleistet werden. GussTough umfasst so die vollständige Wertschöpfungskette für die neuen Gusseisenwerkstoffe: Werkstoffherstellung-Bauteilherstellung und Eigenschaftscharakterisierung – Bauteilkonstruktion – Werkstoffkreislauf und Recycling. Die werkstoffwissenschaftlichen Grundlagen für die Herstellung Cer-freier hochzäher duktiler Gusseisenlegierungen werden erarbeitet.

Mit den wissenschaftlichen Partnern sind Kompetenzen aus den Bereichen Metallurgie und Werkstofftechnik im Verbund vertreten. Die materialtechnische Entwicklung der Cer-Substitution erfolgt durch Elkem AS. Die Herstellung von Demonstratoren mit modifizierten Gusseisenwerkstoffen sowie deren stoffliche Wiederverwertung erfolgt durch die Gießereien Heger Guss und CLAAS GUSS. Die Gießereien betreiben darüber hinaus gemeinsam mit MAGMA, dem führenden Entwickler von gießereispezifischer Prozessoptimierungssoftware die Entwicklung angepasster Fertigungsprozesse. Eine wesentliche Rolle spielen

die Endanwender Enercon und MAN, die in den Bereichen regenerative Energieerzeugung und Kraftfahrzeugtechnik für lebensdauergerichte Bauteilauslegung und die Umsetzung der Anwendungen in Form von marktfähigen Demonstratoren verantwortlich zeichnen.



Perfekt aufeinander abgestimmte Entwicklungs- und Fertigungsprozesse bilden die Grundlage für ressourcen- und energieeffiziente Anlagentechnik. Im Bild: Schmelzprozess bei HegerGuss GmbH.

### BMBF- Förderprogramm: „Materialien für eine ressourcen- effiziente Industrie und Gesellschaft MatResource“

#### Koordinator:

HegerGuss GmbH,  
Donnersbergerstr. 48,  
67677 Enkenbach Dipl.-Ing. Hartwig  
Haurand, haurand@hergerguss.de

#### Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Dierk Hartmann,  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften Kempten

#### Projektpartner:

- CLAAS GUSS GmbH, Bielefeld
- Enercon - WRD GmbH, Aurich
- HegerGuss GmbH, Enkenbach
- Hochschule Kempten für Angewandte Wissenschaften, Labor für Werkstofftechnik und Betriebsfestigkeit, Kempten
- MAGMA GmbH, Aachen
- TU Clausthal-Zellerfeld, Institut für Metallurgie, Clausthal-Zellerfeld
- ZF AG, Friedrichshafen

#### Assoziierte Projektpartner:

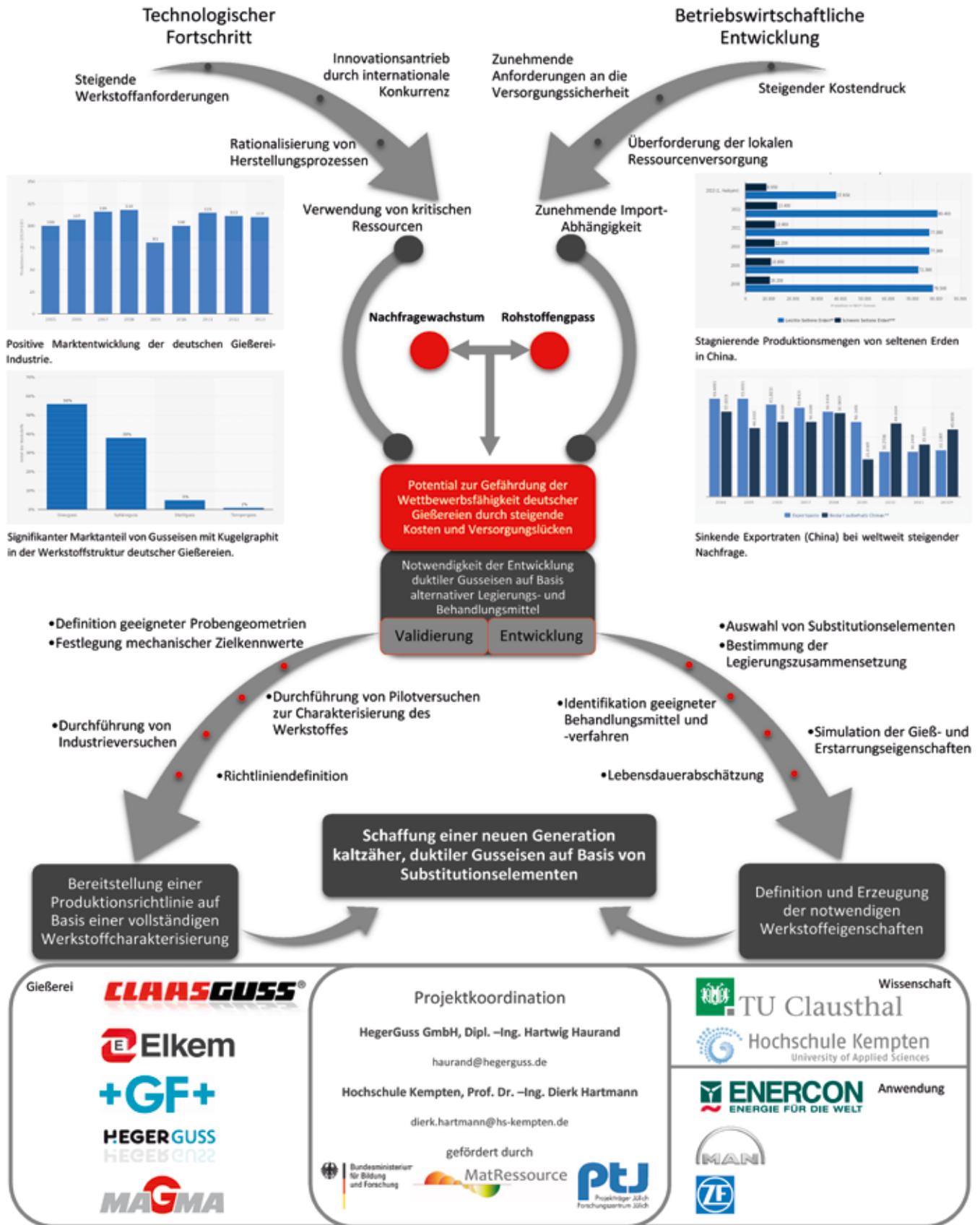
- Elkem AS, Kristiansand, Norwegen
- Georg Fischer AG, Schaffhausen
- MAN Truck & Bus AG, München

**Laufzeit:** 1.8.2014 bis 31.7.2017

**FKZ:** 03X3596F

# Substitution von seltenen Erd-Metallen zur Entwicklung kaltzäher duktiler Gusseisenwerkstoffe

# GussTough



Diagrammquelle: Statista GmbH

Innovative korrosionsbeständige Ofenwandkonstruktionen von Hochtemperaturanlagen für die Verbrennung von Sekundärbrennstoffen, insbesondere in der Zement- und Kalkindustrie

Das Forschungsprojekt hat das Gesamtziel, die Spitzenstellung der deutschen Zementindustrie und des deutschen Zementanlagen- und -maschinenbaues in der Welt auch in der Zukunft zu erhalten, sie auszubauen und am prognostizierten Aufbau neuer Zementwerke und der Modernisierung alter Betriebe, insbesondere im Export, führend beteiligt zu sein. Die Erforschung des Zusammenwirkens der feuerfesten, wärmedämmenden und metallischen Einzelbauteile der Ofenwände zur Einschränkung bis Verhinderung deren Korrosion und damit die Lebensdauer-Verlängerung der Anlagen sind das Hauptziel des Projektes. Die Beherrschung der Korrosionsprobleme ist die Voraussetzung für die erfolgreiche und gesellschaftlich sinnvolle Nutzung der Sekundärbrennstoffe (brennbare Abfälle) in Hochtemperaturanlagen anstelle konventioneller Brennstoffe. Damit hat das Forschungsprojekt neben seinem ökonomischen Effekt geringerer Brennstoffkosten auch das ökologische Ziel der Lebensdauer-Verlängerung von Anlagen, der Einsparung von Materialien, der Schonung von Ressourcen und der Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

---

**Koordinator:**

Klaus Kassau, Refratechnik Cement GmbH

**Projektpartner:**

- Refratechnik Cement GmbH
- AS Schöler + Bolte GmbH – FF-VK
- CALSITHERM Verwaltungs GmbH
- Lafarge Zement Karsdorf GmbH
- Stahlzentrum Freiberg e.V.
- Technische Universität Bergakademie Freiberg – Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik – Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik – Professur für Keramik
- Technische Universität Dresden – Fakultät Maschinenwesen – Institut für Werkstoffwissenschaft

**Laufzeit:** 01.10.2013 bis 30.09.2016

**FKZ:** 03X3590G

# Innovative korrosionsbeständige Ofenwandkonstruktionen von Hochtemperaturanlagen für die Verbrennung von Sekundärbrennstoffen, insbesondere in der Zement- und Kalkindustrie (IKOSEZ)

**Prof. Dr. Ernst Schlegel, Nora Brachhold**  
Technische Universität Bergakademie Freiberg

**Dr. Michael Thieme**  
Technische Universität Dresden, Institut für Werkstofftechnik

**Herrn Dr. Armin Franke**  
Stahlzentrum Freiberg e.V., Freiberg

**Dr. Tobias Wehry**  
Lafarge Cement Karsdorf GmbH, Karsdorf

**Dr. Tobias Hölscher, Dr. Hans-Jürgen Schneider,  
Dr. Winfried Stellmach**  
Calsitherm Verwaltungs GmbH, Bad Lippspringe

**Gerhard Stahl**  
AS Schöler + Bolte GmbH, Witten

**Klaus Kassau, Dr. Johannes Södje**  
Refratechnik Cement GmbH, Göttingen

## Beweggrund:

Die steigende Verwendung von Sekundärbrennstoffen in Hochtemperaturanlagen führt vermehrt zu ungeplanten Produktionsausfällen. Die dadurch entstehenden Kosten, der materielle Mehrverbrauch sowie die Zunahme der CO<sub>2</sub> Emissionen zehren an den Vorteilen der Brennstoffsubstitution.



Zementbrennanlage



Metallische Korrosion



Infiltrierter Stein



Salzangriff auf Feuerbeton



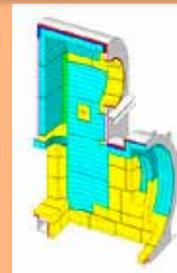
Zerstörter Behälter

## Problemstellung:

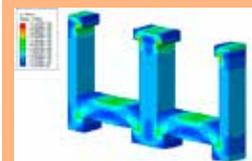
Die einsatzbaren Ersatzbrennstoffe importieren zwangsläufig unerwünschte chemische Elemente, die während des Betriebsprozesses eine Vielzahl von aggressiven Verbindungen eingehen und die feuerfeste Auskleidung der Anlagen zerstören. Ein Entgegenwirken ist nur mit hochwertigen, jedoch knappen Materialien möglich.

## Zielvorstellung:

Das Ziel des Projekts ist die Erforschung des Zusammenwirkens der feuerfesten, wärmedämmenden und metallischen Einzelkomponenten der Ofenwände zur Einschränkung bis Verminderung deren Korrosion. Die Beherrschung der Korrosionsprobleme ist die Voraussetzung für die erfolgreiche und gesellschaftlich sinnvolle Nutzung der Sekundärbrennstoffe.



Feuerfeste Zustellung



FEM-  
Spannungssimulation

## Lösungsansätze:

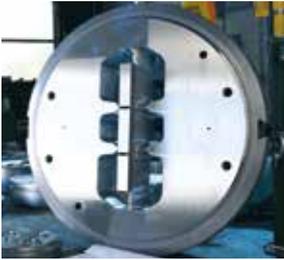
- Verbesserung der thermochemischen Widerstandsfähigkeit von feuerfesten Steinen und Betonen.
- Entwicklung chemisch resistenter Wärmedämmung bei möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit.
- Verwendung korrosionsbeständigerer metallische Werkstoffe durch alternative Legierungskonzepte.
- Schutz der metallischen Anlagen-bzw. Ofenwände der Stahlbaukonstruktion gegen elektrolytisch induzierte Korrosion
- Innovative Feuerfestkonstruktionen zur Verminderung bzw. Beseitigung von Futerschäden.

Alle Bilder mit Genehmigung der Refratechnik Cement GmbH

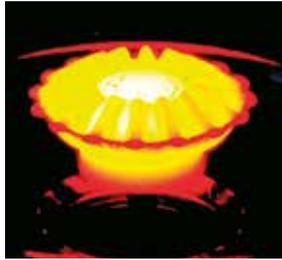


# IP-Werkzeugstahl

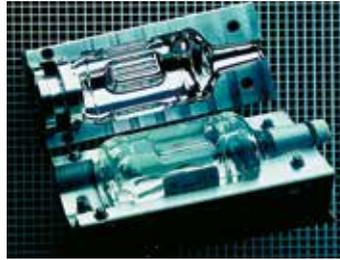
Alternative Legierungskonzepte für Werkzeugstähle: Substitution von sonderkarbidbildenden Elementen durch intermetallische Phasen



Matrize



Schmiedeteil



Blasform



Dornstangen

Quelle : Deutsche Edelstahlwerke GmbH

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung neuer Werkzeugstähle, die ihre spezifischen Eigenschaften mit Hilfe ausgewählter intermetallischer Phasen, auf Basis nichtkritischer Elemente erhalten, um den Einsatz von seltenen und z.T. nur schwer zugänglichen Rohstoffen zu reduzieren.

Werkzeugstähle weisen ein spezifisches Eigenschaftsprofil auf, welches sich durch eine hohe Härte, Warmfestigkeit und Verschleißbeständigkeit beschreiben lässt.

Derzeit werden diese Eigenschaften mit Hilfe von karbidbildenden Legierungselementen wie Chrom, Molybdän, Wolfram, Vanadium und Niob sowie durch die Verwendung des Elementes

Kobalt eingestellt. Studien belegen, dass die meisten der genannten Elemente zu den kritischen Rohstoffen gehören, deren Verfügbarkeit mittel bis langfristig für Europa nicht gesichert ist.

In früheren Untersuchungen wurde gezeigt, dass neben diesem klassischen Ansatz der Härtesteigerung ebenfalls die Möglichkeit besteht, intermetallische Ausscheidungen zur Festigkeitssteigerung zu nutzen. Ende der 70er und 80er Jahre wurden unter dem Oberbegriff der Maraging-Stähle bereits neue Werkstoffe bis zur industriellen Einsetzbarkeit entwickelt, die ihre Eigenschaften durch die Ausscheidung intermetallischer Phasen erlangen, jedoch ebenfalls hohe Gehalte an Molybdän und Kobalt enthalten.

Die Schwerpunkte der erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind im Rahmen des Verbundprojekts wie folgt unterteilt:

- Die Herstellung von Laborschmelzen sowie die Charakterisierung der erzeugten Werkstoffe werden am Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH-Aachen durchgeführt.
- Die Deutsche Edelstahlwerke GmbH übernimmt die Umsetzung ausgewählter Legierungskonzepte in die industrielle Praxis,
- Im Institut für Umformtechnik der FH-Südwestfalen Iserlohn werden neben unterstützenden Prüfaufgaben im Wesentlichen Verschleißuntersuchungen, sowohl an Versuchswerkstoffen, als auch an eingesetzten Werkzeugen durchgeführt.

## Koordinator:

Prof. Wolfgang Bleck, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen - Lehrstuhl und Institut für Eisenhüttenkunde

## Projektpartner:

- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- Deutsche Edelstahlwerke GmbH
- Fachhochschule Südwestfalen

**Laufzeit:** 01.02.2013 bis 31.07.2016

**FKZ:** 03X3566

# Substitution karbidbildender Elemente durch den Einsatz intermetallischer Phasen in Warmarbeitsstählen

A. Zimmermann<sup>a</sup>, W. Bleck<sup>a</sup>, C. Danisch<sup>b</sup>, K. Eger<sup>c</sup>, G. Troost<sup>d</sup>, F. Wendl<sup>d</sup>

## Motivation und Zielsetzung

Das Ziel des Verbundvorhabens ist es, den Einsatz von teuren und bzgl. der Versorgungssicherheit kritischen Elementen wie Wolfram, Chrom, Vanadium und Molybdän in Stählen für Warmarbeitswerkzeuge zu reduzieren. Derzeit werden die charakteristischen Eigenschaften mittels einer martensitischen Matrix und einer zusätzlichen Anlassbehandlung eingestellt, bei der Sonderkarbide ausgeschieden werden, die die Eigenschaften wesentlich bestimmen. In vielen Fällen wird zudem das Element Kobalt zur Steigerung der Warmfestigkeit eingesetzt. Im Rahmen des Projektes sollen intermetallische Phasen auf Basis leichter verfügbarer Rohstoffe den erforderlichen Karbidgehalt zur Einstellung des spezifischen Eigenschaftsprofils verringern und gleichzeitig ohne den Einsatz von Kobalt eine Anwendung auch bei hohen Temperaturen gewährleisten.

## Methodik und Ergebnisse

### Auswahl Legierungssystem

Phasendiagramm Fe-Ni-Al bei 750°C<sup>1</sup>

### Arbeitshypothese

1: Anlaskkurve Standardwerkstoff  
2: Cr zur Stabilisierung von M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>  
3: Ausscheidung intermet. Phasen  
4: Überlagerung von 2+3

### Ausscheidungssimulation

Auslagerungstemperatur in °C

### Herstellung und Verarbeitung von Modelllegierungen

IEHK: Semi-Product-Simulation-Center (SPSC)

### Ermittlung des Eigenschaftsprofils und geeigneter Prozessparameter

Härte in HV10

### Legierungsdesign

- Auswahl Legierungssystem
- Ausscheidungssimulation
- Arbeitshypothese

### Laborversuche

- Modelllegierungen
- Eigenschaftsprofil
- Mikrostrukturanalyse

### Mikrostruktur-analyse

### Rohstoffkosten<sup>2</sup>

Preis in 1.000€/t

### Bewertung der Ressourceneffizienz

- Rohstoffkosten
- Versorgungssicherheit

### Industrielle Umsetzung

- Großschmelze
- Werkzeugeinsatz

### Versorgungssicherheit<sup>3</sup>

Wirtschaftliche Bedeutung

### Kostenvergleich Rohstoffeinsatz<sup>2</sup>

Anteil karbidbildender Elemente in Gew. %

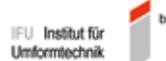
### Schmiedemaschine RF70

### Elektro-Schlacke-Umschmelz-Anlage

Nach Abschluss der Laboruntersuchungen zur Ermittlung des Eigenschaftsprofils und geeigneter Prozessparameter, erfolgt die Umsetzung im industriellen Maßstab und eine Erprobung unter realen Einsatzbedingungen.

Quellen: <sup>1</sup>Eleno, L. et al.: *Intermetallics* 14 (2006), S. 1276; <sup>2</sup>Sauter *Edelstahl* / [www.metallprices.com](http://www.metallprices.com), Stand: 07/2014; <sup>3</sup>EU Commission, MEMO/14/377, Stand: 05/2014

## Partner



Institut für Eisenhüttenkunde  
RWTH Aachen University  
D-52056 Aachen

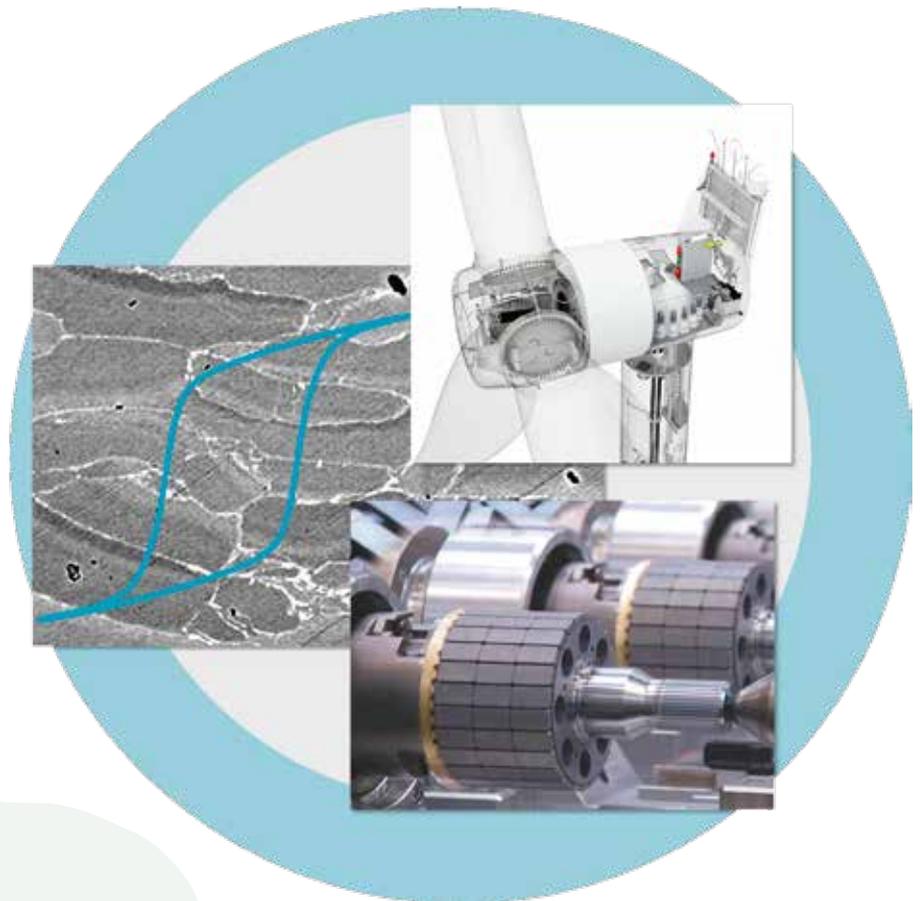
[www.iehk.rwth-aachen.de](http://www.iehk.rwth-aachen.de)  
[alexander.zimmermann@iehk.rwth-aachen.de](mailto:alexander.zimmermann@iehk.rwth-aachen.de)

Das Verbundvorhaben KomMa setzt sich zum Ziel, neuartige werkstoffliche Konzepte für Magnetwerkstoffe zum Einsatz in Stromgeneratoren (u.a. für Windkraftanlagen) und Elektromotoren (u.a. für Elektrofahrzeuge) zu erforschen und zu erproben. Dadurch soll der Bedarf an Seltenerd-basierten Permanentmagneten reduziert werden. Fernziel ist es, diese vollständig durch neue Permanentmagnete zu ersetzen.

Magnetwerkstoffe und insbesondere Permanentmagnete sind wesentliche Leistungskomponenten in heutigen elektrischen Systemen wie z.B. Elektromotoren für die Industrieautomatisierung und Generatoren für die Energiewandlung. Es wird erwartet, dass der zukünftige Bedarf leistungsfähiger und kostengünstiger Permanentmagnete durch den Ausbau der regenerativen Energien, vorwiegend der Windenergie, und der Elektromobilität überproportional anwachsen wird. Heutige Hochleistungs-Permanentmagnete basieren ausschließlich auf intermetallischen Verbindungen der Seltenerd-Metalle im System Nd-Fe-B und unterliegen deshalb bezüglich Preisvolatilität, Versorgungs- und Ressourcensituation der Seltenen Erden Problematik.

Die begrenzte Verfügbarkeit von Neodym und dem als zusätzlichem Legierungselement benötigten Dysprosium macht es dringend erforderlich, nach Alternativen zu Seltenerd-basierten permanentmagnetischen Werkstoffen zu suchen bzw. an einer Minderung der benötigten Menge an Seltenen Erden (insbes. Dy und Nd) zu arbeiten.

Der Lösungsansatz des Projekts beruht auf der Entwicklung neuer hartmagnetischer Materialien auf der Basis



Mikrostruktur und Anwendungen für Permanentmagnete, Quelle: Siemens AG

von Hartferriten und Übergangsmetallen. Dabei sollen hartmagnetische mit weichmagnetischen Materialsystemen im Nanometerbereich nach dem Konzept der Austauschwechselwirkung so kombiniert werden, dass der Anteil an Seltenen Erden vollständig vermieden oder zumindest reduziert werden kann.

Ein besonders großes Potential für Seltenerd-freie Permanentmagnete wird in der internationalen Forschung einem speziellen Eisen-Nitrid zugewiesen. Dieses System eignet sich sowohl als eigenständiger Magnetwerkstoff als auch als Komponente für die angeführten austauschgekoppelten Magnete. Dabei ist aus Sicht der Materialeffizienz und Verfügbarkeit der Rohstoffe entscheidend, dass das ferromagnetische Basismaterial Eisen praktisch unbegrenzt verfügbar ist. Obwohl in Dünnschichtsystemen bereits erfolgreich eingesetzt sind für die

Herstellung von Eisen-Nitrid-basierten Volumenmagneten noch einige Herausforderungen zu meistern.

### Koordinator:

Dr. Michael Krispin, Siemens Aktiengesellschaft - Corporate Technology – CT RTC MAT MSR

### Projektpartner:

- Siemens Aktiengesellschaft - Corporate Technology – CT RTC MAT MSR
- TRIDELTA Hartferrite GmbH
- Technische Universität Darmstadt – Fachbereich Material- und Geowissenschaften – FG Funktionale Materialien
- Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena – Fachbereich SciTec

**Laufzeit:** 01.05.2013 bis 30.04.2016

**FKZ:** 03X3582



# KomMa – Nanoskalige Magnete und Magnetkomposite

M. Krispin<sup>†</sup>, M. Tonski<sup>†</sup>, J. Töpfer<sup>§</sup>, O. Gutfleisch<sup>¶</sup>

<sup>†</sup>Siemens AG – Corporate Technology, <sup>†</sup>Tridelta Hartferrite GmbH, <sup>§</sup>Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena – Fachbereich SciTec, <sup>¶</sup>Technische Universität Darmstadt – Fachbereich Material- und Geowissenschaften – FG Funktionale Materialien

## Motivation

Hochleistungspermanentmagnete basieren ausschließlich auf intermetallischen Verbindungen der Seltenerd-Metalle im System Nd-Fe-B bzw. Sm-Co und unterliegen deshalb bezüglich Preisvolatilität, Versorgungs- und Ressourcensituation der Seltenerd-Problematik.

Mit dem Ausbau von Elektromobilität und erneuerbaren Energien wird die Nachfrage an Hochleistungspermanentmagneten weiter steigen.



Reduktion des Bedarfs an Seltenerd-basierten Permanentmagneten und Erhöhung des Anteils Seltenerd-freier Permanentmagnete

## Zielstellung

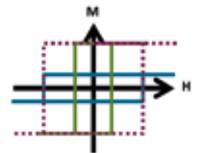
Neuartige werkstoffliche Konzepte für Permanentmagnete auf Basis von Hartferriten und Eisennitriden für den Einsatz in Generatoren und Elektromotoren.

Vorteile:

- Unkritische Rohstoffe ( $Fe_2O_3$ ,  $SrCO_3$ ,  $N_2$ )
- Kostengünstiger Herstellungsprozess von Ferriten im Vergleich zu Seltenerd-basierten Magneten

Ansätze:

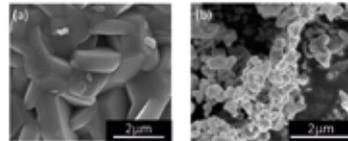
1. Optimierung von Hartferriteigenschaften
2. Synthese von Eisennitrid -basierten Magnetwerkstoffen
3. Austauschgekoppelte Magnete aus
  - optimiertem Hartferrit
  - Material mit hoher Magnetisierung (z.B. Fe)



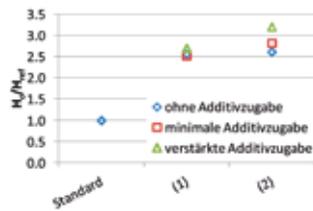
## Optimierung der magnetischen Eigenschaften von Hartferritpulvern

Prozessoptimierung:

- Hochenergiemischung und reduzierte Kalzinierungstemperatur (1)
- Mahlung und Temperung (2)

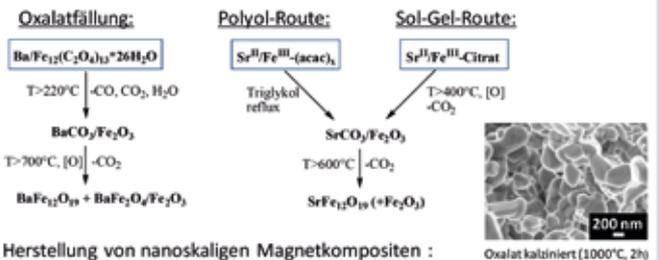


SEM Bilder von Ferritpulver nach Kalzinierung: (a) Standardprozess und (b) verbesserter Prozess

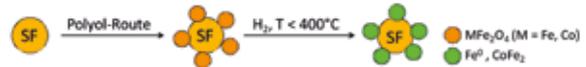


Koerzitivfelderhöhung durch  
• Prozessoptimierung  
• Zugabe von Additivelementen

- Erforschung von Synthesemethoden zur Darstellung nanoskaliger, hartmagnetischer Ferritpartikel mittels:

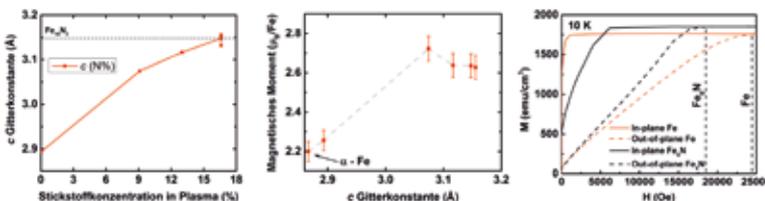


- Herstellung von nanoskaligen Magnetkompositen :



## Entwicklung von Ferro - Nitriden

- Erfolgreiche Präparation von  $\alpha'$ - $Fe_3N$  Filmen mittels RF-Magnetron Sputtering in  $N_2$ -Plasma. Dabei konnte die Gitterkonstante und somit der Grad der Tetragonalität bis hin zum Wert von  $\alpha''$ - $Fe_{16}N_2$  variiert werden.
- Mit steigender Tetragonalität nimmt die Magnetisierung pro Eisenatom zu.
- Eine stärkere Tetragonalität bewirkt eine höhere magnetokristalline Anisotropie.



## Ausblick

- Synthese austauschgekoppelter Magnetsysteme
- Entwicklung einer Methode zur Kompaktierung der Magnetpulver mit eingeschränktem Partikelwachstum
- Herstellung und Bewertung von Prototypen



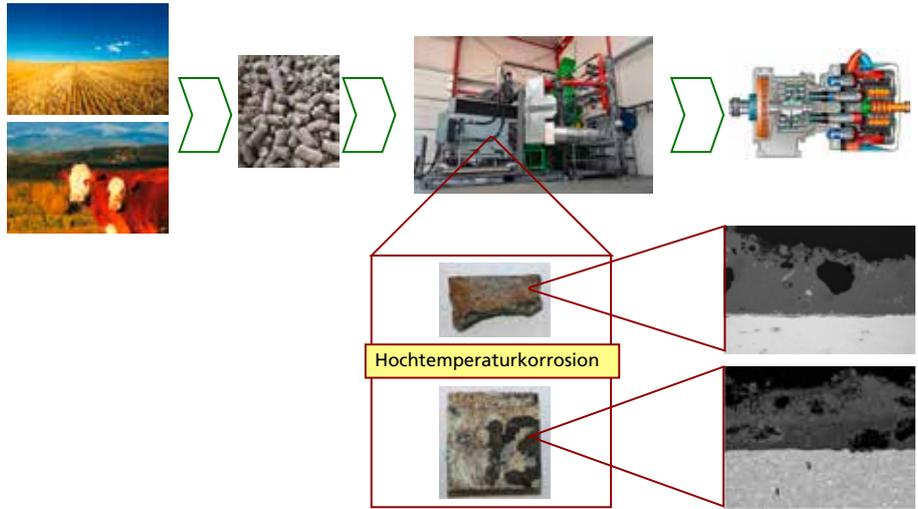
FKZ 03X3582



GEFÖRDEBT VOM  
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Die Vergasung von Biomasse hat das Potential, im Mix der Techniken zur Energiebereitstellung aus regenerativen Quellen eine wichtige Stellung einzunehmen. Von Vorteil ist die witterungs- und jahreszeitunabhängige Energieumwandlung, da die entstehende Wärme und der Strom verbrauchsangepasst erzeugt werden können. Damit hebt sich die Biomassevergasung ganz entscheidend von den anderen regenerativen Energiebereitstellungsverfahren ab. Im Gegensatz zur reinen Verbrennung werden bei der Vergasung brennbare Gase erzeugt, die unmittelbar zur Energiebereitstellung (Verbrennung) weiter genutzt oder auch nach Reinigung in Netze oder Speicher eingespeist werden können und somit zu einer bedarfsgerechten, grundlaststabilen Energieversorgung beitragen. Als Biomasse können neben Holz auch andere Energiepflanzen sowie biogene Reststoffe oder kohlenstoffreiche Fraktionen verwertet werden, die als kommunale Abfälle anfallen.

Bedingt durch die biogenen Festbrennstoffe die in Biomassevergasungsanlagen verwendet werden, gelangen teilweise merkliche Chlor- und Schwefelkonzentrationen in den Prozesskreislauf, was zu einer beschleunigten Materialabzehrung durch Korrosionsvorgänge führt. Erschwerend kommt hinzu, dass in Biomassevergasungsanlagen in räumlich eng begrenzten Zonen mit sehr



Prozesskette vom Reststoff zum „Wertstoff“ Energie. Der Projektfokus liegt auf der Entwicklung korrosionsstabiler Werkstoffsysteme und der Untersuchung des Korrosionsverhaltens.

unterschiedlichen Temperaturen unter reduzierenden, in Teilbereichen unter Umständen auch unter oxidierenden Bedingungen gearbeitet wird. Die Problematik der Hochtemperaturkorrosion ist daher sehr ausgeprägt und kann den wirtschaftlichen Betrieb solcher Anlagen stark beeinträchtigen.

Nach wie vor fehlt am Markt mindestens ein geeigneter Werkstoff, der für die Herstellung der relevanten Teile von Biomassevergasungsreaktoren geeignet ist. Insbesondere Lufteinleitungsbauwerke für Festbettvergaser mit Luft als Ver-

gasungsmittel stellen derzeit noch eine Herausforderung dar.

Im Projektvorhaben sollen zum einen Werkstoffsysteme entwickelt werden, die eine Lebensdauererlängerung solcher durch Hochtemperaturkorrosion belasteten Bauteile ermöglichen. Des Weiteren soll ein Beitrag zum Verständnis der Korrosionsvorgänge und -prinzipien geleistet werden mit dem Ziel, über die bloße Bereitstellung eines geeigneten Werkstoffes hinaus, Möglichkeiten zur Erweiterung der Werkstoffpalette für ähnliche Anwendungen zu schaffen.

### Koordinator:

Dr. Manfred Hülscher, Qalovis GmbH –  
Abteilung Verfahrenstechnik

### Projektpartner:

- Qalovis GmbH – Abteilung Verfahrenstechnik
- Deutsche Edelstahlwerke GmbH – Abteilung Sonderwerkstoffe
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, IFAM Institutsteil Dresden
- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

**Laufzeit:** 01.07.2013 bis 30.06.2016

**FKZ:** 03X3585C

# KorrMat - Werkstoffe für Anwendungen unter korrosiven Atmosphären in der Biomassevergasung (FKZ: 03X3585)



M. Hülscher <sup>a)\*</sup>, H. Hill <sup>b)</sup>, E. Drechsler, G. Wolf, P. Masset <sup>c)</sup>, A. Wiltner, T. Weißgärber, G. Walther <sup>d)</sup>, A. Ossenberg-Engels <sup>e)</sup>

- a) Qalovis GmbH, \* Projektkoordinator
- b) Deutsche Edelstahlwerke
- c) Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
- d) Fraunhofer IFAM, Institutsteil Dresden
- e) VDM Metals GmbH



DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE  
Providing special steel solutions



Fraunhofer  
UMSICHT

Fraunhofer  
IFAM

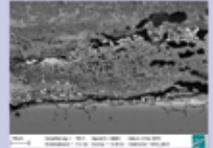
219  
VDM  
Elements

## Motivation

- Biomassevergasungsanlagen bieten den Vorteil der witterungs- und jahreszeitenunabhängigen Energiebereitstellung
- Verwendung von Biomasse aus biogenen Abfällen und Reststoffen (z.B. Hühnerkot, Gärreste)
- Ausgeprägte Hochtemperaturkorrosionserscheinungen bedingt durch:
  - Eintrag hoher S- und Cl-Gehalte mit Festbrennstoffen
  - Wechselnde reduzierende / oxidierende Atmosphären bei Temperaturen > 800 °C (Maximum > 1200 °C)
  - Hohe Aschegehalte (Sulfate, Phosphate, Chloride)



Werkstoffproben nach Einsatz im Biomassevergaser



## Ziele

- **Materialentwicklung** → erhöhte Beständigkeit von Bauteilen (z.B. Begaserdüse) unter Atmosphären in Vergasungsanlagen
- **Verständnis der Korrosionserscheinungen** → vom Laborversuch zum realen Bauteil in Labor- und Real/Testatmosphären

## Lösungsansatz

- Fokus auf Materialien, die passivierende Oxidschichten ausbilden → Hohe Anteile an Cr, Al, Si

### Materialentwicklung:

- **Ziel:** Herstellung der Pulver mittels Verdüsung und endformnahe Bauteilherstellung (z.B. Begaserdüse) bzw. Beschichtung
- Vorversuche zur Einstellung der Zusammensetzung über Mahlungen oder Umschmelzproben aus Pulvermischungen
- Herstellung von Vollmaterialien auf der Basis von Ni-, Fe-, Co-Basislegierungen, MCrAl (M=Fe, Ni), Ni-Mo-Al, MoSi<sub>2</sub>, W-Cr-Si-SiO<sub>2</sub>
- Beschichten von 1.4876 (Nicrofer 3220H) mittels HVOF- oder APS-Verfahren auf der Basis von Ni-Basislegierungen, Ni/Al, NiCrAl, Ni-Mo-Al, MoSi<sub>2</sub>

### Verständnis der Korrosionserscheinungen:

- **Ziel:** Einfluss alternativer Festbrennstoffe auf das Korrosionsverhalten verstehen und Lebensdauer von Bauteilen verlängern
- Beschreibung der korrosiven Atmosphärenbedingungen (Vergasungsanlage Q-PowerGen System Qalovis)
- Untersuchungen zur Oxidschichtbildung (Luft, feuchte Luft) und Vorpassivierung
- Auslagerung vorpassivierter Proben in Vergaserasche im Hochtemperaturkorrosionsprüfstand und unter Realbedingungen

## Aktuelle Ergebnisse

### Materialentwicklung:

- Erste Vollmaterialien mit Al-Gehalten bis 33 m% (Ni-Mo-Al) für Oxidations- und Korrosionsuntersuchungen hergestellt
- Erhöhung des Al-Gehaltes in MCrAl-Proben bis 28 m% mittels Umschmelzproben erfolgt
- Beschichten von Probekörpern (1.4876) mittels HVOF- oder APS-Verfahren erfolgt

### Verständnis der Korrosionserscheinungen:

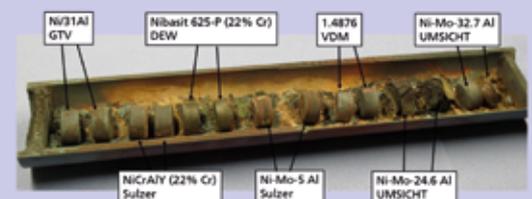
- Oxidationsverhalten bei 850 °C und 1000 °C untersucht (Auslagerung bis zu 10 h, Luft)
- Vorauswahl geeigneter Werkstoffsysteme anhand der Oxidschichtbildung ist erfolgt
- Atmosphärenzusammensetzung basierend auf Betriebsdaten sowie Ergebnissen von Brennstoff- und Ascheanalysen für Holzhackschnitzel bestimmt
- Schwefel- und Chlorgehalte unterschiedlicher Brennstoffe ermittelt → Auslagerungstests erfolgen im Worst Case Szenario



Proben nach Auslagerung in Luft (1000 °C, 10h)

Gasart in Vol%	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	Cl <sub>2</sub>
Anteile bei Vergasung von Holzhackschnitzeln	Rest	18,5	12	10	5	0	6,5	0,030	0,002

Gebundene S- und Cl-Anteile in Brennstoffen (mg/kg)	S		Cl		Gasanteile bei Vergasung (ppm)		
	S	Cl	S	Cl	H <sub>2</sub> S	Cl <sub>2</sub>	
Holzhackschnitzel	1000	73			300	20	
Hühnerkot-Pellets	4800	3214			1370	780	
Gärrest-Pellets	5200	6965			1480	1690	



Proben nach Auslagerung in Asche (850 °C, 72 h, N<sub>2</sub>/ 1.8 Vol% O<sub>2</sub>), Hochtemperaturkorrosionsprüfstand

## Ausblick

### Materialentwicklung:

- Endformnahe Fertigung
- Fügeversuche
- Pulver mit höheren Al-Gehalten für Vollmaterialien und Beschichtungen

### Verständnis der Korrosionserscheinungen:

- Auslagerungen im Worst Case Szenario
- Test unter Realbedingungen im Q-PowerGen System Qalovis
- Untersuchung des Verschlackungsverhaltens

## Entwicklung einer neuartigen Technologie zum Korrosionsschutz an Offshore-Windenergieanlagen

### Längeres Leben für Windenergieanlagen

Mit dem KOWIND-Projekt entwickelt Evonik neuartige Technologien zum Schutz von Offshore-Windenergieanlagen.



In Zeiten knapper werdender Ressourcen sind erneuerbare Energien ein Zukunftsthema. In gut zehn Jahren sollen Windräder etwa 70 Prozent des „grünen Stroms“ produzieren. Immer mehr Offshore-Windenergieanlagen werden in der Nord- und Ostsee geplant. Rauer Wind und stürmische See stellen besondere Anforderungen an die Materialien.

Unter der Koordination von Evonik ([www.evonik.com](http://www.evonik.com)) arbeiten Experten im KOWIND-Projekt an innovativen Lösungen, um die Lebensdauer von Stahlkonstruktionen zu verlängern, die Windkraftanlagen im Meeresboden verankern. Im Mittelpunkt des Projektes steht das Know-How des Geschäftsbereichs Performance Polymers mit seinen Beschichtungstechnologien.

Ziel des dreijährigen KOWIND-Projektes ist die Entwicklung einer neuartigen Technologie zum Korrosionsschutz an Offshore-Windenergieanlagen. Durch den Einsatz neuer Materialien sollen pro Windrad mehrere Tonnen Material eingespart und die Wartungskosten deutlich gesenkt werden.

„Unsere neue Korrosionsschutz-Technologie verspricht sehr guten Schutz der Stahlkonstruktion, auch unter den extremen Belastungen durch Seewasser, Sonnenlicht und mechanischen Einflüssen im Offshore-Einsatz“, sagt Jan Berger, Innovation Manager Large Pipe Projects. Als Beschichtungssysteme sollen im Rahmen des Projekts thermoplastische Umhüllungsmaterialien, neuartige duroplastische Nachumhüllungssysteme sowie Pulverbeschichtungssysteme entwickelt werden. Der Geschäftsbereich Performance Polymers produziert für das Projekt Umhüllungssysteme auf Basis von PA12, die aufgrund ihrer geringen Wasseraufnahme, hervorragenden mechanischen Eigenschaften und sehr guten Barriere-Eigenschaften die bevorzugte Polymerklasse darstellt.

„Die Idee für die Weiterentwicklung bereits bestehender Technologie ist in enger Zusammenarbeit mit der Firma Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH entstanden“, sagt Markus Hartmann, Senior Business Manager Energy Supply bei Performance Polymers. In kürzester Zeit wurden andere Projektpartner ins Boot geholt. Anfang Mai haben die acht Partner aus Industrie und Forschung mit ersten Projektarbeiten begonnen. Denn die Windkraft boomt, die weiteren Wachstumsaussichten sind vielversprechend. In Norddeutschland könnte die Windenergie gar zur Schlüsselindustrie werden.

---

#### Koordinator:

Dipl. Ing. Jan Berger, Evonik Industries AG - Performance Polymers

#### Projektpartner:

- Evonik Industries AG Performance Polymers
- Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) – Institutsteil Bremerhaven,
- Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH,
- TIB Chemicals AG,
- WeserWind GmbH Offshore Construction Georgsmarienhütte,
- Prof. Bellmer Ingenieurgruppe GmbH,
- Universität Duisburg-Essen – Fakultät für Ingenieurwissenschaften – Institut für Produkt Engineering – Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen und
- Institut für Instandhaltung und Korrosionsschutztechnik gGmbH.

**Laufzeit:** 01.05.2012 bis 30.04.2015

**FKZ:** 03X3561

# KOWIND

## Entwicklung einer neuartigen Technologie zum Korrosionsschutz an Offshore-WINDenergieanlagen:



### Herausforderung und Motivation

- Der Korrosionsschutz von Gründungsstrukturen stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor für die Offshore Windenergie Technologie dar
- Unbemannte Windparks, weit auf See gelegene Standorte und eine hohe Anzahl von Gründungsstrukturen stellen große Herausforderungen für die Wartung dar und erfordern eine höchstmögliche Lebensdauer
- Die große Anzahl gleicher Strukturen begünstigt die effiziente Serienfertigung von Gründungsstrukturen mit vorgefertigten Bauteilen



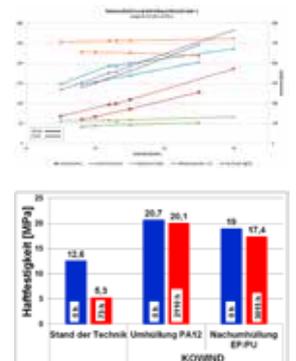
### Lösungsansatz

- **Vorbeschichtete** Rohre und **vorbeschichtete** Knoten werden zu einer Gründungsstruktur verschweißt, nur die Schweißnähte werden danach beschichtet
- Dazu wird ein Beschichtungssystem für Rohre (Extrusionsbeschichtung), ein Beschichtungssystem für Knoten (Pulverbeschichtung/Lackbeschichtung) sowie ein Schweißnahtbeschichtungssystem (Nachumhüllung) mit jeweils erheblich **erhöhter Lebenszeit** entwickelt (mehr als 20 Jahre).
- Die Verträglichkeit und Haftung der Systeme untereinander stellen ein wesentliches Entwicklungsziel dar
- Prüf- und Qualifikationsmethoden sowie ein System zur Beurteilung des Beschichtungssystems vor Ort werden begleitend entwickelt.
- Eine Optimierung des Extrusionsprozesses erhöht die Ressourceneffizienz (Optimierung von Material, Prozessparameter und Extrusionstechnik)



### Aktuelle Ergebnisse

- Polyamid 12 (PA12) für Extrusionsbeschichtung, PU basiertes Nachumhüllungssystem für Schweißnahtbeschichtung entwickelt (Optimierung der Lebensdauer, der Verarbeitungseigenschaften, der Haftung miteinander), Extrusionsversuche und Beschichtungsversuche durchgeführt.
- Prüfprogramm (Offshorekammer, Delta-T Test, NMR Alterungsprüfung) abgeschlossen oder laufend bzw. definiert (Wechselast am Demonstrator), bisherige Ergebnisse äußerst vielversprechend.
- Simulation des Verarbeitungsprozesses auf Basis der Messwertanalyse
- Simulation der Beanspruchung zur Definition geeigneter Prüfkörper
- Prüfprogramm des Demonstrator als Abschluss des Projektes definiert

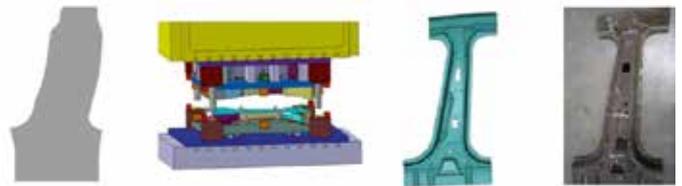


Warmumformbare, mit Mangan und Bor legierte Stähle zeichnen in der Kfz-Industrie ein verstärktes Interesse. Im Vergleich zu den konventionellen Kaltformstählen besitzen sie eine deutlich höhere Festigkeit und ermöglichen damit neue Konstruktionskonzepte mit höheren Sicherheits- und Leichtbauanforderungen. Der spezielle Fertigungsprozess bei der Warmumformung erfordert allerdings die Entwicklung neuer Korrosionsschutzsysteme als Grundvoraussetzung für wirtschaftliche Leichtbaukonstruktionen aus hochfesten Mangan-Bor Stählen.

In dem Verbundvorhaben sollen solche Korrosionsschutzsysteme auf der Basis von Zn-Fe-(Al) mit hohen Fe-Gehalten für hochfeste Warmumformstähle entwickelt werden.

Die Schichtsysteme sollen neben einem lebensdauerlangen kathodischen Korrosionsschutz der Bauteile fertigungstechnische Vorteile wie kurze Prozesszeiten und verbesserte Umformeigenschaften ermöglichen.

Zur Erreichung dieser Ziele sollen zwei unterschiedliche Beschichtungsverfahren, das bereits industriell eingesetzte Schmelztauchen und das neuartige Dampfspritzen so weiterentwickelt werden, dass sie für ein gezieltes Schichtdesign eingesetzt werden können. Die erzeugten Schichtsysteme werden korrosionstechnisch und verarbeitungstechnisch charakterisiert und optimiert. In einem zweiten Schritt werden die Beschichtungsverfahren auf vorhandenen Bandpilotanlagen umgesetzt, um im kontinuierlichen Verfahren größere Mengen beschichteten Materials zu erzeugen. Damit werden die verschiedenen Schichtvarianten in praxisorientierten Verarbeitungsversuchen validiert.



### Koordinator:

Dr. rer. nat. Bernd Schuhmacher,  
ThyssenKrupp Steel Europe AG

### Projektpartner:

- ThyssenKrupp Steel Europe AG
- KIRCHHOFF Automotive Deutschland GmbH
- Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS)
- Max-Planck-Institut für Eisenforschung Gesellschaft mit beschränkter Haftung

**Laufzeit:** 01.05.2012 bis 30.04.2015

**FKZ:** 03X3560

# „Neuartige Korrosionsschutzsysteme für warm umgeformte Blechbauteile – KoWUB“ (FKZ: 03X3560)

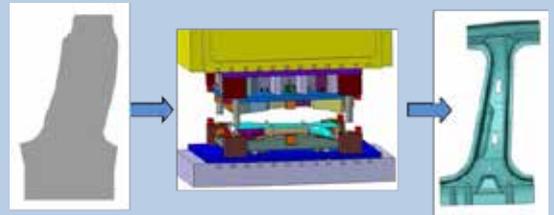
B. Schuhmacher<sup>a)</sup>, Th. Stucky<sup>b)</sup>, M. Rohwerder<sup>c)</sup>, M. Löcker<sup>d)</sup>

- a) ThyssenKrupp Steel Europe, Dortmund \*Projektkoordinator
- b) Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dortmund
- c) Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf
- d) Kirchhoff Automotive GmbH, Attendorn



## Motivation und Zielstellung

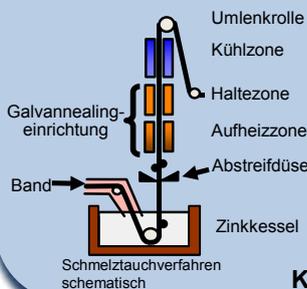
Im Verbundprojekt KoWUB werden hochkorrosionsfeste Schutzsysteme für Warmumformstähle auf Basis von Zink, Eisen und Aluminium erforscht. Diese sollen nach der Warmumformung (~ 900° C) sowohl einen lebensdauerlangen kathodischen Korrosionsschutz der Bauteile als auch eine deutliche schnellere Einstellung des Legierungszustandes bei der Ofenvorwärmung im Vergleich zu konventionellen Legierungssystemen ermöglichen.



**Ziel** ist die Verkürzung der Prozesszeit in der Ofenstrecke, um so eine Erhöhung der **Ressourceneffizienz** und eine **höhere Produktivität** zu erreichen.

## Lösungsansätze

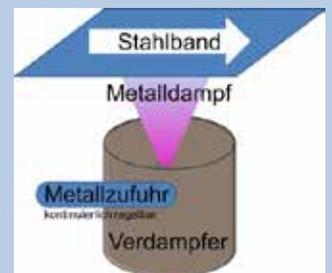
**Schichtdesign:** Screening möglicher komplexer Legierungssysteme hinsichtlich Einfluss der Zusammensetzung auf das Korrosionsverhalten mit „high trough-put“ elektrochemischen Methoden



**Schichttechnologie 1:** inkrementelle Weiterentwicklung des industriell etablierten Schmelztauchverfahrens

**Schichttechnologie 2:** radikaler Neuansatz, Entwicklung einer Hochleistungs-PVD-Quelle

**Umsetzung und Erprobung der neuen Technologien auf vorhandenen Bandpilotanlagen für die kontinuierliche Beschichtung**



## Korrosions- und verarbeitungstechnische Charakterisierung

## Aktuelle Ergebnisse



Kontinuierliche Versuchs-Schmelztauchanlage

- **Schichtdesign:** diverse ternäre Zn-haltige Legierungssysteme wurden gescreent; ein vielversprechendes System wurde bereits identifiziert.
- **Schichttechnologie 1:** diverse ternäre Al-haltige Legierungssysteme wurden im Labor erprobt. Auch hier ergeben sich interessante Ansätze zur Weiterentwicklung.
- **Schichttechnologie 2:** ein Prototyp der neuen Hochleistungs-PVD-Quelle wurde konstruiert und gebaut. Nach dem grundsätzlichen „proof of concept“ läuft derzeit die Optimierungsphase.
- **Vorhandene Bandpilotanlagen** werden derzeit mit diversen Umbauten ausgestattet, um die neuen Schichttechnologien erproben zu können
- Ein **Versuchswerkzeug für die Warmumformung** wurde gebaut, mit dem auch kleinere Proben praxisnah verarbeitet werden können



Hochleistungs-PVD-Quelle im Probebetrieb

## Ausblick



Industrielle kontinuierliche Schmelztauchanlage

- Überführung des modifizierten Schmelztauchprozesses in den **Pilotmaßstab**, besonders vielversprechende Ansätze können in einen Betriebsversuch überführt werden.
- Einbau und Erprobung der Hochleistungs-PVD-Quelle in einer **kontinuierlichen Bandversuchsanlage** (300 mm Bandbreite) für die kontinuierliche Beschichtung
- Herstellung von Demonstrator-Bauteilen
- Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen



Kontinuierliche Bandversuchsanlage für neue Technologien BPA 300





Quelle: Shutterstock



Das Gesamtziel des Vorhabens „MEINDMAP“ ist die Entwicklung von Dichtsystemen für Pumpen und Turbinen, die mit nahezu hundertprozentiger Materialausbeute hergestellt werden können. Der Verbrauch von hochlegierten Stählen und Nickelbasislegierungen mit strategischen

Legierungselementen wie Molybdän, Chrom und Cobalt soll stark minimiert sowie der Verbrauch von kubischen Bornitrid vollständig vermieden werden.

Die erhöhte Nachfrage vor allem in Asien hat in den letzten zehn Jahren zu zunehmenden Abhängigkeiten von starken Kostensteigerungen und extremen Preisschwankungen von Materialressourcen infolge von Verknappungen, geopolitischen Einflüssen und Spekulationen geführt. Im Mittelpunkt der Entwicklung steht eine neuartige dreidimensionale Wabenstruktur (sogenannte Polyederzellstruktur), die in geeigneter Form weiterentwickelt werden soll und sowohl in Turbinen als auch in Pumpen anwendbar ist. Die Verwendung dieser neuen Strukturen soll dabei als Sekundäreffekt durch verbesserte Dichtwirkung zu niedrigeren Blow-by-Effekten und damit zu geringen Energieverlusten führen bzw. zur Einsparung enormer Energiemengen beitragen.

Ein Schwerpunkt der Werkstoffentwicklung ist die Entwicklung eines Verfahrens, mit dem die Fertigung maßgeschneiderter zellulärer Einlaufstrukturen ermöglicht wird. Voruntersuchungen lassen erwarten, dass hervorragende Ergebnisse bezüglich der Dichtwirkung und Lebensdauer mit Polyederzellstrukturen erreicht werden können (s. Bild 1). Solche Strukturen wurden bereits im Labormaßstab entwickelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Fertigungs- und Strukturparameter für die beiden Anwendungsgebiete Turbinen und Pumpen stark voneinander

abweichen. In Pumpen werden eher Materialien mit höheren Festigkeiten benötigt. Dies bedingt große Zellwandstärken und höhere Dichten der porösen Strukturen. Hier soll die Zellenstruktur (Morphologie, Zellgrößenverteilung und Zellwandstärke) hinsichtlich lateraler Dichtigkeit und Spaltsteifigkeit weiterentwickelt werden. In Turbinen ist das Ziel eher die Erreichung weniger hoher Dichten bei geringen, bisher noch nicht hergestellten Zellenweiten.

Das erste Arbeitsziel ist die Beherrschung der Formgebung im Labormaßstab, so dass Bauteile sowohl mit kleinen dünnwandigen Kugeln als auch mit größeren dickwandigen Kugeln homogen hergestellt werden können. Im nächsten Schritt müssen diese Ergebnisse auf den Formteilautomaten und zur Fertigung größerer Strukturen in den Technikumsmaßstab umgesetzt werden.

### Zur Fertigung kleiner Zellenweiten

Für die Fertigung großer Wandstärken werden geeignete Suspensionsrezepturen benötigt, die eine homogene Beschichtung der Templatkugeln im Wirbelbettverfahren zulassen. Darüber hinaus muss die Suspension nach der Beschichtung im getrockneten Zustand eine sehr hohe Dehnbarkeit besitzen, um die starke Expansion während des Aufschäumens defektfrei zu gewährleisten.

### Koordinator:

Dipl.-Ing. Matthias Dudeck, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG – Materials Engineering

### Projektpartner:

- Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG
- Hollomet Gesellschaft mit beschränkter Haftung
- KSB Aktiengesellschaft – Abt. Werkstofftechnik
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) – Institutsteil Dresden

**Laufzeit:** 01.02.2013 bis 31.01.2016

**FKZ:** 03X3572

# Materialeffiziente einlauffähige Dichtungen für Maschinen und Pumpen – MeinDMaP (03X3572)

M. Dudeck<sup>a)</sup>\*, A. Kühl<sup>b)</sup>, F. Reining<sup>c)</sup>\*, P. Quadbeck<sup>d)</sup>

- a) Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG Dahlewitz, \* Projektkoordinator  
 b) KSB AG Frankenthal  
 c) hollomet GmbH Dresden  
 d) Fraunhofer IFAM, Institutsteil Dresden



## Motivation

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Entwicklung von Dichtsystemen für Pumpen und Turbinen, die mit nahezu hundertprozentiger Materialausbeute hergestellt werden können. Dadurch soll der Verbrauch von hochlegierten Stählen und Nickelbasislegierungen mit strategischen Legierungselementen wie Molybdän, Chrom und Kobalt stark minimiert sowie der Verbrauch von kubischem Bornitrid vollständig vermieden werden. Im Mittelpunkt der Entwicklung steht eine neuartige dreidimensionale Wabenstruktur (sogenannte Polyederzellstruktur), die in geeigneter Form weiterentwickelt werden soll und sowohl in Turbinen als auch in Pumpen anwendbar ist. Die Verwendung dieser neuen Strukturen soll dabei als Sekundäreffekt durch verbesserte Dichtwirkung zu niedrigeren Blow-by-Effekten und damit zu geringen Energieverlusten führen

## Problemstellung

### Abrasive Spaltdichtungen für Industriepumpen



Spaltring mit senkrodiertem Zellenprofil (materialintensive, aufwändige Fertigung) für den Einsatz in Hochdruckgliederpumpen



### Abrasive Labyrinthdichtungen für Turbinenluftstrahltriebwerke



Honigwabenstruktur mit gewalzten, umgeformten und gelöteten Zellenprofil (material- und energieintensive Fertigung) für den Einsatz in Mantelstromtriebwerken

## Lösungsansatz

**Neues Werkstoffkonzept:** Entwicklung endformnah herstellbarer 3D Wabenstrukturen

**Fertigungsrouten:** Fertigung durch pulvermetallurgische Wirbelbettbeschichtung von Polystyrolkugeln, Verarbeitung im Formteilautomat und anschließender Wärmebehandlung (Entbindern + Sintern).  
 Umsetzung der Technologie auf industriell einsetzbare Anlagen.

### Untersuchungen zur Anwendung in Pumpen

- Struktureinfluss auf Dichtungsverhalten und Tribologie
- Korrosions- und Verschleißbeständigkeit in Fördermedien
- für drei verschiedene hochlegierte Stähle
- vor und nach Verbindung der Polyederzellstruktur (PZS) mit Vollmaterial (Angießen, Löten, Schweißen)

### Untersuchungen zur Anwendung in Turbinen

- Struktureinfluss auf Dichtungsverhalten und Tribologie
- Hochtemperaturoxidations- und Nasskorrosionsbeständigkeit
- für versch. Materialien, z.B. Ni-Basislegierungen, Stähle
- vor und nach Verbindung der Polyederzellstruktur (PZS) mit Triebwerksbauteil (Löten)
- nach Festigkeit, Versagensverhalten und Wärmeleitung

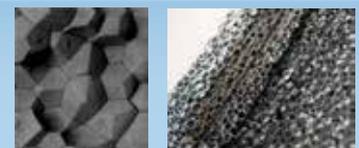


## Aktuelle Ergebnisse

- Temperaturabhängige Korrosionstests in wässrigen Medien für PZS verschiedener Zellgrößen (IFAM) im Vergleich zur Hohlkugelstruktur (hollomet) durchgeführt
- Verschleißbeständigkeit der PZS im Strahlverschleißtest untersucht
- Erster erfolgversprechender Angussversuch nach Gießsimulation absolviert
- Tests von Schweißverfahren zur Verbindung von PZS mit Vollmaterial vorbereitet
- Erste Analyse/Untersuchung der dichtesten Kugelpackungen für den Aufbau der Polyederzellstruktur in einer CAD-Umgebung
- Erste Analyse/Untersuchung der CAD-Polyederzellstruktur (PZS) zur Bestimmung der Kontakt- bzw. Reibflächen in Abhängigkeit von verschiedenen Schnittebenen und im Vergleich zur Hohlkugelstruktur (HMS)

## Ausblick

- Aufbau eines Funktionsdemonstrators für Pumpen und Turbinen
- Test unter praxisrelevanten Bedingungen
- Szenario für die industrielle Fertigung
- Vorbereitung für Kerntriebwerkstest



## Ressourceneffizienz und unkonventionelle „All-Polyethylene“-Nanocomposite für den Leichtbau durch Tandem-Katalyse, kompartimentierte Multizentren-Katalysatoren und mesoskopische Formreplikation

Durch die Verwendung von Faser verstärkten Werkstoffen können in vielen Materialbereichen die Eigenschaften der jeweiligen Polymere erheblich verbessert werden. Typische Fasern wie z.B. Glasfasern sind im Vergleich zum Polymermaterial sehr schwer und verhindern daher oft den Einsatz im ressourceneffizienten Leichtbau. Außerdem ist ein werkstoffliches Recycling praktisch unmöglich. Alternativen wie Nanofüllstoffe sind toxikologisch oft sehr bedenklich und darüber hinaus schwer verarbeitbar. Auf Basis von sehr leichtem und umweltfreundlichen Polyethylenen (PE) sollen in diesem Projekt neuartige Materialien entwickelt werden, bei denen die Faserverstärkung durch bereits während des Herstellprozesses gebildetem ultra-hoch molekularem PE (UHMPE) erreicht wird. Für optimale Materialeigenschaften ist es erforderlich, dass sich das Matrixpolymer und das UHMPE ideal mischen. Da klassische Verfahren wie die Extrusion hier immer versagt haben, zielt dieses Projekt auf eine Mischung direkt am Ort des Entstehens des Polymers: Am Katalysatorkorn, direkt im Polymerisationsreaktor.

Hinzu ist die Entwicklung der neuen Klasse der „Multi-Zentren-Katalysatoren“ erforderlich. Das Matrixpolyethylen, das UHMPE und auch das essentielle Comonomer 1-Hexen werden im Abstand von wenigen Nanometern simultan produziert und damit ideal gemischt.

Ohne die Notwendigkeit aufwendige Reaktorkaskaden zu verwenden, sollen mit den Multi-Zentren-Katalysatoren durch Katalysator-induzierte Nanostrukturbildung, polymere Werkstoffe mit überlegenen Eigenschaften wie erhöhter Dimensionsstabilität kombiniert mit Matrixverstärkung, Gas- und Flüssigkeitssperwirkung sowie elektrischer Leitfähigkeit und erhöhter Schadenstoleranz realisiert werden. Entwicklungsziele des Projekts sind neue gas- und flüssigkeitsdichte PE-Behälter für Flüssiggas, korrosionsfördernde Bio-Treibstoffe, aggressive Chemikalien, neuartige PE-Batteriegehäuse sowie neue PE-Werkstoffe mit erhöhter Wertschöpfung pro Tonne Rohstoff durch verbesserte Bilanz von Festigkeit, Steifigkeit, Schlagzähigkeit und Wärmeformbeständigkeit.



Quelle: Fotolia



Quelle: Fotolia

### Koordinator:

Dr. Shahram Miham,  
Basell Polyolefine GmbH, Frankfurt

### Projektpartner:

- Basell Polyolefine GmbH – Catalyst Systems
- Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg – Fakultät für Chemie und Geowissenschaften - Anorganisch-Chemisches Institut
- Universität Konstanz – Mathematisch-Naturwissenschaftliche Sektion – Fachbereich Chemie – Lehrstuhl für Chemische Materialwissenschaft
- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg – Freiburger Materialforschungszentrum (FMF)

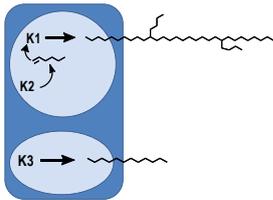
**Laufzeit:** 01.07.2012 bis 30.06.2015

**FKZ:** 03X3565

# Ressourceneffizienz und unkonventionelle „All-Polyethylene“-Nanocomposite für den Leichtbau durch kompartimentierte Multizentren-Katalysatoren, Tandem-Katalyse und mesoskopische Formreplikation

Mathias Ronellenfitsch, Markus Enders (Heidelberg)  
Moritz Baier, Soheila Sameni, Stefan Mecking (Konstanz)  
Markus Stürzel, Jeremia Schwabe, Simon Bodendorfer, Rolf Mülhaupt (Freiburg)  
Basell Polyolefine GmbH (Frankfurt)

## Konzept und Projektziele

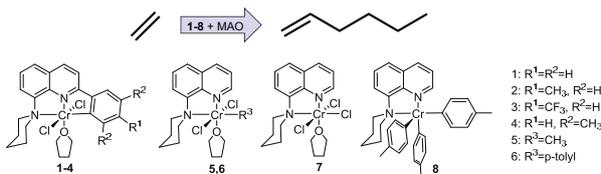


- Ethylen als einziges Monomer für neuartige Polymer-Nanocomposite
- In-situ Erzeugung von 1-Hexen zur Co-Polymerisation mit Ethylen
- Tandem-Katalyse zur parallelen Bildung von PE Komponenten
- signifikante Anteile von verzweigtem UHMWPE
- Nanostrukturbildung durch Kristallisation



⇒ „all-Polyethylen“-Nanokomposite mit hoher mechanischer Stabilität und gutem Verarbeitungsverhalten

## Entwicklung neuer Trimerisierungskatalysatoren



- Intramolekulare CH-Aktivierung bei Aminoarylchinolin-Liganden führt zu 1 - 4
- Zugabe von Methylaluminoxan (MAO) zu 1 - 8 führt zu aktiven Katalysatoren
- Selektive Trimerisierung von Ethylen zu 1-Hexen
- Aktivitäten bis zu 20000g/gCrh bei Selektivitäten von 80-90% für 1-Hexen
- Trägerung der neuen Katalysatoren auf SiO<sub>2</sub> für Tandemkatalyse

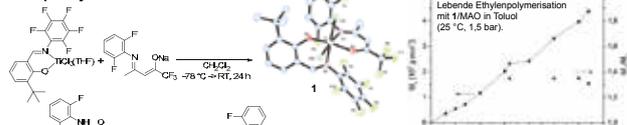
entry	complex	amount [μmol]	T [°C]	p [bar]	activity [g/(Cr)h]	1-hexene activity [g/(Cr)h]	1-hexene [wt %]	C8 [wt %]	C10 [wt %]	C12 [wt %]	other [wt %]	PE [wt %]
1 <sup>a)</sup>	5	8.1	49-51	25	13800	10800	78	13	0	0	6	3
2	5	10.2	50-52	10	12600	10900	87	4	0	0	5	4
3 <sup>b)</sup>	5	8.2	47-53	10	9700	8900	92	5	0	0	3	0
4	5	10.7	48-52	10	20200	16800	83	6	0	0	6	5
5	7	10.4	50-58	10	3000	1700	54	6	1	0	6	33

Tabelle 1: Trimerisierungsergebnisse. Bedingungen: 83 ml Toluol, 1 ml MAO-Lsg. (30% in Toluol), 30 min Reaktionszeit; a) 2 ml MAO-Lsg. (10% in Toluol), 60 min Reaktionszeit; b) Katalysator geträgert auf Silica, 70 ml Heptan, 1 mmol Triisobutylaluminium.

## Katalysatoren für die Bildung von UHMWPE

Enolatimin- und Phenoxyimin-titaniumkomplexe, welche in ortho Position der Phenylsubstituenten fluoriert sind ermöglichen die lebende Polymerisation von Olefinen. Dadurch können in Abhängigkeit von der Polymerisationsdauer sehr hochmolekulare Polymere erzeugt werden. Aus diesem Grund wurden diese Katalysatoren für die Darstellung von UHMWPE mit Molekulargewichten von bis zu  $M_n \cdot 3 \times 10^7 \text{ g mol}^{-1}$  verwendet.

### Komplexsynthese



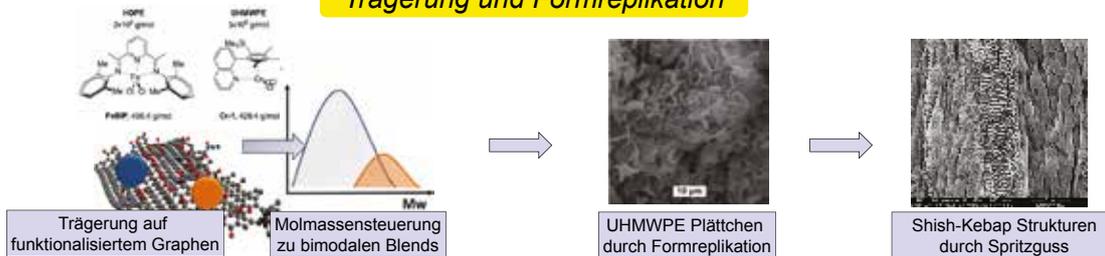
### Katalysatorträgerung und Ethylenpolymerisation

30% MAO (+3) / SiO<sub>2</sub> → 0°C → RT, 2 h → 2 in Toluol / 0°C, 1 h → mit Heptan waschen im Vakuum trocknen → geträgert Katalysator

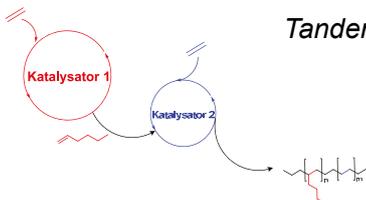
Nr.	Katalysator [μmol]	T [°C]	P [bar]	1-Hexen [mol L <sup>-1</sup> ]	Ausbeute [g]	Aktivität [10 <sup>4</sup> g/(mol <sup>2</sup> h)]	Einbau [g/g]	FP [g/g]	M <sub>w</sub> <sup>a)</sup> [10 <sup>4</sup> g/mol]	T <sub>g</sub> <sup>b)</sup> [°C]	
1	2 (2)	25	4	3	0	2.0	0.32	0	36	9	147/137
2	2 (2)	25	10	1	0	2.5	1.22	0	30	19	-
3	2 (2)	25	30	1	0	4.1	2.82	0	52	19	-
4	2 (2)	25	40	1	0	6.3	3.10	0	72	31	148/137
5	2 (2)	70	30	2.5	0	4.1	0.80	0	37	12	147/137
6	2 (2)	25	4	0.5	0.1	0.5	0.25	2.1	-	-	159/129
7	2 (2)	25	4	0.5	0.4	0.6	0.48	3.7	-	-	135/114
8	2 (2)	70	30	0.5	0.5	1.7	1.56	-	-	-	135/124
9	2 (2.5) / 3 (2.1)	70	30	2	0	33.2	17.60	0	-	-	143/128

Polymerisationsbedingungen: 100 mg 2/MAO/SiO<sub>2</sub> (20 μmol(Ti) g(Katalysator)<sup>-1</sup>, Al/Ti ~300) bzw. 40 mg 2/3/MAO/SiO<sub>2</sub> ((22 μmol(Ti) + 1.7 μmol(Fe)) g(Katalysator)<sup>-1</sup>), 100-500 ml Heptan, 0.25-1.0 mmol i-Bu<sub>3</sub>Al + Intrinsic Viskosität nach Martin (log(η<sub>inh</sub>) = log(IV) + K × c × IV; K = 0,139) bei 135 °C in Dekalin (-0.05 mg/mL Polymer; 5 g/L Irganox 1076). <sup>a)</sup> Viskositätsmittler Molekulargewicht nach Margolies (M<sub>n</sub> = 5.37 × 10<sup>4</sup> × IV<sup>1.49</sup>). <sup>b)</sup> Bestimmt mittels DSC (10 K min<sup>-1</sup>), erste und zweite Aufheizkurve.

## Trägerung und Formreplikation



## Tandemkatalyse



- In-situ Bildung von 1-Hexen
- Selektiver Einbau von 1-Hexen in UHMW-Phase
- UHMW-LLDPE besitzt geringe Kriechenschaften bei gleichzeitig guter mechanischer Stabilität

Cr-I [μmol L <sup>-1</sup> ]	FeBP [μmol L <sup>-1</sup> ]	Cr-I [μmol L <sup>-1</sup> ]	Ausbeute [g]	Aktivität [g/(mol <sup>2</sup> h)]	M <sub>w</sub> [g/mol]	FP [g/g]	UHMWPE Füllstoffgehalt [wt %]
0.4	2.00	18.0	27	18 300	362	9.4	9
0.8	2.7	28.8	181	26 200	474	8.9	15
1.2	2.7	38.8	180	30 800	578	8.2	16
1.6	2.7	37.2	470	38 500	666	16.8	17

Weitere Bedingungen: (a) bestirrt mit Zn-Hf-Ge-C; (b) 600 ml Reaktor; n-Heptan = 300 ml; TBAI = 1.8 mmol; P<sub>max</sub> = 5 bar; P<sub>0</sub> = 150 mg; T<sub>max</sub> = 42°C; t<sub>max</sub> = 80 min; (c) 1.5-vektoriertes n-Heptan = 800 ml; TBAI = 2.0 mmol; P<sub>max</sub> = 5 bar; T<sub>max</sub> = 42°C; t<sub>max</sub> = 120 min.

# NanoEmission

## Untersuchung des Emissionsverhaltens von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung



Quelle: Shutterstock



Quelle: Shutterstock



Quelle: Shutterstock

Im Projekt „Untersuchung des Emissionsverhaltens von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung“ werden für ausgewählte, häufig verwendete nanopartikelhaltige Produkte aus dem Bereich der kommerziellen Nutzung, das Verhalten und die Abscheidung von Nanopartikeln bei der thermischen Abfallbehandlung untersucht.

Dabei wird der gesamte Weg vom Reststoff über die Verbrennung, die Filterung des Abgases, die Freisetzung in die Umwelt bis hin zur toxikologischen Bewertung der Wirkung auf den Menschen und die Umwelt betrachtet. Durch die Auswahl und Adaption geeigneter Filtermedien

soll die Abscheidung definierter Nanopartikel gezielt realisiert werden. Mit den anfallenden nanopartikelhaltigen Proben erfolgt eine Bewertung hinsichtlich eines vor allem aus humantoxikologischer Sicht notwendigen Abscheidens gefährlicher Nanopartikel aus dem Abgas.

Neben den Verbrennungsversuchen im Technikumsmaßstab finden Feldversuche bzw. Messkampagnen unter Einsatz nanopartikelhaltiger Materialien in einer Müllverbrennungsanlage statt, um die Übertragbarkeit von Filtertechnik und Analysemethoden in die Praxis und damit die Anwendbarkeit auf reale Reststoffmischungen hin zu prüfen.

### Koordinator:

Dipl.-Ing. Samir Binder,  
Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik  
(UMSICHT-ATZ)

### Projektpartner:

- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT-ATZ)
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Fakultät 5 – Georessourcen und Materialtechnik – Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER)
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg – Technische Fakultät – Department Chemie- und Bioingenieurwesen – Feststoff- und Grenzflächenverfahrenstechnik
- Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg – Medizinische Fakultät – Institut für Umwelttoxikologie
- Herding GmbH Filtertechnik
- Junker-Filter GmbH – Abt. R & D Forschungsabteilung
- Filtration Testing Equipment & Services GmbH
- MVA Weisweiler GmbH & Co. KG – Geschäftsleitung

**Laufzeit:** 01.05.2013 bis 30.04.2016

**FKZ:** 03X3578

# NANEMISSION

## Untersuchung des Emissionsverhaltens von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung

Julia Zach<sup>1</sup>, Michael Jakuttis<sup>1</sup>, Pawel Baran<sup>2</sup>, Peter Quicker<sup>2</sup>, Sarah Thomas<sup>3</sup>, Felix Glahn<sup>3</sup>, Heidi Foth<sup>3</sup>, Henning Förster<sup>4</sup>, Wolfgang Peukert<sup>4</sup>, Anja Hirte<sup>5</sup>, Jürgen Junker<sup>5</sup>, Reiko Fischer<sup>5</sup>, Stefan Hajek<sup>6</sup>, Erwin Schmidbauer<sup>6</sup>, Andreas Fries<sup>7</sup>, Udo Martinett<sup>7</sup>, Peter Gäng<sup>8</sup>

1 Projektkoordination: Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, Tel: +49 9661 908-418, Email: julia.zach@umsicht.fraunhofer.de,  
2 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 3 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 4 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,  
5 Junker-Filter GmbH, 6 Herding GmbH Filtertechnik, 7 MVA Weisweiler GmbH & Co. KG, 8 FilTEq GmbH

### Projektpartner

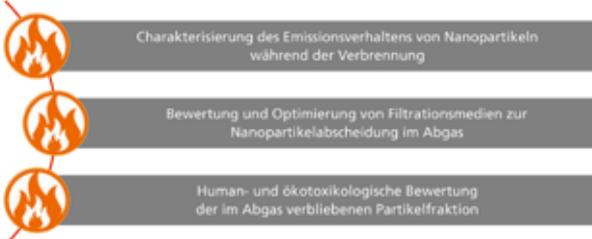
aus Forschung...

und Industrie



### Zielsetzung

Erkenntnisgewinn zum realitätsnahen Emissions- und Abscheideverhalten von Nanopartikeln bei der thermischen Abfallbehandlung



### Konzept

- Aufbau einer Modellfilterapparatur und eines Filtertestprüfstandes (Untersuchung bzgl. Abscheideleistung, Druckverlust etc. an mit Nanopartikeln versetzter Originalasche einer MVA)
- Verbrennungsversuche unter Zugabe definierter Nanopartikel im Technikumsmaßstab (Rost-, Wirbelfeuerung) und unter großtechnischen Bedingungen (MVA)
- Identifizierung und Bilanzierung von Nanopartikeln in den Verbrennungsrückständen, im Filtermaterial und im Abgas
- Filteroptimierung und -bewertung in Modellversuchen durch systematische Variation der relevanten Betriebsparameter (Filtermaterial, Filtrationsgeschwindigkeit, Staubkuchenart und -struktur, Regeneration des Filtermediums) und in realen Verbrennungsversuchen
- Abschätzung der biologischen Wirkmechanismen von Nanopartikeln vor und nach der Verbrennung durch detaillierte Untersuchungen zur Aufnahme in Zellen, der Induktion von oxidativem Stress, zu Effekten auf die Genexpression, zum genotoxischen Potenzial sowie der Induktion von Entzündungen und Apoptose

### Zwischenergebnisse

Projektspezifische Nanomaterialien

**Titandioxid (Rutil-Modifikation)**

**Bariumsulfat**

**Aluminiumoxid (Theta-Modifikation)**

**Ceroxid**

• Herstellerangabe Primärpartikel: ~ 20 nm

• Herstellerangabe Primärpartikel: ~ 60 nm

• Herstellerangabe Primärpartikel: ~ 11 nm

• Herstellerangabe Primärpartikel: ~ 1 nm

Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Nanomaterialien

**Aufbau Feuerungseinheiten, Filter- und Messtechnik**

• Aufbau und Anpassung einer 100 kW Wirbelfeuerung und einer 100 kW Rostfeuerung mit nachgeschaltetem Heißgasfilter abgeschlossen

**Herstellung und Verbrennungsverhalten nanomaterialhaltiger Musterbrennstoffe**

• Anlehnung an Ersatzbrennstoff (Wirbelfeuerung) und Hausmüll (Rostfeuerung)

→ Homogene Einbringung der Nanomaterialien mittels Pelletierung in Holzfraktion möglich

→ Brennstoffcharakterisierung zeigt eine realitätsnahe Anlehnung an typische Zusammensetzungen

→ Verbrennungsverhalten der Musterbrennstoffe unzureichend, keine stabile Verbrennung möglich

Untersuchungen zum Abscheideverhalten von Nanomaterialien

**Aufbau VDI Filterprüfstand**

• Aufbau, Erweiterung und Inbetriebnahme der Filterprüfstände sind abgeschlossen

• Filtrationsexperimente nach VDI 3926 mit Filtermedium späterer großtechnischer Versuche (MVA)

→ Gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, großer Einfluss des Druckverlustes und der Anströmgeschwindigkeit auf das Filtrationsergebnis

**Aufbau der Filtertechnik zur Untersuchung des Langzeitverhaltens textiler Filter im Praxisbetrieb einer MVA**

• Aufbau eines Bypassfilters mit textilen Filtermedien

• Aufbau einer mobilen Filtersonde zur Untersuchung der Filtration von Nanopartikeln im Abgas



Abb. 1: Rostfeuerung

Abb. 2: Wirbelfeuerung

Abb. 3: Filtereinheit

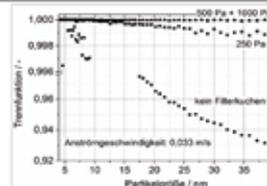


Abb. 4: Einfluss Druckverlust auf Trennfunktion



Abb. 5: Bypassfilter



Abb. 6: Mobile Filtersonde

Untersuchungen zum toxikologischen Verhalten von Nanomaterialien

**Zytotoxizitätstest von nanopartikulärem Aluminiumoxid an Lungentumorzelllinie H322**

• MTT-Test: Reduktion des MTT-Farbstoffes durch mitochondriale Dehydrogenasen vitaler Zellen

• Resazurin-Test: Messung der metabolischen Aktivität vitaler Zellen

→ Dosis- & zeitabhängiger Vitalitätsverlust in beiden Tests nach Inkubation mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nanopartikel

**Herstellung und Charakterisierung von Nanomaterialsuspensionen**

• Herstellung Nanopartikel-Suspensionen in verschiedenen Medien (DMEM, AECG, Daphnien- und Algenmedium) mittels Ultraschallanlage und Charakterisierung mittels dynamischer Lichtstreuung (DLS)

→ Teilweise starke Agglomerationsseffekte der Nanopartikel (besonders Ceroxid)

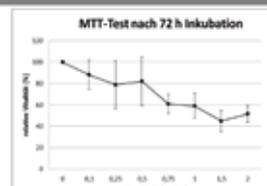
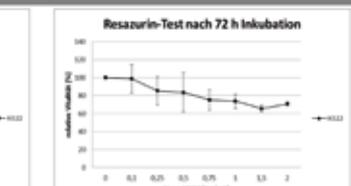


Abb. 6 und 7: Zytotoxizitätstests von nanopartikulärem Aluminiumoxid nach 72 Stunden Inkubation



### Geplante Arbeiten

- Charakterisierung der Nanomaterialien entlang der projektspezifischen Arbeiten
- Vorversuche zum Emissions- und Abscheideverhalten der Modell-Nanomaterialien in Holzpellets als Brennstoff
- Toxikologie: Testung Kompatibilität von Medien und Zusätzen (Proteine, Tenside) mit Primärzellen
- Installation des Bypassfilters in der MVA Weisweiler

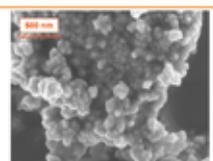


Abb. 8: Bariumsulfat in Pulverform

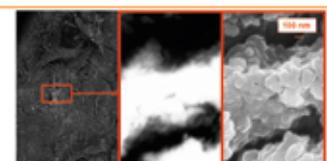


Abb. 9: Bariumsulfat in Holzmatrix gebunden

### Laufzeit und Förderung

Das Forschungsprojekt hat eine Laufzeit vom 01.05.2013 bis 30.04.2016 und wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung



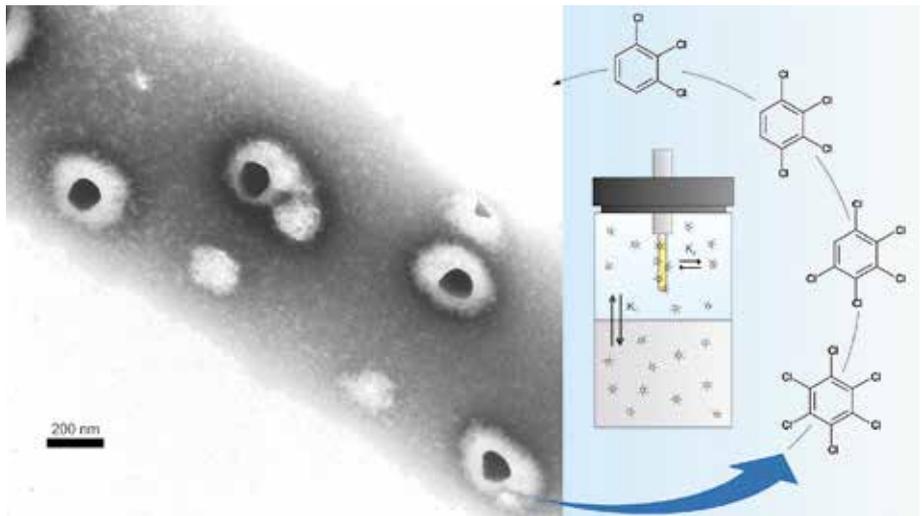
BMBF-Forum MatResource, Darmstadt

## Mikrobielle Synthese und Recycling von Hybrid Palladium-Nanokatalysatoren und ihre Anwendung für die Behandlung von persistenten Umweltschadstoffen

Platingruppenmetalle werden als Industriekatalysatoren in chemischen Prozessen, zur Reinigung von technischen Gasen, als Abgaskatalysatoren und in vielen weiteren Produkten der Automobil-, Elektronik-, und Medizinindustrie genutzt. Außerdem dienen sie zur Erzeugung und Speicherung alternativer Energien zum Beispiel in Solarzellen oder bei der Wasserstoffspeicherung in Brennstoffzellen. Die Entwicklung der Zukunftstechnologien hat die Nachfrage nach vielen Platingruppenmetallen verstärkt. Der ständig steigende Bedarf kann in Zukunft nicht mehr über die verfügbare Fördermenge aus den Minen gedeckt werden.

Neben der effizienten Nutzung vorhandener Ressourcen ist daher ein vollständiges und nachhaltiges Recycling bzw. die Aufbereitung der Edelmetalle aus verschiedensten Industrienwendungen nötig. Die derzeit verwendeten konventionellen pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Recycling-Methoden sind jedoch wenig nachhaltig und mit hohem Energieaufwand bzw. dem Einsatz und der Freisetzung von giftigen Chemikalien verbunden. Im Rahmen von NanoPOP werden umweltfreundlichere „biometallurgische“ Recycling-Methoden entwickelt.

So sollen bei diesem Forschungsvorhaben Konzepte für ein nachhaltiges Recycling und eine ökonomisch wettbewerbsfähige



Gerd Hause, Michael Bunge, Leonard Böhm, 2013

Alternative für die Rückgewinnung von Edelmetallen aus metallhaltigen Abfällen und Abwässern erprobt werden. In dem nanobiotechnologischen Verfahren nutzen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Schwermetall-tolerante Bakterien als „recyclbare“ Produzenten. Die Bakterien erzeugen gleichzeitig höchst aktive Nanokatalysatoren auf nachhaltigem Weg. Bei diesem biotechnologischen Prozess laufen mikrobielles Wachstum, Metallreduktion und Nanopartikel-Bildung simultan ab.

Die mit Hilfe von Bakterien produzierten Edelmetall-Nanopartikel sollen für die

Entfernung von langlebigen Schadstoffen und pathogenen Mikroorganismen eingesetzt werden – ein Ansatz, der auf die Behandlung von Abwässern und auf Umweltsanierungsverfahren erweiterbar ist. Mit der Verwendung der hergestellten Materialien für neuartige Beschichtungstechniken und Edelmetallbeschichteten Keramikoberflächen und Nanofasern bleibt das Verfahren nicht auf chemische Technologien und Umwelttechnologien beschränkt. Es lässt sich auch für verschiedene andere industrielle Anwendungen nutzen, zum Beispiel in der Fahrzeugindustrie.

### Koordinator:

Dr. Michael Bunge, Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Angewandte Mikrobiologie-IFZ

### Projektpartner:

- Justus-Liebig-Universität Gießen
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ), Leipzig
- Technische Universität Dresden
- Institut für Gewässerschutz Mesocosm GmbH, Homberg/Ohm
- Rhenotherm Kunststoffbeschichtung GmbH, Kempen
- Tomsk Polytechnic University, Russland (assoziiertes Partner)

**Laufzeit:** 01.02.2013 bis 31.01.2016

**FKZ:** 03X3571

# NANOPOP: MIKROBIELLE SYNTHESE UND RECYCLING VON HYBRID/PALLADIUM-NANOKATALYSATOREN UND IHRE ANWENDUNG FÜR DIE BEHANDLUNG VON PERSISTENTEN UMWELTSCHADSTOFFEN

Michael Bunge, Michael Schlüter, Leonard Böhm, Rolf-Alexander Düring, Daniele Comandella, Katrin Mackenzie, Matthias Werheid, Nikolai Gaponik, Alexander Eychmüller, Vladimir An, Christina Hensch, Volkmar Eigenbrod, László Dören, Peter Ebke, Markus Müller, Armin Wisthaler, *et al.*



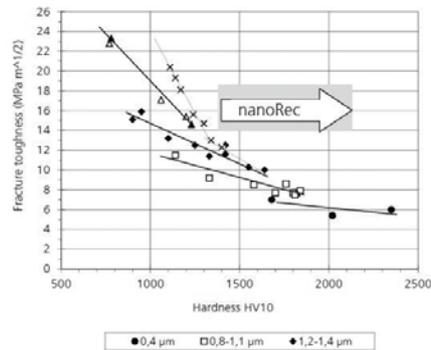
<p><b>Hintergrund</b> Im Rahmen von NanoPOP werden (bio)metallurgische Methoden für die nachhaltige Rückgewinnung von Edelmetallen entwickelt. Simultan synthetisierte Palladium-Nanokatalysatoren mit herausragenden katalytischen Eigenschaften werden für die Entgiftung von Umweltschadstoffen optimiert.</p>	<p><b>Box A:</b> Biosynthese von "BioPalladium(0)" aus Pd(II) in Gegenwart von Mikroorganismen. Die Reduktion und Nanopartikelbildung wird durch die Sorption von Pd(II) an die Zelloberfläche eingeleitet.</p>
<p><b>1. Mikrobielle Synthese von Palladium(0)-Nanokatalysatoren</b> Schwermetalltolerante Bakterien werden in NanoPOP als „recyclbare“ Produzenten genutzt. Mikrobielle Grenzflächen und membrangebundene Enzymsysteme fungieren dabei als Nukleationszentren für die Synthese industriell bedeutsamer Palladium(0)-Nanokatalysatoren.</p> <p><b>Abbildung 1:</b> Der Effekt der Zugabe von bakteriellen Zellen für die Produktion von "bioPalladium". <i>Cupriavidus necator</i> ist als Beispiel gezeigt.</p>	<p><b>2. Zellspezifische Unterschiede hinsichtlich Partikelgröße und Aggregatbildung</b> Gestalt und Größe von Nanopartikeln beeinflussen das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und damit u.a. die katalytischen Eigenschaften des synthetisierten Pd(0). In Abhängigkeit von Bakterienspezies und wachstumsspezifischen Parametern wurden deutliche Unterschiede hinsichtlich Partikelgröße, -größenverteilung und katalytischer Aktivität ermittelt.</p> <p><b>Abbildung 2:</b> Repräsentative elektronenmikroskopische Aufnahmen zur Bildung von Pd(0)-Aggregaten (&gt; 500 nm) durch <i>Escherichia coli</i> (links) und <i>Pseudomonas putida</i> (Mitte) nach Zellernte in der späten stationären Phase. Kleinere Partikel (5-10 nm) konnten für log-Phase-Zellen beobachtet werden, z.B. <i>Cupriavidus necator</i> (rechts, bei 100,000 x).</p>
<p><b>3. Katalytisches Potential von BioPalladium</b> Das katalytische Potential von bio-Pd(0) wurde u.a. für die Dehalogenierung von Dioxinen getestet. Bio-Pd(0) zeigte dabei eine hohe Reaktivität. Der Abbau der Dioxine wurde dabei über einen "sicheren" Weg, ohne die Bildung von toxischeren Zwischenprodukten, katalysiert.</p> <p><b>Abbildung 3:</b> Beispiele für bioPalladium(0)-katalysierte Reaktionen.</p>	
<p><b>4. Periplasmatische Lokalisierung von BioPalladium</b> BioPd(0)-Partikelbildung wurde an der Zelloberfläche beobachtet. Eine weitere Fraktion von Pd(0)-Nanopartikeln mit einer Größe von 3-50 nm wurde im periplasmatischen Raum von Gram-negativen Bakterien nachgewiesen.</p>	<p><b>Abbildung 4:</b> Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Ultradünnschnitten (80 nm) von Bakterien (eingebettet in Epoxidharz). Detailaufnahmen lassen vermuten, dass innere sowie äussere Membranen der Gram-negativen Zellwand als physische Barriere fungieren, das Partikelwachstum beschränken und so eine monodisperse Verteilung gewährleisten.</p>
<p><b>Zusammenfassung</b> Als eine Alternative zu chemisch-physikalischen Recyclingprozessen belegen unsere Ergebnisse die Eignung bakterieller Zellen für die "grüne" Rückgewinnung von Platingruppenmetallen und zeigen die mikrobiell vermittelte Bildung und Immobilisierung von Pd(0)-Nanokatalysatoren im Zellgerüst.</p>	<p><b>Danksagung</b> NanoPOP wird durch das BMBF gefördert (FKZ 03X3571). Wir danken dieser Unterstützung und der Hilfe durch Gerd Hause, Kai Thormann, Thomas Neu und Thomas Hentzel.</p>



## Harte Werkstoffe und Verschleißschutzschichten erhöhter Lebensdauer auf der Basis von neuartigen und recycelten Nanomaterialien

Das Gesamtziel des Vorhabens besteht in der Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Materialinnovation, im Besonderen in der Senkung des spezifischen Bedarfs strategischer Metalle wie Wolfram und Cobalt, der intelligenten und effizienten Nutzung rückgewinnbarer nanoskaliger Werkstoffe, dem Ersatz von natürlichem Diamant durch synthetische Stoffe und dem Ersatz des umwelt- und gesundheitsgefährdenden Cobalts durch weniger bedenkliche Metalle. Die Arbeiten sind auf eine Verbesserung des Verschleißschutzes von mit durch Hartmetallen und Spritzschichten armierten Bauteilen ausgerichtet. Die zu erarbeitenden prinzipiellen Lösungen schaffen zugleich Grundlagen für neuartige Hartmetalle für die Zerspanung und reichen weit über das im Projekt betrachtete Anwendungsfeld hinaus.

Die Zielstellung soll durch die Entwicklung einer neuen Klasse von Verbundwerkstoffen und Verschleißschutzschichten erreicht werden, die aus einer harten Wolframcarbid- und einer duktilen metallischen Bindephase bestehen. Die Größe der Hartstoffteilchen kann dabei wie bei kommerziellen Hartmetallen zwischen wenigen bis einigen Hundert Mikrometern liegen.



Abweichend von bekannten Hartmetallen und hartmetallähnlichen Verschleißschutzschichten bestehen die Hartstoffkörner aber nicht aus Einkristallen, sondern sie stellen aus nanoskaligen Kristalliten bestehende hartver-sinterte Polykristalle dar, deren Härte (bis 3300 HV<sub>0,1</sub>) deutlich über der von Einkristallen (<2500 HV<sub>0,1</sub>) liegt. Die dafür notwendigen Rohstoffe sollen vorzugsweise auf der Grundlage von Sekundärrohstoffen gewonnen werden.

Es wird erwartet, dass die neuen Legierungen auf Grund von verbesserten Härte-Zähigkeits-Kombinationen zu einer merklichen Standzeitsteigerung von Verschleißschutzschichten und stark abrasiv beanspruchten Werkzeugen führen.

### Koordinator:

Dr. Cornel Schreuders, DURUM  
Verschleißschutz GmbH

### Projektpartner:

- DURUM Verschleißschutz GmbH
- FCT Systeme GmbH
- Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)

**Laufzeit:** 01.04.2013 bis 31.03.2016

**FKZ:** 03X3573

# nanoRec – Harte Werkstoffe und Verschleißschutzschichten erhöhter Lebensdauer auf der Basis von neuartigen und recycelten Nanomaterialien

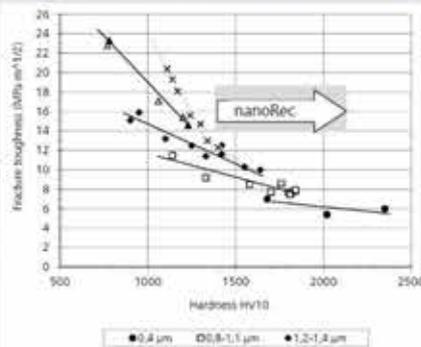
J. Pötschke\*, V. Richter\*, F. Schreiber<sup>2</sup>, T. Erpel<sup>2</sup>, J. Hennicke<sup>3</sup>  
\*Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS  
<sup>2</sup> DURUM Verschleißschutz GmbH, <sup>3</sup> FCT Systeme GmbH

## MOTIVATION

Die Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Materialinnovation, im Besonderen durch Senkung des spezifischen Bedarfs strategischer Metalle wie Wolfram und Cobalt, der intelligenten Nutzung rückgewinnbarer nanoskaliger Werkstoffe, dem Ersatz von natürlichem Diamant durch synthetische Stoffe, dem Ersatz des umwelt- und gesundheitsgefährdenden Cobalts durch weniger bedenkliche Metalle und die Senkung des Energiebedarfs in chemischen Prozessen sowie beim Sintern sind die Ziele dieses Projektes. Die Arbeiten sind auf eine Verbesserung des Verschleißschutzes von mit Hartmetallen und Spritzschichten armierten Bauteilen ausgerichtet. Die zu erarbeitenden prinzipiellen Lösungen reichen aber weit über dieses Anwendungsfeld hinaus und ermöglichen so z. B. die Herstellung neuartiger polykristalliner Hartmetalle.

## ZIEL UND WEG

Ein bislang unüberwindlicher Nachteil sehr feinkörniger und nanoskaliger Hartmetalle besteht in der ungünstigen Kombination von Härte und Bruchzähigkeit (Bild 1). Für nanokristalline Hartmetalle steigt die Bruchzähigkeit mit zunehmendem Bindergehalt kaum noch an, weil die Co-Bereiche zwischen den Hartstoffkörnern durchweg sehr dünn sind und den Bruch nicht mehr durch plastische Deformation abfangen können. Das Ziel ist die Substitution der einkristallinen WC-Körner in Hartmetalllegierungen mit mittlerem und grobem WC-Korn durch polykristalline Körner gleicher Größe, so bleibt die Bruchzähigkeit nahezu unverändert, weil die Dicke der für die Zähigkeit verantwortlichen Cobaltschichten nicht geändert wird. Gleichzeitig steigt die Härte des Hartstoffes deutlich an, weil im nanoskaligen Polykristall eine plastische Deformation weitgehend unterdrückt wird (Bild 1).



## ERGEBNISSE – POLYKRISTALLINE HARTMETALLE

Unter Verwendung von recyceltem feinkörnigem Wolframcarbid wurden mittels moderner Sintertechnologien polykristalline Hartmetalle hergestellt. Sie unterscheiden sich von konventionellen Hartmetallen dadurch, dass jedes vom Binder umschlossene Hartstoffkorn aus sehr vielen nanoskaligen Wolframcarbidkörnern besteht (Bild 2). Härte und Bruchzähigkeit dieser neuartigen Legierung zeigen deutlich gesteigerte Härte-Bruchzähigkeits-Werte.

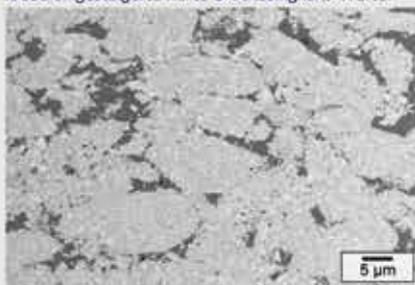


Bild 2: Polykristallines Hartmetall

## ERGEBNISSE – VERSCHLEISSCHUTZ

Durch eine Aufarbeitung von industriell anfallendem Wolframcarbid-Hartschrott konnten polykristalline WC-Partikel in einer Größe von > 60 µm gewonnen werden. Die aus dem wiederaufbereiteten Material hergestellten Schweiß- bzw. Spritzschichten zeigen ein mindestens ebenso gutes Verschleißverhalten wie die aus Frischmaterial gefertigten Schichten, wobei weitere Leistungssteigerungen möglich sind. In Bild 3a ist eine solche durch PTA-Schweißen erzeugte Schicht gezeigt. Mit dem neu aufbereiteten, polykristallinen WC-Material können Schichten mit hoher Packungsdichten (> 60 wt.-%) sowie homogener Karbidverteilung erzielt werden. Bild 3b zeigt eine Nahaufnahme eines einzelnen polykristallinen WC-Kornes, eingebettet in einer NiBSi-Matrix einer PTA-geschweißten Verschleißschutzschicht. Die polykristallinen WC-Körner weisen nach dem thermisch beanspruchten Schweißprozess kaum Auflösungserscheinungen auf und verfügen weiterhin über Härten von bis zu 2800 HV0,1.

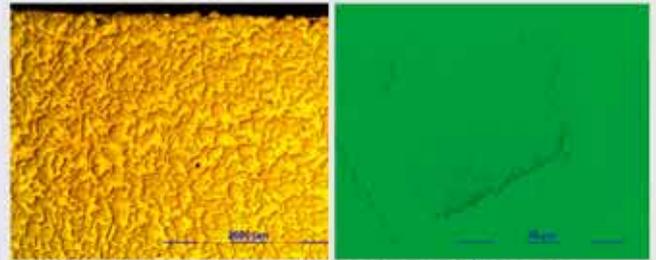


Bild 3: a) PTA-geschweißte Verschleißschutzschicht b) Detailaufnahme eines polykristallinen WC-Kornes

## ERGEBNISSE – WOLFRAMCARBIDKOMPAKTIERUNG

Parallel zur Wiederverwendung von gebrauchtem Wolframcarbid wurde die Herstellung von hochharten Wolframcarbidkörpern aus besonders feinen Ausgangspulvern untersucht, aus denen sich Verschleißteile mit hoher Lebensdauer fertigen lassen. Durch die Verwendung druckunterstützter Kurzzeitsinteranlagen (Spark-Plasma-Sintern-Öfen) können verschieden große Probenkörper in sehr kurzer Zeit (~ 20 min) hergestellt werden. Durch eine Optimierung von Druck, Sinter Temperatur und Haltezeit konnten Wolframcarbid-Keramiken mit herausragenden Härte- (2800 HV10) und Bruchzähigkeitswerten (> 7,0 MPa·m<sup>1/2</sup>) gewonnen werden. Ebenso wurde auf diese Weise das Sinterverhalten von Mischungen für Auftragschweißungen sowie Flammstritzen untersucht. Spark-Plasma-Sinterprofile geben hierzu zur genauen In-situ-Analyse die Verläufe der einzelnen Parameter wieder (Bild 4).

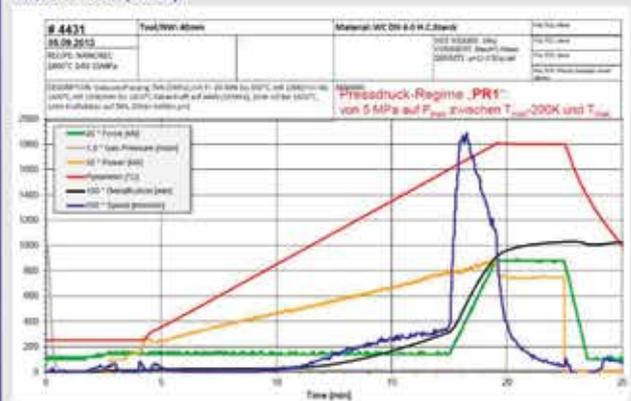


Bild 4: Spark-Plasma-Sinterprofile zur Herstellung sehr feinkörniger Wolframcarbidkeramiken

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK:

- Es wurde ein Verfahren entwickelt, um binderfreie Hartmetalle für eine Wiederverwendung aufbereiten zu können. Dabei wurden polykristalline Wolframcarbidpartikel von ~ 60 µm gewonnen, die zu neuartigen Verschleißschutzschichten mit deutlich gesteigerter Abriebfestigkeit verarbeitet werden.
- Durch den Einbau von polykristallinen Wolframcarbidkörnern anstelle von monokristallinen Körnern konnten neuartige Hartmetalle mit gesteigerten Härte/Bruchzähigkeits-Kombination entwickelt werden.
- Der Einsatz der SPS-Technik erlaubt die schnelle Herstellung von besonders hoch qualitativem Wolframcarbid-Verschleißschutzplatten aus Frischmaterial.

# PROFORMING

## Ressourcen- und Energieeffiziente Reaktionen für die Chemische Industrie – PROzessinnovationen für die HydroFORMylieruNG

Das wesentliche Ziel dieses Projektes besteht in der Entwicklung eines ressourceneffizienten Verfahrens zur Herstellung von Oxo-Produkten, einer wichtigen und wirtschaftlich sehr bedeutsamen Klasse von Plattformchemikalien, mit Hilfe von neuartigen umweltfreundlicheren Katalysatorsystemen. Dabei sollen Fortschritte bei der sog. Hydroformylierung von Olefinen zu entsprechenden Aldehyden erreicht und so weitreichende Verfahrensinnovationen in der Chemischen Industrie realisiert werden. Die Hydroformylierung stellt die wichtigste homogenkatalytische Reaktion der Chemischen Industrie dar (> 10 Mio. t Oxoprodukte pro Jahr), so dass Prozessinnovationen auf diesem Gebiet für die gesamte Chemische Industrie bedeutsam sind. Die Prozessoptimierungen führen zu einer und energieeffizienteren Produktion von Oxo-Alkoholen und sind daher für die gesamte Chemische Industrie von erheblicher Bedeutung.

Übergeordnetes wissenschaftliches Gesamtziel des Vorhabens ist die Substitution von teuren Metallen der Platingruppe, insbesondere Rhodium durch alternative, gut verfügbare und umweltverträgliche Metalle. Daraus leiten sich die folgenden wissenschaftlich-technischen Teilziele ab:

- Entwicklung von neuen und effizienten Liganden für die Hydroformylierung mit alternativen Metallen.
- Entwicklung und Optimierung eines stabilen und effizienten Katalysatorsystems, ausgehend von z. B. Iridium, Palladium, Ruthenium und vorzugsweise auf der Basis von Eisen als besonders ressourcenschonendes Metall.
- Entwicklung angepasster Verfahren und Aufbau einer Mini-plant für die Hydroformylierung mit alternativen Metallen.

Die wirtschaftlichen Ziele liegen im Bereich der Ressourcen- und Energieeffizienz. Die entwickelten Verfahren werden verglichen mit den etablierten Prozessen, wobei sich folgendes wesentliche wirtschaftliche Ziel ergibt:

- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz um mindestens 20%.

Die oben genannten Ziele sind außerordentlich anspruchsvoll und sehr risikoreich. Das hier vorgestellte Konsortium ist bezüglich seiner Kompetenz und Expertise auf diesem Gebiet vermutlich weltweit führend, was ganz wesentlich dazu beiträgt, die ambitionierten Ziele zu erreichen und das wissenschaftlich-technische Risiko zu minimieren. Unseres Wissens ist diese Thematik in der hier vorgestellten wissenschaftlichen Tiefe bislang nicht in einem interdisziplinären Forschungsverbund unter Industrieführung bearbeitet worden. Die Ergebnisse sind neben der bedeutenden wirtschaftlichen Tragweite auch wissenschaftlich von hohem Stellenwert und werden die weltweite Spitzenstellung der beteiligten Institute auf den hier betrachteten Forschungsgebieten maßgeblich sichern. Dies gilt ebenfalls für das beteiligte forschungsorientierte Ingenieur-KMU.

PROFORMING

### Koordinator:

Prof. Dr. Robert Franke,  
Evonik Industries AG, Hanau (Dr. Marc  
Oliver Kristen, Evonik Industries AG)

### Projektpartner:

- Evonik Industries AG – Advanced Intermediates – Performance Intermediates – Innovation Management
- SUPREN GmbH
- Leibniz-Institut für Katalyse e.V. an der Universität Rostock
- Technische Universität Dortmund – Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen – Lehrstuhl Technische Chemie A

**Laufzeit:** 01.03.2012 bis 28.02.2015

**FKZ:** 03X3559

# PROFORMING - Ressourcen- und Energieeffiziente

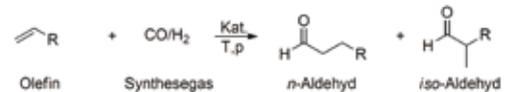
## Reaktionen für die Chemische Industrie

### PROzessinnovationen für die HydroFORMylieruNG

Kristen, M.<sup>2)</sup>; Franke, R.<sup>2)</sup>; Hess, D.<sup>2)</sup>; Beller, M.<sup>3)</sup>; Jackstell, R.<sup>3)</sup>; Börner, A.<sup>3)</sup>; Kubis, C.<sup>3)</sup>; Baumann, W.<sup>3)</sup>; Behr, A.<sup>1)</sup>; Kämper, A.<sup>1)</sup>; Gottschalk, A.<sup>4)</sup>; Tlatlik, S.<sup>4)</sup>

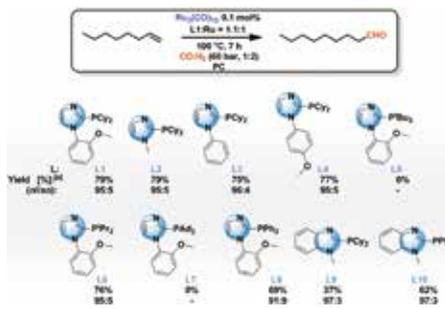
MOTIVATION

Die Hydroformylierung, „Oxo-Synthese“, zählt zu den bedeutendsten homogen katalysierten Reaktionen, bei der im Allgemeinen Olefine mit Synthesegas (CO/H<sub>2</sub>) zu Aldehyden umgesetzt werden. Die gebildeten Oxo- und deren Folgeprodukte besitzen aufgrund ihrer Substratflexibilität ein breites Anwendungsfeld in der chemischen Industrie, was von Lösungsmitteln über Weichmacher bis hin zu Riechstoffen und anderen Feinchemikalien reicht. Für die selektive Durchführung haben sich insbesondere Katalysatorsysteme auf Basis des sehr seltenen und auch preisinstabilen Edelmetalls Rhodium etabliert. Im Rahmen einer ressourcen- und energieeffizienten Zukunftsperspektive ist es daher notwendig, Katalysatorsysteme auf Basis alternativer Metalle wie beispielweise Iridium, Ruthenium oder Eisen zu finden und auf ihre potenziellen Anwendungsmöglichkeiten zu testen. Dazu werden neuartige Katalysatorsysteme entwickelt und diese auf ihre Hydroformylierungseigenschaften untersucht.



#### Katalysatorentwicklung

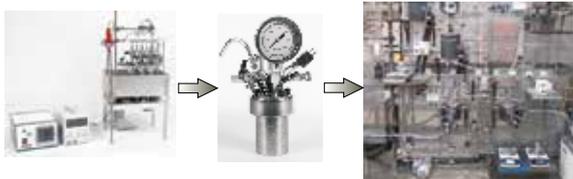
- Katalysatordesign und -synthesen für die Hydroformylierung mit Iridium, Ruthenium und Eisen
- Katalysator-optimierung und -validierung
- Untersuchung und Optimierung verschiedener Reaktionsparameter, wie Druck, Temperatur, Kat.-Konzentration, Ligand-Konzentration u.a.
- Untersuchung und Nutzung möglicher Präformierungseffekte



[1] Fleischer, I.; Wu, Lipeng; Profir, I.; Jackstell, R.; Franke, R.; Beller, M.; Chem. Eur. J. 2013, 19, 10589-10594  
[2] Wu, L.; Fleischer, I.; Jackstell, R.; Profir, I.; Franke, R.; Beller, M.; J. Am. Chem. Soc. 2013, 135, 14306-14312

#### Katalysatorrecycling und Miniplant

- Entwicklung und Testung von Konzepten zur Rückgewinnung der auf Iridium und Ruthenium basierenden Katalysatorsysteme im Labormaßstab
- Anwendung unterschiedlicher Trennkonzepte basierend auf der Flüssig-Flüssig-Zweiphasentechnik, Temperaturgesteuerter Mehrkomponenten Lösungsmittel Systeme und einer Extraktion
- Projektierung, Aufbau und Inbetriebnahme einer flexibel einsetzbaren Miniplant
- Übertragung der entwickelten Recyclingkonzepte in den kontinuierlichen Miniplantmaßstab

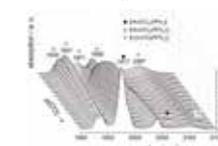


6er Multiplex (links) und Parr-Druckautoklav (rechts) für die notwendigen Voruntersuchungen zur Reaktionskinetik und zum Katalysatorrecycling  
Miniplant zur homogen-katalysierte Hydroformylierung mit alternativen Übergangsmetallen

#### Mechanistische Untersuchungen: IR-, NMR- und Operando Spektroskopie

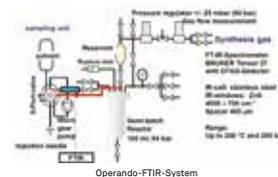


FTIR-Versuchsausrüstung

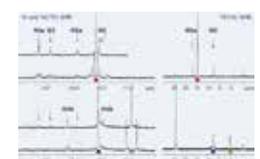


(links) FTIR-Spektrenserie aus einer Untersuchung der Gleichgewichtszusammensetzung von Iridiumkomplexen unter Variation des CO-Partialdrucks. (rechts) Konzentrationsprofile der Iridiumkomplexe aus der chemometrischen Analyse der FTIR-spektroskopischen Daten

- Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Reaktionsmechanismen der entwickelten Katalysatorsysteme
- Molekulare Modellierung mittels DFT-Rechnung (Dichtefunktionaltheorie)
- Kinetische Messungen zur Erstellung und Validierung der Formalkinetik



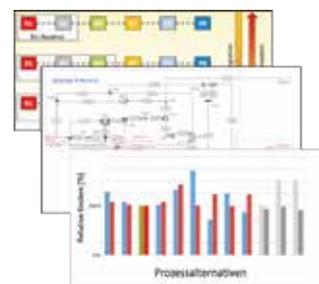
Operando-FTIR-System



NMR-Untersuchungen an Trihydridokomplexen unter Reaktionsbedingungen

[3] Hess, D.; Hannebauer, B.; Koenig, M.; Reckers, M.; Buchholz, S.; Franke, R.; Z. Nat.forsch. B: A.J. of Chem. Sciences 2012, 67(10), 1061-1069  
[4] Kubis, C.; Baumann, W.; Barsch, E.; Selent, D.; Sawall, M.; Ludwig, R.; Neymeyr, K.; Hess, D.; Franke, R.; Börner, A.; ACS Catal. 2014, 2097-2108

#### Prozessentwicklung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung



- Entwicklung alternativer Verfahrenskonzepte
- Simulation aussichtsreicher verfahrenstechnischer Prozesse
- Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Gottschalk, A.; Tlatlik, S.: Process Intensification on Hydroformylation of Olefins to Aldehydes. In: International Exhibition and Conference on Sustainable Chemistry & Engineering (ECO-CHEM 2013), Basel (CH)

ARBEITSPAKETE UND ERGEBNISSE

1) Lehrstuhl Technische Chemie Universität Dortmund  
Emil-Figge-Str. 66  
D-44227 Dortmund  
0231/755-2310  
0231/755-2311  
behr@bci.tu-dortmund.de  
[www.bci.tu-dortmund.de/tc](http://www.bci.tu-dortmund.de/tc)

2) Evonik Industries AG  
Advances Intermediates  
Paul-Baumann-Str. 1  
D-45772 Marl  
02365/49-2899  
02365/49-6215  
robert.franke@evonik.com  
[www.evonik.de](http://www.evonik.de)

3) Leibniz-Institut für Katalyse e.V.  
an der Universität Rostock  
Albert-Einstein-Str. 29 A  
D-18059 Rostock  
0381/1281-113  
0381/1281-5113  
matthias.beller@catalysis.de  
[www.catalysis.de](http://www.catalysis.de)

4) SUPREN GmbH  
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20  
D-44227 Dortmund  
0231/9700-390  
0231/9700-391  
gottschalk@supren.eu  
[www.supren.eu](http://www.supren.eu)

## Ressourcenschonende Werkstoffsubstitution durch additive & intelligente FeAl-Werkstoff-Konzepte für angepassten Leicht- und Funktionsbau



Quelle: Shutterstock

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung der werkstofftechnischen Grundlage zum Ersatz technischer Superlegierungen und Edelstähle (z.B. auf Basis von Nickel, die zudem hohe Anteile strategischer Metalle wie Co, Nb oder Ta bzw. W) enthalten durch preiswerte intermetallische Fe-Al-Basislegierungen.

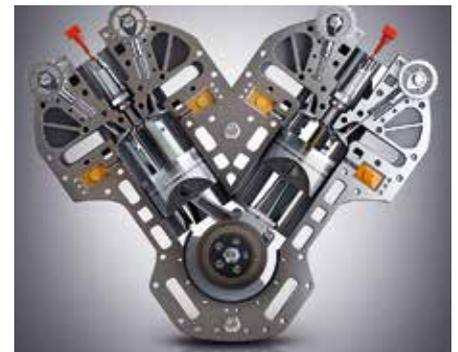
Die aktuelle Diskussion um Ressourcenverknappung (z.B. strategisch wichtige Metalle, andere Elemente) zeigt die dringende Notwendigkeit der Substitution dieser Metalle, um wirtschaftliche und politische Abhängigkeiten zu vermeiden. Zwar steigen auch die Preise für Aluminium und Eisen, jedoch auf einem deutlich niedrigerem Niveau (der Preis für eine Tonne Aluminium liegt derzeit bei 1/10 des Preises für eine Tonne Nickel [London Metal Exchange LME, Stand 02/2011]) und die Ressourcen dieser Metalle, sprich Häufigkeit & Verteilung in der Erdkruste sind deutlich größer als die von Nickel. Die Fe-Al-Legierungen weisen eine hervorragende Korrosions- und Abrasionsbeständigkeit auf und ihre Festigkeiten übertreffen inzwischen die modernster ferritischer Turbinenstähle bzw. erreichen die einiger Co- und Ni-Basislegierungen und sind daher prinzipiell auch für mechanisch,

thermisch und korrosiv hochbelastete Bauteile und Aggregate geeignet. Da Fe-Al-Legierungen zudem eine wesentlich geringere Dichte haben und keine oder nur sehr geringe Mengen strategischer Metalle enthalten, stellen sie aus industrieller Sicht eine interessante Werkstoffalternative dar. Hinzu kommt, dass Fe-Al-Basislegierungen aufgrund ihrer Eigenschaften einen großen potenziellen Anwendungsbereich haben, z. B. in vielen Bereichen der Energietechnik, der (petro-)chemischen Industrie, für automobiler Anwendungen oder in der Luftfahrt, wo neben Festigkeit auch Langzeitbeständigkeit, in der Hauptsache also Korrosions-sicherheit gefordert ist. Somit könnten später vielerorts klassische CrNi-Stähle durch FeAl-Stähle ersetzt werden.

Eine werkstofftechnische Herausforderung stellt die begrenzte Duktilität (Gleichmaßdehnung  $\approx$  ca. 1%) der Fe-Al-Legierungen dar, was zum Teil auf eine ausgeprägte Grobkörnigkeit (Korngrößen im Millimeterbereich), z. B. beim Gießen der Legierungen, zurückzuführen ist. Neue innovative Urformverfahrensketten (sogenannte Schichtfertigungsverfahren, engl. auch „Rapid Manufacturing (RM) oder Additive Layer Manufacturing“ (ALM) genannt) wie „Selective Laser Melting“ (SLM), „Electron Beam Melting“ (EBM) und „Laser Metal Deposition“ (LMD) gestatten die Herstellung endkonturnaher Bauteile mit nahezu unbegrenzter Geometriefreiheit und sehr feinkörnigen Mikrostrukturen durch schichtweisen Materialaufbau in einem Pulverbett (SLM, EBM) oder mit einer Pulverdüse (LMD), realisiert durch lokales Aufschmelzen des Pulvers über Laser- oder Elektronenstrahl, d. h. eine Art Permanent-schweißen, jedoch mit einem sehr kleinen Schmelzbad. Die bei diesem Methoden in der Regel erzeugte, sehr feinkörnige und vorteilhafte Mikrogussstruktur resultiert dabei aus den sehr hohen Abkühlraten (104-106 K/s). Zu erwarten ist, dass sich dadurch auch bei FeAl-Werkstoffen eine deutlich kleinere Korngröße einstellen lässt und damit die Duktilität verbessert wird. Auch lassen sich mittels LMD chemisch gradierte Bauteile herstellen, so dass die Zusammensetzung in den hochbelasteten Bereichen des Bauteils entsprechend maßgeschneidert werden kann. Damit

bieten diese Verfahren außergewöhnliche Möglichkeiten zum Prozessieren von Fe-Al-Legierungen. Alle drei Verfahren weisen spezifische Unterschiede auf, die im Hinblick auf die generative Fertigung verschiedener Bauteile Vor- und Nachteile aufweisen. Daher ist der Einsatz aller drei Varianten sinnvoll, um das Potenzial der ALM-Verfahren auszuschöpfen.

Die Entwicklung entsprechender Fe-Al-Legierungen für diese Urformverfahren, das Herstellen von Probenkörpern und Bauteilen mittels SLM, LMD und EBM sowie die Untersuchung der erzielbaren Mikrostrukturen und der daraus resultierenden Werkstoff- und Bauteileigenschaften (mechanisch-technologisch & korrosiv) sollen in dem vorgeschlagenen Vorhaben untersucht und gegen etablierte Werkstoffe gespiegelt werden und so das immense Substitutionspotential belegen.



Quelle: Shutterstock

### Koordinator:

Dipl.-Ing. Frank Palm,  
EADS Deutschland GmbH,  
Bereich: Innovation Works (EADS)

### Projektpartner:

- Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH (MPIE)
- Siemens AG (SIEMENS)
- Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT)
- Dr. Kochanek Entwicklungsgesellschaft (KEG)
- NANOVAL GmbH & Co. KG (NANOVAL)

**Laufzeit:** 01.02.2013 bis 31.01. 2016

**FKZ:** 03X3574

# RADIKAL

## Ressourcenschonende Werkstoffsubstitution durch additive & intelligente FeAl-Werkstoff-Konzepte für angepassten Leicht- und Funktionsbau



### ➤ Partner

- Airbus Group Innovations (ehemals EADS Innovation Works) Ottobrunn (Industrie)
- Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT Aachen (Forschung)
- Kochanek Entwicklungsgesellschaft (Industrie)
- Max-Planck-Institut für Eisenforschung Düsseldorf (Forschung)
- NANOVAL Berlin (Industrie)
- SIEMENS Corporate Technology Berlin (Industrie)

Laufzeit: 02/2013 – 01/2016



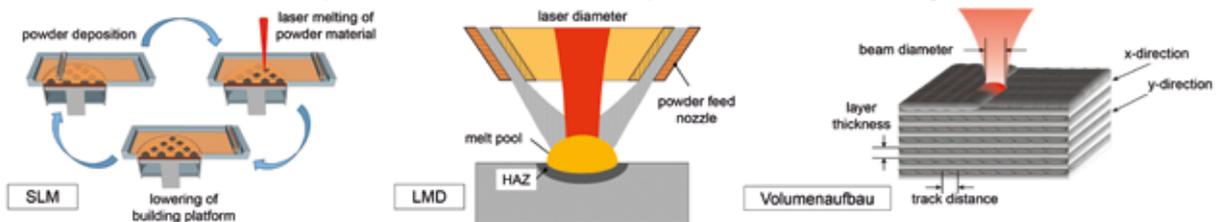
### ➤ Ziele & Arbeitshypothese

- Erstmalige Herstellung von Hochleistungsbauteilen aus Eisen-Aluminiden (Fe-Al)
- Urform-technische Fertigung mittels Laser gestützter additiver Fertigungsmethoden
- Minimaler ressourcen-schonender Werkstoffeinsatz - Gewichtsminimierung (FeAl ~ 6 g/cm<sup>3</sup>)
- Überwindung der eingeschränkten Nutzung von Fe-Al intermetallischen Phasen-Werkstoffen über die direkt erzeugte (sehr feine) Mikrostruktur als Resultat der Laserschmelz-Prozesse (Laser-Düse & Laser-Pulverbett)
- Minimierung von teuren Legierungsmaterialien trotzdem Langlebigkeit & Korrosionssicherheit (z.B. Ni, Co etc.)

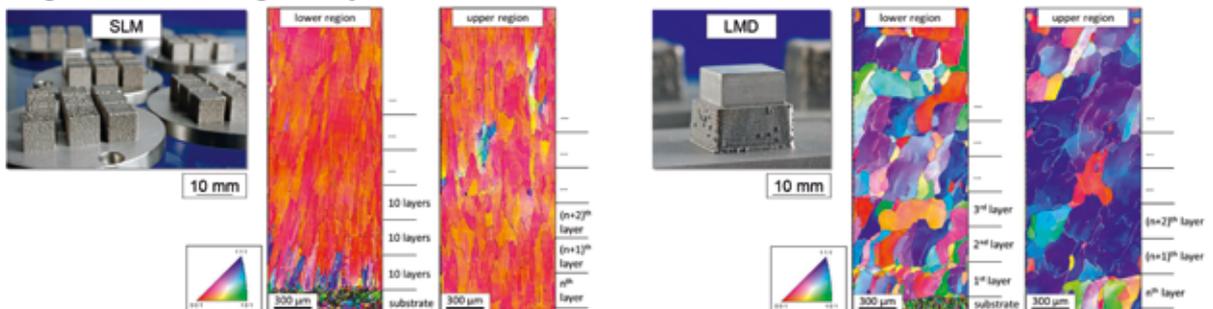
### ➤ Anwendungsbeispiele



### ➤ Innovative Prozesse (SLM & LMD-Verfahren) & Schnellerstarrung



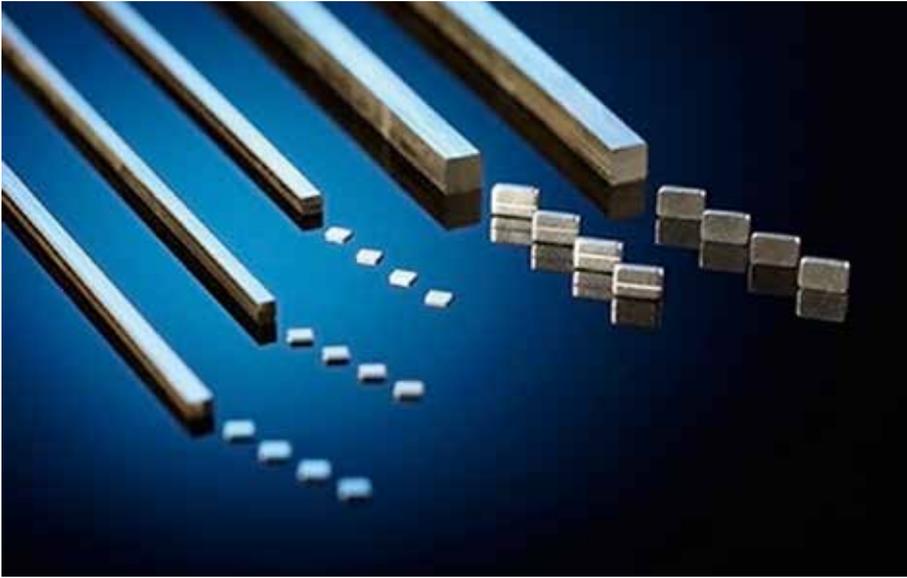
### ➤ Ergebnisse: Gefügeanalyse mittels EBSD-Aufnahmen



AIRBUS GROUP INNOVATIONS

Kontakt: Airbus Group Innovations, Ottobrunn  
 81663 München  
 Frank Palm (frank.palm@airbus.com)

**AIRBUS**  
 GROUP



elektrische Schaltkontakte auf Silberbasis

## Gesamtziel des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist es, den Bedarf von Silber für Schaltgeräte der industriellen Niederspannungselektrotechnik (Schalter, Schaltschütze für Elektromotoren etc.) deutlich zu reduzieren.

Silberhaltige Kontakte sind die wichtigsten Bestandteile der überall im Einsatz befindlichen elektromechanischen Schaltgeräte. Sie haben die Aufgabe Stromkreise zu schließen, vorübergehend oder auch für längere Zeit die Stromleitung zu gewährleisten und aus dem geschlossenen Zustand zuverlässig wieder zu öffnen. Silber als das preiswerteste Edelmetall ist als Werkstoffbasis für diese Schaltgeräte unersetzbar.

Es werden hochsilberhaltige Verbundwerkstoffe mit ca. 80–90% Silbergehalt als Kontakt genutzt, da die Edelmetallmatrix einen sehr niedrigen und stabilen Kontaktwiderstand im geschlossenen Schaltzustand gewährleistet. Weitere Hauptanforderungen an diese mit Lichtbogenbelastung schaltenden Kontakte sind hoher Verschleißwiderstand für die Sicherheit zum Öffnen des Stromkreises und Abbrandfestigkeit für eine lange Lebensdauer.

Aufgrund der wachsenden Nachfrage nach Silber nicht nur in der Elektrotechnik, sondern auch in Zukunftstechnologien mit wachsender Bedeutung wie zum Beispiel der Photovoltaik und

RFID-Funketiketten sind für die Zukunft Versorgungsengpässe zu erwarten.

Jährlich werden allein in Deutschland für Kontaktwerkstoffe auf Ag/SnO<sub>2</sub>-Basis 400 t Silber verbraucht. In dem Projekt soll in einem umfassenden Ansatz, der den gesamten Schichtaufbau des Schaltkontakts, die Kontaktwerkstoffschicht und das Herstellverfahren umfasst, der Silbergehalt im Schalter um insgesamt 40% reduziert werden. Zusätzlich sollen Wege und Geschäftsmodelle für das Recycling von Silber aus Schaltgeräten untersucht werden.



Schalterschütz

## Koordinator:

Dr. Michael Bender,  
Umicore AG & Co. KG - TM-TOM-MP

## Projektpartner:

- Siemens Aktiengesellschaft – Industry Sector - Industry Automation Division – I IA CE CP MF GWA FTQ33
- ThermProTEC GmbH – Geschäftsführung
- Technische Universität Bergakademie Freiberg – Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie – Institut für Metallformung
- Max-Planck-Institut für Eisenforschung Gesellschaft mit beschränkter Haftung

**Laufzeit:** 01.06.2013 bis 31.05.2016

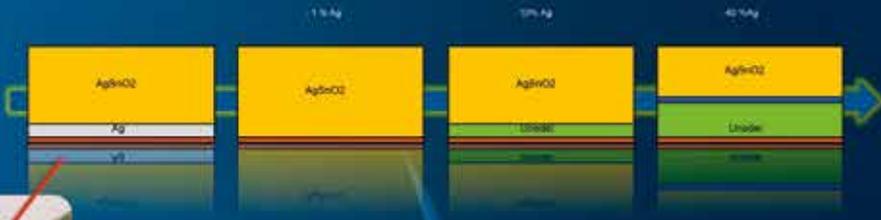
**FKZ:** 03X3586

# R.A.V.E.-K

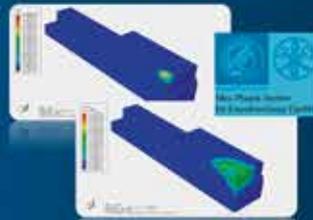
## Ressourcensparende Aufbau- und Verbindungstechnik für edelmetallhaltige Kontaktwerkstoffe der Niederspannungstechnik

### Motivation:

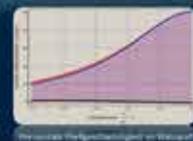
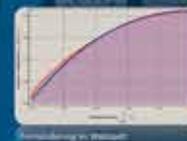
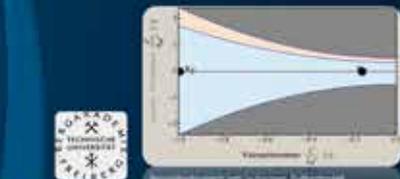
Ziel des Vorhabens ist es, den Bedarf von Silber für Schaltgeräte der industriellen Niederspannungselektrotechnik (Schalter, Schaltschütze für Elektromotoren etc.) deutlich zu reduzieren. Silberhaltige Kontakte sind die wichtigsten Bestandteile der überall im Einsatz befindlichen elektromechanischen Schaltgeräte. Sie haben die Aufgabe Stromkreise zu schließen, vorübergehend oder auch für längere Zeit die Stromleitung zu gewährleisten und aus dem geschlossenen Zustand zuverlässig wieder zu öffnen. Aufgrund der wachsenden Nachfrage nach Silber nicht nur in der Elektrotechnik, sondern auch in Zukunftstechnologien mit wachsender Bedeutung wie zum Beispiel der Photovoltaik und RFID-Funketiketten sind für die Zukunft Versorgungsengpässe zu erwarten. In dem Projekt soll in einem umfassenden Ansatz der Silbergehalt im Schalter um bis zu 40% reduziert werden. Außerdem sollen Wege und Geschäftsmodelle für das Recycling von Silber aus Schaltgeräten untersucht werden.



### Zwischenergebnisse:

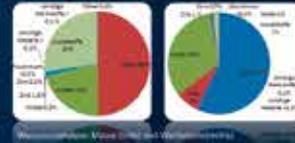


Simulation der Kontaktanpresskraft bei Befestigung  
des Silber-Kontakt-Druckstempfers mittels Schraubenschlüssel  
(1770 °C, 4000 N)



Optimierung des Kontaktanpressmechanismus der Kontakte durch umicore

### SIEMENS



### Ausblick:

Auf Basis der Simulationsrechnungen werden Haftfestigkeiten im Materialverbund und damit die Lebensdauer der Schaltgeräte weiter optimiert. Dies ist Grundvoraussetzung für eine weitere Reduzierung des Silbers im Gesamtaufbau. Auf Basis der Wertstromanalysen werden gemeinsam Recyclingkonzepte entwickelt, um einen nachhaltigen ressourceneffizienten Umgang mit Silber bei der Produktion, der Anwendung und der Entsorgung von Kontaktwerkstoffen zu gewährleisten.

we join energies!

Contact and Power  
Technology Materials

Der volkswirtschaftliche Schaden durch Korrosion und Verschleiß wird allein in Deutschland auf mehrere Milliarden Euro jährlich geschätzt. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Forderung nach Materialien, welche den gestiegenen Anforderungen gerecht werden. Abrasionsbeständige Werkstoffe werden daher in vielen Anwendungen als Verbundwerkstoffe aus Hartstoffen und einer metallischen Matrix ausgeführt. Hierzu gehören neben Schneidstoffen (z. B. Hartmetall und Cermets) auch verschleißbeständige Metal-Matrix-Composites (MMC) und Werkstoffe für Aufschweiß- und Spritzschichten. Mit steigendem Hartstoffgehalt lässt sich der Verschleißwiderstand und damit die Lebensdauer des Verbundwerkstoffes erhöhen. Aufgrund beschränkter Ressourcen werden die heute in der Hautsache verwendeten Karbide der Elemente Wolfram und Titan immer knapper, so dass die verwendeten Hartphasen in den Hartmetallen und MMCs einen großen Kostenfaktor darstellen. Daraus resultiert ein Interesse diese durch Recycling zurückzugewinnen. Im Bereich der Hartmetalle wird das Recycling zur Rückgewinnung des Wolframkarbids (WC) bereits industriell umgesetzt. Für das Titankarbid (TiC), welches in Anteilen

bis 45% in Cermets, Ferro-Titanit® sowie in vielen MMC und Auftragschweißlegierungen enthalten ist, gibt es derzeit keine Ansätze zur Wiederverwertung bzw. nachhaltigen Ressourcenschonung. Ziel dieses Verbundvorhabens ist es daher, das Titankarbid aus Abfallprodukten der Fertigung (z. B. Späne) und verschlissenen Komponenten durch einen chemischen Prozess zurückzugewinnen. Dieses Recycling führt zu einem verringerten Bedarf an Titankarbid bei der Produktion von Verbundwerkstoffen. Zum anderen wird recyceltes TiC in auftragsgeschweißten und thermisch gespritzten Verschleißschutzschichten verarbeitet, um hier das heute vorrangig eingesetzte Wolframschmelzkarbid teilweise zu ersetzen. Dieser Substitutionsansatz unter Verwendung recycelter Rohstoffkomponenten stellt somit ein mehrdimensionales Konzept der Ressourcenschonung als Antwort auf die absehbare Rohstoffverknappung im Weltmarkt dar. Die beschriebene Zielsetzung wird durch ein Projektkonsortium verfolgt, das den nötigen Kompetenzbereich abdeckt und zugleich die gesamte Prozesskette von der pulvermetallurgischen Fertigung bis hin zum praktischen Einsatz der Verschleißkomponenten abbildet. Die industriellen



Partner werden dabei von zwei Forschungseinrichtungen ergänzt, welche über langjährige Erfahrung in der Umsetzung von Forschungsergebnissen durch Technologietransfer verfügen.

### Koordinator:

Dr. Andre van Bennekom und Dr.-Ing. Horst Hill, Deutsche Edelstahlwerke GmbH

### Projektpartner:

- Deutsche Edelstahlwerke GmbH
- Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG
- VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
- Durum Verschleißschutz GmbH
- RiWaLas Ltd., Ritz & Walter Lasertechnik
- Ruhr-Universität Bochum - Lehrstuhl Werkstofftechnik

### Publikationen:

- A. Mohr, A. Röttger, M. Windmann, W. Theisen: Rezyklieren von metallischen Spänen mittels Electro-Discharge Sintering, 16. Werkstofftechnisches Kolloquium, 05.-06. September 2013, Chemnitz

**Laufzeit:** 01.08.2012 bis 31.07.2015

**FKZ:** 03X3567

# RecyTiC - Ressourcenschonende Werkstoffkonzepte für TiC-haltige Verschleißkomponenten

## Einleitung

- Aufgrund von Korrosion und Verschleiß kommt es in Deutschland jährlich zu einem volkswirtschaftlich Schaden von mehreren Milliarden Euro.
- Um den Verschleiß zu minimieren und die Lebensdauer eines Bauteils zu erhöhen, werden Hartphasen/Hartpartikel-verstärkte Legierungen verwendet. Hierzu gehören neben Werkstoffen wie Hartmetalle und Cermets auch verschleißbeständige Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe.
- In dem von den Deutschen Edelstahlwerken GmbH hergestellten Verbundwerkstoff Ferro-Titanit® wird Titankarbid (TiC) zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit und damit einhergehende Standzeiterhöhung eingesetzt. Nachteil der Verwendung von TiC sind die hohen Rohstoffkosten. Ziel dieses Verbundvorhabens ist es, das TiC aus Abfallprodukten der Fertigung (z.B. Spanmaterial) und verschlissenen Komponenten durch einen chemischen Prozess zurückzugewinnen und dieses für die Herstellung neuer Werkstoffe nutzbar zu machen.

## Ausgangswerkstoffe

- Als Ausgangswerkstoff für den Recyclingprozess wurde auf Spanmaterial des Werkstoffs Ferro-Titanit® zurückgegriffen. Ferro-Titanit® ist ein Eisen- bzw. Nickelbasiswerkstoff, der bis zu 33 Ma.-% TiC als Hartstoffe beinhaltet. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Ferro-Titanit® Güten ist in Tabelle 1 aufgelistet.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der rezyklierten Ferro-Titanit Güten®. Alle Angaben in Ma.-%.

Ferro-Titanit® Güte	TiC	C	Cr	Mo	Co	Fe
C-Spezial	33	0,65	3	3	-	Rest
WFN	33	0,75	13,5	3	-	Rest
S	32	0,5	19,5	2	-	Rest
Nikro143	30	-	6	9	9	Rest
Nikro128	30	-	13,5	5	9	Rest
CrMoNi	22	-	20	15,5	-	-

- Ferro-Titanit® wird durch eine pulvermetallurgische Herstellungsroute erzeugt, bei der TiC als Hartstoffe verwendet werden. Nachfolgend wird das Pulvergemisch bei erhöhtem Druck und Temperatur auf theoretische Dichte verdichtet.

- Das verdichtete Gefüge von Ferro-Titanit® besteht aus TiC, die homogen verteilt und metallurgisch in der metallischen Matrix eingebunden ist (Bild 1). Die Härte der TiC beträgt ca. 3200 HV0,5.

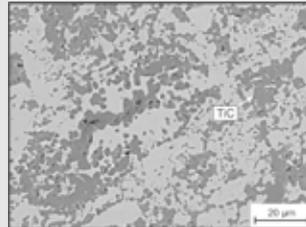


Bild 1: Mikrostruktur der Ferro-Titanit® Güte Nikro128

- Je nach verwendetem Matrixsystem kann die Korrosions- bzw. die Verschleißbeständigkeit der Ferro-Titanit® Güten variiert werden. So besitzen die kohlenstoffmartensitischen Güten WFN, S und C-Spezial eine sehr hohe Verschleißbeständigkeit, wogegen die Nickelbasis Legierung CrMoNi eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit aufweist.

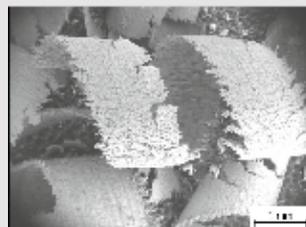


Bild 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des zum Recycling verwendeten Ferro-Titanit® Spanmaterials

- Das für den Recyclingprozess verwendete Spanmaterial ist in Bild 2 dargestellt. Aufgrund des hohen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen eignet es sich besonders für den chemischen Recyclingprozess.

## Recyclingsprozess

- Der Recyclingprozess wurde vom VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI) in Kooperation mit den Deutschen Edelstahlwerken entwickelt und patentiert.

- Kernprozess der Recyclingtechnologie ist das chemische Auflösen der metallischen Matrix mittels mineralischen Säuren (z.B. Salzsäure) und Additiven (z.B. Oxidationsmittel).

- Alle untersuchten Ferro-Titanit® Güten konnten im gerührten Laborreaktor (Bild 3) aufgelöst und somit die beinhaltenden TiC zurückgewonnen werden. Die Prozesszeit ist dabei abhängig von dem elektro-chemischen Verhalten der einzelnen Ferro-Titanit® Güten (Bild 4).



Bild 3: Laborreaktor zur TiC-Rückgewinnung

- Die im Labor gewonnenen Ergebnisse wurden auf eine Demonstratoranlage bei den Deutschen Edelstahlwerken in Hagen übertragen (Bild 5a).

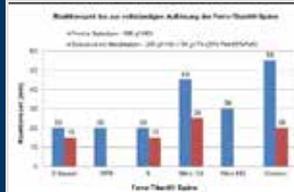


Bild 4: Reaktionszeit in Abhängigkeit der Säure und Werkstoffgüte

- Insgesamt wurden in der Demonstratoranlage (Bild 5a) bis dato mehr als 1200 Kg Spanmaterial aufgelöst. Dabei wurden ca. 100-120 kg TiC (Bild 5b) pro 500 Kg Spanmaterial zurückgewonnen. Durch optimierte Filtersysteme wird aktuell die Rückgewinnungsquote des TiC erhöht.



Bild 5: a) Demonstratoranlage DEW-Werk Hagen zur TiC-Rückgewinnung, b) In der Demonstratoranlage zurückgewonnenes TiC

## Charakterisierung des RecyTiC

- Für eine Weiterverwendung des recycelten Titankarbid (RecyTiC) wurden die RecyTiC umfassend in den Bereichen chemische Zusammensetzung, Morphologie/Partikelgröße und mechanische Eigenschaften charakterisiert.

- In Bild 6a) und 6b) sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (REM) vom konventionell hergestellten TiC (Ausgangszustand vor Ferro-Titanit®-Herstellung) und recycelten TiC dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kanten der RecyTiC im Vergleich zum TiC abgerundet sind. Ebenso kann eine Abhängigkeit zwischen der Partikelgröße und dem Ausgangsmaterial bestimmt werden (Bild 7).

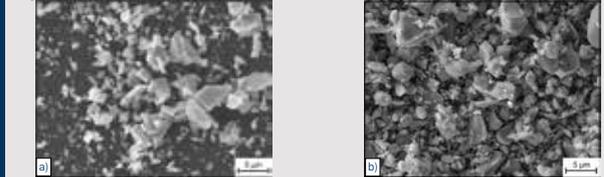


Bild 6: a) REM-Aufnahme des konventionell hergestellten TiCs, b) REM-Aufnahme des RecyTiCs

- Die chemische Zusammensetzung der RecyTiC wurde mittels der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) bestimmt (Tab. 2). Es kam eine Diffusion von Molybdän in das RecyTiC beobachtet werden. Der Molybdängehalt variiert je nach verwendetem Ausgangswerkstoff.

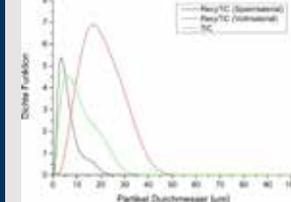


Bild 7: Ergebnisse der Laserbeugungsanalyse

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der rezyklierten Titankarbid aus den unterschiedlichen Ferro-Titanit®

Werkstoff	C	Si	Mo	Ti	Cr	Fe
Ausgangs-TiC	17	-	-	83	-	-
WFN	13	3	5	65	10	6
C-Spezial	17	-	4	69	4	6
S	18	1	3	63	10	4
Nikro128	16	-	6	77	-	-
Nikro143	15	-	8	77	-	-
CrMoNi	15	-	26	59	-	-

## Weiterverwendung des RecyTiC

### ■ Rückführung RecyTiC/Ferro-Titanit®

- Die Rückführung von RecyTiC in den Werkstoff Ferro-Titanit® wurde im Labormaßstab auf Basis von Sinterversuchen erfolgreich umgesetzt (Bild 8). Es kommt zu einer stoffschlüssigen Anbindung zwischen RecyTiC und metallischer Matrix.

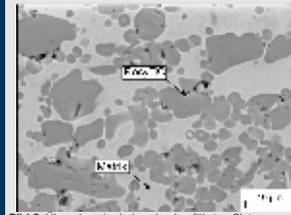


Bild 8: Über einen im Labor durchgeführten Sinterprozess in eine Metalmatrix eingebundene RecyTiCs



Bild 9: a) Versuchslicher R08 der Fa. Eirich, b) PTA-gepanzerte Rührwerkzeuge der Fa. Durum, c) Laser-gepanzerte Rührwerkzeuge der Fa. Riwalas

### ■ Rückführung RecyTiC/Auftragschweißungen

- Weiterhin soll RecyTiC in Auftragschweißlegierungen Anwendung finden. Die Verarbeitung von RecyTiC erfolgt durch die Fa. DURUM Verschleißschutz GmbH in Form des Plasmaauftragsschweißens (PTA) (Bild 9b). Die Fa. Riwalas Ltd. konzentriert sich auf die Verarbeitung durch Laserauftragsschweißen (Bild 9c). Die Verschleißbeständigkeit wird in einem von der Fa. Einch Maschinenbaufabrik GmbH konstruierten Versuchslicher R08 industriell getestet (Bild 9a). Erste RecyTiC-haltige Verschleißschutzschichten konnten erfolgreich hergestellt werden und in Verschleißuntersuchungen getestet werden (Bild 10-11).



Bild 10: Mit TiC-haltigem Spanmaterial gepanzertes Rührwerkzeug

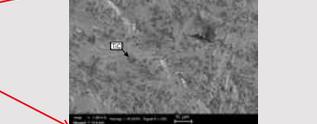


Bild 11: Verschleißfläche des gepanzerten Rührwerkzeuges.

## Zusammenfassung

- Im Projekt RecyTiC wurde ein chemischer Prozess zur Recycling von TiC aus nicht mehr verwendbaren Schrottmaterial entwickelt.
- Die chemische Zusammensetzung der RecyTiC weicht von der chemischen Zusammensetzung konventioneller, stöchiometrischer TiC ab.

- Dieser Recyclingprozess kann bei allen konventionell erhältlichen Ferro-Titanit® Güten angewendet werden.
- Eine Rückführung der RecyTiC in das Ferro-Titanit® konnte im Labormaßstab realisiert werden. Ebenso wurden RecyTiC-haltige Auftragschweißungen erfolgreich durchgeführt.

- Die Morphologie und Partikelgröße der RecyTiC ist abhängig von dem zu recycelten Ausgangsmaterial.

## Entwicklung von ressourceneffizienten Autoabgaskatalysatoren mit deutlich reduziertem Gehalt an Edelmetall und Seltenerdmetall

Große Teile der Weltförderung der Edelmetalle Palladium und Rhodium, sowie des Seltenerdmetalls Cer, werden gegenwärtig für die Herstellung von Drei-Wege-Katalysatoren zur Abgasreinigung von Benzinfahrzeugen verwendet.

	Masse in kg	% der Weltproduktion	Wert in Mio. € (Ø 2012)
Palladium	165.000	66	2800
Rhodium	22.000	80	1300
Cer	40.000	36	390

Bedarf an Edel- und Seltenerdmetallen für die Herstellung von Drei-Wege-Katalysatoren.<sup>[1],[2],[3]</sup>

Weltweit existieren derzeit ca. 790 Mio. Benzinmotoren mit Drei-Wege-Katalysator.<sup>[4], [5]</sup> Somit ist der Drei-Wege-Katalysator der am weitesten verbreitete katalytische Reaktor der Welt. Durch ihn werden jährlich insgesamt mehr als 100 Mio. Tonnen Schadstoffe umgesetzt.<sup>[6], [7]</sup> Diese setzen sich zusammen aus:

- 68 Mio. Tonnen Kohlenstoffmonoxid
- 22 Mio. Tonnen Stickstoffoxide und
- 14 Mio. Tonnen Kohlenwasserstoffe

Betrachtet man die umgesetzte Masse, so bewegt sich der Drei-Wege-Katalysator im Bereich der großen, industriellen chemischen Prozesse wie z. B. die Ammoniakherzeugung (136 Mio. t/a in 2011). Ziel des Projekts ist es, Autoabgaskatalysatoren zu entwickeln, die durch einen deutlich reduzierten Anteil an Edel- und Seltenerdmetallen Ressourcen schonen.

### Inhalt und Arbeitsschwerpunkte:

Im betriebswarmen Zustand und bei optimalem Sauerstoffgehalt im Abgas erreichen Drei-Wege-Katalysatoren heute einen Umsatz von praktisch 100%. Emissionen treten immer dann auf, wenn

der Sauerstoffgehalt vom optimalen Wert abweicht. Obwohl moderne Fahrzeuge mehrere Sauerstoffsensoren zur Regelung des Sauerstoffgehalts im Abgas enthalten, lassen sich Fehler bei der Einstellung des Sauerstoffgehalts im dynamischen Fahrbetrieb nicht vermeiden, zum Beispiel bei plötzlichen Beschleunigungsvorgängen. Gute Katalysatoren zeichnen sich deshalb dadurch aus, dass sie auch bei Abweichungen des Sauerstoffgehalts vom optimalen Wert einen guten Umsatz zeigen.

Das Zusammenspiel des Katalysators mit dem Motor und den verschiedenen Sensoren ist äußerst komplex, so dass einfache Kriterien für die Entwicklung besserer Katalysatoren nicht ausreichend sind. Die heutige Katalysatorentwicklung basiert daher auch stark auf aufwändigen und kostspieligen Tests an Motorprüfständen. Der Ansatz des REffKat Projekts ist es, die Effizienz des Entwicklungsprozesses durch ein verbessertes chemisches Verständnis zu erhöhen. Dafür arbeiten die Katalysatorentwickler von Umicore mit Regelungstechnikern und Modellierungsexperten der Universitäten Darmstadt und Karlsruhe zusammen.

Im Zentrum des Projekts stehen Arbeiten an neuartigen Prüfständen, die verschiedene Aspekte des Fahrzeugbetriebs realistisch und reproduzierbar im Labor nachstellen können, sowie mit Simulationsmodellen, die es erlauben, von den Labormessungen auf das Verhalten der Katalysatoren im Fahrzeug zu extrapolieren.

Bei der Materialentwicklung konzentriert sich das Projekt auf die Entwicklung verbesserter Ceroxid-Mischoxide, die im Katalysator eine wichtige Rolle als Sauerstoffspeicher spielen. Zunächst soll mit quantenchemischen Methoden die Stabilität von mehr als 700 Mischoxiden berechnet werden. Parallel werden etwa 250 neue Cer-Mischoxide in einem automatisierten Prozess synthetisiert. Die Charakterisierung dieser neuen Materialien erfolgt zunächst an den neu entwickelten Laborprüfständen, so dass nur noch für die vielversprechenden Materialien ein vollständiger Katalysator hergestellt und am Motorprüfstand vermessen werden muss.



Dynamischer Motorprüfstand zur Untersuchung von Autoabgaskatalysatoren, Quelle: Umicore AG & Co. KG

Eine Möglichkeit, den Edelmetallbedarf des Drei-Wege-Katalysators zu reduzieren, ist die Verbesserung der Regelung des Sauerstoffgehalts im Abgas. Bisher werden hier sehr einfache Regler verwendet, die für jede neuentwickelte Katalysatorformulierung aufwändig von Hand angepasst werden müssen. Ein Teilziel des Projekts ist die Entwicklung und Erprobung verbesserter modellbasierter Regelalgorithmen.

- [1] "Platinum 2013", Johnson Matthey Public Limited company, 2013
- [2] M. Humphries, "Rare Earth Elements: The Global Supply Chain", U.S. Congressional Report Service, 2013
- [3] S. Shaw, J. Chegwidan, "Global drivers for rare earth demand", Roskill Information Services Ltd., 2012
- [4] "Ward's World Motor Vehicle Data", Ward's Automotive Group, 2011
- [5] "The Outlook for Energy: A View to 2040", Exxon Mobil Corporation, 2014
- [6] "International Energy Statistics", U.S. Energy Information Administration, 2010
- [7] "Verkehr in Zahlen 2011/2012", Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2013

### Koordinator:

Dr. Martin Votsmeier,  
Umicore AG & Co. KG, Hanau

### Projektpartner:

- Umicore AG & Co. KG, Automotive Catalysts AC-RT-R
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Fakultät für Chemie und Biowissenschaften - Institut für technische Chemie und Polymerchemie
- Technische Universität Darmstadt – Fachbereich Chemie – Ernst-Berl-Institut für Technische und Makromolekulare Chemie

**Laufzeit:** 01.04.2012 bis 31.03.2015

**FKZ:** 03X3563

# Projekt „REffKat“



## Entwicklung von ressourceneffizienten Autoabgaskatalysatoren mit deutlich reduziertem Gehalt an Edelmetall und Seltenerdmetall

T. Bäröth<sup>1,4)</sup>, J. Rink<sup>1,4)</sup>, M. Hensdorf<sup>1,4)</sup>, B. Betz<sup>1,4)</sup>, A. Drochner<sup>1)</sup>, H. Vogel<sup>1)</sup>, R. Stanchev<sup>1)</sup>, U. Konigorski<sup>1)</sup>, S. Kannepall<sup>2)</sup>, S. Tischer<sup>2)</sup>, B. Mozaffar<sup>2)</sup>, O. Deutschmann<sup>2)</sup>, G. Keit<sup>3,4)</sup>, J. Schell<sup>4)</sup>, L. Jongen<sup>4)</sup>, A. Hofmann<sup>4)</sup>, J. Després<sup>4)</sup>, M. Roesch<sup>4)</sup>, M. Votsmeier<sup>4)</sup>

1) Ernst-Berl-Institut, TU Darmstadt, Alarich-Weiss-Str. 8, 64287 Darmstadt, Germany

3) Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Goethe Universität, Max-von-Laue-Str. 7, 60438 Frankfurt am Main, Germany

2) Institut für Technische Chemie und Polymertechnik, KIT, Engesserstraße 210, 76131, Karlsruhe, Germany

4) Umicore AG & Co. KG, Rodenbacher Chaussee 4, 63403 Hanau, Germany

### Herausforderungen und Ziele

Große Teile der Weltförderung der Edelmetalle Palladium und Rhodium, sowie des Seltenerdmetalls Cer, werden gegenwärtig für die Herstellung von Drei-Wege-Katalysatoren (TWC) zur Abgasreinigung von Benzinfahrzeugen verwendet.

	Masse in kg	Anteil an der Weltproduktion	Wert in Mio. €
Pd	165.000	66 %	2700
Rh	22.000	80 %	730
Ce	40.000	36 %	0,7



Heutzutage ist jedes kommerziell erhältliche Benzinfahrzeug mit einem Drei-Wege-Katalysator ausgerüstet. Der Drei-Wege-Katalysator ist damit der am weitesten verbreitete katalytische Reaktor der Welt.

Ziel des Projekts ist es, Autoabgaskatalysatoren zu entwickeln, die durch einen deutlich reduzierten Anteil an Edel- und Seltenerdmetallen effektiv Ressourcen schonen.

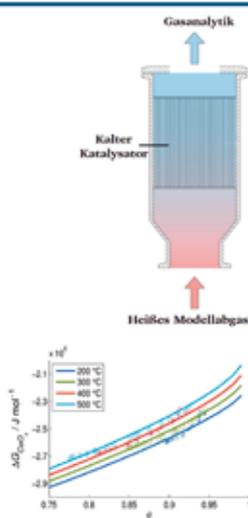
### Kinetische Modelle

#### Kaltstartverhalten

Ein Großteil der Emissionen eines heutigen Fahrzeugs entstehen beim Kaltstart. Mit Hilfe eines eigens dafür angefertigten Modellgasprüfstands kann der Kaltstart eines Motors im Labormaßstab unter realen Bedingungen nachgestellt werden. Die so erzeugten Messdaten dienen als Basis für das Erstellen kinetischer Modelle.

#### Sauerstoffspeicherverhalten

Drei-Wege-Katalysatoren besitzen einen Sauerstoffspeicher, um bei dynamischem Fahrverhalten auftretende Störungen im Kraftstoff-Luft-Verhältnis ( $\lambda$ -Wert) ausgleichen zu können. Die Lage des chemischen Gleichgewichts des Speichers kann durch thermodynamische Größen modelliert und nachvollzogen werden.



### Neue Materialien

Mit DFT (Dichte-Funktional-Theorie) -basierten Methoden werden computergestützt gängige, auf Cer-Zirkonmischoxid basierende Sauerstoffspeichermaterialien mit verschiedenen Seltenerdmetallen M(a) und M(b) dotiert:



Die Charakterisierung der neuen Materialien erfolgt zunächst an neu entwickelten Laborprüfständen, so dass nur noch für die vielversprechenden Materialien ein vollständiger Katalysator hergestellt und an Motorprüfständen vermessen werden muss.

### Regelkonzepte

Bisher werden zur Regelung des Sauerstoffgehaltes im Fahrzeug meist nur einfache PI-Regler verwendet, die für neu entwickelte Katalysatoren aufwändig von Hand angepasst werden müssen.

Ausgehend von kinetischen Modellen, welche durch partielle Differentialgleichungen repräsentiert werden, werden bessere, modellbasierte Regelverfahren entwickelt.

#### Regelziel

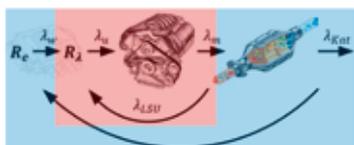
Niedrige Emissionswerte bei niedrigem Ressourceneinsatz

#### Kaskadenregelung

$\lambda$ -Regelung  
Emissionsregelung

#### $\lambda$ -Regelung

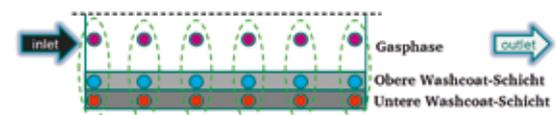
(IMC) Internal Model Control



### Schicht- und Zonenstrukturen

Im Rahmen des Projektes sollen mit geeigneten Simulationsprogrammen verschiedene Katalysatorarchitekturen vorgeschlagen werden, welche durch sinnvolle Anordnung der aktiven Edelmetall- und Sauerstoffspeicherkomponenten einen ressourcensparenden Schadstoffumsatz erzielen.

Die Anordnung kann sowohl in mehreren Schichten an der Katalysatorinnenwand, als auch axial entlang des Katalysatorkanals in verschiedenen Zonen erfolgen.



# RepaKorr

## Reparatursysteme und -konzepte für Korrosionsschutzbeschichtungen von Offshore-Windenergieanlagen

Korrosion ist ein kritischer Faktor beim Einsatz von Offshore-Windenergieanlagen. Die wichtigste Schutzmethode im nicht dauerhaft getauchten Bereich der Anlagen ist die Applikation von Korrosionsschutzbeschichtungen. Für eine wirtschaftliche Nutzung der Anlagen ist eine Lebensdauer von mehr als 25 Jahren notwendig. Dieser Wert liegt deutlich über in geltenden technischen Richtlinien genannten Schutzdauern für Korrosionsschutzbeschichtungen an Stahlkonstruktionen. Weitere Belastungen, insbesondere Beschädigungen aufgrund mechanischer Beanspruchung, können nach aktuellem Stand nicht ausreichend spezifiziert werden.

Ein nachhaltiges Reparatursystem, das offshore appliziert werden kann, erfordert die Berücksichtigung komplexer Zusammenhänge, u.a. Anlagenbetrieb, Bedingungen vor Ort, Überwachung und Bewertung der vorhandenen Schutzsysteme. Ebenso stellen die aufgrund der Lage im Meer spezifischen Umweltschutz- und Sicherheitsanforderungen eine besondere Herausforderung dar.

Im Verbundprojekt „RepaKorr“ erarbeiten Hersteller von Beschichtungswerkstoffen, Applikateure von Beschichtungssystemen, Anlagenbetreiber, Stahlbauer und Gutachter die werkstofflichen, technischen, konzeptionellen und organisatorischen Grundlagen für ein „vor-Ort-Reparatur“-Konzept.

Im Mittelpunkt des Vorhabens steht die Entwicklung von Reparaturwerkstoffen (Sika Deutschland GmbH) sowie entsprechender Applikationsverfahren (Muehlhan AG) für Offshore-Windenergie-



Inspektions- und Reparaturarbeiten an einer Offshore-Wind-Konstruktion, Quelle: Muehlhan AG, Hamburg

anlagen vor Ort. Für den Nachweis der Funktionalität werden neue Prüfkonzepte entwickelt (Fraunhofer IFAM), da geltende Prüfvorschriften und -methoden den Reparaturfall nicht berücksichtigen. Weiterhin soll ein neues Verfahren zur Inspektion von Beschichtungen mittels Drohneneinsatz (muav, „mobile unmanned aerial vehicle“) entwickelt werden (AirRobot GmbH & CO.KG). Entsprechende Inspektionskriterien werden aus anderen technischen Anwendungsfeldern (Schiffbau, schwerer Korrosionsschutz) übernommen, gegebenenfalls modifiziert und Bestandteil einer automatisierten Inspektionstechnik werden (Corroconsult GmbH). Darüber hinaus werden Modifikationen an den Konstruktionen vorgenommen, die eine sachgerechte und sichere Durchführung der Reparaturmaßnahmen ermöglichen (Weserwind GmbH). Des Weiteren wird auf der Basis internationaler und

nationaler technischer Richtlinien und Umweltauflagen die Ressourceneffizienz des erarbeiteten Reparaturkonzeptes untersucht und bewertet (RETC GmbH).



### Koordinator:

Dr. Andreas Momber, Muehlhan AG

### Projektpartner:

- Muehlhan AG
- Sika Deutschland GmbH – Geschäftsbereich Industrial Coatings
- Corroconsult Gesellschaft für Coating Control Consulting GmbH
- WeserWind GmbH Offshore Construction Georgsmarienhütte
- AirRobot GmbH & Co KG
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) – Bereich Klebetechnik und Polymere
- RETC Renewable Energy Technology Centre GmbH (assoziiert)

**Laufzeit:** 01.04.2013 bis 31.03.2016

**FKZ:** 03X3570A

# Entwicklung von Inspektions- und Reparaturkonzepten für Korrosionsschutzsysteme an Offshore-Windenergieanlagen

Dr. A. Momber\*, S. Buchbach

BMBF Forum MatRessource „Die Förderinitiative des BMBF zu Materialien im Kontext von Ressourcen, Recycling, Substitution, Katalyse und Korrosionsschutz“, Darmstadt

## Herausforderung und Ziele

Korrosion ist ein kritischer Faktor beim Einsatz von Offshore-Windenergieanlagen. Die wichtigste Schutzmethode im nicht dauerhaft getauchten Bereich der Anlagen ist die Applikation von Korrosionsschutzbeschichtungen. Für eine wirtschaftliche Nutzung der Anlagen ist eine Lebensdauer von mehr als 25 Jahren vorgesehen. Weitere Belastungen, insbesondere Beschädigungen aufgrund mechanischer Beanspruchung, können nach aktuellem Stand nicht ausreichend spezifiziert werden.

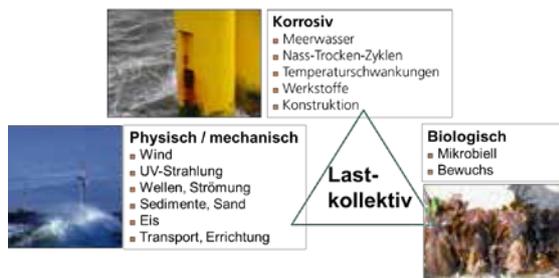


Bild 1: Lastkollektiv an einer Offshore-Windkraftanlage

## Inhalt und Arbeitsschwerpunkte

Im Verbundprojekt „RepaKorr“ erarbeiten die Projektpartner die werkstofflichen, technischen, konzeptionellen und organisatorischen Grundlagen für ein *Vor-Ort-Reparatur*-Konzept und Inspektionsmöglichkeiten für Offshore-Anlagen.

### 1. Reparaturkonzept

Einen Arbeitsschwerpunkt des Vorhabens bildet die Entwicklung von Reparaturwerkstoffen sowie entsprechender Applikationsverfahren für Offshore-Windenergieanlagen vor Ort. Hierbei wird eine zeit- und kosteneffektive „Ein-Schritt“-Philosophie konsequent verfolgt. Für den Nachweis der Funktionalität der Werkstoffe werden neue Prüfkonzepte entwickelt, da geltende Prüfvorschriften und -methoden den Reparaturfall nicht berücksichtigen.



Bild 2: Konzept der Lebensdauererlängerung

### 2. Inspektion und Überwachung

Einen weiteren Schwerpunkt stellt die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Inspektion von Beschichtungszustand und Korrosionsfortschritt mittels Drohneneinsatz (muav, „mobile unmanned aerial vehicle“) dar. Entsprechende Inspektionskriterien und Beurteilungsmethoden werden aus anderen technischen Anwendungsfeldern (Schiffbau, schwerer Korrosionsschutz) übernommen, systematisiert, gegebenenfalls modifiziert und in einen automatisierten Inspektionsalgorithmus überführt.



Bild 3: Inspektion/Reparatur einer OWEA-Anlage und Drohnentechnik

### Anwendung, Nutzung und Ressourceneffizienz

- Die derzeit sehr hohen Kosten für die Reparatur von Offshore-Beschichtungssystemen werden deutlich reduziert.
- Die Inspektionsleistungen, deren Effektivität momentan entscheidend von der Nutzung sogenannter Wetterfenster bestimmt wird, können deutlich beschleunigt werden.
- Der Inspektionsprozess wird standardisiert, und die Ergebnisse können digital aufbereitet und zur online-Anlagenüberwachung übertragen werden.
- Inspektions- und Reparaturarbeiten können beschleunigt und Inspektions- und Reparaturzyklen reduziert werden.
- Instandhaltungsarbeiten können, da das entwickelte Inspektionssystem zuverlässige und örtlich zugeordnete Daten liefert, wesentlich genauer und zielgerichtet geplant werden.

#### Projektkonsortium RepaKorr:

Airrobot® GmbH & Co. KG  
Corroconsult GmbH  
Fraunhofer IFAM  
Muehlhan AG (Projektkoordinator)  
SIKA Deutschland GmbH  
WeserWind GmbH  
Senvion SE (Assoziierter Partner, ohne Förderung)

## Entwicklung ressourceneffizienter Korrosionsschutzschichten für hochbeanspruchte Komponenten in der alternativen Energieerzeugung



Quelle: Shutterstock



Quelle: Shutterstock



Quelle: Shutterstock

Nachhaltigen Anti-Korrosions-Strategien kommt eine immer größer werdende Bedeutung bei der Bewältigung globaler Herausforderungen durch den weltweit steigenden Energie- und Materialverbrauch zu. Insbesondere im Bereich der alternativen Energieerzeugung übernehmen sie eine Schlüsselfunktion bei der Steigerung der Ressourceneffizienz und Erschließung neuer Einsatzbereiche und tragen damit maßgeblich zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der alternativen Energieerzeugung bei (Bild 1).

Das übergeordnete Ziel des Verbundprojekts RESKORR ist daher die Entwicklung neuer ressourceneffizienter

Korrosionsschutzschichten auf PEEK-Basis als Alternative zu bisherigen sehr kostenintensiven, umweltbelastenden und oftmals den Anforderungen nicht genügenden Lösungen für den Korrosionsschutz hochpräziser Komponenten. Durch die Mitarbeit der Industriepartner Schaeffler, Flagsol, Evonik und ELB sowie dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik und der Hochschule Osnabrück ist es gelungen, die für das Vorhaben essentiellen Kompetenzen aus den Bereichen Werkstoffentwicklung, Beschichtung, Lasermaterialbearbeitung, Funktionsprüfung und Anwendung im Bereich Offshore Windenergieanlagen und Solarthermischer Kraftwerke zu

bündeln und so ein interdisziplinäres aufgestelltes Konsortium zu bilden. Ausgangspunkt der zu entwickelnden Korrosionsschutzschichten ist der polymere Werkstoff Polyetheretherketon (PEEK), der u. a. aufgrund seiner hohen chemischen und mechanischen Belastbarkeit prädestiniert für die angestrebten Einsatzbereiche ist. Ziel des Vorhabens ist es, einen PEEK-basierten Werkstoff sowie ein laserbasiertes Beschichtungsverfahren zu entwickeln, die die Erzeugung hochkorrosionsbeständiger und hochpräziser Beschichtungen auf anlassemempfindlichen Stahlwerkstoffen erlauben.

### Koordinator:

Dr. Tim Hosenfeldt, Schaeffler Technologies AG & Co. KG

### Projektpartner:

- Schaeffler Technologies AG & Co. KG
- Evonik Industries AG – Performance Polymers
- ELB – Eloxalwerk Ludwigsburg – Helmut Zerrer GmbH
- Flagsol GmbH
- Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT
- Hochschule Osnabrück

**Laufzeit:** 01.02.2013 bis 31.01.2016

**FKZ:** 03X3564A

# - ResKorr -

## Entwicklung ressourceneffizienter Korrosionsschutzschichten für hochbeanspruchte Komponenten in der alternativen Energieerzeugung

gefördert durch



BMBF-FORUM MatResource, 24. – 25.09.2014 in Darmstadt

### Motivation

Vor dem Hintergrund des weltweit steigenden Energie- und Materialverbrauchs und der daraus resultierenden Notwendigkeit, mit Ressourcen weitsichtig umzugehen, ist das Ziel dieses Projektes, eine ressourcenschonende Korrosionsschutzschicht auf Polymerbasis zu entwickeln, um bisherige kostenintensive, umweltbelastende und oftmals nicht ausreichende Systeme zu ersetzen.

Insbesondere im Bereich der alternativen Energieerzeugung ist meist mit starker korrosiver Belastung zu rechnen. Bei den zu beschichtenden hoch belasteten Lagerkomponenten spielt auch ein hoher mechanischer Verschleiß eine große Rolle.

Das temperatur- und chemikalienbeständige Polyetheretherketon (PEEK) bietet sich hier auch aufgrund seiner guten Reibwerte und der Beständigkeit gegen abrasiven Verschleiß als Beschichtung an.

Da die Schmelztemperatur von PEEK bei 340°C liegt, die zu beschichtenden Lagerkomponenten jedoch aus gehärteten Stählen (z.B. 100Cr6) hergestellt werden, deren Anlass-temperatur bei ca. 180°C liegt, ist ein herkömmliches Beschichtungsverfahren nicht anwendbar, ohne dass der Stahl seine wichtigen Härteeigenschaften verliert.



Solarthermisches Kraftwerk, Flagsol



Strömungskraftwerk, Geographie Infothek



Off-Shore Windkraftanlage, Quelle: ingenieur.de

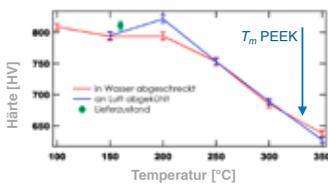


Rührwerk einer Biogasanlage, Fermenta

### Zielsetzung

Im Rahmen des Projekts wird ein laserbasiertes Beschichtungsverfahren entwickelt, das die Bildung eines benetzenden Films aus den applizierten polymeren Werkstoffen ermöglicht, ohne eine funktionsrelevante Beeinträchtigung des Stahlsubstrats zu bewirken:

- Konfliktlösung  $T_m$  PEEK — Anlass-T 100Cr6



Abnahme der Härte (HV) bei Wärmebehandlung von 100Cr6

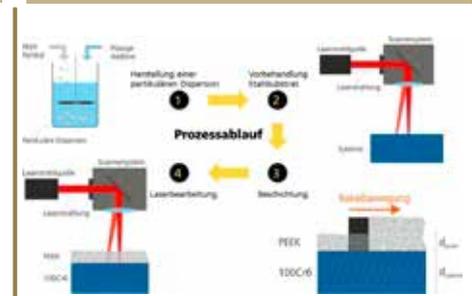
### Anforderungen an das System

- Schichtdicke  $d < 60 \mu\text{m}$
- Schichtdickenschwankungen  $\Delta d \leq \pm 3 \mu\text{m}$
- Korrosionsbeständigkeit im Salzsprühnebeltest  $\geq 3000 \text{ h}$  (DIN EN ISO 9227)
- Oberflächenrauheit  $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$
- Reibbeiwert  $\mu \leq 0,2$
- Verschleißbeständigkeit  $> 200 \text{ m}$  pro  $10 \mu\text{m}$  Schichtdicke
- Nachweis der Tauglichkeit für den Lagerbau im Fe8-Prüfverfahren nach DIN 51819 bei einer Last von 5 kN

#### Zusätzlich:

Entwicklung eines Schnelltests auf Basis des elektrochemischen Rauschens: Prüfdauer  $< 24 \text{ h}$  für eine Belastung entsprechend 3000 h Salzsprühnebeltest

### Schema des Prozessablaufs



Laserbeschichtungsprozess, Fraunhofer ILT

### Zwischenergebnisse

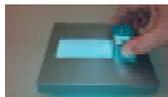
#### PEEK-Pulver



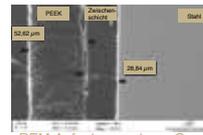
Auswahl und Weiterentwicklung von PEEK VESTAKEEP:

- Reduzierung der Korngröße auf  $5 \mu\text{m}$
- Rußpartikel als Laseradditive
- Durch Vernetzer deutlich höhere  $T_g$  des Pulvers

#### Beschichtungs-Prozess Ofen



ELB-Shim-Schablone: Aufbringen einer wässrigen Dispersion (lö-sungsmittelfrei).



REM-Aufnahme des Querschliffes, ofengesinterte Schicht bei 360 °C

Ofensintervallen führen zu Erkenntnissen der Einflüsse von:

- Sintertemperaturen
- Abkühlgeschwindigkeiten

#### Vorbehandlung des Stahls



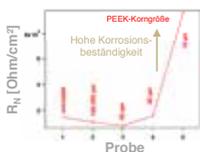
Mikroskopische Aufnahme der laservorbehandelten Stahloberfläche

Haftverbesserung durch Vorbehandlung des Stahls: Es wurden verschiedene Vorbehandlungsmethoden untersucht.

Basierend auf den bisherigen Ergebnissen konnten folgende Vorbehandlungen ausgewählt werden:

- Laservorbehandlung
- Silikatisierung der Oberfläche

#### Elektrochemisches Rauschen



Auswahl eines geeigneten PEEK-Pulvers mithilfe von  $R_N$

Das Messen des elektrochemischen Rauschens ermöglicht es, einen Korrosionsschutz ohne äußere Einwirkungen zu beurteilen.

- Rauschwiderstand  $R_N$  als Maß für Korrosionsbeständigkeit

$$R_N = \frac{\sigma(U)}{\sigma(I)}$$

$\sigma(U)$ : Standardabweichung Potential  
 $\sigma(I)$ : Standardabweichung Strom

#### Prozessoptimierung

Der Laserbearbeitungsverfahren wird weiter optimiert. So können z.B. durch das Vorheizen des Stahlsubstrats Haftfestigkeit und Dichte der Schicht vergrößert werden.



Laserbeschichtung von 100Cr6-Shims mit PEEK-Dispersion

Angepasst wurden ebenfalls:

- Wellenlänge und Laserleistung
- Scangeschwindigkeit und Pulsdauer
- Schichtdicke und Pulversorte

#### Realteil-Anwendung



Als erstes Real-Bauteil wird ein zylindrischer Lagerbolzen beschichtet werden, der bei TSK Flagsol in Anwendung ist.

### Ausblick

#### Erreichen des 1. Meilensteins:

Die mit dem Laserverfahren erzeugte Beschichtung soll 750 h im Salzsprühnebeltest bestehen.

#### Realteil-Beschichtung:

Weiterentwicklung des Laserbeschichtungsverfahrens für die Realteil-Beschichtung.



FLAGSOL





Quelle: Shutterstock



Quelle: Shutterstock

Heutzutage entfallen bereits etwa 70% des weltweiten Antimonbedarfs auf den Einsatz von Antimontrioxid (ATO) als synergetischer Werkstoff in Flammschutzmitteln für die Kunststoffindustrie. Zukünftig werden für den ATO-Bedarf auf diesem Sektor Wachstumsraten >5% prognostiziert. Fraglich ist, ob und zu welchem Preis dieser Materialbedarf der Industrienationen in Zukunft gedeckt werden kann, da für Antimon eine starke Importabhängigkeit vom nahezu monopolistischen Antimonproduzenten China vorliegt und der Markt auf die chinesische Exportpolitik mit einer sehr volatilen Preisentwicklung reagiert.

Die Situation auf dem Weltmarkt zeigt die Notwendigkeit der Mobilisierung alternativer Antimonquellen für diesen High-Tech-Werkstoff. Dies kann durch Entwicklung geschlossener Stoffkreisläufe erreicht werden und ist Basis des Forschungsvorhabens „s AmOx“. Recycling ist hierzu essentiell, jedoch erfolgt derzeit auf diesem Wege keine nennenswerte Nutzung von Antimon z. B. aus Reststoffen der Elektronik- und Batterieindustrie. Im Verlauf des Forschungsvorhabens soll daher ein sekundär gewonnenes Antimonoxid entwickelt werden, dass gleichzeitig alle Spezifikationen für den Einsatz als Flammschutzwerkstoff erfüllt, dabei aber sowohl ressourcenschonender als auch kosteneffizienter zu produzieren ist, als das primär gewonnene Pendant.

Das Ausgangsmaterial für die Entwicklung dieses sekundären Antimonoxides bilden antimonhaltige Mischoxide, die bei der Raffination von Rohblei zwangsläufig anfallen. Im Rahmen des Projektes wird unter anderem daran gearbeitet, die Verunreinigungen in diesen Mischoxiden durch hochselektive Abtrennung mittels gesteuerter Oxidation zu reduzieren, um im darauffolgenden Prozessschritt der Antimonoxidgewinnung über die Gasphase ein möglichst hochreines Produkt gewinnen zu können. Da die Funktionalität des so gewonnen Materials in Bezug auf den Einsatz in Flammschutzmitteln von grundlegender Bedeutung ist, wird neben einer ausführlichen Analytik des sekundären ATO auch dessen Einsatz im Produkt experimentell erprobt. Weiterhin wird an der Integration jener Stoffströme, die zwar Antimonergehalte aufweisen, aber heute nicht an den Recyclingkreislauf des Antimons angeschlossen sind, gearbeitet. Ein Beispiel dafür bilden Kunststoffe, die mit eben jenen antimonhaltigen Flammschutzmitteln versetzt wurden.

### Koordinator:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich,  
Rheinisch-Westfälische Technische  
Hochschule Aachen

### Projektpartner:

- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- Conmet GmbH
- Verseidag-Indutex Gesellschaft mit beschränkter Haftung
- Aurubis AG

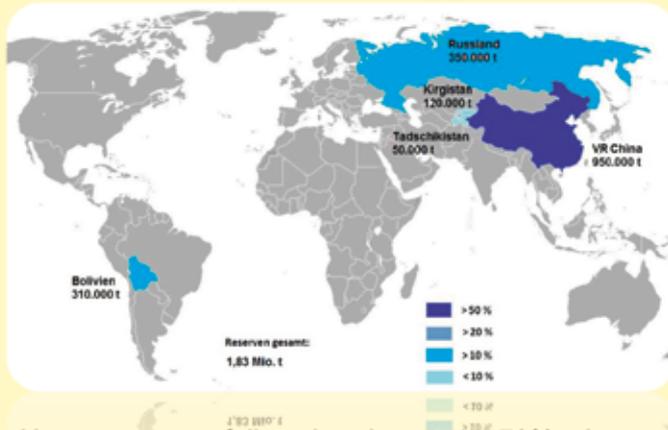
**Laufzeit:** 01.01.2014 bis 31.12.2016

**FKZ:** 03X3592

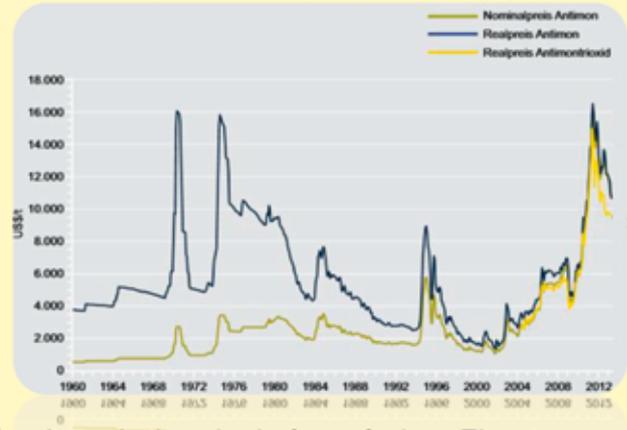
# Matressource Verbundprojekt s-AmOx

Entwicklung von sekundären Antimonoxiden für den Einsatz in Kunststoffartikeln

## Globale Antimonreserven



## Preisentwicklung Antimon



Heutzutage entfallen bereits etwa 70% des weltweiten Antimonbedarfs auf den Einsatz von Antimontrioxid (ATO) als synergetischer Werkstoff in Flammenschutzmitteln für die Kunststoffindustrie. Zukünftig werden für den ATO-Bedarf auf diesem Sektor Wachstumsraten >5% prognostiziert. Fraglich ist, ob und zu welchem Preis dieser Materialbedarf der Industrienationen in Zukunft gedeckt werden kann, da für Antimon eine starke Importabhängigkeit vom nahezu monopolistischen Antimonproduzenten China vorliegt und der Markt auf die chinesische Exportpolitik mit einer sehr volatilen Preisentwicklung reagiert.

## Closed Loop Recycling



Die Situation auf dem Weltmarkt zeigt die Notwendigkeit der Mobilisierung alternativer Antimonquellen für diesen High-Tech-Werkstoff. Dies kann durch Entwicklung geschlossener Stoffkreisläufe erreicht werden und ist Basis des Forschungsvorhabens "s-AmOx". Recycling ist hierzu essentiell, jedoch erfolgt derzeit auf diesem Wege keine nennenswerte Nutzung von Antimon z.B. aus Reststoffen der Elektronik- und Batterieindustrie. Im Verlauf des Forschungsvorhabens soll daher ein sekundär gewonnenes Antimonoxid entwickelt werden, das gleichzeitig alle Spezifikationen für den Einsatz als Flammschutzwerkstoff erfüllt, dabei aber sowohl ressourcenschonender als auch kosteneffizienter zu produzieren ist, als das primär gewonnene Pendant.



Ziel ist es, eine neue Technologieplattform für Katalysatoren und katalytische Flüssigphasenprozesse auf der Basis stimuli-schaltbarer Polymere zu schaffen, die folgende Vorteile aufweist: Erhöhung der Materialeffizienz der Prozesse durch Rezyklierung komplexer teurer Katalysatoren inklusive der Edelmetalle auf Basis des schaltbaren Aggregatzustandes, Erhöhung der Raumzeitausbeuten durch lösemittelarme Prozessführung, sichere Prozessführung bei stark exothermen katalytischen Prozessen durch selbst-abschaltende Katalysatoren.

Katalysatoren auf Basis stimuli-schaltbarer Polymere sind Systeme, deren Aggregatzustand und damit einhergehend, deren Aktivität mittels definiert einstellbarer Reaktionsparameter (z. B. Temperatur) schlagartig geändert („geschaltet“) werden können. D. h. im „Arbeitsmodus“ liegen sie gelöst als hochaktive und selektive Katalysatoren vor, während sie im „abgeschalteten Modus“ zu festen Phasen mit weitgehend unzugänglichen katalytischen Zentren werden. Solche stimuli-schaltbare Katalysatoren sind im Bereich der angewandten Katalyse als neue Reaktionsklasse zu betrachten, die im Erfolgsfall der hochselektiven Metallkomplekxkatalyse einen neuen Anwendungsschub verleihen könnte. Damit

sollen folgende Potentiale zur Verbesserung der Ressourceneffizienz chemischer Verfahren im Bereich der Spezial- und Feinchemie zu adressieren:

- **Minimieren von Nebenprodukten** durch den Einsatz hochselektiver Metallkomplekxkatalysatoren
- Erhebliche Kostenreduktion und Materialeffizienz der Prozesse durch **Rezyklierung** komplexer teurer Katalysatoren inklusive **Liganden und Edelmetalle** auf Basis ihres schaltbaren Aggregatzustandes (Einsparung von Entsorgungskosten der verbrauchten Katalysatoren und Energiekosten beim Refining des verbrauchten Edelmetalls)
- **Erhöhung der Raumzeitausbeuten und Materialeffizienz** durch **lösemittelarme Prozessführung** auf Basis stimuli-schaltbarer Katalysatoren, da sich diese einfach mittels Filtration von der Produktlösung abtrennen lassen und aufwändige Extraktionsverfahren entfallen. Dieser Aspekt führt zu einer Reduzierung der atmosphärischen Belastung durch flüchtige organische Stoffe und zu einer beträchtlichen Energieeinsparung, da Trennoperationen (Lösungsmittel/Produkt) und Reinigungs- oder Produktionsschritte für die eingesetzten Lösungsmittel minimiert werden.

- **Weitere Erhöhung der Raumzeitausbeute** auch im Vergleich zu konventionellen heterogen-katalysierten Prozessen, da die stimuli-schaltbaren Katalysatoren quasi als **homogene Katalysatoren** eingesetzt werden, d. h. es wird ein optimale Wechselwirkung zwischen der Reaktantenlösung und den katalytisch aktiven Zentren gewährleistet, ohne zusätzliche aktivitätsmindernde Diffusionsbarrieren zu schaffen, wie sie in der Phasentransferkatalyse oder der heterogenen Katalyse auftreten.
- **Sichere Prozessführung bei stark exothermen katalytischen Prozessen** durch selbst-abschaltende Katalysatoren: Katalytisch funktionalisierte stimuli-schaltbare Polymere, die eine sogenannte LCST (lower critical temperature) aufweisen, senken ihre Löslichkeit schlagartig oberhalb dieser kritischen Temperatur und fallen als Feststoff aus. Dieser Übergang vom gelösten bzw. kolloidal dispergierten Zustand in den festen Zustand ist mit einer deutlichen Verringerung der katalytischen Aktivität verbunden. Reaktion und die weitere Wärmeerzeugung werden so gestoppt, das Durchgehen des Reaktors wird unterbunden.

### Koordinator:

Dr. Dorit Wolf, Evonik Industries AG, Hanau

### Projektpartner:

- Evonik Industries AG – Inorganic Materials – Catalysts – Research & Development
- DWI an der RWTH Aachen e.V.
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Institut für Anorganische Chemie

**Laufzeit:** 01.08.2013 bis 31.07.2016

**FKZ:** 03X3588A

# Switchable Microgel Catalysts

V. Palchyk, R. Borrmann, A. Pich, M. Rueping, D. Wolf, R. Kadyrov

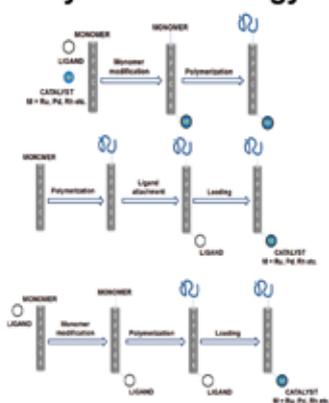
## Motivation

New technology platform for catalysts and catalytic liquid phase processes based on stimuli responsive polymers. With the aim to improve the resources efficient of chemical techniques in a field of special- and fine- chemistry.

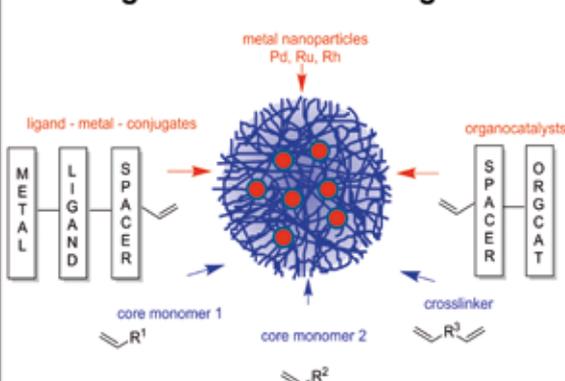
## Aim

Synthesis of temperature sensitive microgels with UCST properties. High catalytic activity resulted by incorporating of metal nanoparticles, metal complexes and organo-catalysts in microgel.

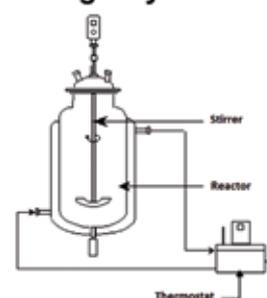
## Synthesis strategy



## Loading of switchable microgels

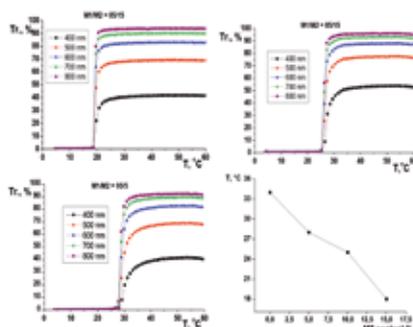
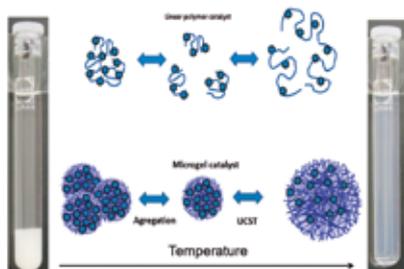


## Microgel synthesis

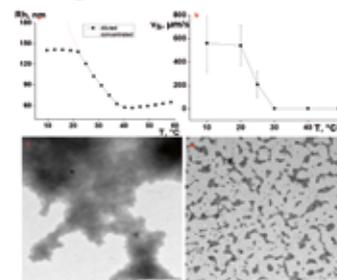


Emulsions polymerization  
 T = 70°C  
 Duration 8 hours  
 Purification: dialysis or centrifugation

## UCST properties

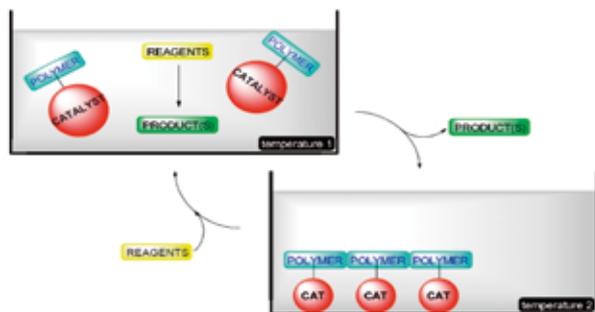


## Microgel characterization



Hydrodynamic radius (a) and sedimentation velocity (2000 rpm) (b) of microgels in isopropanol as a function of the temperature. TEM image of the microgel dried at 5°C (c) 45°C (d).

## Catalysis concept



## Catalytic functionalities:

**Homogeneous:**  
 Phosphines  
 Carbenes  
 Diamines  
 Organocatalysts

**Heterogeneous:**  
 Metal nanoparticles

## Catalytic applications:

Hydrogenations  
 Hydroformylations  
 C-C-cross-couplings  
 C-N-cross-couplings  
 Ring closing metathesis (RCM)  
 Cross metathesis

## Outlook:

- Design of robust microgel-based catalysts with switchable solubility for efficient recycling
- Application in hydrogenation, metathesis, C-C cross-coupling reactions

# Stahl-Schnecke

Kupfer- und zinnfreie Schneckenradgetriebe hoher Effizienz und Leistungsdichte – technologische Substitution von Bronze durch Stahl



## Gesamtziel des Vorhabens

Im Forschungsprojekt arbeiten 13 Partner aus Industrie und Hochschule daran, ein neues Konzept für Schneckengetriebe zu entwickeln. Das alternative Getriebe soll die Vorteile von Schneckengetrieben behalten und gleichzeitig ohne den Verschleißwerkstoff Bronze auskommen. Die Bronze soll durch einen konventionellen Stahlwerkstoff substituiert werden. Somit soll eine drastische Senkung der Produktionskosten erreicht werden. Gleichzeitig soll der Wirkungsgrad durch die neue Werkstoffpaarung und entsprechende Oberflächenbehandlungsverfahren gesteigert werden.

Die Weltbevölkerung wächst, Energie- und Materialverbrauch steigen, die Rohstoffvorkommen aber sind begrenzt. Die aktuelle Diskussion um Ressourcenverknappung zeigt die dringende Notwendigkeit der Substitution dieser Metalle, um wirtschaftliche und politische Abhängigkeiten zu vermeiden. Die Industriegesellschaft ist deshalb gezwungen, Innovationen für mehr Ressourceneffizienz voranzutreiben.

Die Bestandteile der wertvollen Bronze sind Kupfer und Zinn. Somit ist Bronze für den Einsatz im Schneckengetriebe zu kostbar, denn dort fungiert die Bronze nur als Verschleißwerkstoff. Auf innovativen Gebieten wie den erneuerbaren Energien und der Elektromobilität übernehmen Kupfer und Zinn aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit wichtige Funktionen und werden dort dringend benötigt.

Die Verwendung von Stahl anstelle von Bronze in Getrieben bringt wesentliche Vorteile. Stahl wird in Deutschland hergestellt und macht die Industrie importunabhängig. Zweitens ist der Wirkungsgrad von einer Stahl-Stahl-Paarung höher als der einer Stahl-Bronze-Paarung. Und zu guter Letzt ist die mechanische Belastbarkeit der Stahl-Stahl-Paarung höher als die Belastbarkeit von Bronze. Jedoch ist die Technologie heute noch nicht so weit entwickelt, um ein hoch belastbares Schneckenradgetriebe mit einer Stahl-Stahl-Paarung herzustellen.

Das Projekt Stahlschnecke greift den Leitgedanken der Hightech-Strategie auf, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu stärken. Das Projekt setzt eine innovative ganzheitliche Betrachtung der Wertschöpfung und der Anwendung von Schneckengetrieben als Lösung an. Die benötigten Kompetenzen werden durch die Partner aus verschiedensten Industriezweigen und Hochschulen abgedeckt. Im Erfolgsfall sind eine branchenübergreifende Einsparung von Investitionskosten, die Arbeitsplatzsicherung im Hochlohnland Deutschland und die Einsparung von Energie zu erwarten.

## Koordinator:

Dr.-Ing. Philipp Kauffmann, Bonfiglioli Vectron GmbH

## Projektpartner:

- Bonfiglioli Vectron GmbH, Krefeld
- Liebherr-Verzahntechnik GmbH, Kempten (Allgäu)
- ELTRO Gesellschaft für Elektrotechnik mit beschränkter Haftung, Baesweiler
- ALD Vacuum Technologies GmbH, Hanau
- Klüber Lubrication München SE & Co. KG – Abt. Marketing und Anwendungstechnik – MA-TM/PF, München
- Elgeti Engineering GmbH, Aachen
- ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH - Bereich Montage- und Automatisierungstechnik, Saarbrücken
- BGH Edelstahl Siegen GmbH, Siegen
- Ruhr-Universität Bochum – Fakultät für Maschinenbau – Lehrstuhl für Industrie- und Fahrzeugantriebstechnik (LIFA), Bochum
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Werkzeugmaschinenlabor – Forschungsbereich Werkzeugmaschinen, Aachen
- Hochschule Niederrhein University of Applied Sciences – STAR-Kompetenzzentrum, Krefeld

**Laufzeit:** 01.03.2013 bis 29.02.2016

**FKZ:** 03X3576



Projektkoordination:  
Bonfiglioli Vectron GmbH  
Ansprechpartner:  
Dipl.-Ing. Daniel Chmill  
daniel.chmill@bonfiglioli.com  
+49(0)2151/8396-121

# Stahlschnecke

## Kupfer- und zinnfreie Schneckengetriebe hoher Effizienz und Leistungsdichte – technologische Substitution von Bronze durch Stahl

### Motivation      Ziele      Vorgehensweise



**Bronze dient als Verschleißwerkstoff:**

- Hohe Materialkosten
- Hohe Reibung durch vermehrte Partikel im Schmierstoff
- Wenig ressourceneffizient

**Verschleiß- und Kostenminimierung**

- Senkung der Materialkosten
- Erhöhung der Lebensdauer des Getriebes
- Reduzierung der Wartungsaufwendungen
- Reduzierung der Materialvarianz
- Vereinfachung des Recyclingprozesses
- Reduzierung des Spiels der Verzahnung

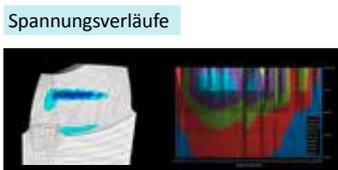
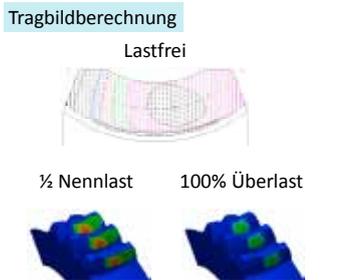
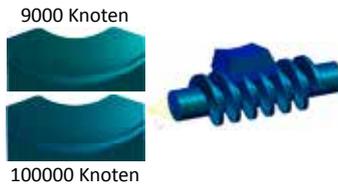
**Senkung des Energieverbrauchs:**

- Reduzierung der Reibung im Zahnkontakt
- Steigerung des Wirkungsgrad
- Energieeinsparung durch die Wahl einer kleineren Antriebsmaschine



#### Berechnung und Simulation

##### FE-Modellierung und Netzstudie



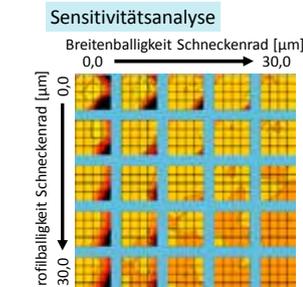
#### Erzielte Teilziele der Optimierungsphase:

**Auslegung einer Testgeometrie**

- Tragbildberechnung (lastfrei und lastbehaftet)
- Netzstudie zur FE-Simulation
- FE-Modellierung zur Spannungssimulation
- Sensitivitätsanalyse bzgl. Flankenabweichungen und Flankenmodifikationen
- Spannungsverlauf in Bauteiltiefenrichtung zur Bestimmung der benötigten Härte tiefe

**Prüfstand**

- Testkriterium: Fressschäden
- Prüfplan der Screening Tests
- Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme

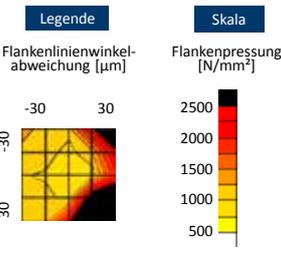


**Fertigung**

- Definition der Prüfräder durch Kombinationen von:
  - Material
  - Wärmebehandlung
  - Hart-Fein-Bearbeitung
  - Oberflächenveredlung
  - Schmierstoff
- Auslegung der Werkzeuge
- Optimierung des Fräsprozesses
- Iterativer Abgleich von Fertigung und Simulation

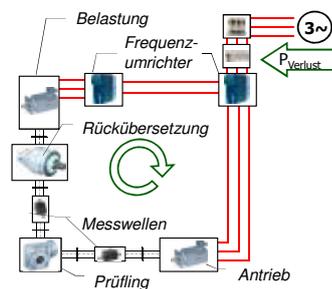
**Analysen**

- Oberflächenmessung
- Härteverlaufsmessung
- Zahngeometriemessung
- Schmierstofftest



#### Fertigung und Test

##### Prüfstandentwicklung



## Substitution von Selten Erden Elementen in hochfesten und duktilen Magnesiumwerkstoffen

Magnesiumwerkstoffe bieten enorme Potenziale für den industriellen Leichtbau und die Herstellung ressourceneffizienter Anwendungen. Sie weisen alle wesentlichen Vorzüge metallischer Werkstoffe auf (vielseitige Verarbeitungsmöglichkeiten, gute Leitfähigkeit für Wärme und elektrischen Strom, günstiges Crashverhalten, vollständige Recyclierbarkeit) und sind auf der Erde in nahezu unbegrenzter Menge verfügbar. Speziell für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften sowie die Brandsicherheit werden heute allerdings Legierungen eingesetzt, die Elemente der Seltenen Erden beinhalten, was sowohl hinsichtlich der Umweltverträglichkeit als auch hinsichtlich der Rohstoffverfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit kritisch zu bewerten ist.

Aufgabe des Vorhabens SubSEEMag ist die Entwicklung von Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren für Magnesiumwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaften, ohne den Zusatz von Selten Erden Elementen. Dazu sollen zum einen neue Legierungen zum Einsatz kommen, die vergleichbare Eigenschaftspotentiale aufweisen; Zum anderen sollen die Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren entlang der Prozesskette so aufeinander abgestimmt werden, dass die werkstoffseitigen Potentiale optimal ausgeschöpft werden können. So können die Werkstoffeigenschaften über ein gezieltes Mikrostrukturdesign nachhaltig beeinflusst werden.

Neben der Vermeidung des Einsatzes von Seltenen Erden besteht ein wesentliches Ziel des Vorhabens darin, die industrielle Nutzbarkeit von Magnesiumwerkstoffen zu erweitern, in dem einerseits Werkstoffe mit anwendungsbezogen optimiertem Eigenschaftsprofil entwickelt werden, die zusätzlich zu signifikant verringerten Kosten hergestellt und verarbeitet werden können.

Mit dem Magnesium Innovations Center des Helmholtz-Zentrums Geesthacht und dem Institut für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg beteiligen zwei auf dem Gebiet der Magnesiumforschung international führende Forschungseinrichtungen. Als Industriepartner arbeiten die ThyssenKrupp Magnesium Flachprodukte GmbH (Herstellung von Magnesium-Halbzeugen), die Carl Bechem GmbH (Umform-Schmierstoffe), IRE Industrial Research & Engineering (Fügeverfahren), die Henkel AG & Co. KGaA (Oberflächentechnik), die Prevent TWB GmbH & Co. KG (Blechverarbeitung für automobiler Anwendungen) sowie die VOITH Engineering Services GmbH (Anwendungsentwicklung für den Fahrzeugbau) an dem Vorhaben mit. Im Rahmen einer assoziierten Partnerschaft wird das Konsortium außerdem durch die Unternehmen Magontec, Airbus, Volkswagen und Audi unterstützt.

### **Koordinator:**

Dr.-Ing. Hans-Peter Vogt, MgF Magnesium Flachprodukte GmbH

### **Projektpartner:**

- MgF Magnesium Flachprodukte GmbH
- Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Metallformung
- Helmholtz-Zentrum Geesthacht
- Carl Bechem GmbH
- IRE Industrial Research & Engineering
- Henkel AG & Co. KGaA
- Prevent TWB GmbH & Co. KG
- VOITH Engineering Services GmbH

Laufzeit: 01.04.2014 bis 31.03.2017

FKZ: 03X3593H

### Hintergrund:

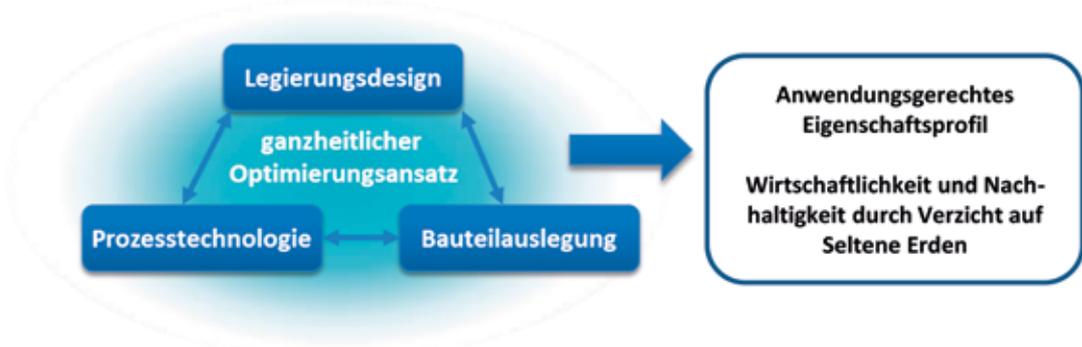
Magnesium bietet als Leichtbauwerkstoff ein hohes Anwendungspotenzial (Gewichtsvorteil von 30% ggü. Aluminium und bis zu 80% ggü. Stahl). Besondere funktionale Eigenschaften werden heute durch den Einsatz von Legierungen mit Selten-Erden-Elementen realisiert.

### Aufgabe:

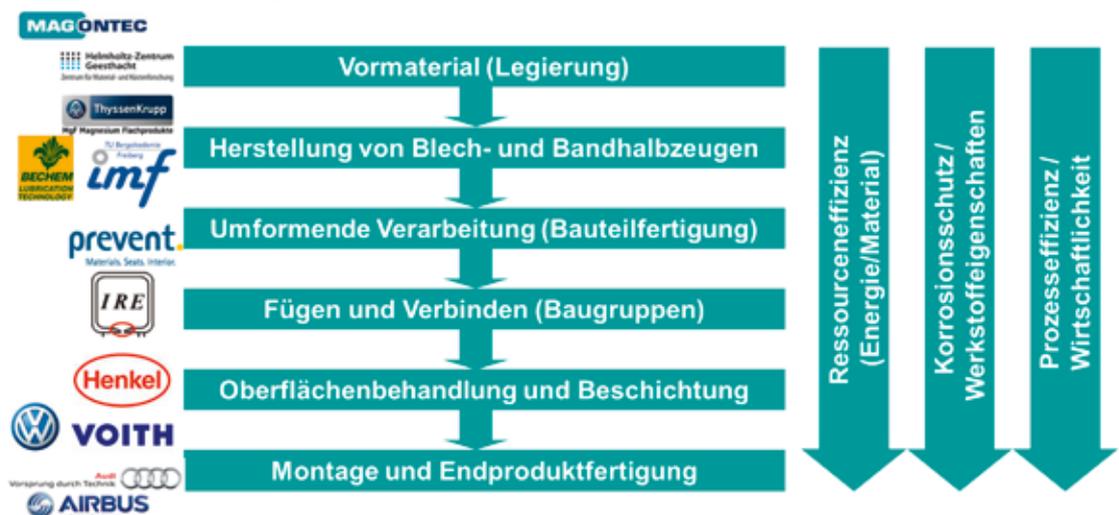
Aufgrund der Kritikalität der Rohstoffverfügbarkeit und Umweltverträglichkeit von Seltenen Erden sollen diese substituiert werden.

### Lösungsansatz:

Durch nach thermomechanischen Gesichtspunkten optimierte Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und eine daran angepasste Legierungsauswahl lassen sich die inhärenten Eigenschaftspotentiale von Magnesiumwerkstoffen optimal nutzen, um höchstwertige funktionale Eigenschaften auch ohne den Zusatz Seltener Erden einzustellen.



### Projektstruktur



### Ziel:

- ✓ Industrietaugliche Prozesse mit hoher Wirtschaftlichkeit und Produktivität
- ✓ Erschließung erweiterter Potentiale für den Leichtbau mit Magnesiumwerkstoffen
- ✓ Verzicht auf den Einsatz von Seltenen Erden für Magnesiumwerkstoffe

# Substungs

## Substitution von Wolfram in Verschleißschutzschichten

Bei starkem Abrasionsverschleiß, wie er im Umgang mit mineralischen Gütern häufig auftritt, haben sich auftraggeschweißte Hartverbundschichten bewährt. Deren hoher Verschleißwiderstand beruht darauf, dass harte Wolframkarbidpartikel (WC oder WC/W<sub>2</sub>C) in hohen Gehalten (bis zu 40 Vol. %) einer metallischen Matrix auf meist Ni-Basis zugegeben werden. Die keramischen Wolframkarbide stellen sich furchenden mineralischen Partikeln in den Weg und sind aufgrund ihrer hohen Härte bei gleichzeitig hoher Bruchzähigkeit für den Verschleißwiderstand und die daraus resultierende Lebensdauer von Verschleißteilen verantwortlich. Da Wolfram gemäß mehrerer Studien zu den kritischen Rohstoffen gehört, ist das Gesamtziel des vorliegenden Verbundvorhabens die Entwicklung hochverschleißbeständiger wolframbreier Auftragschweißlegierungen. Wolframkarbid soll durch andere in Europa verfügbare und zugleich kostengünstige Hartstoffe ersetzt werden. Die Materialkosten der Auftragschweißung sollen zusätzlich durch die Substitution der bisher verwendeten Ni-Matrices erzielt werden. Es werden Fe-Basis-Matrices entwickelt.

Als Hartstoffe werden Karbide, wie das hoch harte Siliziumkarbid, aber auch Oxide benutzt.

Um sie ausreichend sicher in die Fe-Basis-Matrices einzubetten, müssen werkstofftechnische und technologische Untersuchungen durchgeführt werden. Werkstofftechnisch werden Transfer-schichten vorgesehen, die eine optimale

chemisch/physikalische Bindung zu der Matrix auf Fe-Basis garantieren. Diese Transferschichten sollen einerseits unerwünschte Reaktionen zwischen dem Hartstoff und Metallmatrix unterbinden und andererseits eine metallurgische Hartstoffeinbindung in die Metallmatrix ermöglichen. In einem ersten Schritt gilt es, geeignete Transferbeschichtungen mittels der physikalischen und chemischen Gasphasenabscheidung auf den zuvor ausgewählten Hartstoffpartikeln zu platzieren. Gleichzeitig wird eigens für diesen Zweck eine pulvermetallurgische Hartlegierung auf Fe-Basis entwickelt und diese durch Gasverdüsen hergestellt.

Technologisch wird das Metallpulver in einem weiteren Prozessschritt mit den beschichteten Hartstoffen vermischt und zu einem schweißbaren Pulvergemisch, Schweißstäben sowie zu Fülldrähten weiterverarbeitet. Die hergestellten Schweißzusatzwerkstoffe mit alternativen Hartstoffen sollen zu Panzerschichten auf Baustahlsubstraten mit den Auftragstechnologien: autogenes-, Fülldraht-, PTA-, UP-Schweißen, Laserschweißen sowie mittels InduClad verarbeitet werden. Neben der Bewertung der hergestellten Panzerschichten bezüglich der tribologischen und mechanischen Eigenschaften unter Laborbedingungen gilt es, das Potential der neu entwickelten Panzerschichten unter realen Praxisbedingungen zu prüfen. Als Demonstrator wird auf Bauteile des im **Bild 1** dargestellten Gewinnungsgerätes; insbesondere auf Schneiden von Grabgefäßen zurückgegriffen.



Schaufelradbagger; Quelle: RWE



Grabgefäß mit Schneiden

### Koordinator:

Dr. Frank Schreiber, Durum Verschleißschutz GmbH

### Projektpartner:

- Durum Verschleißschutz GmbH
- Reiloy-Metall GmbH
- Vattenfall Europe Mining Aktiengesellschaft
- RWE Power Aktiengesellschaft – POT-MR
- Impuls Verschleißtechnik GmbH
- ELDEC Schwenk Induction GmbH – Anwendungstechnik
- Ruhr-Universität Bochum – Fakultät Maschinenbau – Institut für Werkstoffe – Lehrstuhl Werkstofftechnik
- Hochschule Lausitz (FH) – Fertigungstechnik– Tribologie

**Laufzeit:** 01.06.2013 bis 31.05.2016

**FKZ:** 03X3584

# Substitutions - Substitution von Wolfram in Verschleißschutzschichten

## Problemstellung

Bei starkem Abrasionsverschleiß, wie er im Umgang mit mineralischen Gütern häufig auftritt, haben sich auftragsschweißte Hartverbundschichten bewährt. Deren hoher Verschleißwiderstand beruht darauf, dass harte Wolframboridpartikel (WC oder WC/W,C) in hohen Gehalten (bis zu 40 Vol. %) einer metallischen Matrix auf meist Ni-Basis zugegeben werden. Die keramischen Wolframboride stellen sich furchenden mineralischen Partikeln in den Weg und sind aufgrund ihrer hohen Härte bei gleichzeitig hoher Bruchzähigkeit für den Verschleißwiderstand und die daraus resultierende Lebensdauer von Verschleißteilen verantwortlich.



Bild 1: Typische Anwendungen für den Einsatz auftragsschweißter Hartverbundschichten - Tagebaubagger für die Kohleförderung (links), Extruderschnecker für die Polymerverarbeitung (rechts)

- Da Wolfram gemäß mehrerer Studien zu den kritischen Rohstoffen zählt (siehe Bild 2), ist das Gesamtziel des vorliegenden Verbundvorhabens die Entwicklung hochverschleißbeständiger wolframbreier Auftragschweißlegierungen.

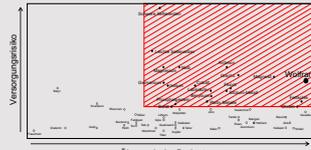


Bild 2: Einreihung der Rohstoffe bezüglich des Versorgungsrisikos und der ökonomischen Bedeutung (nach „Report on Critical Raw Materials for the EU“, 2014)

- Dies soll dadurch erreicht werden, dass das Wolframborid durch andere in Europa verfügbare und zugleich kostengünstigere Hartstoffe ersetzt wird, wobei auch die bisher verwendeten Ni-Basis Matrices durch günstigere Fe-Basis Matrices substituiert werden sollen.

## Ziel und Weg

- Die Einbringung alternativer Hartstoffe in Fe-Basiswerkstoffe scheint möglich, indem die Partikel mit funktionalen Schichten per CVD (LWT) oder PVD (BTU) ummantelt werden
- Diese Transferschicht wirkt im Falle von metastabilen, eher kovalent gebundenen Hartstoffen (SiC), einer starken Auflösung (Diffusions-sperschicht) entgegen.
- Im Falle der Verwendung von thermodynamisch stabilen Phasen, wie den ionisch gebundenen Hartstoffen ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ ), fördert die Transferschicht eine stoffschlüssige Einbindung (reaktive Schicht) in die Metallmatrix.
- Sowohl für Transfer- als auch Diffusions-sperschichten eignen sich vor allem Karbide und Nitride der Übergangsmetalle als Beschichtungswerkstoff (Bild 3).

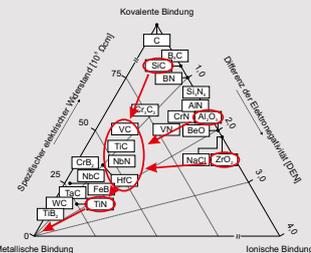


Bild 3: Einteilung wichtiger Hartstoffe nach spezifischem elektrischem Widerstand und Differenz der Elektronegativität

## Partikelbeschichtung

- Im Rahmen des Projektes werden die Hartstoffe sowohl über die PVD-Technik, als auch über die CVD-Technik beschichtet. Dies ermöglicht die Vorteile beider Verfahren zu nutzen und miteinander zu vergleichen.
- An der BTU werden die Hartstoffe in einer PVD-Sputter-Anlage beschichtet. Um eine allseitig Beschichtung der Hartstoffe zu ermöglichen, werden diese über einen dafür entwickelten Drehteller gewendet. An dieser Anlage erfolgt hauptsächlich die Abscheidung von Reinformetallen.
- Am LWT wurde für dieses Projekt eine LPCVD-Anlage zur Partikelbeschichtung entwickelt und installiert (Bild 5). Die Umwälzung der Partikel erfolgt hier durch eine Gasströmung und die dadurch erzeugte Wirbelschicht. Per CVD werden Übergangsmetallnitrid- und -karbidschichten abgeschieden.

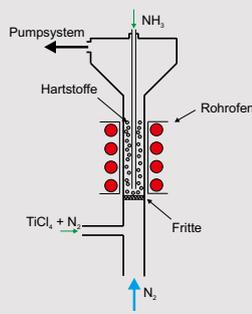
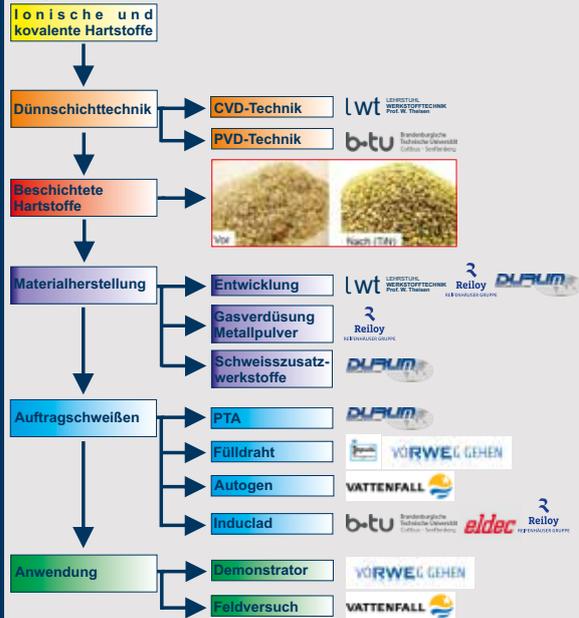


Bild 5: Schematische Darstellung der Partikelbeschichtungsanlage am LWT

## Projektkonsortium und Prozesskette



## Zwischenergebnisse

Sowohl an der BTU Cottbus-Senftenberg als auch am Lehrstuhl Werkstofftechnik der RUB wurden erfolgreich Partikel beschichtet. Das diese Beschichtungen zu einer Benetzung der Hartstoffe führen und diese dadurch stoffschlüssig in die Metallmatrix eingebunden werden, konnte durch Sinterversuche gezeigt werden (siehe Bild 4). Ohne Beschichtung werden die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ -Partikel von der Metallschmelze nicht benetzt. Dadurch sind sie nur mechanisch in der Matrix verklammert (a). Mit TiN-Beschichtung zeigt sich nach dem Sintern mit Fe-Basispulver eine metallurgische Verbindung (b).

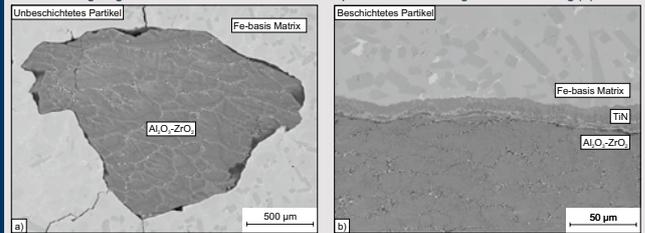


Bild 4: Einfluss der Beschichtung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ -Partikeln in Fe-Basis Matrices

Mit Titanitrid (TiN) beschichtete  $\text{ZrO}_2$ -Partikel wurden von der Fa. Durum in Füllröhre verarbeitet und verschweißt (Bild 6). Die Partikel konnten zwar teilweise stoffschlüssig in die Metallmatrix eingebunden werden, es zeigte sich jedoch, dass die Partikel zu starkem Aufschwimmen aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen  $\text{ZrO}_2$  ( $6,1 \text{ g/cm}^3$ ) und Metallmatrix ( $8 - 9 \text{ g/cm}^3$ ) neigen und die Beschichtung teilweise aufgrund von Themoschock abplatzen.

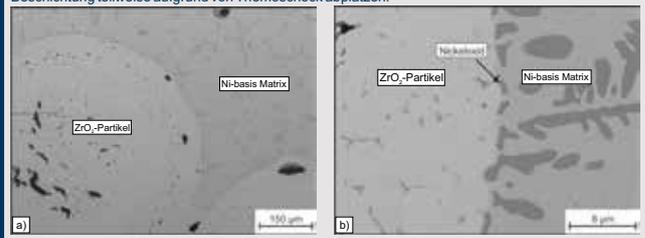


Bild 6: TiN beschichtete  $\text{ZrO}_2$ -Partikel mit einer Ni-Basismatrix aufgeschweißt

## Ausblick

Um die Problematik des Aufschwimmens aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen den Hartstoffen und der Fe-Basismatrix zu lösen, entwickelt die BTU einen Partikelbeschleuniger mit dem die Hartstoffe während des Schweißvorgangs in das flüssige Schmelzbad beschleunigt werden. LWT und BTU beschichten zudem Hartstoffe mittels PVD und CVD. Auf Basis von Beschichtungsversuchen erfolgt derzeit die Findung geeigneter Prozessparameter. Dabei werden die Beschichtungsversuche durch eine nachfolgende metallkundliche Schichtcharakterisierung bewertet. Beschichtete Partikel werden zudem mit Metallpulvern bei DURUM zu Schweißzusatzwerkstoffen verarbeitet. Schweißversuche und die Herstellung von Demonstratoren durch die Industriepartner Impuls, Reiloy, RWE und Vattenfall schließen sich an.

## Sustainable Hydrogen – Edelmetallfreie Katalysatoren für die Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energiequellen

Ziel des Projektes SusHy ist die Entwicklung von edelmetallfreien oder signifikant edelmetallreduzierten Katalysatoren für ein effizienzoptimiertes, photo-elektrochemisches Modul zur Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe von Sonnenlicht als Energieträger. Hierbei soll ein Systemwirkungsgrad von Sonnenlicht zu Wasserstoff von mindestens 10% erreicht werden.

Mit diesem Projekt wird ein wichtiger Beitrag zum Förderschwerpunkt Katalyse und Prozessoptimierung der Ausschreibung „Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und Gesellschaft – MatResource“ geleistet, da im Erfolgsfall eine Möglichkeit zur regenerativen Erzeugung von Wasserstoff als Energieträger bereitgestellt wird. Darüber hinaus wird die Abhängigkeit von Edelmetallen (z.B. Platin), die für die elektrochemische Herstellung von Wasserstoff derzeit als Katalysator verwendet werden, reduziert, indem diese durch neue Katalysatoren wie Metall(oxid)katalysatoren und auf Kohlenstoff basierenden Materialien substituiert werden. Hiermit kann sowohl die Abhängigkeit von Edelmetallimporten dauerhaft verringert, als auch die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft durch Senkung der Energie- und Materialkosten im Bereich der Wasserstofferzeugung durch erneuerbare Energien verbessert und somit die Umwelt nachhaltig entlastet werden.

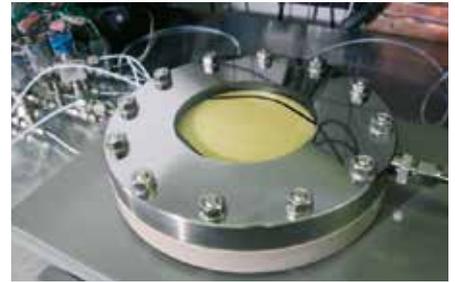
Im Rahmen des Vorhabens wird ein ganzheitlicher Lösungsansatz entwickelt, der

sowohl die Wasserreduktion als auch die Wasseroxidation mit Hilfe edelmetallfreier Katalysatoren in einem Modul vereint. Das Modul besteht aus verschiedenen funktionalen Schichten, die aufeinander abzustimmen sind. Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten liegt hierbei auf der Entwicklung von edelmetallarmen, möglichst edelmetallfreien Katalysatoren und deren Integration in ein effizientes Gesamtsystem mit getrennten Elektrodenräumen, das die separate Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff ermöglicht.

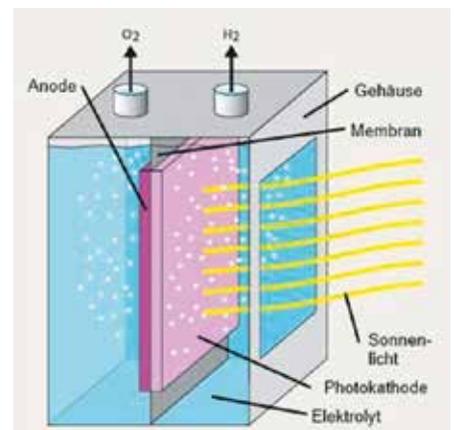
Daraus leiten sich die folgenden wissenschaftlich-technischen Teilziele ab:

- Entwicklung edelmetallfreier Katalysatoren zur Wasserspaltung
- Optimierung einer Mehrschicht-Photodiode für die Wasserstofferzeugung
- Herstellung und Optimierung eines Moduls zur Wasserstofferzeugung
- Ökonomische und ökologische Betrachtung der Energie- und Umweltbilanz (Life-Cycle-Analyse)

Das Konsortium gehört bezüglich seiner Kompetenz und Expertise zu den führenden Forschergruppen auf diesem Gebiet. Die erwarteten Ergebnisse sind neben der bedeutenden wirtschaftlichen Tragweite auch wissenschaftlich von hohem Stellenwert und werden die Spitzenstellung der beteiligten Institute und Unternehmen auf den hier betrachteten Forschungsgebieten maßgeblich ausbauen.



Photoreaktor, Quelle: Evonik Industries AG



Schematische Darstellung Reaktormodul

### Koordinator:

Dr. Jens Busse, Evonik Industries AG

### Projektpartner:

- Evonik Industries AG – Creavis Technologies & Innovation
- Forschungszentrum Jülich GmbH – Institut für Energie- und Klimaforschung
- Leibniz-Institut für Katalyse e. V. an der Universität Rostock
- Ruhr-Universität Bochum – Fakultät für Chemie und Biochemie – Technische Chemie

**Laufzeit:** 01.05.2013 bis 30.04.2016

**FKZ:** 03X3581

# SusHy - Sustainable Hydrogen



J. Busse<sup>[a]</sup>, W. Schuhmann<sup>[b]</sup>, M. Muhler<sup>[b]</sup>, F. Finger<sup>[c]</sup>,  
H. Junge<sup>[d]</sup>, A. Martin<sup>[d]</sup>, A. Brückner<sup>[d]</sup>, W. Jaegermann<sup>[e]</sup>

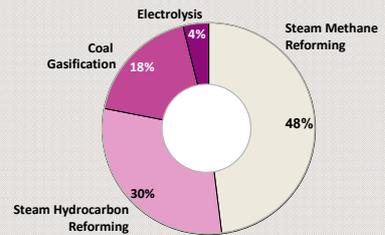
[a] CREAVIS – Science to Business, Evonik Industries AG, [b] Ruhr-Universität Bochum,  
[c] Forschungszentrum Jülich, [d] Leibniz Institute for Catalysis, [e] TU Darmstadt

## Motivation



- 95% of commercial hydrogen is produced from fossil fuels
- Global hydrogen production is with 900 Mt CO<sub>2</sub> emissions per year a major contributor to greenhouse gas emissions (equivalent to the CO<sub>2</sub> emissions of Germany in 2009)
- Hydrogen is essential for mobility and production of various chemicals, fertilizers and feed-additives

**Technology for low emission hydrogen production is an attractive research target**

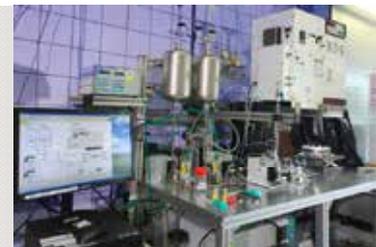


Market volume: 52.9 Mt in 2009  
Annual Growth Rate(2009-2014): 5.8 %

## Project scope

**Development of a technology that allows the production of hydrogen from sunlight with a minimum efficiency of 10%”**

- Noble metal free catalysts for water-splitting based on first-row transition metal-oxides
- Utilization of tandem-solar cells for the conversion of sunlight into an electrochemical potential difference for electrons and holes
- Corrosion resistant contact layer between the catalyst and the absorber layer
- Optimization of absorber material to increase the photoefficiency of the light harvesting cell
- Performance evaluation and long term testing under standardized conditions

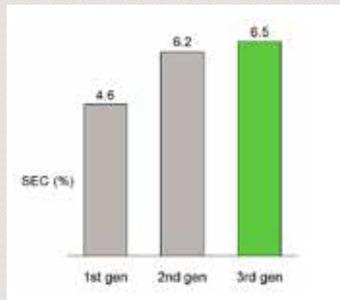


Laboratory test setup for photocatalyst evaluation

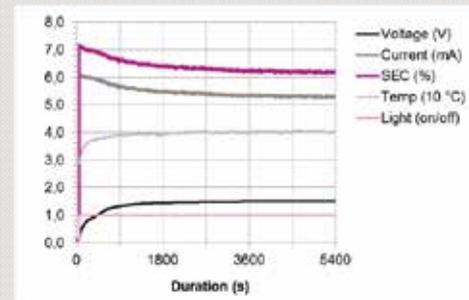
## Intermediate Results



Photoelectrochemical setup with a noble-metal free anode and a platinum cathode driven by a tandem solar cell



The solar energy conversion efficiency (SEC) was increased from 4.6% to 6.5%



After an equilibrium time a steady state appears in the solar driven photoelectrochemical device

## Outlook

- By further optimization of water-splitting catalysts and solar-absorbers we aim to boost the solar energy conversion efficiency
- An optimal reactor design is needed in order to reduce energy losses to increase the overall efficiency
- A detailed sustainability assessment for photoelectrochemical hydrogen production will be carried out within the project

Project consortium:

	The project SusHy is funded by the BMBF (FKZ: 03X3581)	

Contact person: Dr. Jens Busse +49 2365 49 86509 jens.busse@evonik.com

Evonik. Power to create.

## Thermisch gespritzte und solvothermal verdichtete Schutzschichten in Müllverbrennungsanlagen und Biomassekraftwerke

Gesamtziel des Forschungsvorhabens ist es, einen thermischen und chemischen Korrosionsschutz für Funktionsoberflächen in Müllverbrennungsanlagen (MVA) und Biomassekraftwerken (BMK) über solvothermal verdichtete Mehrschichtsysteme zu entwickeln. Im Fokus steht insbesondere der Betrieb von Müllverbrennungsanlagen bzw. -kraftwerken, bei denen auf Grund der aggressiven Gaszusammensetzungen die Anforderungen an den Korrosionsschutz am höchsten sind.

Die Entwicklungsaufgaben zielen darauf ab, den bisher noch unzureichenden Korrosionsschutz in diesen Anlagen mit ihren hohen Betriebstemperaturen und chemisch aggressiven Umgebungsbedingungen zu erhöhen und deren Zuverlässigkeit und Lebensdauer nachhaltig zu steigern. Die Aufgaben werden durch den innovativen Ansatz gelöst, chemisch inerte keramische Schutzschichten, die über thermisches Spritzen aufgetragen werden, durch solvothermale Prozesse so zu modifizieren, dass sie den hohen Anforderungen genügen.

In vorherigen Forschungsvorhaben wurden thermisch gespritzte Schichtsysteme auf Basis von Ni-Legierung als Ausgleichsschicht (Zwischenschicht) und

oxidkeramischen Deckschichten eingehend untersucht und solvothermale Prozesse identifiziert. Letztere bewirken eine Verdichtung der Keramik im Übergangsbereich zum Metall und erhöhen deren Verschleiß-, Thermowechsel- sowie Korrosionsbeständigkeit. Bisher vorhandene Defizite von thermisch gespritzten Schichten in Form von mangelnder Dichtheit, zu geringer Haftung auf metallischen Grundkörpern und mechanischer Belastbarkeit können dadurch beseitigt werden.

Das Ziel des Vorhabens ist es, oben genannte Effekte vertiefend zu untersuchen, deren Kinetik näher zu bestimmen und die Methoden zur Synthetisierung des Prozesses zielgerichtet für relevante Schichtsysteme des Korrosionsschutzes für MVA und BMK weiterzuführen und zu verfeinern. Die aus diesen Untersuchungen ermittelten Werkstoffkombinationen und die parallel dazu durchgeführte Entwicklung der Beschichtungstechnik werden fortlaufend labortechnisch überprüft und geeignete Schichtsysteme im direkten Anlagenbetrieb des Müllheizkraftwerks Schwandorf und im Verbrennungstechnikum des Fraunhofer UMSICHT eingesetzt und erprobt. Mit diesen wissenschaftlich-technischen Untersuchungen und

Anwendungen soll die Basis für den Einsatz thermisch gespritzter Schichtsysteme als zuverlässiger Korrosionsschutz für MVA und BMK geschaffen werden.

An dem Forschungsvorhaben sind neben den Forschungseinrichtungen (Fraunhofer UMSICHT und Ludwig-Maximilians-Universität München) zwei produzierende Unternehmen aus der Metallindustrie beteiligt, von denen die Deutsche Edelstahlwerke GmbH hauptsächlich für die industrielle Herstellung von Pulverlegierungen und die Rohrwerk Maxhütte GmbH für die Herstellung der Substrate überwiegend verantwortlich sein werden. Darüber hinaus bildet die Beteiligung eines MVA-Betreibers (Zweckverband Müllverwertung Schwandorf) sowie die beratende Tätigkeit eines Ingenieurdienstleisters für MVA (Martin GmbH) insofern eine vorteilhafte Konstellation, als ein großer Teil der Wertschöpfungskette (vom Herstellen der Grundwerkstoffe und Halbzeuge über deren Veredelung bis zur Planung und zum Betrieb einer MVA) hierdurch abgebildet wird.

### Koordinator:

Dr.-Ing. Patrick Masset, Fraunhofer UMSICHT

### Projektpartner:

- Deutsche Edelstahlwerke GmbH – Sonderwerkstoffe
- Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT)
- Ludwig-Maximilians-Universität München, Department für Geo- und Umweltwissenschaften – Sektion Mineralogie, Petrologie & Geochemie
- Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik
- Rohrwerk Maxhütte GmbH
- Zweckverband Müllverwertung Schwandorf

**Website:** <http://www.ts-protect.com/>

**Laufzeit:** 01.01.2013 bis 31.12.2015

**FKZ:** 03X3569

# TS - Protect

## SOLVOTHERMAL MODIFIZIERTE KORROSIONSSCHUTZSCHICHTEN

S. Wöllmer<sup>1</sup>, S. Schuster, P. J. Masset<sup>1</sup>, C. Härtel<sup>2</sup>, K. T. Fehr(t)<sup>3</sup>, S. Heuss-Abbichler<sup>3</sup>, D. Abbichler<sup>3</sup>, D. Müller<sup>3</sup>, M. Murer<sup>4</sup>, K. Rieger<sup>5</sup>, H. Hill<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer UMSICHT, An der Maxhütte 1, 92237 Sulzbach-Rosenberg, www.umsicht.fraunhofer.de

Telefon<sup>1</sup> 09661/ 908-415, E-Mail<sup>1</sup> silke.woellmer@umsicht.fraunhofer.de

### AUFGABENSTELLUNG

Den Betreibern von Müllverbrennungsanlagen entstehen durch Hochtemperaturchlorkorrosion erhebliche Stillstands- und Wartungskosten. Besonders korrosionsgefährdete Bauteile werden derzeit mit einer ca. 2 mm dicken Nickelbasislegierung durch Auftragsschweißen geschützt.



Abschnitt einer Müllverbrennungsanlage und Korrosion (rechts)

### ZIEL

Ziel ist ein dauerhafter, kostengünstiger Korrosionsschutz. Thermisch gespritzte Multilayerschichten mit verschiedenen Funktionalitäten werden solvothermal modifiziert. Eine Nickelbasislegierung fungiert als Korrosionsschutz, Wärmedehnungsausgleich, Haftgrundlage und nimmt am Solvothermalprozess teil. Ein zirkoniumdioxidbasierter Keramiklayer übernimmt den äußeren Schutz und wird durch die solvothermale Reaktion verdichtet.

### ZUSAMMENFASSUNG

Solvothermal behandelte Schichten besitzen

- größere Haftfestigkeiten
- eine höhere Härte und
- sind dichter.

Die anfänglich poröse thermische Spritzschicht ist von einem feinen Rissnetzwerk durchzogen. Dieses ermöglicht den solvothermalen Prozess. Durch Rekristallisation wird die darunterliegende Metallschicht gegen Korrosion geschützt.

### ERWARTETE ERGEBNISSE

Die Stahlrohre von Überhitzer, Sammler und Econmizer einer Müllverbrennungsanlage sollen mit solvothermal beschichteten Überzügen gegen Korrosion geschützt werden. Die beim Verbrennungsprozess entstehenden chlor- und sulfathaltigen Rauchgase und Feuchte gehen mit Bestandteilen der Keramikschicht in Lösung.

### DER SOLVOTHERMALPROZESS

Lösung → Transport als Gasspezies → Rekristallisation

**Der Schichtwerkstoff soll durch Einwirkung der im Rauchgas enthaltenen Spezies in ähnlicher Weise verdichten.**



Solvothermal verdichtete Multilayerschicht

### EINE ZUSAMMENARBEIT VON:



<sup>1</sup> Fraunhofer UMSICHT Sulzbach-Rosenberg, <sup>2</sup> Rohrwerk Maxhütte GmbH, 92237 Sulzbach-Rosenberg, <sup>3</sup> Ludwig-Maximilians-Universität, 80333 München, <sup>4</sup> Martin-GmbH für Umwelt- und Energietechnik, 80807 München

<sup>5</sup> Martin-GmbH für Umwelt- und Energietechnik, <sup>6</sup> Zweckverband Müllverwertung Schwandorf, 92237 Schwandorf, <sup>7</sup> Deutsche Edelstahlwerke GmbH, 47807 Krefeld



Demontage 40t Wärmetauscher



Leckage in unbeschichteten Anlagen



Quelle: ARA Brunsbüttel GmbH

Ziel des Projekts ist es, ein wirkungsvolles Korrosionsschutzkonzept für Werkstoffe in Anlagen zur Gewinnung von Energie und chemischen Vorprodukten aus Reststoffen zu entwickeln. Damit soll es möglich werden, bisher nicht ressourceneffizient genutzte Energieträger (Raffinerierückstände, Ölschlämme und Ölsande etc.) einer umweltfreundlichen Verwendung durch Umwandlung in Ausgangsstoffe für die chemische Industrie bei gleichzeitiger Energieerzeugung zuzuführen. Bei Verwertung dieser „Problemenergieträger“ führen die Verunreinigungen zu einem extrem korrosiven Angriff in den Anlagen, z. B. bei Verwendung von Schwerstöl, in Form von vanadathaltigen Ablagerungen und schwefelhaltigen, reduzierenden Gasen.

Heute werden mangels eines wirksamen Korrosionsschutzkonzepts im Anlagenbau Stähle eingesetzt, die oft in weniger als einem Jahr Laufzeit große Schäden in Form von Durchbrüchen zeigen, weil sie

dem hohen Schwefelwasserstoff-Gehalt im Gas und den Schlacke-Ablagerungen nicht standhalten. Im Extremfall muss nach weniger als 10.000 Betriebsstunden der Abhitzeessel kostenintensiv getauscht werden. Dies führt zu Vergeudung von Ressourcen sowohl auf der Werkstoffseite (ca. 40t Stahl pro ausgetauschtem Abhitzeessel) als auch bezüglich der für den Prozess aufgewendeten Energieträger, denn besonders das Anfahren der Anlagen ist mit einem erhöhten Energieverbrauch sowie erhöhten Emissionen und Belastungen verbunden.

Im Projekt VANTOM (Vanadium ash tolerant materials) soll ausgehend von Laborversuchen und thermodynamischen Berechnungen ein wirkungsvolles Schutzkonzept für Abhitzeessel entwickelt werden. Im Fokus stehen neuartige magnesiumhaltige Schutzschichten, die entwickelt und untersucht werden müssen. Magnesiumoxid ist ein umweltfreundlicher, wirkungsvoller

Inhibitor für Vanadatkorrosion, dessen Einsatz in Gasturbinen in vollständiger Verbrennungsatmosphäre bereits Stand der Technik ist. Im Projekt soll Magnesiumoxid in eine Beschichtung eingebaut werden, um lokal an der Stelle zu wirken, an der die Vanadiumoxide und Sulfatablagerungen die Probleme verursachen. Diese neuartigen Beschichtungen sollen auch direkt vor Ort auf Rohre in bestehenden Anlagen aufgebracht werden können.

Durch das Projekt VANTOM wird es mittels eines neuen Korrosionsschutzkonzepts möglich, minderwertige Energieträger effizient zu nutzen durch eine Verwertung zur Energie- und Synthesegaserzeugung mit deutlich niedrigerem Ausstoß von Schadstoffen. So erfolgt eine ressourceneffiziente und umweltfreundliche Umwandlung von Problemenergieträgern in hochwertige unproblematische Energieträger und Vorprodukte für die chemische Industrie.

### Koordinator:

Mathias Schmahl, YARA Brunsbüttel GmbH – Technik

### Projektpartner:

- YARA Brunsbüttel GmbH – Technik
- DECHEMA Forschungsinstitut
- Lurgi GmbH
- Borsig Service GmbH

**Laufzeit:** 01.03.2013 bis 29.02.2016

**FKZ:** 03X3579A



## Vanadium induced boiler corrosion

X. Montero, M.C. Galetz, M. Schütze  
e-mail: [montero@dechema.de](mailto:montero@dechema.de)  
Funded by: BmBF via PtJ  
Period: 01.03.2013 – 29.02.2016



### Classical vanadates induced corrosion industrial cases

- Vanadates induced or accelerated corrosion is mainly observed in fossil energy conversion systems as direct combustion of coal or heavy fuels, gas turbine engines (marine, land or aircraft) or fluidized bed combustors.
- Vanadate salts melt at low temperatures (around 600°C) accelerating hot corrosion by fluxing of the protective scales
- Vanadates are usually introduced in the systems due to the burning of poor quality fuels
- The damaged parts are boilers or turbines and their coatings, directly exposed to the combustion atmosphere (bond coats or TBCs)

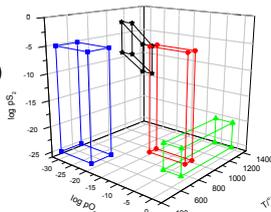


Fig. 1: Working conditions of classical vanadates induced corrosion technologies (colors in table 1)

Table 1: Constituents of classical vanadate corrosion

Salt	ppm	Industrial case	
Vanadate (4*/5*)	50-600	Direct combustion of heavy fuel (Vantom)	
	1-30	Gas turbine engine (marine, land, aircraft)	
Alkali	30-200	Ca,Na,K	Direct coal combustion
		Ca,Na	Direct combustion of heavy fuel (Vantom)
	Ca	Fluidized bed	
	2-5	Na	Gas turbine engine (marine, land, aircraft)

- Different corrosion cases involving vanadate melts are strongly affected by the process parameters (temperature and atmosphere, see figure 1) as well as the vanadates composition (see table 1)
- Critical vanadate salt properties are: melting temperature, viscosity, ionic conductivity, oxidation state and concentration because they directly affect the dissolution mechanism of the protective scale

### Failure case deposit analysis

In the area where the hole is produced a combined effect of sulfidation and vanadates melt accelerated corrosion is observed. The corrosion product is a three layered structure formed by CrS on bottom, a FeS in the middle and a (Ca,Na)-P-V oxide on top, which contains Fe dissolved from the FeS layer

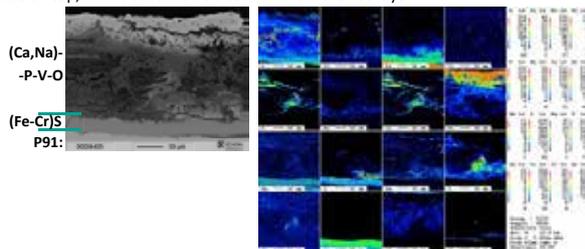


Fig. 4: SEM cross-section and elemental mapping of P91 ferritic-martensitic heat exchanger tube around the hole (damage)

At distances of around 1 m of after the position where the hole is produced (in the direction of the heat exchanger tube) only sulfidation is detected as main corrosion issue. The corrosion produces a multiple layered structure which combines successively FeS and CrS.

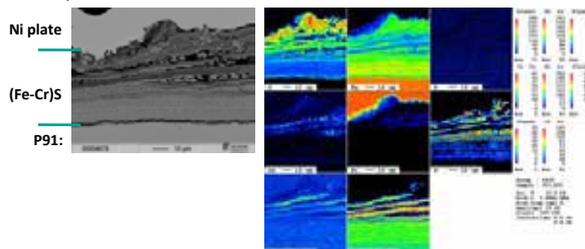


Fig. 5: SEM cross-section and elemental mapping of the P91 ferritic-martensitic heat exchanger tube at 1 m distance of the hole/damage in the direction of the tube)

### Motivation

- VANTOM will develop economically viable and efficient coatings against vanadate induced corrosion for heavy fuels direct combustion corroded heat exchangers.
- The heat exchanger are usually manufactured from low Cr containing ferritic steel (13CrMo44) or ferritic-martensitic steel (P91)
- The atmosphere contains H<sub>2</sub>S (0.6%), CO<sub>2</sub> (4.5%), H<sub>2</sub>O (7%), H<sub>2</sub> (41.5%) and CO (46.4%)
- The exposure temperature ranges between 450°C and 600°C
- The resulting good metal loss of 5.3 mm·year<sup>-1</sup>, produces holes through the heat exchanger after less than two years, therefore a protective coating is being envisaged



Fig. 2: Damaged heat exchanger



Fig. 3: Detail of the hole damage

- Coatings should prevent sulfidation of the heat exchanger as well as inhibit the formation of low melting vanadates containing salts.
- The coating method should be cost efficient and easy to manufacture on large parts. Therefore, diffusion coatings as pack cementation or slurry application are preferred.

### Identification of the low temperature melting vanadates

The exact identification of the vanadate salt composition, which determines the low melting temperature is an essential step in order to elucidate the corrosion mechanism and to reproduce the real VANTOM conditions at the lab scale in order to evaluate the best protective coatings.

#### Quantitative analysis of a real failure case

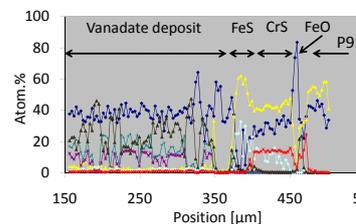


Fig. 6: Quantitative analysis of figure 4 in at. %

The **vanadate salt deposit** is composed of V (21 at.%), O (41 at.%) Ca (13 at.%) Fe (19 at.%) and P (9 at.%). The high Fe amount is presumably due to the dissolution of FeS  
The **sulfide layer** is composed of an outer FeS and an inner CrS layer. Only FeS is dissolved in the vanadate melt  
**Substrate:** local Fe oxides are detected between P91 and the sulfide layer.

### Melting temperature of different vanadates detected in the real failure case

- Vanadate melting:** Presence of alkali salts decreases the melting temperature. Salt cation type has a stronger influence on the melting temperature than the anion type.
- Vanadate melting inhibition:** While calcium salt decreases the vanadate melting temperature, calcium oxide inhibits the formation of melted vanadates (above 60 at.%).

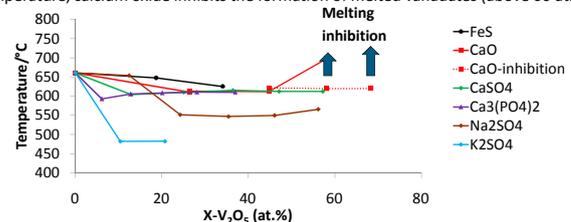


Fig. 7: Melting temperatures of vanadium pentoxide combined with different salts or corrosion products

### Prospects and outlook

Vanadate salts dissolve the scale and accelerate the corrosion of heat exchangers found in heavy fuel combustion boilers. Most of the analyzed vanadate salts melt at temperatures below 600°C. Further characterization is needed to determine the corrosiveness of the salts and to identify inhibiting oxides in order to produce adequate coatings for the VANTOM atmosphere and temperatures.

The authors would like to thank all project partners for their contributions. This work is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BmBF project via PtJ contract no.03X3579B) which is gratefully acknowledged.



Rohrreißer in einem Überhitzerbündel; Quelle: Warnecke, GKS

Die Hochtemperatur-Korrosion in Kesseln und Feuerungen zählt zu den Korrosionsformen mit dem höchsten Werkstoffverbrauch. Sie bewirkt damit einen besonders hohen Verlust an Ressourcen, einerseits auf der Seite der in großen Mengen für Kessel, Wärmetauscher und Rohrleitungen eingesetzten metallischen Werkstoffe und andererseits energieseitig durch korrosionsbedingte Beschränkungen hinsichtlich der Erzielung eines optimalen Anlagenwirkungsgrades und einer maximalen Verfügbarkeit. Dies gilt neben der Nutzung fossiler Energieträger insbesondere für biobasierte Energielieferanten wie auch für die thermische Nutzung

von Abfällen. Die Schäden allein durch Hochtemperatur-Korrosion können pro (Heiz-)Kraft-Werken im Mittel mit etwa 500.000 Euro pro Jahr angesetzt werden (durch Abnutzung der Werkstoffe, verminderte Verfügbarkeit, zusätzliche Instandhaltungskosten etc.). Darüber hinaus führt die Minderung der Effizienz durch Belagbildung zum Beispiel auf den Rohren in einer mittelgroßen Anlage zu Kosten von rund 750.000 Euro pro Jahr. Bei knapp 200 Anlagen, die in Deutschland gemischte Brennstoffe wie Müll, Ersatzbrennstoff, Altholz etc. einsetzen, muss von einem wirtschaftlichen Schaden von etwa 250 Millionen Euro pro Jahr ausgegangen werden.

In Projekt VOKos sollen insbesondere die strukturellen Eigenschaften der Partikel untersucht werden, die offensichtlich einen entscheidenden Einfluss auf die Hochtemperatur-Korrosion haben. Parallel dazu werden neue Werkstoffe und Beschichtungen im praktischen Einsatz einer realen Anlage und im Laborofen unter Berücksichtigung der Partikeleinflüsse untersucht. Gleichzeitig zur Untersuchung der korrosiven Partikel und vielversprechenden Werkstoffen wird deren Wechselwirkung durch Messung von Korrosionsleitwerten in der realen Anlage aufgezeichnet und in einer Laboranlage nachgestellt. Erst durch das Nachstellen im Labor wird deutlich, ob das Korrosionsmodell richtig verstanden ist. Alle Erkenntnisse fließen in eine Modellierung ein, die Methoden mit integrierten chemischen, physikalischen und elektrostatischen Modellen nutzt.

Perspektivisch kann bei erfolgreicher Umsetzung des Projekts ein deutlicher Beitrag zur Ressourceneffizienz durch eine Steigerung der Energie- und Materialeffizienz und eine Verlängerung der Lebensdauer der betroffenen Anlagen (-bauteile) geleistet werden.

### Koordinator:

Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS –  
Gemeinschaftskraftwerk  
Schweinfurt GmbH

### Projektpartner:

- GKS - Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH
- Universität Augsburg, Lehrstuhl Experimentalphysik II
- bifa Umweltinstitut GmbH
- Universität Bochum, Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT)
- Dechema Forschungsinstitut (DFI)
- Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)
- SAR Elektronik GmbH

**Laufzeit:** 01.07.2013 bis 30.09.2016

**FKZ:** 03X3589



Ein Forschungsprojekt im Rahmen von „MatRessource“ – Der Förderinitiative des BMBF zu Materialien für Ressourceneffizienz

## VOKos - Effizienzsteigerung durch verfahrenstechnisch optimierende Korrosionsschutzkonzepte in Verbrennungsanlagen mit heterogenen Festbrennstoffen

### Hintergrund:

Die Hochtemperatur-Korrosion in Kesseln und Feuerungen zählt zu den Korrosionsformen mit dem höchsten Werkstoffverbrauch und bewirkt damit einen besonders hohen Verlust an Ressourcen. Dieser Ressourcenverlust resultiert, einerseits aus großen Mengen für Kessel, Wärmetauscher und Rohrleitungen eingesetzter **metallischer Werkstoffe** und andererseits energieintensiv durch korrosionsbedingte Beschränkungen hinsichtlich der Erzielung optimaler **Anlagenwirkungsgrade** und der maximalen **Verfügbarkeit**. Dies gilt neben der Nutzung fossiler Energieträger insbesondere für biobasierte Energielieferanten wie auch für die thermische Nutzung von Abfällen.

Obwohl unstrittig ist, dass Chlorspezies die Hauptverursacher der Hochtemperatur-Korrosion sind, sind der genaue Mechanismus der Korrosion und damit auch die Gegenmaßnahmen weitgehend ungeklärt.

### Ziele:

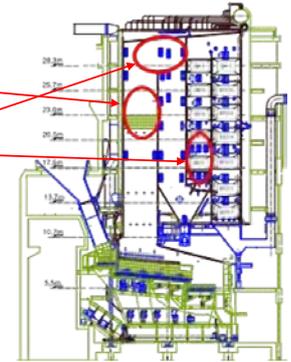
- Lebensdauererhöhung von rauchgasberührten Stahl-Bauteilen um bis zu einem Faktor 5;
- Effizienzsteigerung von Kraftwerksprozessen durch Erhöhung der Dampfparameter in Anlagen mit heterogenen Brennstoffen um bis zu 25 %;
- Erhöhung der Anlagensicherheit durch Vermeidung von ungeplanten Rohrreißen in rauchgasberührten Wärmeübertragern.

### Arbeitsansatz:

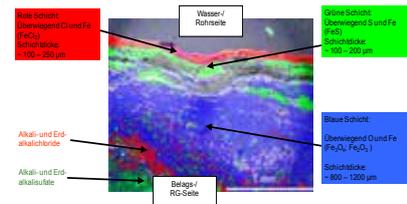
1. Verfahrenstechnischer Ansatz:
  - a) Vermessung der Verhältnisse in der **Feuerung**
  - b) Bestimmung der Chlorträger, insbesondere **Partikel**, im Feuerraum
  - c) Bestimmung der Chlorträger, insbesondere **Partikel**, im Kessel
  - d) Ermittlung von Stoffeigenschaften der Chlorspezies
  - e) Simulation des Feuerraumes inklusive Partikelfraktion
  - f) Simulation des Kessels inklusive Partikelfraktion
  - g) Simulation der Vorgänge am **Korrosionsort**
2. Werkstoffauslagerung mit neuen Werkstoffschuttschichten
3. **Gesamtmodellierung** des Prozesses

### Hauptkorrosionszonen in Kesseln:

1. Bereich oberhalb Feuerfestzustellung
2. Bereich im Übergang in den 2. Zug
3. Bereich der konvektiven Überhitzer

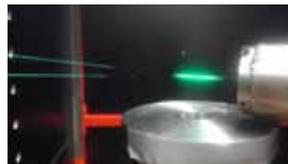


### Typisches Bild: Chlor ist das treibende Element der „Hochtemperatur-Chlor-Korrosion“



### Teilprojekt „Feuerung“:

- Die Feuerung wird hinsichtlich der Eigenschaften charakterisiert, um überhaupt Simulationen valide durchführen zu können. Dazu werden insbesondere die Wärmestrahlung und die Turbulenz im Feuerraum vermessen (u.a. mit LDA durch Uni. Bochum).
- Ferner wird der mechanische Transport des Brennstoffes, insbesondere an der Aufgabe (durch SAR) untersucht, wobei eine verlässliche Modellierung angestrebt wird.
- Um die Freisetzung der Chlorspezies verlässlich vorhersagen zu können, müssen die Temperaturen im Brennbett bekannt sein, die von bifa und GKS bestimmt werden.
- Die Gesamtheit der gewonnenen Information wird in das Simulationsprogramm „CombAte“ integriert (IUTA und GKS), mit dem Startwerte für die CFD-Simulation von Feuerung und Kessel berechnet werden können.



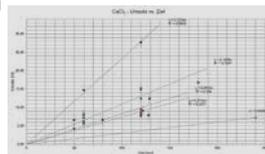
### Teilprojekt „Partikelmessung“:

- Partikel sind der Hauptträger der Chlorspezies.
- Das Vermessen von Partikeln bei Temperaturen von deutlich über 500 °C (hier bis über 1.250 °C) ist durch Kondensationseffekte und schnelle Reaktionen beeinflusst.
- Die Partikelcharakterisierungen erfordert somit ein System, welches diese Effekte entweder ausschließt oder berechenbar macht.
- Die Partikelmessungen werden in Feuerraum und Kessel durchgeführt, um die Entwicklung der Partikel entlang des Rauchgasweges bis zum Korrosionsort nachverfolgen zu können.
- Ein Vergleich von Messungen in korrosionsreichen und korrosionsarmen Anlagen soll eine weitere Indikation zur Identifizierung der Korrosionskausalitäten liefern.



### Teilprojekt „Nahbereich“:

- Auf dem korrosionskritischen Bauteil werden die Ergebnisse der Partikelbildung in Abhängigkeit der Partikelflugbahn abgeschieden und geben dort das Chlor für die Korrosion ab.
- Für die korrosionsrelevanten Reaktionen sind zum einen die Reaktionsgeschwindigkeiten und zum anderen die Stofftransporte zum Korrosionsort wichtig.
- Es werden Laborversuche zur Reaktionsgeschwindigkeit (Uni. Augsburg) und Berechnungen zum Stofftransport (DFI) durchgeführt.
- Auslagerungsversuche mit neuen Beschichtungen sowohl in Laboranlagen (an der Uni. Augsburg und dem DFI) als auch in der Großanlage (GKS) geben Hinweise auf potentielle Korrosionsvermeidung.



### Teilprojekt „Simulation-Modellierung“:

- Die Simulation bezieht sich auf die Vorgänge von der Freisetzung der Chlorspezies aus dem Brennstoff (mittels Programm „CombAte“), über den Transport der chlorhaltigen Partikel durch den Kessel (mittels CFD-Simulation) bis zur Umsetzung und Reaktion der Chlorspezies am Korrosionsort.
- In CombAte wird die Freisetzung der Partikel durch Verdampfung und Ausblasen beschrieben.
- Die CFD-Simulation berücksichtigt neben den üblichen physikalisch-chemischen Effekten auch die elektrostatischen Einflüsse.
- Die Vorgänge im Belag und am Rohr werden über Transportgleichungen beschrieben.

