

Graduiertenkolleg GRK 2802: Feuerfest Recycling

Ein Beitrag für Rohstoff-, Energie- und Klimaeffizienz in Hochtemperaturprozessen

Christos G. Aneziris, Olena Volkova, Patrick Gehre, Jana Hubalkova



Graduiertenkolleg 2802

Feuerfestkeramiken sind die unsichtbaren Helden in zahlreichen Hochtemperaturanwendungen und leisten einen essentiellen Beitrag in unserer Gesellschaft. In der Metallurgie, in der Energiewirtschaft, in der Baustoff- und Keramikindustrie sowie in der chemischen Industrie ist eine Verwendung von Feuerfestkeramiken unumgänglich, und insbesondere ihre Symbiose in Kontakt mit aggressiven Medien bestimmt häufig die Leistungsfähigkeit des Gesamtprozesses. Die Feuerfestkeramik befindet sich derzeit auf dem Entwicklungsweg vom groben Massenprodukt zum forschungsintensiven Spezialprodukt. Die Längenskala reicht vom „Nanometerkorn“ bis zu „Metermaßen der Feuerfestauskleidung“ und bei den Produkten vom gradierten Verbundwerkstoff oder Werkstoffverbund zur Hochtemperatur-Funktionskeramik, sog. „smart refractories“, [ANE08]. Knappe Ressourcen und die Notwendigkeit zur Senkung des Energiebedarfs fordern die Feuerfestforschung heraus deutlich leistungsfähigere und dennoch material- und energieeffiziente Werkstoffe, Herstellungsverfahren und insbesondere Recycling-Konzepte zu entwickeln.

Weltweit fallen jährlich bis zu 28 Millionen Tonnen gebrauchter Feuerfestmaterialien an, allerdings hat deren Recycling in der Vergangenheit eine eher untergeordnete Rolle gespielt. Aus ökologischen Gründen und aufgrund gestiegener Deponiekosten wurde in den letzten Jahren ein verstärkter Forschungsbedarf identifiziert sich mit der Nutzung der Hochtemperatur-Rezyklate auseinanderzusetzen. Allerdings stand bisher nicht die Treibhausgasreduzierung oder -neutralität im Fokus, da heutzutage die Mehrheit der gebrauchten Feuerfestmaterialien zunächst vor allem für eine artfremde Nutzung eingesetzt wird, u. a. als Zuschlagstoffe für den Straßenbau oder als Schlackenconditionierer in metallurgischen Prozessen. Ein enormes Potential zur direkten Vermeidung von treibhauswirksamen Emissionen entfaltet sich daher erst bei der Wiedernutzung in artgleichen Hochtemperaturwerkstoffen.

Die Feuerfestindustrie hat einen starken Einfluss auf die Treibhausgasemissionen in der keramischen Branche sowohl im Sinne der Freisetzung von CO_2 bei der thermischen Zersetzung von Carbonaten, z. B. bei der Kalzinierung von Magnesit zu Magnesiumoxid, als auch im Sinne der nachträglichen thermischen Behandlungen mit fossilen Brennstoffen für die Herstellung von Feuerfesterzeugnissen.

Gegenüber 1990 konnten die spezifischen Emissionen in der Feuerfestindustrie bis 2010 um ca. 35 % reduziert werden [FRO11]. Die Quellen der erneuerbaren Energien können dabei erhebliche Beiträge zur weiteren Reduzierung von Emissionen leisten, allerdings kann die Reduzierung von chemisch gebundenen Treibhausgasen aus den natürlichen Rohstoffen nur realisiert werden, wenn die feuerfesten Werkstoffe recycelt und in neuartigen Feuerfesterzeugnissen umgesetzt werden.

Dies wird in der Tabelle 1 am Beispiel MgO dargestellt, wo die Dekarbonisierung während der thermischen Kalzinierung zu einem CO_2 -Ausstoß von ca. 64 bis 74 % je nach Ausgangsrohstoffart des Magnesits beiträgt. Die Wiederverwendung als Feuerfestmaterial im Sinne eines geschlossenen Recyclingkreislaufs hat das Potenzial zu einem höheren ökonomischen und ökologischen Nutzen durch a) geringeren Energieverbrauch und CO_2 -Ausstoß im Vergleich zum Einsatz von natürlichen Ausgangsrohstoffen, b) kostengünstigere Ausgangsmaterialien und c) niedrigere Verarbeitungskosten. Damit entfaltet sich das Feuerfest-Recycling als die Basis für Rohstoff-, Energie- und Klimaeffizienz in Hochtemperaturprozessen.

Tabelle 1: Vergleich der Kohlendioxid-Bilanzen verschiedener Sinterbrandtechnologien [SZE07].

Spezifische CO_2 -Emissionen in t CO_2 /t MgO	A	B
Rohstoff	Magnesit, Fe-reich	Magnesit, Fe-arm
Ofentyp / Brennstofftyp	Drehrohr / Erdgas	Schachtofen / Erdgas
Dekarbonisierung: $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$	0,996	1,06
Direkte Kalzinierung	0,349	0,591
Gesamtsumme	1,344	1,655

Bisher wurde die Wiederverwendung nur in einem begrenzten Umfang bis zu ca. 20 % praktiziert [CER12]. Starke Anstiege der Rohstoffpreise und Lieferungsunsicherheiten in den letzten 5 Jahren haben dazu beigetragen, dass sich das Interesse an einer derartigen Wiederverwendung deutlich erhöht hat [HOR19].

Genau hier setzt das in Mai 2022 bewilligte DFG Graduiertenkolleg 2802 an, mit einer **fachübergreifenden Ausbildung** von Doktorandinnen und Doktoranden das Eigenschaftsspektrum als auch die Limitierungen einer neuen Generation von Hochtemperaturwerkstoffen auf der Basis von Feuerfest-Rezyklaten mit speziellen thermomechanischen Eigenschaften zu untersuchen.

Kontakt
aneziris@ikfww.tu-freiberg.de

schen, chemischen und funktionstechnischen Eigenschaften in Hochtemperaturprozessen der Metallurgie zu erforschen. Dabei soll einerseits eine materialbedingte CO₂-Reduzierung durch Recycling erzielt werden (Verzicht auf eine Kalzination und Freisetzung von CO₂ am Beispiel der Nutzung von MgO-Rezyklaten oder Verzicht auf den Bayer-Prozess am Beispiel der Nutzung von Al₂O₃-Rezyklaten), andererseits eine CO₂-Reduzierung durch funktionalisierte, metallokeramische Verbundwerkstoffe auf Basis dieser Rezyklate, deren Einsatz erst CO₂-ärmere u. a. metallurgische Prozesse ermöglicht.

In der Studie des Institute for European Studies (IES) „Industrial value chain: A bridge towards a carbon neutral Europe“ werden die Synergieeffekte der Funktionskette Materialeffizienz-Prozessinnovation-Recycling-Ökonomie offenbart: „For most basic materials, enhanced circularity will become more important over the next decades as a strategy to reduce emissions, reduce energy use, maintain security of supply (in some cases), and enhance production and growth while reducing costs.“ [WYN18].

Der Fokus des Graduiertenkollegs liegt dabei nicht auf der Weiterentwicklung der Aufbereitungstechnik für die Erzeugung der Rezyklate, da diese von Firmen des Industriebeirats zur Verfügung gestellt werden. Deren prozesstechnische Vorgeschichte wird dokumentiert und mitgeliefert und ist eines der zentralen Elemente für das Verständnis der Gefüge-Evolution und insbesondere die Basis für eine gezielte Funktionalisierung, um deren massenhafte Wiederverwendung zu ermöglichen. Am Beispiel von MgO-C-Erzeugnissen bedeutet dies u. a. den strategisch-bewussten Verzicht auf metallische Anti-Oxidantien (z. B. Al) bereits bei den „frischen Erzeugnissen“, um das Explosionsrisiko bei der Reaktion von Al₄C₃-Karbiden mit Feuchte bei der Wiederverwendung zu eliminieren [ZHA20].

Ein wesentlicher Aspekt sowohl bei der Ausbildung von jungen Nachwuchskräften als auch bei den Forschungsaktivitäten ist die Gesamtbetrachtung von Wechselwirkungen und Mechanismen in den neu entstehenden Material-/Prozessketten im Sinne eines geschlossenen Recyclingkreislaufs, welche auch die Erforschung und das Verständnis des Einflusses der Chemie der neuartigen Feuerfestwerkstoffe auf die Einschlusspopulation der durch die metallurgischen Prozesse generierten metallischen Proben impliziert. Die Chemie, Anzahl und Geometrie der Einschlüsse beeinträchtigen einerseits die mechanischen Endigenschaften (Festigkeit, Duktilität, Ermüdungsverhalten) der Metallkomponenten, andererseits kann eine zusätzliche Nachbearbeitung zur Entfernung kritischer Einschlüsse an der Metalloberfläche die gesamte CO₂-Bilanzierung belasten.

Kernidee I:

Feuerfest-Rezyklate für neuartige Feuerfestwerkstoffe unter der Nutzung von umweltfreundlichen Bindemitteln

Im Fokus der Kernidee I steht der Einsatz von Feuerfest-Rezyklaten für die Erforschung neuartiger, umweltfreundlicher Feuerfestwerkstoffe am Beispiel der MgO-C-Rezyklate als Pfannen- oder Konvertersteine in der Sekundärmetallurgie bzw. die Erforschung neuartiger Schlüsselbauteile wie Ausgussdüsen, Stopfen oder Tauchausgüsse für den Stahl-Strangguss am Beispiel der Al₂O₃-C-Rezyklate. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Nutzung von pech- und harzfreien umweltfreundlichen Bindemittelsystemen (bei Pechen ca. 85

% C-Anteil und bei Harzen ca. 60 % C-Anteil nach der Verkokung) vordergründig auf Protein-Basis bzw. Kohlenstoffhydrat-Basis, z. B. bei der Nutzung und Funktionalisierung von Gelatine (in [NOW14] wird verkockte Gelatine mit einem C-Anteil über 65 % für Batterieelektroden demonstriert) und/oder Tannin und Laktose-Basis (siehe u.a. SFB 920 [HIM18] mit einem C-Anteil nach der Verkokung von ca. 45 %). Dadurch soll einerseits die Umwelt weitgehend geschont, andererseits die Arbeitssicherheit im Labor, aber auch später in einer möglichen Implementierungsphase in der Industrie mit Hilfe von Demonstrator-Bauteilen deutlich erhöht werden.

Ein Feuerfestmaterial wird nach seinem Einsatz in der Stahlerzeugung gegenüber einem frischen Erzeugnis immer gewisse Veränderungen aufweisen, insbesondere hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung, des Anteils der Korngrenzen und der Porosität. Durch die stattgefundenen Wechselwirkungen mit korrosiven Medien können - chemisch betrachtet - gesättigte Zustände zu einer höheren Korrosionsbeständigkeit bei der Wiederverwendung beitragen, u. a. auch über eine zusätzliche Verdichtung des Gefüges. Die bereits bei hohen Temperaturen und in Kontakt mit aggressiven Medien eingesetzten Ausgangsrohstoffe können damit eine deutlich höhere chemische und funktionstechnische Kompatibilität in Wechselwirkung mit den eingesetzten Schlacken und Metallschmelzen aufweisen. Die Anzahl der Lebenszyklen des Feuerfestmaterials wird erhöht und dadurch ein höherer Reinheitsgrad beim metallischen Endprodukt erwartet. Andererseits können auch die bereits aufgenommenen Verunreinigungen die Reaktionsbereitschaft steigern und zur Bildung/Anstieg von schädlichen Einschlüssen/Verunreinigungen im metallischen Endprodukt führen. Weiterhin kann die Verdichtung der Ausgangsrohstoffe die thermophysikalischen Eigenschaften wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit verändern, was zur Veränderung des Wärmehaushalts der metallurgischen Aggregate führen kann. Die Veränderung der vorherrschenden Temperaturen bedeutet eine Verschiebung der oxidischen und sulfidischen Verteilungen, was sich im gesamten Reinheitsgrad widerspiegeln kann. Der Erfolg der Wiederverwendung für feuerfeste Auskleidungen hängt davon ab, ob mit einem vollständigen oder teilweisen Ersatz neuer Rohstoffe durch Rezyklate ebenfalls die erforderlichen Werkstoffeigenschaften, wie eine hohe Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit, eine ausreichende Kriechbeständigkeit oder ausreichende Anti-Clogging-Eigenschaften am Beispiel von Ausgüssen/Tauchausgüssen bei mindestens gleichbleibender Stahlqualität gewährleistet werden können.

Außerdem steht die Erforschung der Nutzung von weiteren, speziellen Rezyklaten, z. B. auf der Basis von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen aus der Automobil- oder Luft- und Raumfahrtindustrie im Fokus des Graduiertenkollegs [BAC20]. Recycelte Kohlenstofffasern oder Kohlenstofffaserstrukturen können einerseits als Ersatz von jungfräulichen Graphitflocken eingesetzt werden, andererseits können sie durch eine Oberflächenfunktionalisierung zu einer Verbesserung der thermomechanischen Eigenschaften beitragen.

Kernidee II:

Feuerfest-Rezyklate für neuartige, metallokeramische Verbundwerkstoffe für CO₂-ärmere metallurgische Prozesse am Beispiel Aluminiumschmelzflusselektrolyse

Laut der Prognose der Gesellschaft European-Alumini-

um (2019) wird der Aluminium-Bedarf bis 2050 um 50 % steigen. Die Aluminiumschmelzflusselektrolyse ist einer der energieintensivsten metallurgischen Prozesse mit hohem Verbrauch an Kohlenstoffanoden. Die Erforschung von inerten, kohlenstofffreien Anoden ist daher bei steigender Aluminiumproduktion (im Jahr 2019 war sie für 0,6 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalent verantwortlich) von entscheidender Bedeutung [HAR20]. Darüber hinaus haben inerte, kohlenstofffreie Elektroden eine signifikantere Auswirkung im ökologischen Sinne nicht nur wegen der CO₂-Entschärfung, aber auch insbesondere wegen der kompletten Vermeidung von Perfluorkohlenwasserstoffen (CF₄, C₂F₆), welche einen deutlich größeren Schaden in der Atmosphäre im Vergleich zu CO₂ verursachen [SOL18]. Perfluorkohlenwasserstoffe werden an Kohlenstoffanoden generiert, wenn der Oxidgehalt des Elektrolyten zu gering ist. Inerte Elektroden brauchen einen Elektrolyten mit deutlich höherem Oxidgehalt, damit sich die Elektroden nicht selbst verbrauchen.

Inerte Anoden wurden in den letzten Jahrzehnten intensiv untersucht. Kupfer/Nickel/Eisen-Legierungen bzw. ihre Oxide sind potenzielle Werkstoffkandidaten, da einerseits eine hohe Leitfähigkeit und andererseits eine ausreichende Passivierung über die in-situ Bildung von Spinellen auf der Basis von Nickerferriten für eine hohe Lebensdauer im aggressiven Elektrolytbad gewährleistet wird [YIN20]. Dennoch werden diese Werkstoffe bei niedrigeren Temperaturen und angepasstem Elektrolytssystem eingesetzt [HEL18].

Im Rahmen des Graduiertenkollegs soll ein neuer Ansatz auf der Basis von grobkörnigen MgO-Rezyklaten und Cr-Ni-Stahl erforscht werden. Als Fertigungsroute steht die Pulvermetallurgie im Vordergrund. Über die Grobkörnigkeit wird eine geringe Schwindung während der Sinterung erwartet [ZIE18], und die Passivierung in Aluminium-Schmelzen wurde bereits mit einer Voroxidierung am Beispiel von feinkörnigen MgO/Stahl-Proben durch die gezielte Bildung von Spinellen erreicht [MAL20], [PAT1], [PAT2]. Der Beitrag von Ni/NiO/TiO₂-Zusätzen steht u. a. im Fokus der Erforschung zur Erreichung einer ausreichenden elektrischen Leitfähigkeit bei den grobkörnigen, metallokeramischen Verbundwerkstoffen [PAT3]. Eine weitere interessante Variante zur Einstellung der elektrischen Leitfähigkeit ist die Nutzung von MgO-C-Rezyklaten und die Generierung von MAX-Phasen u.a. auf der Basis Ti₃SiC₂ oder Ti₂AlC während des Sinterbrands.

Die Kollegiatinnen und Kollegiaten erforschen **die Symbiose unterschiedlicher Materialklassen auf Rezyklat-Basis** am Beispiel kohlenstoffgebundener Erzeugnisse (MgO-C / Al₂O₃-C) und metallokeramischer Verbundwerkstoffe (MgO-Stahl) und vertiefen sich in grundlegenden werkstoff- und verfahrenstechnischen Konzepten in der Mikrostruktur (Werkstoffdesign) und Makrostrukturentwicklung (Verbundwerkstoff bzw. Werkstoffverbund) für gezielte Anwendungsumgebungen in der Stahl- und Aluminiummetallurgie, unterstützt durch die Modellierung in der Thermodynamik bzw. in der Thermomechanik. Dies beinhaltet u. a. drei Erforschungs- und Ausbildungsebenen, a) die Herstellung von funktionalisierten Werkstoffen auf Rezyklat-Basis, b) die Er-



Abb. 1: Erforschungs- und Ausbildungsebenen

fassung von deren Eigenschaften und deren Wechselwirkung mit den metallischen Schmelzen in labortechnischen Anlagen und c) die gezielte Auswahl von maximal drei Grundlagenkonzepten und deren Überführung zu Demonstrator-Bauteilen, um mit Unterstützung des Industriebeirates Aspekte einer anwendungsorientierten Grundlagenforschung am Beispiel einer Post Mortem Analyse bzw. eines Life Cycle Assessments zu reflektieren, Abb. 1. Dies beinhaltet auch einerseits das Studium der Technologie vom Pulver bis zum Bauteil, andererseits das Verständnis eines breiten Eigenschaftsspektrums in unterschiedlichen Skalengrößenordnungen, als Basis für ein zukünftiges Innovationswerkzeug zur Einstellung von maßgeschneiderten Eigenschaften in Hochtemperaturanwendungen. Hierfür können zu einem späteren Zeitpunkt gezielt DFG-Transferprojekte als anwendungsorientierte Grundlagenforschung in enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Industriebeirates beantragt werden.

Die Innovationskraft des Graduiertenkollegs beruht auf den beteiligten, forschungsstarken, bereits vernetzten Professuren aus drei Fakultäten, die für die fachübergreifende Forschung des Graduiertenkollegs bewusst zusammengeführt worden sind und seit dem 01.03.2021 gebündelt im Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffumwandlung **ZeHS** kooperieren.

Die vernetzte Expertise der bewusst ausgewählten, an den bereits abgeschlossenen (SPP 1418, SFB 799) und laufenden DFG-Großforschungsvorhaben (SFB 920, FOR 3010) beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der TU Bergakademie Freiberg garantiert eine zielgerichtete und qualitativ hochwertige Promotionsausbildung von Kollegiatinnen und Kollegiaten mit bereits erfolgreich etablierten Methoden mittels spezieller, an der TU BAF vorhandener Geräte. Diese sind für die Erforschung der neuartigen Werkstoffe a) auf Kohlenstoffbasis (umweltfreundliche Bindemittel mit Rezyklaten) bzw. b) für die metallokeramischen Verbundwerkstoffe als kohlenstoffärmere bzw. kohlenstofffreie Anodenmaterialien (MgO-Rezyklat mit Stahl und weiteren Zusätzen) eine vielversprechende und fokussierte Ausgangsbasis, sowohl für die Rekrutierung von exzellenten Doktorandinnen und Doktoranden als auch für die tiefgründige wissenschaftliche Auseinandersetzung mit einer komplexen Materie der Gegenwart und der Zukunft, im Sinne einer Ressourcen-Universität und einer Ressourcen-Gesellschaft.

Erste fünfjährige Förderperiode, 12 Promotionsprojekte, 24 Promotionsstellen in zwei Kohorten

Promotionsprojekt P1 (Prof. Aneziris, PD Gehre, Dr. Hubálková)

Umweltfreundliche Bindemittel für Al_2O_3 -C- und MgO-C-Erzeugnisse auf Rezyklat-Basis mit speziellen thermomechanischen, chemischen und Anti-Clogging-Eigenschaften.

Promotionsprojekt P2 (Prof. Biermann, PD Weidner)

Mechanische Hochtemperatur-Eigenschaften kohlenstoffgebundener Al_2O_3 -C und MgO-C aus Feuerfest-Rezyklaten.

Promotionsprojekt P3 (Prof. Fieback, Dr. Wulf)

Wärmeleitfähigkeit von funktionalisierten Werkstoffen auf Rezyklat-Basis.

Promotionsprojekt P4 (Prof. Volkova)

Wechselwirkungen von Elektrostählen mit MgO-C Erzeugnissen auf der Basis von Rezyklaten und umweltfreundlichen Bindemitteln.

Promotionsprojekt P5 (Prof. Volkova)

Erforschung der Auswirkung von MgO-C Erzeugnissen auf der Basis von Rezyklaten und umweltfreundlichen Bindemitteln auf den sulfidischen Reinheitsgrad der Stähle und die Spinell-Bildung.

Promotionsprojekt P6 (Prof. Kiefer)

Modellierung und Bewertung des thermomechanischen Verhaltens von MgO-C- und Al_2O_3 -C-Werkstoffen auf Rezyklat-Basis und der Nutzung umweltfreundlicher Bindemittel.

Promotionsprojekt P7 (Prof. Aneziris, Dr. Hubálková, PD Gehre)

Metallokeramische Verbundwerkstoffe aus MgO- oder MgO-C-Rezyklaten in Kombination mit Stahl und weiteren Zusätzen als inerte bzw. kohlenstoffärmere Anoden in der Aluminiumschmelzflusselektrolyse.

Promotionsprojekt P8 (Prof. Rafaja)

Mikrostrukturdesign von Verbundwerkstoffen durch FAST/SPS.

Promotionsprojekt P9 (Prof. Kortus)

Ramanspektroskopische und elektrische Charakterisierung von funktionalisierten Werkstoffen auf Rezyklat-Basis.

Promotionsprojekt P10 (Prof. Charitos)

Untersuchung von neuen kohlenstofffreien Materialien als inerte Anoden bei der Aluminiumschmelzflusselektrolyse.

Promotionsprojekt P11 (Prof. Charitos)

Untersuchung des Kohlenstoffoxidationswiderstandes und des Verhaltens von kohlenstoffarmen Anoden bei der Aluminiumschmelzflusselektrolyse.

Promotionsprojekt P12 (Prof. Biermann, PD Weidner)

Mechanische Hochtemperatur-Eigenschaften von feuerfesten Sinter-Verbundwerkstoffen auf der Basis von grobkörnigem MgO bzw. MgO-C und austenitischem Stahl.

Literaturverzeichnis

- [ANE08] Aneziris, C.G.: Bridging of Material Disciplines for Refractory Innovation, 4. Mitgliederversammlung MORE-Freiberg e.V., Freiberg 14.10.2008
- [BAC20] Bach, M., Gehre, P., Biermann, H., Aneziris, C.G.: Recycling of carbon fiber composites in carbon-bonded alumina refractories, *Ceramics International*, 46 (2020), 12574-12583
- [CER12] Cerame-Unie: Unser Weg ins Jahr 2050. Fahrplan der Keramikindustrie, Cerame-Unie A.I.S.B.L., The European Ceramic Industry Association, 2012
- [FRO11] Frondel, M., Halstrick-Schwenk, M., Janßen-Timmen, R., Ritter, N.: Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft - Monitoringbericht 2010: Verifikation der Vereinbarung zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der deutschen Wirtschaft zur Klimavorsorge. Bericht des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung, September 2011
- [HAR20] Haraldsson, J.: Improved Energy Efficiency in the Aluminium Industry and its Supply Chains, *Linköping Studies in Science and Technology*. Dissertation No. 2063, 2020
- [HEL18] Helle, S., Davis, B., Guay, D., Roue, L.: Ball-milled Cu-Ni-Fe-O materials as inert anodes for aluminum electrolysis in low-temperature KF-AlF₃ electrolyte. *Light Metals* (2018), 1377-1380
- [HIM18] Hincinschi, C., Biermann, C., Storti, E., Dietrich, B., Wolf, G., Kortus, J., Aneziris, C.G.: Innovative carbon-bonded filters based on a new environmental-friendly binder system for steel melt filtration, *Journal of the European Ceramic Society*, 38 (2018) 16, 5580-5589
- [HOR19] Horckmans, L., Nielsen, P., Dierickx, P., Ducastel, A.: Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking, *Resources, Conservation and Recycling*, 140 (2019), 297-304
- [MAL20] Malczyk, P., Zienert, T., Kerber, F., Weigelt, Ch., Sauke, S.O., Semrau, H., Aneziris, C.G.: Corrosion resistant steel-MgO composites as refractory materials for molten aluminium alloy, *Materials*, 13 (2020), art. no. 4737
- [NOW14] Nowak, A.P.; Trzciniński, K., Lisowska-Ole, A., Electrochemical cha-

racterization of gelatine derived ceramics, *Advanced in Materials Science*, 14 (2014), 75-81

[PAT1] DE 10 2020 005 130.8, Aneziris, C.G., Volkova, O., Charitos, A.: "Kohlenstoffärmere und kohlenstofffreie Elektroden-Wabenkörper-Werkstoffverbunde für den Einsatz in der Metallurgie", Deutsche Patentanmeldung am 21.08.2020

[PAT2] DE 10 2020 005 129.4, Aneziris, C.G., Volkova, O.: "Kohlenstoffärmere und kohlenstofffreie Elektroden für den Einsatz in der Stahlmetallurgie", Deutsche Patentanmeldung am 21.08.2020

[PAT3] WO 2018/087224, Aneziris, C.G., Gehre, P., Dudczig, S.: "Verbundwerkstoff aus Metall und Keramik und Verfahren zu dessen Herstellung", Internationale Patentanmeldung am 09.11.2017

[SOL18] Solheim, A.: Inert Anodes - The Blind Alley to Environmental Friendliness?, *Light Metals* 2018, 1253-1260

[SZE07] Szednyj, I., Brandhuber, D.: Stand der Technik zur Kalk-, Gips und Magnesiaherstellung Beschreibung von Anlagen in Österreich, *Umweltbundesamt* 2007

[WYN18] Wyns, T., Khandekar, G., Robson, I.: Industrial Value Chain: A Bridge Towards a Carbon Neutral Europe, *Institute for European Studies*, September 2018

[YIN20] Ying, L., Dengpeng, Ch., Wei, W., Dongsheng, L., Junwei, W., Yudong, L., Zhirong, S.: Influences of heat treatment on the oxidation and corrosion behavior of Cu/Ni/Fe inert anodes for aluminium electrolysis, *Journal of Alloys and Compounds*, 832 (2020), art. no. 154848

[ZIE18] Zienert, T., Farhani, M., Dudczig, S., Aneziris, C.G.: Coarse-grained refractory composites based on Nb-Al₂O₃ and Ta-Al₂O₃ castables, *Ceramics International*, 44 (2018), 16809-16818

[ZHA20] Zhang, R.: Recycling of refractory materials in ferrous and non-ferrous metallurgy as well as in glass, ceramic and cement industries: prospects and limitations, Master Thesis, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Keramik, Feuerfest und Verbundwerkstoffe, 2020