



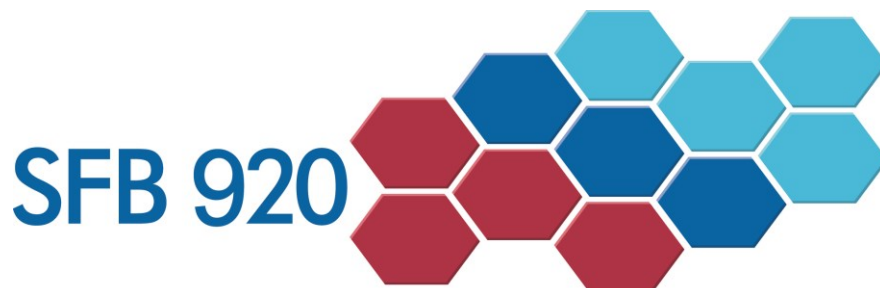
**TUBAF**  
Die Ressourcenuniversität.  
Seit 1765.

**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

Sonderforschungsbereich 920

**Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration –  
ein Beitrag zu Zero Defect Materials**

Technische Universität Bergakademie Freiberg



**Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration –  
ein Beitrag zu Zero Defect Materials**

Abschlussbericht

2. Halbjahr 2011 - 1. Halbjahr 2023



## ABSCHLUSSBERICHT

DFG-Geschäftszeichen: SFB 920

Projektnummer: 169148856

Titel des Sonderforschungsbereichs:

Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration –  
ein Beitrag zu Zero Defect Materials

Antragstellende Hochschule: Technische Universität Bergakademie Freiberg

Name des Sprechers: Prof. Dr.-Ing. habil. Christos G. Aneziris

Dienstanschrift des Sprechers: TU Bergakademie Freiberg  
Institut für Keramik, Feuerfest und Verbundwerkstoffe  
Agricolastraße 17  
09599 Freiberg  
Telefon: 03731 39 2505  
Aneziris@ikfww.tu-freiberg.de

Berichtszeitraum: 2. Halbjahr 2011 – 1. Halbjahr 2023



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung / Summary</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Die 50 wichtigsten veröffentlichten Ergebnisse</b> .....	<b>2</b>
2.1 Publikationen mit wissenschaftlichen Qualitätssicherung .....	2
2.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse .....	4
<b>3 Übersicht der Teilprojekte</b> .....	<b>5</b>
<b>4 Wissenschaftliche Entwicklung des Sonderforschungsbereichs</b> .....	<b>7</b>
4.1 Einleitung, Vision und Thesen .....	7
4.2 Ausgewählte Ergebnisse .....	8
4.2.1 „Stahlschmelze-Filtration“ .....	8
4.2.2 „Aluminiumschmelze-Filtration“ .....	16
4.2.3 „Magnesiumschmelzefiltration“ .....	17
4.2.4 Beiträge der Simulation .....	18
4.2.5 Harz- und pechfreies Bindemittel für umweltfreundliche, reaktive Filter .....	20
4.2.6 Generatives Hybrid-Flammspritzverfahren .....	20
4.2.7 Transferprojekte .....	21
4.2.8 Zusammenfassende Bemerkungen .....	22
4.2.9 Management der Forschungsdaten .....	24
4.2.10 Literatur .....	24
4.3 Wissenschaftliche Veranstaltungen und Wissenschaftskommunikation .....	26
4.4 Nationale und internationale Kooperationen .....	28
<b>5 Schwerpunktbildung und internationale Sichtbarkeit</b> .....	<b>31</b>



## 1 Zusammenfassung / Summary

### Zusammenfassung

Die Forderung nach erhöhter Metallqualität und geringeren Ausschussraten seitens der Anwender und Weiterverarbeiter machen eine gleichmäßigere Einstellung der chemischen Zusammensetzung und eine verstärkte Kontrolle des Reinheitsgrades erforderlich. Die Vision dieses SFB ist die Einstellung exzellenter, an die Bauteilbeanspruchung angepasster funktionaler und adaptiver mechanischer Eigenschaften für einen Innovationsschub in Sicherheits- und Leichtbaukonstruktionen. Dieses Ziel soll mittels einer erheblichen Reduzierung von anorganischen nichtmetallischen Einschlüssen in der Metallmatrix beim Einsatz intelligenter Filterwerkstoffe bzw. neuartiger, kombinierter Reinigungsfiltersysteme erreicht werden. Die Metallschmelze kommt erst in Kontakt mit reaktiven Filtern, die in situ Gasblasen in der Metallschmelze generieren bzw. Gasblasen an den Einschlüssen aktivieren und zu einer Art Flotation der Einschlüsse beitragen. Durch die hohe Reaktivität und aufgrund der Gasblasen wird die Agglomeration der feinen Einschlüsse gefördert, so dass die größeren Cluster von Einschlüssen entweder durch Auftriebskräfte in Richtung Schlackenoberfläche der Schmelze sich bewegen oder an aktiven, nicht gasbildenden Filtern mit funktionalisierten Filteroberflächen – mit ähnlicher Chemie wie die der Einschlüsse – durch Filtrationsprozesse sich entfernen lassen. Die Modellierungsansätze konzentrieren sich einerseits in den Beiträgen der Gasblasen zur Flotation und die in situ Bildung von Reaktionsschichten an denen Einschlüsse gezielt haften, andererseits werden Geometrien berechnet, die u.a. zu einem 3D-Druck von funktionalisierten Filterstrukturen in Kombination mit einer roboterunterstützten Flammsspritzendbeschichtung beitragen. Die intensive interne und internationale Vernetzung führte zu einem innovativen SFB-Kreislauf von Erforschung, Werkstoffdesign und Verständnis der Grundwirkungsmechanismen sowie zu Demonstratoren und Übertragung der Ergebnisse auf weitere Metallschmelzen und zur Generierung von 8 DFG-Transfer-Projekten, mit mehr als 39 Promotionen, 380 wissenschaftliche Publikationen und 12 erteilte Patente.

Die Erforschung neuartiger Filterwerkstoffe sowie ein an die Filtrationstechnik angelehntes modellunterstütztes Filterdesign der Mikro- und Makrostruktur ermöglichen die Herstellung von dünn- als auch dickwandigen, höchstbeanspruchbaren Komponenten auf Basis Stahl, Eisen, Aluminium und Magnesium mit bahnbrechenden Eigenschaften – Festigkeit, Zähigkeit, Ermüdungsresistenz – für die Sicherheit der Insassen von Kraft-, Schienen- und Luftfahrzeugen. Darüber hinaus werden zukunftssträchtige Anwendungsfelder in der Elektronikindustrie am Beispiel Filtration von Kupfer und Silizium, in der Verpackungsindustrie am Beispiel Aluminiumfolien und in der Filtrationstechnik und Konditionierung von Behandlungsschlacken erschlossen. Das Ziel einer höheren Materialeffizienz sowie der Reduktion des Energieaufwandes und der CO<sub>2</sub>-Emissionen rückt damit in greifbare Nähe.

### Summary

There exists an increasing pressure on the metal making and metal using industry to remove solid and liquid inclusions such as deoxidation products, sulfides, nitrides carbides etc. and thereby improve metal cleanliness. It is well known that size, type and distribution of non-metallic inclusions in metal exert considerable effects on the mechanical properties of the cast products. The vision of this collaborative research centre (CRC) is to create a new generation of metal qualities via melt filtration with superior mechanical properties for use in light weight structures and high demand construction materials. The aim of the CRC is an enormous reduction of non-metallic inclusions in the metal matrix by the use of intelligent filter materials as well as a new generation of combined refining filter systems. The metal melt comes first in contact with a reactive filter which generates gas bubbles in the melt as well as activates gas bubbles on the surface of the inclusions. As a result, a kind of flotation of the inclusions towards the slag on the surface of the melt takes place. Further the high reactivity as well as the gas bubbles contribute to the agglomeration of the fine inclusions to big clusters which flow due to buoyancy forces to the surface of the melt or are filtrated on the surface of active filters, which do not form gas bubbles but provide on their functionalized surfaces the same chemistry as the inclusions for a sufficient adhesion and as a result for a sufficient filtration of the inclusions. The modelling is focusing mainly on the several contributions of the gas bubbles and on the in situ formed reactive layers on the surface of the reactive filters as well as they generate codes with respect to the thermomechanical and functional properties of the filters for a 3D-printing of filter structures which are then end shaped with the aid of a robot-assisted flame spraying technique. The

intensive internal and international networking led to an innovative CRC-circuit of research, material design and exploration of basic effects and mechanisms as well as to the development of demonstrators and the generation of 8 transfer projects with industrials, more than 39 PhDs, 380 scientific publications and 12 granted patents.

The flow dynamic conditions in the filter during casting are of great importance for the proper design of the filter macrostructure. A material as well as a flow computer aided micro- and macrostructure filter design based on investigated filtration mechanisms will lead to high purification efficiencies with superior properties – strength, fracture toughness, fatigue – of the cast steel, iron, aluminum and magnesium components. In addition, other applications such as the electronic industry via filtration of copper or the thin aluminum foil production will profit from the scientific results. The target for a higher material efficiency and reduction of energy and CO<sub>2</sub>-emissions is coming closer in the near future.

## 2 Die 50 wichtigsten veröffentlichten Ergebnisse

### 2.1 Publikationen mit wissenschaftlichen Qualitätssicherung

- 1) Emmel, M., Aneziris, C. G.: Development of novel carbon bonded filter compositions for advanced steel melt filtration, *Ceramics International*, 38 [6] (2012), pp. 5165-5172. DOI 10.1016/j.ceramint.2012.03.022
- 2) Emmel, M., Sponza, F., Dudczig, S., Aneziris, C.G., Colombo, P.: In situ Spinel Formation in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-C Filter Materials for Steel Melt Filtration, *Ceramics International*, 40 [8B] (2014), pp. 13507-13513. DOI 10.1016/j.ceramint.2014.05.033
- 3) Voigt, C., Zienert, T., Schubert, P., Aneziris, C. G., Hubáľková, J.: Reticulated porous foam ceramics with different surface chemistries, *Journal of the American Ceramic Society*, 97 [7] (2014), pp. 2046–2053. DOI 10.1111/jace.12977
- 4) Dopita, M., Emmel, M., Salomon, A., Rudolph, M., Matěj, Z., Aneziris, C.G., Rafaja, D.: Temperature evolution of microstructure of turbostratic high melting coal-tar synthetic pitch studied using wide-angle the X-ray scattering method, *Carbon*, 81 (2015), pp. 795-802. DOI 10.1016/j.carbon.2014.09.058
- 5) Heuzeroth, F., Fritzsche, J., Peuker, U.A.: Wetting and its influence on the filtration ability of ceramic foam filters. *Particuology*, 18 (2014), pp. 50–57. DOI 10.1016/j.partic.2014.06.001
- 6) Fritzsche, J., Peuker, U.A.: Particle adhesion on highly rough hydrophobic surfaces: The distribution of interaction mechanisms. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 459 (2014), pp. 166-171. DOI 10.1016/j.colsurfa.2014.07.002
- 7) Dudczig, S., Aneziris, C. G., Emmel, M., Hubáľková, J., Schmidt, G., Berek, H.: Characterization of carbon bonded alumina filters with active or reactive coatings in a steel casting simulator, *Ceramics International*, 40 [10B] (2014), pp. 16727-16742. DOI 10.1016/j.ceramint.2014.08.038
- 8) Krewerth, D., Weidner, A., Biermann, H.: Application of In Situ Thermography for Evaluating the High-Cycle and Very High-Cycle Fatigue Behaviour of Cast Aluminium Alloy AlSi7Mg (T6), *Ultrasonics Journal*, 53 [8] (2013), pp. 1441-1449. DOI 10.1016/j.ultras.2013.03.001
- 9) Lehmann, H., Werzner, E., Mendes, M., Trimis, D., Jung, B., Ray, S.: In-situ data compression algorithm for detailed numerical simulation of liquid metal filtration through foam-like structures, *Advanced Engineering Materials*, 15 [12] (2013), pp. 1260-1269. DOI 10.1002/adem.201300129
- 10) Storti, E., Dudczig, S., Schmidt, G., Colombo, P., Aneziris, C.G.: Short-time performance of MWCNTs-coated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C filters in a steel melt, *Journal of the European Ceramic Society*, 36 [3] (2016), pp. 857-866. DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.036
- 11) Gehre, P., Schmidt, A., Dudczig, S., Hubáľková, J., Aneziris, C.G., Child, N., Delaney, I., Rancoule, G., DeBastiani, D.: Interaction of slip- and flame-spray coated carbon-bonded alumina filters with steel melts, *Journal of the American Ceramic Society*, 101 [7] (2018), pp. 3222-3233. DOI 10.1111/jace.15431
- 12) Jankovský, O., Storti, E., Schmidt, G., Dudczig, S., Sofer, Z., Aneziris, C.G.: Unique wettability phenomenon of carbon-bonded alumina with advanced nanocoating, *Applied Materials Today*, 13 (2018), pp. 24-31. DOI 10.1016/j.apmt.2018.08.002
- 13) Herdering, A., Abendroth, M., Gehre, P., Hubáľková, J., Aneziris, C.G.: Additive manufactured polyamide foams with periodic grid as templates for the production of functional coated carbon-bonded alumina foam filters, *Ceramics International*, 45 [1] (2019), pp. 153-159. DOI 10.1016/j.ceramint.2018.09.146
- 14) Voigt, C., Jäckel, E., Taino, F., Zienert, T., Salomon, A., Wolf, G., Aneziris, C.G., Le Brun, P.: Filtration Efficiency of Functionalized Ceramic Foam Filters for Aluminum Melt Filtration, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48B [1] (2017), pp. 497-505. DOI 10.1007/s11663-016-0869-5
- 15) Voigt, C., Ditscherlein, L., Werzner, E., Zienert, T., Nowak, R., Peuker, U., Sobczak, N., Aneziris, C.G.: Wettability of AlSi7Mg alloy on alumina, spinel, mullite and rutile and its influence on the aluminum melt



- filtration efficiency, *Journal of Materials & Design*, 150 (2018), pp. 75-85. DOI 10.1016/j.matdes.2018.04.026
- 16) Voigt, C., Hubálková, J., Ditscherlein, L., Ditscherlein, R., Peuker, U., Giesche, H., Aneziris, C.G.: Characterization of reticulated ceramic foams with mercury intrusion porosimetry and mercury probe atomic force microscopy, *Ceramics International*, 44 [18] (2018), pp. 22963-22975. DOI 10.1016/j.ceramint.2018.09.094
  - 17) Himcinschi, 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), pp. 5580-5589. DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.08.029
  - 18) Salomon, A., Zienert, T., Voigt, C., Dopita, M., Rafaja, D., Fabrichnaya, O., Aneziris, C.G.: Formation of different alumina phases and magnesium aluminate spinel during contact of molten AlSi7Mg alloy with mullite and amorphous silica, *Journal of Corrosion Science*, 114 (2017), pp. 79-87, DOI 10.1016/j.corsci.2016.10.023
  - 19) Becker, H., Thum, A., Distl, B., Kriegel, M.J., Leineweber, A.: Effect of melt conditioning on removal of Fe from secondary Al-Si alloys containing Mg, Mn and Cr, *Metallurgical and Materials Transaction A*, 49A (2018), pp. 6375-6389. DOI 10.1007/s11661-018-4930-7
  - 20) Ditscherlein, L., Gulden, S.J., Müller, S., Baumann, R.-P., Peuker, U.A., Nirschl, H.: Measuring interactions between yeast cells and a micro-sized air bubble via atomic force microscopy, *Journal of Colloid and Interface Science*, 532 (2018), pp. 689-699. DOI 10.1016/j.jcis.2018.08.031
  - 21) Knüpfer, P., Ditscherlein, L., Peuker, U.A.: Nanobubble enhanced agglomeration of hydrophobic powders, *Colloids and Surfaces A*, 530 (2017), pp. 117-123. DOI 10.1016/j.colsurfa.2017.07.056
  - 22) Asad, A., Haustein, M., Chattopadhyay, K., Aneziris, C.G., Schwarze, R.: Numerical Assessment of a Filtration Experiment Influenced by Arising Micro-Scale Carbon Monoxide Bubbles in Steel Melt, *JOM*, 70 [12] (2018), pp. 2927-2933. DOI 10.1007/s11837-018-3117-4
  - 23) Solarek, J., Himcinschi, C., Klemm, Y., Aneziris, C.G., Biermann, H.: Ductile behavior of fine-grained, carbon-bonded materials at elevated temperatures, *Carbon*, 122 (2017), pp. 141-149. DOI 10.1016/j.carbon.2017.06.041
  - 24) Krewerth, D., Lippmann, T., Weidner, A., Biermann, H.: Influence of non-metallic inclusions on fatigue life in the very high cycle fatigue regime, *International Journal of Fatigue*, 84 (2016), pp. 40-52. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2015.11.001
  - 25) Seleznev, M., Merson, E., Weidner, A., Biermann, H.: Evaluation of very high cycle fatigue zones in 42CrMo4 steel with plate-like alumina inclusions, *International Journal of Fatigue*, 126 (2019), pp. 258-269. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2019.05.011
  - 26) Henschel, S., Gleinig, J., Lippmann, T., Dudczig, S., Aneziris C.G., Biermann, H., Krüger, L., Weidner, A.: Effect of crucible material for ingot casting on detrimental non-metallic inclusions and the resulting mechanical properties of 18CrNiMo7-6 steel, *Advanced Engineering Materials*, 19 [9] (2017), pp. 1700199 (1-12). DOI 10.1002/adem.201700199
  - 27) Dietrich, B., Becker, H., Smolka, M., Keßler, A., Leineweber, A., Wolf, G.: Intermetallic sludge formation in Fe containing secondary Al-Si alloys influenced by Cr and Mn as preparative tool for metal melt filtration, *Advanced Engineering Materials*, 19 [9] (2017), pp. 1700161 (1-7). DOI 10.1002/adem.201700161
  - 28) Wetzig, T., Baaske, A., Karrasch, S., Brachhold, N., Rudolph, M., Aneziris, C.G.: Application of exchangeable carbon-bonded alumina foam filters in an industrial tundish for the continuous casting of steel, *Ceramic International*, 44 (2018), pp. 23024-23034. DOI 10.1016/j.ceramint.2018.09.105
  - 29) Luchini, B., Hubálková, J., Wetzig, T., Grabenhorst, J., Fruhstorfer, J., Pandolfelli, V.C., Aneziris, C.G.: Carbon-bonded alumina foam filters produced by centrifugation: A route towards improved homogeneity, *Ceramics International*, 44 [12] (2018), pp. 13832-13840. DOI 10.1016/j.ceramint.2018.04.228
  - 30) Schmidt, A., Salomon, A., Dudczig, S., Berek, H., Rafaja, D., Aneziris, C.G.: Functionalized Carbon-Bonded Filters with an Open Porous Alumina Coating: Impact of Time on Interactions and Steel Cleanliness, *Advanced Engineering Materials*, 19 [9] (2017), pp. 1700170 (1-12). DOI 10.1002/adem.201700170
  - 31) Bock-Seefeld, B., Wetzig, T., Hubálková, J., Schmidt, G., Abendroth, M., Aneziris, C.G.: Fabrication of carbon-bonded alumina filters by additive manufactured, water-soluble polyvinyl alcohol filter templates and alginate-based slips, *Advanced Engineering Materials*, 24 [2] (2022), pp. 2100655 (1-10). DOI 10.1002/adem.202100655
  - 32) Becker, H., Fankhänel, B., Voigt, C., Charitos, A., Stelter, M., Aneziris, C.G., Leineweber, A.: Interaction of Fe-containing, secondary Al-Si alloy with oxide and carbon-containing ceramics for Fe removal, *Advanced Engineering Materials*, 24 [2] (2022), pp. 2100595 (1-12). DOI 10.1002/adem.202100595
  - 33) Martin, S., Sulik, D., Fang, X.F., Becker, H., Leineweber, A.: Steel-Aluminum Hybrid Die Casting: Microstructures related to the applied Al-Si bond coating, *Intermetallics*, 151 (2022), pp. 107712, DOI 10.1016/j.intermet.2022.107712

- 34) Hoppach, D., Werzner, E., Demuth, C., Löwer, E., Lehmann, H., Ditscherlein, L., Ditscherlein, R., Peuker, U.A., Ray, S.: Experimental Investigations of the Depth Filtration Inside Open-cell Foam Filters Supported by High-Resolution CT Scanning and Pore-Scale Numerical Simulations, *Advanced Engineering Materials*, 22 [2] (2020), pp. 1900761 (1-13). DOI 10.1002/adem.201900761
- 35) Ditscherlein, L., Knüpfer, P., Peuker, U.A.: The influence of nanobubbles on the interaction forces between alumina particles and ceramic foam filters, *Powder Technology*, 357 (2019), pp. 408-416. DOI 10.1016/j.powtec.2019.08.077
- 36) Ditscherlein, L., Zienert, T., Dudczig, S., Aneziris, C.G., Peuker, U.A.: Atomic Force Microscopy investigation of the in situ-formed oxide layer at the interface of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C/steel melt in terms of adhesion force and roughness in a model system, *Advanced Engineering Materials*, 24 [2] (2022), pp. 2100634 (1-12). DOI 10.1002/adem.202100634
- 37) Heisig, L.-M., Markuske, K., Werzner, E., Wulf, R., Fieback, T.M.: Experimental und simplified predictive determination of extinction coefficients of ceramic open-cell foams used for metal melt filtration, *Advanced Engineering Materials*, 24 [2] (2022), pp. 2100723 (1-13). DOI 10.1002/adem.202100723
- 38) Roy, S., Prakash, A., Sandfeld, S.: Sintering of alumina nanoparticles: comparison of interatomic potentials, molecular dynamics simulations, and data analysis, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 30 (2022), pp. 065009 (1-26). DOI 10.1088/1361-651X/ac8172
- 39) Settgast, C., Hütter, G., Kuna, M., Abendroth, M.: A hybrid approach to simulate the homogenized irreversible elastic-plastic deformations and damage of foams by neural networks, *International Journal of Plasticity*, 126 (2020), pp. 102624 (1-16). DOI 10.1016/j.ijplas.2019.11.003
- 40) Asad, A., Schwarze, R., Aneziris, C.G.: Numerical Investigation of the Filtration Influenced by Micro-Scale CO-Bubbles in Steel Melt, *Advanced Engineering Materials*, 22 [2] (2020), pp. 1900591 (1-7). DOI 10.1002/adem.201900591
- 41) Wei, X., Storti, E., Dudczig, S., Yehorov, A., Fabrichnaya, O., Aneziris, C.G., Volkova, O.: The interaction of carbon-bonded ceramics with Armco iron, *Journal of the European Ceramic Society*, 42 [11] (2022), pp. 4676-4685. DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.04.058
- 42) Zielke, H., Wetzig, T., Himcinschi, C., Abendroth, M., Kuna, M., Aneziris, C.G.: Influence of carbon content and coking temperature on the biaxial flexural strength of carbon-bonded alumina at elevated temperatures, *Carbon*, 159 (2020), pp. 324-332. DOI 10.1016/j.carbon.2019.12.042
- 43) Seleznev, M., Henschel, S., Storti, E., Aneziris, C.G., Biermann, H., Krüger, L., Weidner, A.: Effect of filter functional coating on detrimental non-metallic inclusions in 42CrMo4 steel and its resulting mechanical properties, *Advanced Engineering Materials*, 22 [2] (2020), pp. 1900540 (1-11). DOI 10.1002/adem.201900540
- 44) Seleznev, M., Weidner, A., Biermann, H., Vinogradov, A.: Novel method for in situ damage monitoring during ultrasonic fatigue testing by the advanced acoustic emission technique, *International Journal of Fatigue*, 142 (2021), pp. 105918 (1-6). DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.105918
- 45) Wagner, R., Seleznev, M., Fischer, H., Ditscherlein, R., Becker, H., Dietrich, B.G., Keßler, A., Leißner, T., Wolf, G., Leinweber, A., Peuker, U.A., Biermann, H., Weidner, A.: Impact of melt conditioning and filtration on iron-rich  $\beta$  phase in AlSi9Cu3 and its fatigue life studied by  $\mu$ CT, *Materials Characterization*, 174 (2021), pp. 111039 (1-12). DOI 10.1016/j.matchar.2021.111039
- 46) Wagner, R., Lehnert, R., Storti, E., Ditscherlein, L., Schröder, C., Dudczig, S., Peuker, U.A., Volkova, O., Aneziris, C.G., Biermann, H., Weidner, A.: Nanoindentation of alumina and multiphase inclusions in 42CrMo4 steel, *Materials Characterization*, 193 (2022), pp. 112257 (1-12). DOI 10.1016/j.matchar.2022.112257
- 47) Schramm, A., Nowak, R., Bruzda, G., Polkowski, W., Fabrichnaya, O., Aneziris, C.G.: High Temperature Wettability and Corrosion of ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C, MgO and MgAlON Ceramic Substrates by an AZ91 Magnesium Alloy Melt, *Journal of the European Ceramic Society*, 42 [6] (2022), pp. 3023-3035. DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.01.040
- 48) Lehmann, H., Werzner, E., Malik, A., Abendroth, M., Ray, S., Jung, B.: Computer-Aided Design of Metal Melt Filters: Geometric Modifications of Open-Cell Foams, Effective Hydraulic Properties and Filtration Performance, *Advanced Engineering Materials*, 24 [2] (2022), pp. 2100878 (1-11). DOI 10.1002/adem.202100878
- 49) Schoß, J.P., Baumann, B., Keßler, A., Szucki, M., Wolf, G.: Filtration efficiency in the recycling process of particle-reinforced aluminum alloys using different filter materials, *International Journal of Metalcasting*, 17 (2023), pp. 1681-1696. DOI 10.1007/s40962-022-00880-z

## 2.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

- 50) Aneziris, C.G., Biermann, H., Multifunctional Ceramic Filter Systems for Metal Melt Filtration - Towards Zero-Defect Materials, *Springer Series in Materials Science* 337 (2023), accepted: 21.06.2023. ISBN 978-3-031-40929-5 – Open Access

### 3 Übersicht der Teilprojekte

Teilprojekt	Titel	Fachgebiet	Teilprojektleitende, Institut(e), Ort(e)	Projektlaufzeit
<b>Projektbereich A: Filterwerkstoff</b>				
A01	Kohlenstoffgebundene Filterwerkstoffe und Filterstrukturen mit aktiven und reaktiven Funktionshohlräumen	Keramik, Metallurgie	Prof. C.G. Aneziris, Dr. P. Gehre, ab 2015 IKFVW, Freiberg Prof. O. Volkova, ab 2019 IEST, Freiberg	2011 - 2023
A02	Oxidhaltige Filterwerkstoffe und Filterstrukturen mit aktiven und reaktiven Funktionshohlräumen	Keramik	Prof. C.G. Aneziris, Dr. N. Brachhold, ab 2019, Dr. P. Gehre, ab 2019, IKFVW, Freiberg	2011 - 2023
A03	Thermodynamik der Filterwand und der Einschlüsse	Werkstoffwissenschaft	Dr. O. Fabrichnaya, Dr. P. Franke, 2011 - 2012 IWW, Freiberg	2011 - 2023
A04	Thermodynamische Eigenschaften und Wechselwirkung von Filtermaterialien und Einschlüssen	Theoretische Physik	Prof. J. Kortus, Dr. C. Himcinschi, ab 2019, ITP, Freiberg	2011 - 2023
A05	Grenzflächenbildung in aktiven und reaktiven Filterstrukturen sowie Phaseneubildung nach der Schmelzefiltration	Werkstoffwissenschaft	Prof. D. Rafaja, IWW, Freiberg	2011 - 2023
A06	Dynamische Grenzschichtgenerierung in einer Spark Plasma Sinteranlage	Werkstoffwissenschaft	Prof. D. Rafaja, IWW, Freiberg	2011 - 2023
A07	Entfernung von Eisen aus Sekundäraluminium durch Metallschmelzefiltration	Werkstoffwissenschaft	Prof. A. Leineweber, IWW, Freiberg	2016 - 2023
<b>Projektbereich B: Modellierung Filterstruktur / Filtersystem</b>				
B01	Erhöhung der Filtrationseffizienz von keramischen Tiefenfiltern durch Beeinflussung der Haftungsmechanismen	Partikeltechnologie, Verfahrenstechnik	Prof. U.A. Peuker, IMVTAT, Freiberg	2011 - 2023
B02	Strömungsverhalten, Wärme- und Stofftransport in Verbundfilterstrukturen	Thermofluiddynamik, Prozessmodellierung	Prof. D. Trimis, 2011 - 2015 Prof. S. Ray, ab 2015 IWTT, Freiberg	2011 - 2023
B03	Wärmetransportvorgänge in Verbundfilterstrukturen	Thermodynamik, Wärmetechnik	Prof. U. Groß, 2011 - 2015 Prof. T. Fieback, ab 2015, Dr. R. Wulf, IWTT, Freiberg	2011 - 2023
B04	Maßgeschneiderte Agglomerate zur Erhöhung der Abscheideeffizienz	Partikeltechnologie, Phasenfeldsimulation	Prof. U.A. Peuker, IMVTAT, Freiberg Prof. K.G. van den Boogaart, 2011 - 2018, ISTO, Freiberg, Prof. S. Sandfeld, IAS-9, FZ Jülich, ab 2019	2011 - 2023
B05	Modellierung und Bewertung des thermomechanischen Verhaltens von Filterwerkstoffen und Filterstrukturen	Mechanik	Prof. M. Kuna, 2011 - 2019 Prof. B. Kiefer, ab 2019 Dr. M. Abendroth, Dr. S. Roth, ab 2019 IMFD, Freiberg	2011 - 2023
B06	Schmelzefiltration bei kontinuierlichen Gießverfahren - Stahlstrangguss	Strömungsmechanik	Prof. R. Schwarze, Dr. K. Bauer, ab 2019, IMFD, Freiberg	2015 - 2023

Projektbereich C: Filtereffizienz, Materialeigenschaften				
C01	Erfassung der Filtereffizienz von aktiven und reaktiven Filterwerkstoffen in Kontakt mit Metallschmelzen in einem Stahlguss-simulator	Keramik, Metallurgie	Prof. C.G. Aneziris, IKFVW, Freiberg Prof. O. Volkova, ab 2019, IEST, Freiberg	2011 - 2023
C02	Hochtemperatur-Festigkeit und Formstabilität von C-gebundenen Filterwerkstoffen	Werkstofftechnik	Prof. H. Biermann, IWT, Freiberg	2011 - 2023
C03	Bestimmung der temperaturabhängigen bruch- und schädigungsmechanischen Eigenschaften keramischer Filterwerkstoffe aus Kleinstproben	Mechanik	Dr. M. Abendroth, Prof. M. Kuna, 2011 – 2019, Prof. B. Kiefer, ab 2019, IMFD, Freiberg	2011 - 2023
C04	Experimentelle und stochastische Untersuchung des Einflusses von Einschlüssen auf die Ermüdungslebensdauer	Werkstofftechnik, Simulation	Prof. H. Biermann, Dr. A. Weidner, IWT, Freiberg Prof. K.G. van den Boogaart, 2011 – 2019, ISTO, Freiberg, Prof. S. Sandfeld, IAS-9, FZ Jülich, ab 2019	2011 - 2023
C05	Einfluss von Materialinhomogenitäten auf das temperatur- und geschwindigkeitsabhängige Festigkeits-, Verformungs- und Versagensverhalten	Werkstofftechnik	Prof. L. Krüger, IWT, Freiberg	2011 - 2023
C06	Ermittlung des Wirkmechanismus und der Effizienz reaktiver Filter zur Vermeidung unerwünschter H <sub>2</sub> -Porosität im Aluminiumguss und zur Entfernung von Partikeln und H <sub>2</sub> aus Magnesiumschmelzen	Werkstofftechnik, Metallurgie	Prof. M. Stelter, Prof. C. Scharf, INEMET, Freiberg	2015 - 2023
Transferprojekte				
T01	Reinheitsgraderhöhung von Flüssigstahl	Transferprojekt	Prof. C.G. Aneziris, IKFVW, Freiberg Prof. R. Schwarze, IMFD, Freiberg	2016 - 2019
T02	Bestimmung der Ermüdungslebensdauer und der Anrissursachen von Stahl-Kolben-Legierungen im VHCF-Bereich bei erhöhten Temperaturen	Transferprojekt	Prof. H. Biermann, Dr. A. Weidner, IWT, Freiberg	2016 - 2019
T03	Abscheidung eisenhaltiger intermetallischer Phasen aus Aluminium-Legierungen durch Filtration	Transferprojekt	Prof. G. Wolf, Dr. A. Keßler, GI, Freiberg	2019 - 2022
T04	Funktionalisierte Einlauftrichter, Rohrsteine, Königsteine und Starterrohre für die Erhöhung des Reinheitsgrades bei Stahlgießverfahren	Transferprojekt	Prof. C.G. Aneziris, Dr. P. Gehre, IKFVW, Freiberg	2019 - 2022
T05	Erhöhung des Reinheitsgrades von Aluminiumschmelzen durch gekapselte keramische Tiefenfilter mit keramischen Fasern nach dem Prinzip der Anschwemmfiltration	Transferprojekt	Prof. U.A. Peuker, IMVTAT, Freiberg	2020 - 2023
T07	Abscheidung nichtmetallischer Verunreinigungen (Dross) aus GJS-Legierungen durch Filtration	Transferprojekt	Prof. G. Wolf, Prof. M. Szucki, GI, Freiberg	2022 - 2025
T08	Rotationsunterstützte Filtration von partikel- und faserverstärkten Aluminiumlegierungen	Transferprojekt	Prof. M. Szucki, Prof. G. Wolf, GI, Freiberg	2022 - 2025
T09	Keramische Hybrid-Filtersysteme für den ESU-Blockguss	Transferprojekt	Prof. Aneziris, IKFVW, Freiberg	2023 - 2025

Zentrale Teilprojekte				
MGK	Modul Integriertes Graduiertenkolleg	-	Prof. C.G. Aneziris, IKFVW, Freiberg Prof. H. Biermann, IWT, Freiberg	2011 - 2023
S01	Probenpräparation, Filtrationswirkungsgrad, Computertomographie	Dienstleistung für den SFB	Prof. D. Rafaja, IWW, Freiberg Prof. C.G. Aneziris, Dr. J. Hubálková, ab 2015, IKFVW, Freiberg	2011 - 2023
S02	VR-basierte visuelle Analyse von Filtrationsprozessen	Dienstleistung für den SFB	Prof. B. Jung, IFI, Freiberg Prof. D. Trimis, 2011 – 2013, IWTT, Freiberg	2011 - 2023
S03	Aktive und reaktive Filtration von Stahl- und Aluminiumschmelzen beim dünn- und dickwandigen Formguss	Dienstleistung für den SFB	Prof. K. Eigenfeld, 2011 - 2014 Prof. G. Wolf, ab 2014 Dr. A. Keßler, ab 2015 GI, Freiberg	2011 - 2023
Z	Geschäftsführung und Sekretariat	Zentrale Verwaltungsaufgaben	Prof. C.G. Aneziris, IKFVW, Freiberg	2011 - 2023

## 4 Wissenschaftliche Entwicklung des Sonderforschungsbereichs

### 4.1 Einleitung, Vision und Thesen

Ausgangspunkt des SFB war die Schadensanalyse der Radsatzwelle des ICE 3, der 2008 in Köln entgleiste. Der Schaden wurde insbesondere auf feine (1 bis 5  $\mu\text{m}$ ), agglomerierte (Bildung von Agglomeraten in der Größenordnung von ca. 200  $\mu\text{m}$ ), nichtmetallische Einschlüsse beim Blockgussprozess zurückgeführt, da diese über den nachträglichen Schmiedeprozess nicht entfernt bzw. unschädlich gemacht werden konnten.

Die Vision des SFB 920 ist die Erforschung neuartiger Filterwerkstoffe sowie ein an die Filtrationstechnik angelehntes modellunterstütztes Filterdesign der Mikro- und Makrostruktur zu generieren, um die Herstellung von dünn- als auch dickwandigen, höchstbeanspruchbaren Komponenten auf Basis Stahl, Gusseisen, Aluminium und Magnesium mit bahnbrechenden Eigenschaften – in Bezug auf die Festigkeit, Zähigkeit, Ermüdungsresistenz – für die Sicherheit der Insassen von Kraft-, Schienen- und Luftfahrzeugen zu ermöglichen. Darüber hinaus werden zukunftssträchtige Anwendungsfelder in der Elektronikindustrie am Beispiel Filtration von Kupfer, in der Verpackungsindustrie am Beispiel Aluminiumfolien, Recycling von Si-Panels und Wafern bei der Filtration von Si Schmelzen und im Maschinenbau sowie in der Energiegewinnung am Beispiel hochbelasteter Gussteile erschlossen. Beispielhaft sei hier die Entwicklung der Windenergieanlagen genannt. Neben der Optimierung der derzeitigen 5 MW-Anlagen (Gussgewichte bis 150 Tonnen pro Anlage in ca. 120 m Höhe) stehen bereits neue Anlagen im Leistungsbereich bis 8 MW in der Entwicklung, bei denen eine noch intensivere Werkstoffausnutzung bei höchsten Festigkeitsklassen eine immer subtiler werdende Schmelzereinigung erfordert.

Bei der Filtration von metallischen Schmelzen betrachtet man a) den Transport der Einschlüsse in der Metallschmelze, der durch die Strömungsführung, die Größe und relative Dichte der Einschlussteilchen, den relativen Porendurchmesser und die Vernetzung der Filterporen abhängig ist, und b) den eigentlichen Vorgang der Abscheidung der Einschlüsse an der Filterwand. Der letzte setzt sich aus drei Teilschritten zusammen. Zunächst, abhängig von deren Größe, Chemie und den Strömungsverhältnissen, agglomerieren feine Teilchen, dann gelangen sie an die Filterwand und anschließend muss eine Haftung mit oder ohne einen Sinterungsvorgang erfolgen, damit die Teilchen nicht mehr durch die nachfolgende Strömung mitgerissen werden können.

Die Abscheidung von nichtmetallischen Einschlüssen aus einer Metallschmelze erfordert ein erstes Eindringen der Schmelze in die Funktionshohlräume (Poren und Kanäle) des keramischen Filters.

Die Metallschmelze muss eine Energie gegen den Strömungswiderstand der Pore sowie die Grenzflächenenergie zwischen Schmelze und Filtermaterial überwinden. Hinzu kommt der notwendige Wärmefluss für den Temperatureausgleich zwischen Schmelze und Filter. Die Summe dieser Effekte wird allgemein als Anlaufvorgang oder „Priming“ bezeichnet und die erforderliche Energie bei der Filtration wird von Metallschmelzen durch eine vorgesehene metallostatistische Druckhöhe und/oder eine ausreichende Schmelzeüberhitzung geliefert.

Die Benetzungseigenschaften der Einschlüsse gegenüber der Schmelze als auch die Benetzungseigenschaften des Filtermaterials gegenüber der Schmelze spielen eine entscheidende Rolle für die Filtrationseffizienz. In der Regel eine schlechte Benetzbarkeit der Einschlüsse und des Filtermaterials gegenüber der Metallschmelze unterstützt die Abscheidung und Haftung auf dem Filtermaterial.

## 4.2 Ausgewählte Ergebnisse

### 4.2.1 „Stahlschmelze-Filtration“

#### Filtrationswirkungsmechanismen, Studium der Kinetik a) der Abscheidungseffizienz von Einschlüssen auf die funktionalen Filteroberflächen und b) der Reinigung der Stahlschmelze durch Flotationsbeiträge

Für die Stahlschmelzefiltration wurden kohlenstoffgebundene Filter mit oder ohne eine weitere funktionale Beschichtung erforscht. Die modifizierte Replica-Technologie aus der Kombination eines ersten Imprägnierschlickers mit anschließender funktionaler Beschichtung mittels Zentrifugierens wurde hinsichtlich der Reduzierung der Gesamtschwindung des kohlenstoffgebundenen Filters und der Schwindung der Filterstege mit Hilfe der Computertomographie weiterentwickelt. Bei einer neuartigen Prozessroute mit zweimal Zentrifugieren anstatt des Imprägnierens und mit einer thermischen Zwischenbehandlung nach dem ersten Zentrifugieren bei 300 °C (Carbores P als Kohlenstoffträger und Binder wurde bei 236 °C aufgeschmolzen und infiltrierte die Poren) konnte die Gesamtschwindung des Filters nach dem Verkoken bei 800 °C von 8 % auf 1 % und die Schwindung der Filterstege von ca. 12 % auf 6 % erheblich reduziert werden.

Dieser Schritt ist ein wichtiger Beitrag zur Erzeugung von rissfreien, kohlenstoffhaltigen, großvolumigen Filterstrukturen.

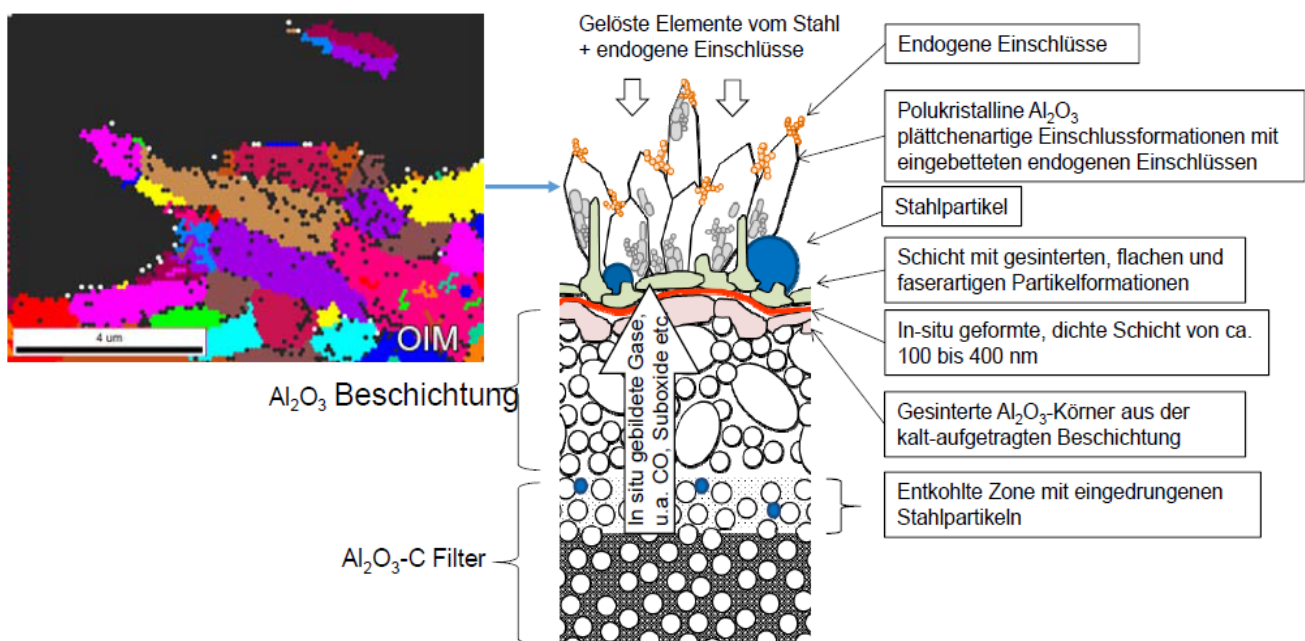


Abb. 1: Rechts Modellschema der in situ Schichtbildung eines kohlenstoffgebundenen Aluminiumoxids mit einer „kalten“, porösen Aluminiumoxidbeschichtung in Kontakt mit Stahlschmelze (adapted and translated from [Sch17] © 2017 Wiley), links EBSD der plättchenartigen Einschlussformationen mit eingebetteten Einschlüssen unterschiedlicher Orientierung [Sch16].

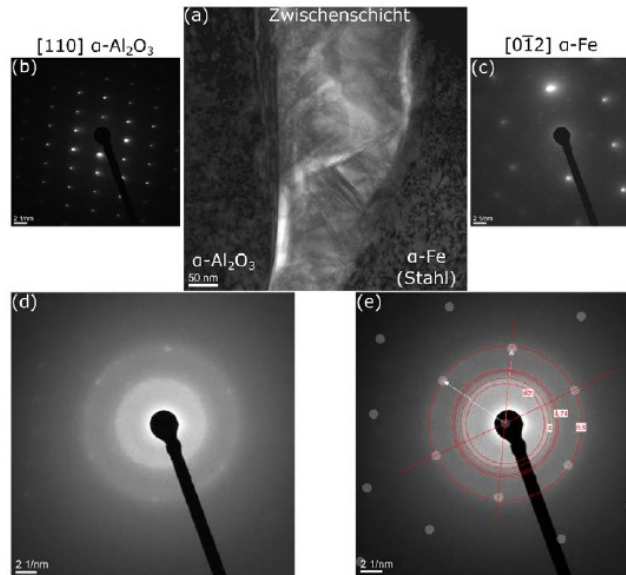


Abb. 2: SAD-TEM der Grenzfläche Stahl/Filter mit einer amorphen Zwischenschicht, [Sal19] © 2019 mit Genehmigung von A. Salomon, oben Mitte adapted and translated from [Sal21] © 2021 Wiley.

Im Rahmen der zweiten und der dritten Förderperiode konnten mit Fingerfiltertestversuchen in einem einzigartigen Stahlgussimulator (TP C01) mit Hilfe von reproduzierbar konditionierten Stahlschmelzen (Auffoxidation und Desoxidation unterhalb 10 ppm) die Wirkungsmechanismen von reaktiven, kohlenstoffhaltigen Filtern - unabhängig vom oxidischen Füllstoff - erstmalig entschlüsselt werden. In Abb. 1 wird das Modellschema am Beispiel eines kohlenstoffgebundenen Aluminiumoxids funktionalisiert mit einer „kalt aufgesprühten“ und anschließend bei 1400 °C unter reduzierenden Bedingungen thermisch wärmebehandelten, porösen Aluminiumoxidbeschichtung demonstriert (TP A01, TP A06). Der Kohlenstoff vom Filter reduziert das Aluminiumoxid vom Filter und es werden Suboxide und CO-Gase generiert, welche über die poröse, kalt aufgebrachte, reine Aluminiumoxid-Schicht diffundieren und u.a. mit dem im Stahl gelösten Sauerstoff und Kohlenstoff des Stahls reagieren. Es bilden sich in situ 100 bis 400 nm aluminiumoxidhaltige Neu-Schichten, auf denen größere Einschlussformationen in Richtung Stahlschmelze mit eingebetteten endogenen Einschluss-Clustern aus der Stahlschmelze wachsen. Als Funktion der Zeit wachsen diese größeren Einschlussformationen und ab ca. 60 sec werden an deren Spitzen weitere endogene Einschluss-Cluster abgeschieden, bis die Oberflächen mit feineren, endogenen Einschlüssen vollbedeckt werden (ca. 120 sec), Abb. 3. Mit Hilfe von EBSD-Untersuchungen (TP A01) sowie TEM-Aufnahmen und Beugungsbildern (TP A05, A06, siehe Abb. 2) konnten die in situ Schichten überwiegend als amorph mit kristallinen Bereichen bzw. auch als kristalline Aluminiumoxidschichten identifiziert werden (eine Frage der Verunreinigungen des Aluminiumoxidpulvers im Filter oder der kalt aufgesprühten Aluminiumoxidschicht auf dem Filter).

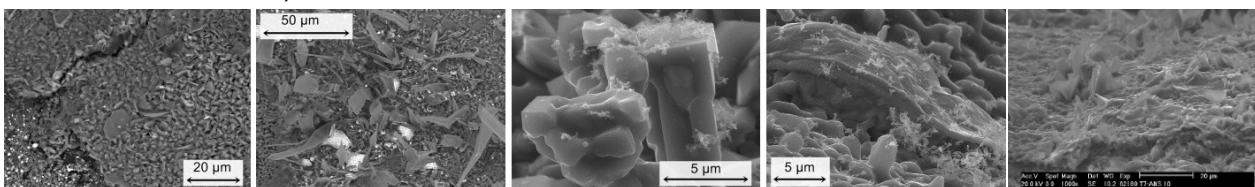


Abb. 3: von links nach rechts, 10 sec [Sch16], 30, 60 und 120 sec Eintauchzeit eines kohlenstoffgebundenen Aluminiumoxid-Filters funktionalisiert mit einer Aluminiumoxidschicht [Sch17] © 2017 Wiley, rechts 10 sec Eintauchzeit einer kohlenstoffgebundenen Aluminiumoxid-Filterprobe funktionalisiert mit Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) und Aluminiumoxidnanoplättchen (ANP), [Sto17a].

Im Falle einer Oberflächenfunktionalisierung mit einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht mit 4 % Kohlenstoff führt die carbothermische Reduktion zur Reduzierung auch der Verunreinigungen (z.B.  $\text{CaO}$  etc.) des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und damit werden überwiegend amorphe in situ Schichten generiert, Abb. 2, „Zwischenschicht“. Im Falle von der reinen, kalt aufgesprühten Schicht werden kristalline in situ Schichten identifiziert. Die Bildung und das Wachstum der größeren Einschlussformationen wurde unter unterschiedlichen Atmosphären und Kombinationen mit oder ohne eine katalytische Wirkung von Eisen modellhaft ohne

Makro-Strömung in einer Spark Plasma Sinteranlage (TP A06) tiefgründig untersucht und den realen Versuchen im Stahlgussimulator (TP C01, A01) mit Hilfe von thermodynamischen Berechnungen (TP A03) gegenübergestellt.

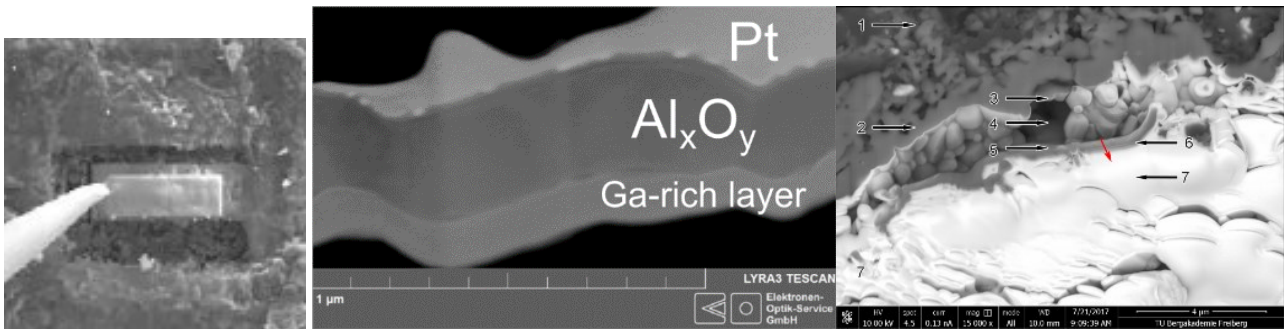


Abb. 4: FIB-Präparation einer in situ gebildeten Schicht nach einem Filter-Fingertestversuch im Stahlgussimulator [Sto18a], die Aluminiumoxidschicht (Pos. 5), angelehnt an der Platinschicht (Pos. 7), entspricht der Position an der Kontaktstelle mit der Stahlschmelze; Aluminium- und Sauerstoff-Gradient, die Schichtregion in Richtung Filtersubstrat (Pos.1) ist mit Aluminium angereichert und in Richtung Stahlschmelze mit Sauerstoff, TP A01/ TP C01, reprinted from [Sto18a] © 2018 with permission from Elsevier.

Darüber hinaus variiert bei den in situ gebildeten dünnen Schichten an den Proben des Stahlgussimulators der Al- und O-Gehalt. In der Abb. 4 Mitte und rechts wird eine mittels FIB präparierte Schicht (TP A01), die anschließend mittels EDX analysiert worden ist, gezeigt. Die Aluminiumoxidschicht, angelehnt an der Platinschicht (Pos. 7), entspricht der Position an der Kontaktstelle mit der Stahlschmelze und die gegenüber der Kontaktstelle mit dem kohlenstoffgebundenen Filtersubstrat (Pos.1). Die Schichtregion in Richtung Filtersubstrat ist mit Aluminium angereichert (Reduktion von  $Al_2O_3$ ) und die zweite in Richtung Stahlschmelze mit Sauerstoff (Aufoxidation der Suboxide und Bildung von in situ Schichten). Im Falle eines Füllstoffs auf Basis  $Al_2O_3$  bei den kohlenstoffgebundenen, reaktiven Filtern führen die Al-Suboxide auch zu einer Wechselwirkung mit dem Kohlenstoff der Stahlschmelze, welcher reduziert wird. Diese Phänomene werden mittels Phasenfeldsimulation im TP B05 erforscht, Abb. 5.

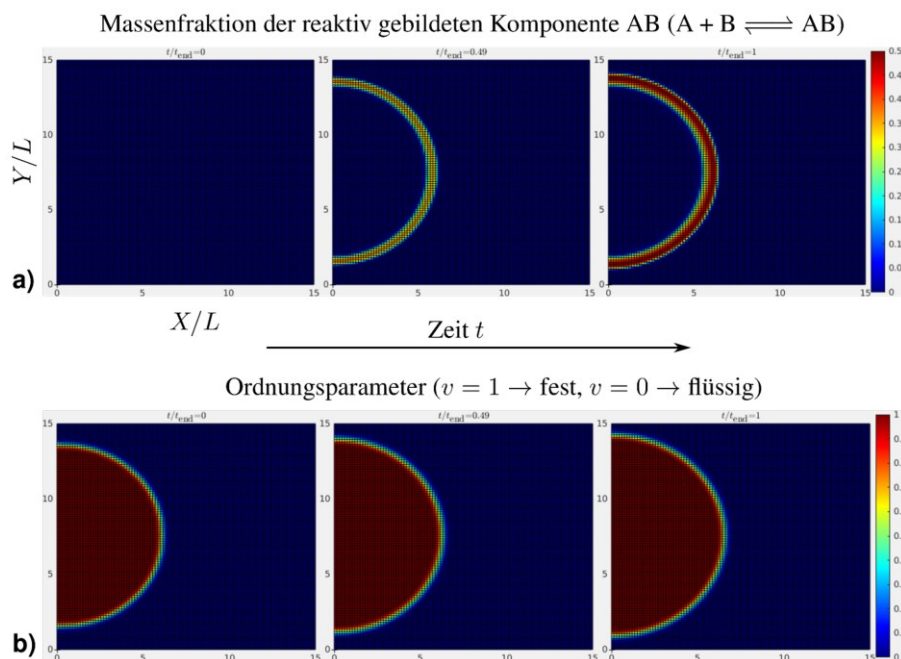


Abb. 5: Ergebnisse einer Finite Elemente Simulation zur zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Anlage einer reaktiv gebildeten chemischen Komponente: a) Entwicklung der Massenfraktion der Reaktionschicht und b) Entwicklung der Fest-Flüssig-Grenzfläche; (Phasenfeldansatz zur Unterscheidung von festem und flüssigem Zustand (Partielle Differentialgleichung vom Allen-Cahn-Typ für Ordnungsparameter  $v$ ), Zusätzlich Lösung von gekoppeltem System von Reaktions-Diffusionsgleichungen zur Entwicklung der chemischen Komponenten, FEM-Ansatz hier basierend auf gemischter Variationsformulierung vom Ratentyp für dissipative Systeme).



Im Falle von MgO-oxidischen Füllstoffen in einer kohlenstoffgebundenen Matrix mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird keine nennenswerte Änderung des C-Gehalts im Stahl registriert, allerdings führt das Mg zu einer in situ Spinellbildung, welche mit ihrer Volumenexpansion zur Formstabilität (wirkt einer Schwindung ab ca. 1500 °C entgegen) der niedrig verkokten Filter während der „Filtration“ beiträgt.

Von großer Bedeutung für die Reinigung der Stahlschmelze ist die Wirkung der Reaktionsgase wie u.a. CO oder nicht reagierter Metall-Suboxide, die als Gasblasen zum Reinigungsprozess über eine Art Flotation beitragen. Eine Oberflächenfunktionalisierung mit nanoskaligen Zusätzen beschleunigt die Kinetik; die größeren in situ gebildeten Einschlussformationen werden bereits ab 10 sec identifiziert bzw. führen auch zu einer stärkeren Gasentwicklung. In Abb. 6 wird die Kinetik der Reinigungseffizienz der Stahlschmelze mit Hilfe von ASPEX-Messungen (TP A01, TP C01, automatische Rasterelektronenmikroskopie mit Identifikation der Größe, der Population und der Chemie der Einschlüsse) beim Einsatz eines Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C-Filtersubstrats, funktionalisiert mit a) einer reaktiven Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-4%C-Schicht und b) mit einer reaktiven Schicht bestehen aus Kohlenstoffnanoröhrchen, Aluminiumoxidnanoplättchen und Kohlenstoff, gezeigt.

Die hochreaktive nanofunktionalisierte Schicht führt bereits ab einer Wirkungszeit von 10 sec zu einer Reinigung der Schmelze von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Einschlüssen über 90 %. Allerdings führen längere Eintauchzeiten zu einer Vergrößerung der Einschlüsse; wenn diese mittels Auftriebs oder einer weiteren, nachgeschalteten Filtration nicht entfernt werden können, fungieren diese als kritische Einschlüsse im Sinne einer negativen Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des metallischen Endprodukts. Die Nanofunktionalisierung beschleunigt nicht nur die Kinetik und trägt zu einer größeren Gasblasenentwicklung in kürzeren Eintauchzeiten bei, sondern kann auch zu stabileren in situ Schichten, die am Beispiel von Benetzungsversuchen in einem Erhitzungsmikroskop (TP A01) erforscht worden sind.

Chemie der Einschlüsse	Einschlüsse pro cm <sup>2</sup>						
	Kein Filter	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Beschichtung 10 s	CNTs-ANSs 10 s	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Beschichtung 60 s	CNTs-ANSs 60 s	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Beschichtung 120 s	CNTs-ANSs 120 s
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1248	371	56	439	446	597	484
Ca-Aluminate	0	0	0	0	0	0	0
Mg-Spinell	0	0	0	0	0	0	0
Al/Mn/Mg/ Fe/Ca-Silikate	0	0	2	0	234	1	122
SiO <sub>2</sub>	5	9	1	18	3	85	4
MnO/MnS	6	0	0	0	1	0	1
CaO/CaS	0	0	0	0	0	0	0
Andere	116	9	1	16	81	56	122
Reinigungs- effizienz* (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	70%	95%	65%	64%	52%	61%

Abb. 6: Gegenüberstellung von ASPEX-Ergebnissen als Funktion der Zeit (10 sec, 60 sec und 120 sec) eines mit einer kalt aufgetragenen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht funktionalisierten Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C-Filtersubstrats und einmal funktionalisiert mit CNT und ANP/ANS (Aluminananoplättchen/Aluminananosheets); Einschlussverteilung; Zuordnung der Einschlüsse nach chemischer Zusammensetzung, translated from [Sto17a] © 2017 Wiley.

### Reaktive Beiträge der funktionalen kohlenstoffhaltigen Filter: Gasblasen, Nanoblasen und Modellierungsansätze

Der hohe Reinigungsbeitrag in der Art des Tauchens eines hochporösen Filterfingers in der Stahlschmelze bei mäßiger Durchströmung (im Vergleich zu einer direkten Durchströmung am Beispiel Formguss) durch das wirkende Induktionsfeld konnte nur mit dem Beitrag der Flotation durch die in situ gebildeten Gasblasen erstmals begründet werden. In der Literatur wird darüber hinaus auch der Beitrag von Gasblasen zur Agglomeration von Einschlüssen zitiert.

Im TP A01 wird bereits der Beitrag der Rauigkeit von exogenen und endogenen Einschlüsse diskutiert, insbesondere unter dem Gesichtspunkt von wirkenden Flotations- bzw. Immersionskräften nach Kralchevsky. Die Beobachtungen in den bisherigen Messungen im Konfokalen Laser Scanning Mikroskop unter dem Gesichtspunkt der Auftriebsgeschwindigkeit der sehr feinen, endogenen Einschlüsse im Bereich deutlich kleiner 10 µm unterstreichen den Beitrag zur Flotation auch durch angesiedelte bzw. „aktivierte“ oder in situ generierte Blasen an den einzelnen Einschlüssen. Aus den bisherigen Beobachtungen mit der sehr hohen Reinigungseffizienz der Schmelze innerhalb von

10 sec Wirkungszeit (ca. 20 g Filterfinger, mit einer Entkohlungszone von ca. 100  $\mu\text{m}$ , reinigen bis zu ca. 95 % die 30 kg (unter 10 ppm desoxidierte) Stahlschmelze von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einschlüssen bei der Kombination funktionale Oberflächenschicht CNT/ANS/C) fungieren nicht nur die größeren Gasblasen auf Basis CO und/oder Metallsuboxiden zur Flotation, sondern es wird stark vermutet, dass auch die an Einschlüssen anhafteten Blasen bzw. an den Einschlüssen in situ generierten Blasen durch die chemische Wechselwirkung des kohlenstoffhaltigen Filtermaterials aktiviert werden und zur Reinigung der Schmelze beitragen. In Simulationen (TP B06) werden die zwei unterschiedlichen Beiträge zur Flotation von Einschlüssen dargestellt: a) mit an den Einschlüssen wachsenden Gasblasen bzw. b) mit Blasen aus der Filteroberfläche, die Einschlüsse in Richtung Stahlschmelzoberfläche „mitnehmen“. Mit dem ersten Ansatz wird nach dem Modell eine Reinigungseffizienz von ca. 80 % innerhalb der 10 sec ab einer Gasblasengröße von ca. 250  $\mu\text{m}$  postuliert, TP B06, TP C01. Es ist eindeutig, dass die Gasblasen aus dem Filter zur Flotation beitragen, allerdings scheint die Bildung und/oder Vergrößerung der Blasen an oder in der Nähe der Einschlüsse eine dominierende Wirkung auszuüben. Dass solche feine Blasen bis zu Nanobläschen beständig in Lösungen sein können, hat u.a. Prof. Lohse in seinem Überblicksbeitrag (2017) dargestellt und anhand der „angehefteten Dreiphasenkontaklinie“, die das Auflösungszenario erheblich verändert, demonstriert; der Laplace-Druck divergiert nicht mehr mit dem Krümmungsradius, sondern geht nach Null und damit kann sich beim Auflösen der Blase kein großer Innendruck mehr aufbauen und die Blasenstabilität wird erhöht. Eigene Erfahrungen in den TP B01 und B04 mit der Registrierung von Nanobläschen an hydrophoben  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Partikeln unterschiedlicher Rauigkeit unterstützten die Modellvorstellungen für den Hochtemperaturbereich, Abb. 7 links.

Auf Basis von oxidhaltigen Füllstoffen auf Calciumaluminatbasis in Kombination mit Kohlenstoff als funktionale Schicht, die zu einer zusätzlichen Bildung von gasförmigen Spezies u.a. von calciumhaltigem Gas führten (TP A01), konnte eine Reinigungseffizienz von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einschlüssen bis nahe 100 % erreicht werden (siehe Abb. 7 Mitte).

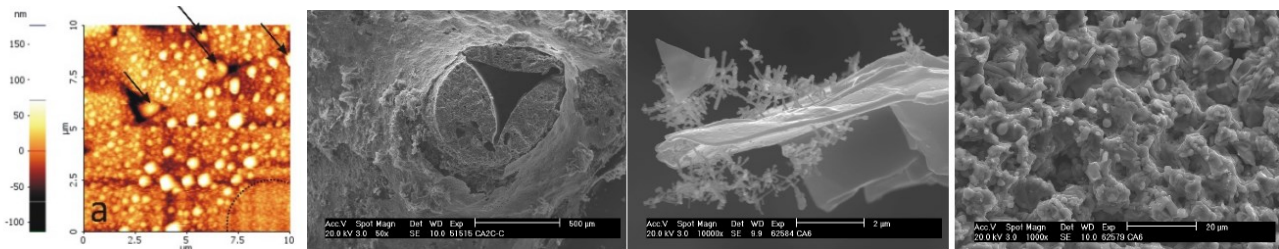


Abb. 7: Links Nanobläschen am hydrophobierten Aluminiumoxideinschluss in Kontakt mit Wasser im AFM (reprinted from [Dit16] © 2016 with permission from Elsevier), in situ Schichtbildung und Einschlussformationsbildung von kohlenstoffgebundenem Calciumaluminat Filter (Mitte links), Abscheidung von endogenen Einschlüssen auf der in situ gebildeten Schicht (Mitte rechts, [Sto17b] © 2017 Wiley), rechts kraterartige Oberfläche durch die Gasentwicklung, [Sto17b] © 2017 Wiley.

In der Abb. 7 rechts wird die funktionale, kohlenstoffhaltige Calciumaluminatschicht nach dem Filter-Fingerversuch offenbart, deren „kraterartige“ Struktur auf der in situ Gasbildung beruht.

### Entfernung von Einschlüssen „direkt nach ihrer Genese“

Eine der Visionen in der zweiten und der dritten Förderperiode stellte die Entfernung von sehr feinen Einschlüssen im Bereich 50 bis 500 nm möglichst direkt nach ihrer Genese dar. In der Abb. 8 links wird ein mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und 4 % C funktionalisierter kohlenstoffhaltiger Filter dargestellt, auf dessen in situ in Stahlschmelzen gebildeter Schicht Cluster von endogenen Einschlüssen mit Primärkristalliten im Bereich 60 bis ca. 100 nm abgeschieden sind. Dies ist ein eindeutiger Beweis, dass feine, endogene Einschlüsse entfernt werden können. In der Abb. 8 rechts wird eine Schale/Kern-Einschlussformation aus dem filtrierte metallischen Gussstück gezeigt (TP C04). Unterhalb seiner aluminosilikatischen Schale wurde der geclusterte „ursprüngliche endogene“ Einschluss mit Primärkristallitgrößen in der Region 60 bis 100 nm identifiziert.

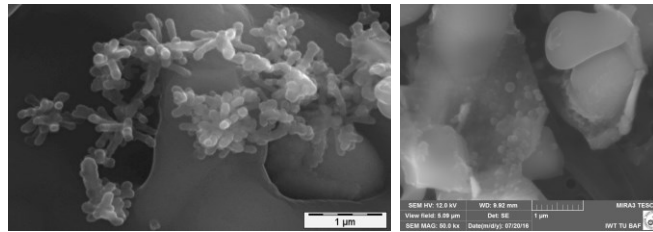


Abb. 8: Links Abscheidung von geclusterten, endogenen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einschlüssen auf einem kohlenstoffhaltigen Filter, funktionalisiert mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und 4 % C, unmittelbar nach ihrer Genese [Geh18] © 2018 The American Ceramic Society, rechts ursprüngliche geclusterte  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einschlüsse in einer silikatischen Schlacke als Einschluss im metallischen Gussstück, [Gle18].

Dies ist ein weiterer Beweis einer der Thesen des SFB 920; die feinkörnigen Einschlüsse sollen schnell entfernt werden, ohne dass die Gefahr entsteht, dass diese in der Gussform agglomerieren oder als Keime für die Formation von größeren Einschlussclustern beitragen.

Mechanische Eigenschaften von Stahlgussproben a) 60 min Untergussverfahren, b) 10 sec Filterfingerproben

Am Beispiel Unterguss (60 min Wirkungszeit) mit Hilfe von funktionalisierten Tiegeln (Übertragung der Filterchemie auf Gießmassen für Tiegefertigung, TP C01) wurden mit einer anderen Stahlsorte (18CrNiMo7-6 (1.6587)) diese Wirkungsmechanismen erfolgreich demonstriert (TP C04, TP C05, TP C01). Kohlenstoffhaltige Aluminiumoxidtiegel, funktionalisiert mit Titandioxid/Zirkondioxid (AZT-C) mit oder ohne nanoskaligen Zusätzen (AZT-C-n, bei Zugabe von Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) und Alumina-Nanoplättchen (ANP)) tragen über ihre starke chemische Aktivität zur Reduzierung der Gesamtanzahl von Einschlüssen und insbesondere von feineren Populationen bei, allerdings kommt es bei den restlichen Einschlüssen zu einer Vergrößerung; diese (Titandioxid, ANP bzw. die Reaktionsprodukte aus CNT und ANP) fungieren wie „Sinterhilfsmittel“ während der Sinterung von feinkörnigen Keramiken. Die Reduzierung der Gesamtanzahl der Einschlüsse führt zu einer höheren Duktilität des Stahls und damit zu einer höheren Energieabsorption von ca. 30 % (Vergleiche AZT-C mit A-C) im Falle eines Einsatzes als „Crashabsorber“ im Automobilbau. Allerdings führen die in situ gebildeten größeren Einschlüsse zu einer Reduzierung der Festigkeit, insbesondere der Ermüdungsresistenz, Abb. 9. Da aber die größeren Einschlusscluster im Bereich größer 50  $\mu\text{m}$  liegen, kann eine kombinierte Filtration mit nachgeschalteten, aktiven, kohlenstofffreien Filtern z.B. auf Basis flammgespritzter Aluminiumoxidfilter (siehe Hybrid-Flammgespritztechnologie) auch das Ermüdungsverhalten deutlich verbessern. Ähnliche Ergebnisse werden mit den 10 sec Filterfingerversuchen in der 42CrMo4 Stahlschmelze erzielt. Die Versuche mit der funktionalen Schicht auf Calciumaluminatbasis und „C“ (AC5+CA6) führen zu der größten Energiedissipation, allerdings auch zu der geringsten Ermüdungsfestigkeit bei  $10^9$  Zyklen, (Abb. 9 rechts).

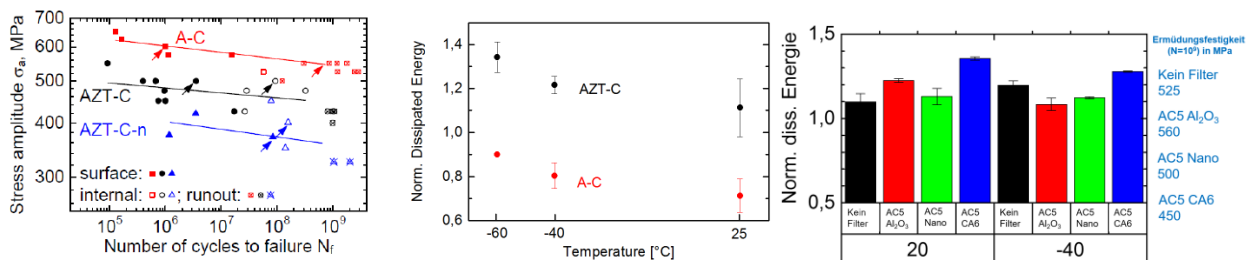


Abb. 9: Eigenschaften von Stahl 18CrNiMo7-6 nach 60 min in funktionalisierten Tiegelwerkstoffen links Ermüdungsverhalten, Mitte Energiedissipation [Hen17] © 2017 Wiley, rechts 10 sec Fingerversuche in 42CrMo4 Stahlschmelze, Energiedissipation bei 20 und -40 °C, Ermüdungsfestigkeit bei  $10^9$  Zyklen [Sel20].

Flammgespritzte funktionale Schichten und metastabile Phasen zur Schmelzereinigung

Im Rahmen der zweiten Förderperiode wurden erstmalig flammgespritzte funktionale Schichten (offene Porosität ca. 10 Vol.%) auf kohlenstoffgebundene Substrate mit metastabilen Aluminiumoxidphasen (überwiegend gamma-Aluminiumoxid) aufgetragen und im Stahlgussimulator in eine nicht oxidierte und nicht desoxidierte 18CrNiMo7-6 (1.6587) Stahlschmelze getaucht und mit Filtern mit dem gleichen Kohlenstoffsubstrat, allerdings einmal mit einer kohlenstoffhaltigen funktionalen Schicht und einmal mit einer kalt aufgetragenen, porösen alpha-Aluminiumoxidschicht (offene

Porosität ca. 35 Vol.%) verglichen. Sowohl bei der kohlenstoffhaltigen Schicht als auch auf der alpha-Aluminiumoxidschicht entsteht eine in situ Schicht nach dem Modellschema in Abb. 1 und feine endogene Einschlüsse können auf den Oberflächen identifiziert werden. Bei der flammgespritzten Schicht konnte keine in situ gebildete Schicht identifiziert werden. Die Oberfläche zeigte keine „kraterartige“ Oberflächenbeschaffenheit durch die Gasbildung und der gelöste Sauerstoff konnte überraschenderweise um ca. 30 % (mit Hilfe von EMK-Messungen in der Stahlschmelze) nach der Wirkung des Filters gesenkt werden. Im TP A05 wurden in Kooperation mit den TP A01 und TP A02 auch metastabile Aluminiumoxidschichten aus deren Hydroxiden hergestellt bzw. hinsichtlich ihrer Struktur, Fehlstellen und Übergang bis zur stabilen alpha-Phasenmodifikation intensiv untersucht. TP A03 unterstützte diese Aktivitäten mit thermodynamischen Berechnungen im Dreistoffsystem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$ . Solche flammgespritzten AZT-Schichten wurden mittels Stab-Flammspritzens (TP A01) erzeugt und hinsichtlich R-Kurvenverhalten in Kooperation mit der Gruppe von Prof. Schneider an der TU Hamburg und bez.  $K_{IC}$  bei Prof. Graule an der EMPA in der Schweiz untersucht.

#### Kohlenstoffgebundene Schaumstrukturen: Duktiles Verhalten

Der erfolgreiche Einsatz der reaktiven, kohlenstoffhaltigen Schaumfilterstrukturen wurde mit deren Modellierung im TP B05 und insbesondere mit der Erfassung ihrer mechanischen Eigenschaften im TP C02 (erstmalig im Hochtemperaturbereich bis 1500 °C) erheblich unterstützt. Small Punch Tests (TP C03) an dünnen Scheibchen mit gleicher Mikrostruktur – wie diese bei der Schaumkeramikfilterfertigung – als auch die HT-E-Modul-Erfassung im TP C01 und die thermische Dehnung im TP A01 haben zu Modellevaluierung beigetragen und ermöglichen erstmals von der thermomechanischen Seite her die modellunterstützte Generierung und Abschätzung von Großfiltergeometrien, wie z.B. die wechselbaren Filterkörper im Verteilerbereich beim kontinuierlichen Stranggießverfahren (Transferprojekt T01) mit Thyssen-Krupp-Steel Europe. In den Spannungs/Stauchungs-Darstellungen wird ein duktileres Verhalten des kohlenstoffgebundenen Filtersubstrates ab 1400 °C registriert; diese Plastizität trägt zum Abbau von kritischer Energie bei und kann zum Rissstopp führen bzw. erhöht die Thermoschockbeständigkeit erheblich insbesondere im Sinne eines „Kaltstarts“ ohne notwendige Vorwärmung der Filterstrukturen. Im Falle von größeren Filtergeometrien muss diese Hochtemperaturduktilität im Sinne des Kriechens u.a. konstruktiv, z.B. mit der Hilfe von Kombifiltern aus „Schaum“ und „Spaghetti“ oder werkstofftechnisch, z.B. mit der in situ Spinellbildung in der Matrix entschärft werden.

#### Kombinierte Versuche. Einschlusschemie

Die Herausforderung bei den Reinigungsversuchen von Metallschmelzen im Stahlgussimulator-SGS (TP C01) ist die reproduzierbare Generierung von Einschlüssen. Dies betrifft nicht nur deren Anzahl und Chemie, sondern auch deren Morphologie. Am Beispiel der „Reinigungsbehandlung“ der Stahlschmelze mit einem getauchten, prismatischen, reaktiven Filter auf Basis eines kohlenstoffgebundenen Filters mit einer kohlenstoffgebundenen Calciumaluminatschicht für 10 sec in einer 42CrMo4 Stahlschmelze (welche im SGS vorher aufgeschmolzen, aufoxidiert mit FeO und auf 5 ppm Sauerstoff mit Al desoxidiert war) werden hohe Reinigungsgrade – was die kritischen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einschlüsse betrifft – generiert. Dies ist u.a. mit der Blasenentwicklung zur Flotation und Vergrößerung begründet, andererseits folgt auch eine chemische Umwandlung der Einschlüsse in silikathaltigen mit weniger Aluminiumoxid; diese chemische Umwandlung führt auch zu einer Änderung deren Morphologie und Härte; es werden mehr runde Einschlussgeometrien begleitet von einer geringeren generiert. Allerdings beim Kippen der Schmelze im SGS durch einen weiteren Filter mit einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht (Durchströmung durch einen nicht reaktiven Filter, um die vergrößerten Einschlüsse zu reduzieren) werden alle Einschlüsse, die sich auch auf der Stahlschmelzeoberfläche befinden, durch den durchströmten Filter geführt. Damit wird die Reinigungseffizienz am Beispiel dieser Stahlgussimulator-Gießreihe deutlich herabgesetzt. In der Realität wird nicht der Tiegel oder die Pfanne gekippt, es werden in der Regel die Stopfen angehoben und die Schlacke mit den angehafteten Einschlüssen aus der Behandlung mit dem reaktiven, kohlenstoffhaltigen Filter entfernt. In der Abb. 10 sieht man die Chemie der Einschlüsse und deren Härte aus dem Versuch im Stahlgussimulator mit Kippen der Schmelze (nach einer Behandlung mit einem reaktiven Filter mit einer kohlenstoffhaltigen Calciumaluminat Funktionsschicht) durch einen aktiven Filter.

Bei weiteren kombinierten Versuchsreihen wurden folgende Reinigungsbehandlungen angestrebt:

- a) Tauchen für 10 sec nur von prismatischen, reaktiven, kohlenstoffhaltigen Filterfingern mit

Funktionalbeschichtungen

- b) Tauchen für 10 sec von prismatischen, reaktiven kohlenstoffhaltigen Filterfingern mit Funktionalbeschichtungen, anschließend Durchströmung durch einen aktiven kohlenstoffgebundenen Filter komplett mit  $Al_2O_3$  flammgespritzt
- c) Tauchen für 10 sec von prismatischen, reaktiven kohlenstoffhaltigen Filterfingern mit Funktionalbeschichtungen, anschließend Durchströmung durch einen Kombi-Filter, oberhalb kohlenstoffgebunden – reaktive Wirkung, unterhalb mit  $Al_2O_3$  flammgespritzt nur aktive Wirkung
- d) Tauchen für 10 sec von prismatischen, reaktiven kohlenstoffhaltigen Filterfingern mit Funktionalbeschichtungen, gesinterte reine Aluminiumoxid - Filterkollektoren auf der Stahloberfläche (anstatt einer Abdeckschlacke, um Korrosionsvorgänge mit dem Feuerfestiegel vorzubeugen) und anschließend Durchströmung durch einen aktiven kohlenstoffgebundenen Filter komplett mit  $Al_2O_3$  flammgespritzt (die dichteren flammgespritzten  $Al_2O_3$ -Schichten unterbinden stark den Gasaustausch zwischen Filter und Stahlschmelze, in der Regel keine Blasenentwicklung).

Beim Vergleich dieser Versuchsreihen erkennt man die positive Wirkung der reaktiven und der kombinierten Reinigungsbehandlung  $I_{CA}$  und  $I_{CA\_cov}$  (Abb. 11). Insbesondere die  $I_{CA\_cov}$  führt zur Reduzierung der Anzahl der kritischen  $Al_2O_3$ -Einschlüsse und zur gesamten Einschlussanzahl bei leicht kleinerer Einschlussflächen; die in situ gebildeten, silikathaltigen Einschlüsse werden von den  $Al_2O_3$ -Kollektorfiltern an der Stahloberfläche entfernt. Die ist eindeutig aus dem Vergleich mit dem Versuch  $I_{CA}$  ohne  $Al_2O_3$ -Kollektorfilter zu entnehmen, der klar zu den geringsten  $Al_2O_3$ -Einschlüssen führt, allerdings durch deren chemischen Modifizierung zu einer erhöhten Anzahl an unkritischeren, silikathaltigen beiträgt. Die Kombination  $I_{CA\_cov}$  führt sogar zu besseren Ergebnissen im Vergleich zu dem durchströmten aktiven bzw. durch den durchströmten reaktiven und aktiven Kombi-Filter. Diese Ergebnisse sind für die Reinigungsbehandlung von eisenhaltigen Metallschmelzen von großer Relevanz und unterstreichen nicht nur die richtige chemische Auswahl des Filtermaterials aber auch die richtige Positionierung der Filtereinheiten, allein oder in Kombination mit aktiven Filterkollektoren oder Abdeckschlacken. Dabei ändern auch die Filterkollektoren sowohl die Chemie als auch durch deren thermischen Isolationswirkung auf die Stahlschmelze die Morphologie der Einschlüsse.

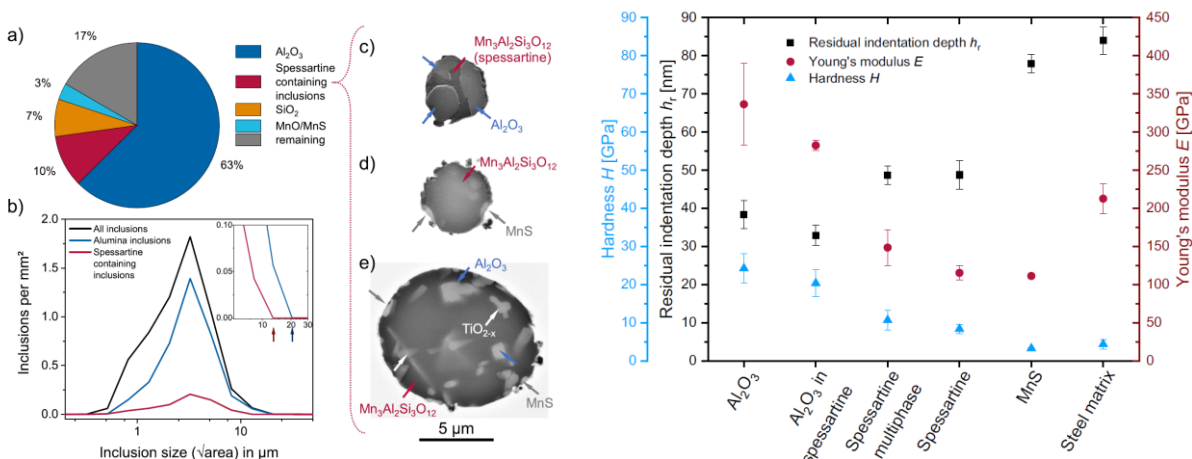


Abb. 10: Verteilungen und Mikrostruktur von Einschlüssen nach den Reinigungsbehandlungen, silikathaltige Einschlüsse, Härte der Einschlüsse als Funktion der Chemie, TP C04, reprinted from [Wag22] © 2022 with permission from Elsevier.

Versuch	Einschlussanzahl pro cm <sup>2</sup>				Morphologie (Q <sub>90</sub> Alumina)		
	Alumina	Multi-phase	Andere	Summe	D <sub>max</sub> (µm)	Fläche (µm <sup>2</sup> )	Aspektverhältnis
I <sub>CA-F<sub>A</sub></sub>	306	99	49	454	14,5	64,2	5,2
I <sub>NM-F<sub>A</sub></sub>	425	0	46	471	13,3	50,3	5,3
I <sub>O-F<sub>A</sub></sub>	262	0	55	317	8,9	30,9	3,8
I <sub>O-F<sub>S</sub></sub>	283	0	46	329	8,7	27,9	3,8
I <sub>O-F<sub>0</sub></sub>	385	0	38	423	8,1	24,0	3,5
I <sub>CA</sub>	161	601	51	813	8,7	24,2	4,2
I <sub>CA-cov</sub>	254	0	34	288	9,1	21,6	7,3
I <sub>NM-cov</sub>	412	0	35	447	9,8	23,1	7,2
I <sub>O-cov</sub>	462	0	44	506	9,4	20,1	8,1

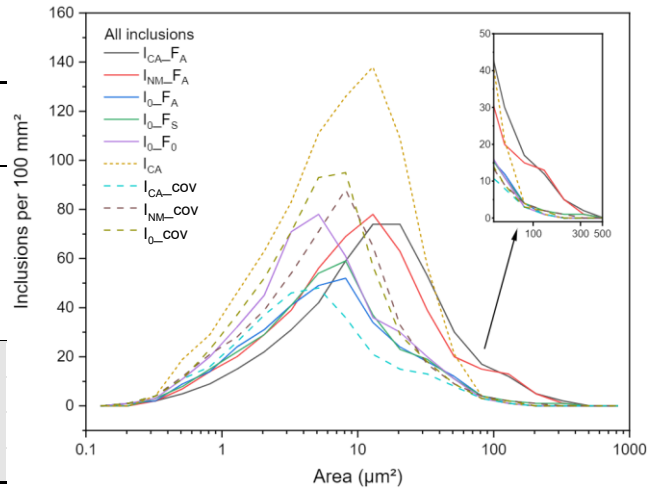


Abb. 11: I<sub>CA</sub> kohlenstoffgebundener, prismatischer, reaktiver Filterfinger mit kohlenstoffgebundener Calciumaluminat-Funktionalschicht, I<sub>NM</sub> kohlenstoffgebundener, prismatischer, reaktiver Filterfinger mit kohlenstoffgebundener-Funktionalschicht auf Basis u.a. von Nanoröhrchen, I<sub>O</sub> kein prismatischer Filterfinger, „cov“ gesinterte Aluminiumoxidfilter auf der Stahlschmelzeoberfläche, F<sub>A</sub> mit Aluminiumoxid flammgespritzter aktiver Durchströmungsfiler, F<sub>S</sub> Kombi-Durchströmungsfiler, oberhalb kohlenstoffgebunden – reaktive Wirkung, unterhalb mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> flammgespritzt nur aktive Wirkung; Aspektverhältnis Länge zu Breite, „Alumina“ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Einschlüsse, „Multiphase“ mangansilikathaltige Einschlüsse, „Andere“ u.a. Mg-, S- oder Ca-haltige, Kooperation TP C01 und TP C04, Tabelle links „Einschlussanzahl pro cm<sup>3</sup>“ translated from [Sto23] © 2023 with permission from Elsevier.

#### 4.2.2 „Aluminiumschmelze-Filtration“

##### Beiträge des effektiven Benetzungswinkels und der Adhäsionskraft

Für den Bereich Aluminium sind Versuchsreihen bei den Mitgliedern des Industriebeirates Fa. Constellium bzw. Fa. Hydro zielführend, da bei beiden über eine doppelte LiMCA – Messung die Möglichkeit besteht, die Filtrationseffizienz von unterschiedlichen Filterwerkstoffen mit unterschiedlicher Rauigkeit aber bei ähnlichen Porositäten und Makroporengrößen (+/- 3 %) in situ zu erfassen, TP A02, TP S01, TP S03. Spezielle Schmelzen aus einer Mischung mit Einschlüssen aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>/SiC werden vorsynthetisiert, um eine Selektivität im Sinne der aktiven Filtration zu untersuchen. Wegen der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit wurden Gießzeiten zwischen 46 und 70 min am Beispiel der speziellen 30 ppi Schaumkeramikgeometrie realisiert. Im Rahmen dieser Versuchsreihen ist es erstmals gelungen, den Beitrag des effektiven Benetzungswinkels (Chemie und Rauigkeit der funktionalen Filterschicht) zur Filtrationseffizienz von feinen Einschlüssen kleiner 110 µm zu korrelieren bzw. aus der Zusammenarbeit der TP B01, B04 und A02 den Beitrag der Adhäsionskraft (ermittelt bei RT in einem AFM) auf die Entfernung von größeren Partikeln zu identifizieren, Abb.12.

Die Mullitbeschichtung führt u.a. wegen ihrer höchsten Rauigkeit zur größten Filtrationseffizienz von Einschlussgrößen kleiner 110 µm, allerdings zeigt die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung die größte Effizienz für Partikel größer 110 µm. Diese Beiträge waren erst nach der Erfassung der Benetzungswinkel bei der Anwendungstemperatur von ca. 730 °C im Gießerei-Institut an der TU Krakau bei Frau Prof. Natalia Sobczak möglich, da über die spezielle Dosierungsvorrichtung an der Sessile Drop – Apparatur die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht des Al-Tropfens zurückgehalten wird (es sind keine größeren Temperaturen für die Zerstörung der Schicht nötig). Bei 730 °C Testtemperatur in der Pilotgießanlage zeigt nur die TiO<sub>2</sub>-Beschichtung mit der in situ Bildung von Al<sub>2</sub>Na<sub>2</sub>Ti<sub>6</sub>O<sub>16</sub> (TP A06) eine Reaktion mit der Aluminiumschmelze. Die LiMCA Ergebnisse wurden anhand der Identifizierung von abgeschiedenen Einschlüssen auf den funktionalen Schichten mittels REM/EDX-Aufnahmen unterstützt. Auf allen funktionalen Filteroberflächen wurden amorphe Schichten auf der Basis Mg, Na und C identifiziert, die allerdings als Kondensationsprodukte aus der Gasphase (nach dem Beenden des Filtrationsversuches) einzustufen sind.

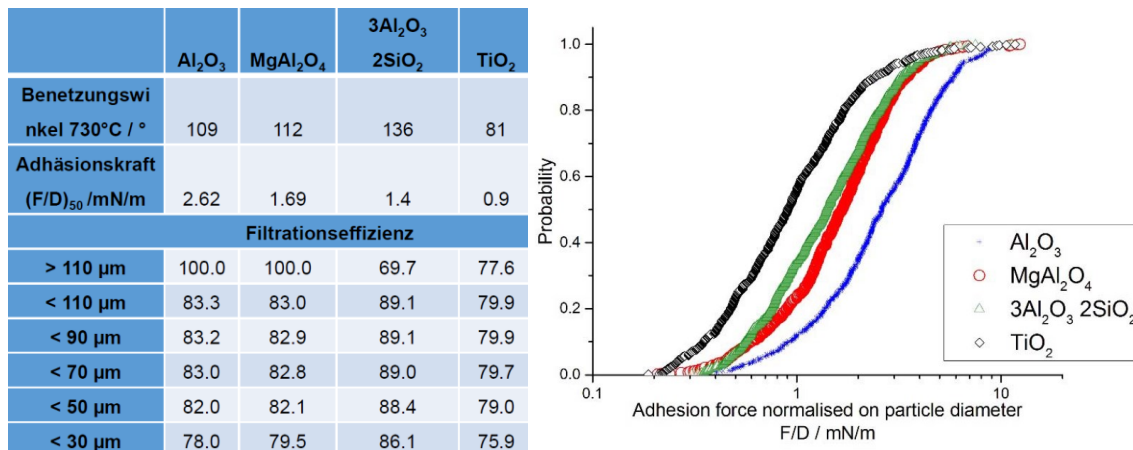


Abb. 12: Links Benetzungswinkel in Kontakt mit Al-Schmelze der funktionalen Schichten ermittelt in Kooperation mit dem Gießereinstitut in Krakau (TP A02/C06); links und rechts Adhäsionskräfte bei RT mittels AFM (TP B01), Filtrationseffizienz (TP A01/S03) mittels doppelter LiMCA der Fa. Constellium, (Tabelle links „Filtrationseffizienz“ translated from [Voi18] und Diagramm rechts reprinted from [Voi18] © 2018 with permission from Elsevier).

### Filtrationsbeiträge zur Reduzierung von Eisen

Die Ausbildung von primär erstarrenden, Fe-haltigen intermetallischen Phasen wurde an sekundären Al<sub>7.1</sub>Si<sub>1.5</sub>(Fe,M)- und Al<sub>7.1</sub>Si<sub>1.5</sub>Fe+M-Legierungen mit M=(Cr, Mn, Mg) untersucht. Die Al-Si-Schmelzen wurden gezielt bei Temperaturen kurz oberhalb der Liquidustemperatur von Aluminium durch die Zugabe von Cr und Mn konditioniert oder kontinuierlich aus der Schmelze mit verschiedenen Abkühlgeschwindigkeiten erstarrt. Während Letzteres zur Bildung primärer, Fe-haltiger intermetallischer Phasen mit dendritischer Morphologie führt, bewirkt ersteres die Bildung großer, kompakter intermetallischer Phasen. Für die Abbindung des Fe sind die α-(Al,Si)<sub>21</sub>(Fe,Mn)<sub>5</sub>-Phase bzw. die (Al,Si)<sub>21</sub>(Fe,Cr)<sub>5</sub>-Phase verantwortlich. Der Zusatz von Mn oder Cr erhöht die potentielle Fe-Entfernungseffizienz von 41 % auf max. 67 %. Aus der Kooperation mit TP S03 wurde der Effekt von Cr- und Mn-Zugabe sowie verschiedener Haltezeiten während der Konditionierung auf die Bildung von primärer, Fe-haltiger Intermetallik in sekundären, technischen Al-Si-Mg-Cu-Legierungen untersucht. Der Fe-Gehalt konnte durch Filtration, zusätzlich zur Reduktion des Fe-Gehaltes, durch reine Sedimentation, um weitere 40 % gesenkt werden.

### Reaktive Filterschichten zur Reduzierung von Wasserstoff

Im Rahmen des SFB ist es dem TP C06 in Kooperation mit dem TP A02 gelungen, erstmalig die Wirkung von reaktiven, funktionalen Spodumen-Schichten zur Aufnahme von Wasserstoff nachzuweisen. Mit Hilfe einer Auslagerung von kompakten Filtermaterialien in einer wasserstoffhaltigen Formiergasatmosphäre und die darauf folgende SNMS-Analyse wurde der Nachweis wasserstoffhaltiger Reaktionsprodukte bereits bei Temperaturen ab 700 °C erbracht. Mit Hilfe von Keilprobe-Gießversuchen wurde festgestellt, dass sich bei den „ohne Filter“-Gussteilen der überwiegende Teil des frei werdenden Wasserstoffs in den interdendritischen Bereichen der Probenmitte sammelte und zu einer Schwindungsporosität führte. Dabei wurde bereits durch die Beruhigung der Schmelze während des Durchfließens eines Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Filters genügend Wasserstoff ausgeschieden, sodass sich hier überwiegend große kreisrunde Gasporen entwickelten. Gleichzeitig verringerte sich der Anteil der Schwindungsporosität und die Maßhaltigkeit verbesserte sich merklich, obwohl sich insgesamt das Porenvolumen nicht verringerte. Eine deutliche Reduzierung des Porenvolumens konnte erst durch den Einsatz eines spodumenhaltigen Filters erreicht werden. Dabei verringerte sich nicht nur die Porenanzahl auf 42 ± 6 %, bezogen auf die ohne Filter abgegossenen Gussteile, auch die Porenfläche (hier stellvertretend für das Porenvolumen) halbierte sich nahezu im Vergleich zu den ohne Filter abgegossenen Proben. Ebenso wurde eine weitere Verbesserung der Maßhaltigkeit erreicht.

### **4.2.3 „Magnesiumschmelzefiltration“**

Aus der Kooperation TP A01 und TP C06 und im Rahmen der Dissertation von Frau Schramm wurden für die Reinigung von Magnesiumschmelzen erstmalig kohlenstoffgebundene Filter mit funktionalen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C und MgAlON Beschichtungen eingesetzt, als Fingerfilter bzw. als

Durchflussfilter. Von großer Bedeutung ist das neu synthetisierte bei 1500 °C in Stickstoffatmosphäre MgAlON-Filtermaterial auf der Basis eines Reaktionsbrandes aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , AlN und MgO. MgAlON weist den größten Benetzungswinkel von 150 °C für mindestens 10 min in Kontakt mit der Mg-Legierung AZ91 bei 680 °C unter Ar-Atmosphäre, gefolgt von MgO bei 140 °C. In der Abb. 13 wird beispielhaft die Reduzierung von oxidischen Einschlüssen bzw. von intermetallischen Phasen mit Fe beim Einsatz der neuartigen Filterzusammensetzungen und speziell von MgAlON und  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ -Beschichtungen bei Durchflussversuchen unter Ar + 0.2 Vol%  $\text{SF}_6$  Atmosphäre. Auf Basis dieser sehr erfolgreichen Ergebnisse sind weitere Versuche mit Mitgliedern des Industriebeirates geplant.

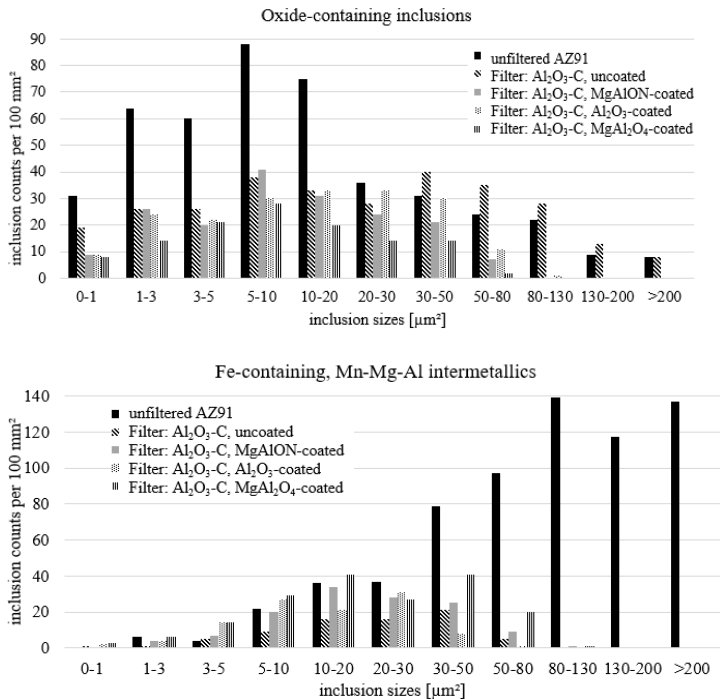


Abb. 13: Ergebnisse auf der Basis von ASPEX-Analysen nach der Filtration von AZ91, [Sch23] © 2023 mit Genehmigung von A. Schramm.

#### 4.2.4 Beiträge der Simulation

Im Projektbereich B wird den Anspruch erhoben, durch die physikalische und modellunterstützte Darstellung von interaktiven Wirkungsmechanismen in unterschiedlichen Skalenbereichen (Abb. 14) und einer darauf aufbauenden durchgängigen Simulation zum grundlegenden Verständnis der Wirkweise der Reinigungsmechanismen (Filtration und Flotation) in Abhängigkeit von Filterstruktur, -prozess und -system beizutragen. Hierfür werden auf Basis experimenteller Arbeiten Modelle der Abscheidung (TP B01), Agglomeration (TP B04), effektiven Wärmeleitung und Diffusionskoeffizienten von gelösten Gasen (TP B03) in Schmelzen weiter bzw. neu erforscht.

Mit Hilfe von Phasenfeldsimulationen werden erstmalig die in situ Schichtbildungen u.a. mit Schwerpunkt deren Porositätsänderung als Funktion der Zeit betrachtet (TP B05). Im Mittelpunkt steht das Verständnis der Mikroprozesse der Abscheidung von Partikeln, also Einschlüssen an der aktiven und reaktiven inneren Oberfläche des Funktionshohlraums unter der Wirkung von Gasblasen bzw. die Entfernung von Einschlüssen an angehafteten Gasblasen oder Aktivierung von eigenen Nanoblasen an ihrer Oberfläche (TP B06), die zur Agglomeration bzw. auch zur Flotation beitragen (TP B04, TP B06, TP B02). Darüber hinaus werden funktionalisierte Filtersysteme für kontinuierliche Gießprozesse modellhaft erforscht, TP B06. Die prozesstechnischen Arbeiten werden durch mikro-mechanische, kontinuumsmechanische und schädigungsmechanische Aspekte des Filterwerkstoffverhaltens ergänzt (TP B05). Dieser Projektbereich wird als Voraussetzung für das zielgerichtete geometrische und materialtechnische Design von Filterstrukturen sowie für die Bewertung des Werkstoffverhaltens unter realen Einsatzbedingungen angesehen.

Zur Modellierung der Strömung kommt dabei die Lattice-Boltzmann Methode zum Einsatz, welche Lösungen der Kontinuitäts- und Impulserhaltungsgleichung liefert. Der Beitrag der CO-Blasen steht im Fokus des gesamten Modellierungsbereichs B. Deren Wirkung wird auch bei der Ermittlung der



Haftungskraft der nichtmetallischen Einschlüsse mitberücksichtigt. Die Haftungskraft der nichtmetallischen Einschlüsse an der Filterwand setzt sich aus van-der-Waals-, kapillaren und „metallophoben“ Wechselwirkungen zusammen. Die kapillaren Haftkräfte werden durch gasgefüllte Kapillarbrücken zwischen Partikel und Abscheider bewirkt und können nur im Falle großer Randwinkel existieren.

Mit Hilfe der experimentellen Erfassung der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus der Zusammenarbeit der TP B03 und S03 konnte der Eindringvorgang von Aluminiumschmelzen realitätsnah abgebildet werden bzw. führte die Implementierung und Auswertung der unterschiedlichen Strömungsmodelle (TP B02, TP B06), der modellunterstützten Konstruktionsvorschläge aus den thermomechanischen Beanspruchungsszenarien (TP B05) begleitet von Agglomerationserscheinungen in der funktionalen Filterporosität, Anhaftung von Einschlüssen als Funktion unterschiedlicher Benetzungswinkel und Adhäsionskräften (TP B01 und TP B04) zu einer gradierten Kombi-Filter-Strukturauslegung. Diese Kombi-Filterstruktur besteht aus drei Sektionen a) der Beschleunigung und Blasenbildung, b) der Relaxation und Agglomeration und c) der Filtration, Abb. 15. Solche Hinweise wurden in ersten „gradierten“ Kombi-Filterstrukturen umgesetzt (TP A01), u.a. Fasern mittels Electrospinning (Mercator-Professur, Prof. Paolo Colombo) / oder flammgespritzten Schichten (TP A01) in der mittleren Sektion von zusammengefügt, kohlenstoffgebundenen Substraten bzw. mit weiteren aufgetragenen Schichten auf Aluminiumoxidbasis auf der Eintrittsseite bzw. flammgespritzt auf der Austrittsseite, Abb. 15. Das übergreifende Ziel der Modellierung im TP B02 ist weiterhin, die Filtrationsmodelle bzw. -prozesse (Wärme- und Stofftransport TP B03, Agglomeration TP B04, Benetzung/Haftung TP B01, TP B06 Abscheidungswirkungsmechanismen, TP B05 Randbedingungen gegeben durch die thermomechanische Beanspruchung) in die Simulationsrechnung zu integrieren. Die Komplexität der integrierten Modelle wächst kontinuierlich, wodurch weitere wichtige Teilprozesse des Filtrationsvorgangs aufgelöst werden können. Die Daten werden darüber hinaus aufbereitet, stark komprimiert (Big Data, TP S02) und in einer 4D-Visualisierung (3D als Funktion der Zeit, TP S02) in einer CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) dargestellt, was erheblich zum Verständnis des hierarchischen aktiven und insbesondere reaktiven Filtrationsablaufs beiträgt.

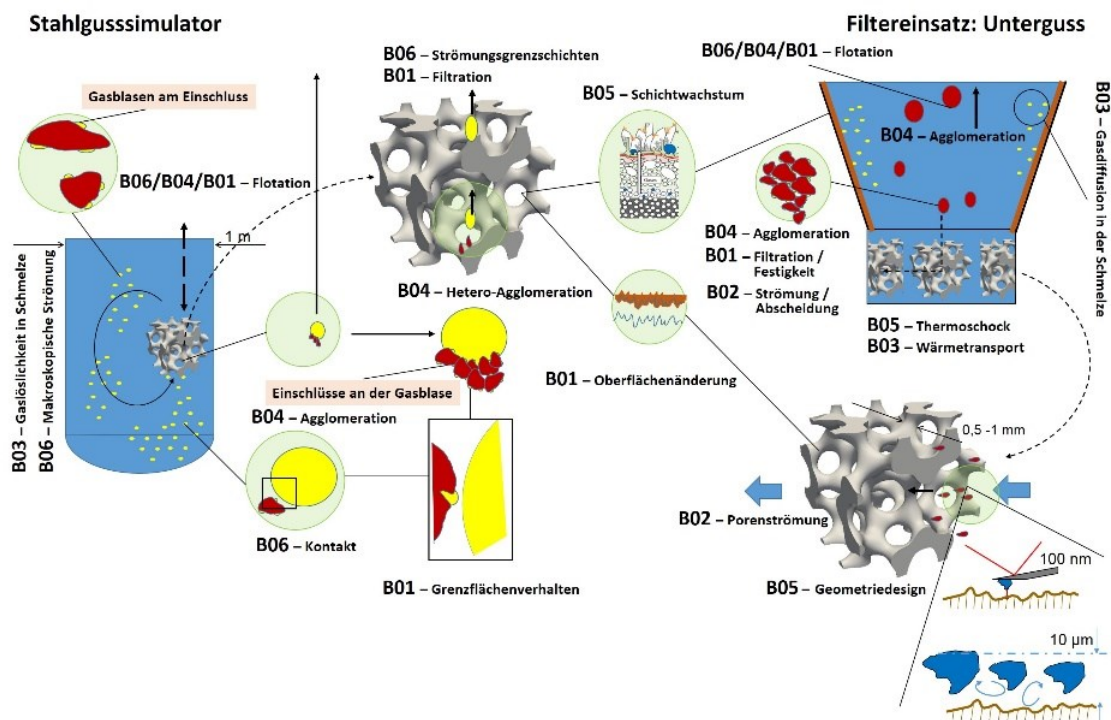


Abb. 14: Modellierungsansätze im Projektbereich B von der Mikroskala bis zur Makroskala – links: Reinigung im Tiegel des Stahlgussimulators mit Hilfe reaktiver Filter, makroskopische Anströmung/Flotation (B06/B04/B01), Hetero-Agglomeration (B04/B01) mit Gasblasen (B03) sowie reaktives Schichtenwachstum (B05); rechts: Abscheidung (B01) von Agglomeraten (B04/B01) im Gusskanal im thermisch (B03) und thermisch-mechanisch (B05) belasteten durchströmten Filter (B02) – Veränderung der Filteroberfläche durch Schichtenwachstum aus der Schmelze (B05) mit Rückwirkung auf geometrischen (B05), Strömungs- (B02) und Haftungseigenschaften (B01).

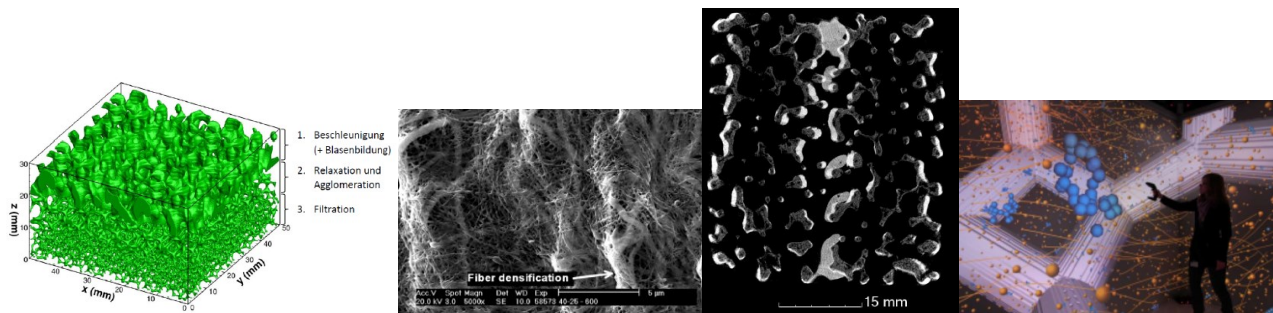


Abb. 15: Links computerunterstützte Filtersystemauslegung (TP B02), Mitte links verkochte Magnesiumborat Faser mittels Electrospinning (TP A01, Mercator-Professur/Prof. Paolo Colombo) reprinted from [Sto16] © 2016 with permission from Elsevier, Mitte rechts Hybridfilterauslegung (TP A01/S01) [Ane20], rechts Visualisierung des Filtrationsprozesses, CAVE (S02).

#### 4.2.5 Harz- und pechfreies Bindemittel für umweltfreundliche, reaktive Filter

In der zweiten Förderperiode wurden erfolgreich Oberflächenstrukturierungen mittels Electrospinning, Elektrophorese, Nanozusätzen bzw. Freeze-Casting auf kohlenstoffhaltigen als auch auf oxidischen Filtersubstraten mit unterschiedlichen Eindringtiefen bzw. Bildung von Oberflächenbeschaffenheiten mit Kapillaren, Aufwölbungen vorgenommen, Abb. 16. Dabei wurde festgestellt, dass die Art des Flammgespritzens selbst (Stab, Schnur oder Pulver) bzw. der Kohlenstoffhabitus (Zugabe von Carbores P oder Graphit) zu einer Erhöhung des Benetzungswinkels beitragen können. Im Sinne der kohlenstoffgebundenen funktionalen Filterwerkstoffe wurde erfolgreich ein neues, harz- und pechfreies, 100 % umweltfreundliches Bindemittelsystem auf Basis Tannin-Laktose für Filterstrukturen erforscht, welches erste Filter-Fingertestversuche erfolgreich überstanden hat. Darüber hinaus konnten mit dem Humboldt-Stipendiaten Dr. Ondrej Jankovský aus Prag (VŠCHT Praha) erste Filter mit Graphenoxid mit oder ohne CNT beschichtet und thermisch wärmebehandelt werden. Die Kombination von Graphenoxid mit CNT führte bei höheren Temperaturen in Kontakt mit Stahlschmelze im Erhitzungsmikroskop zu einer geringeren Benetzbarkeit.

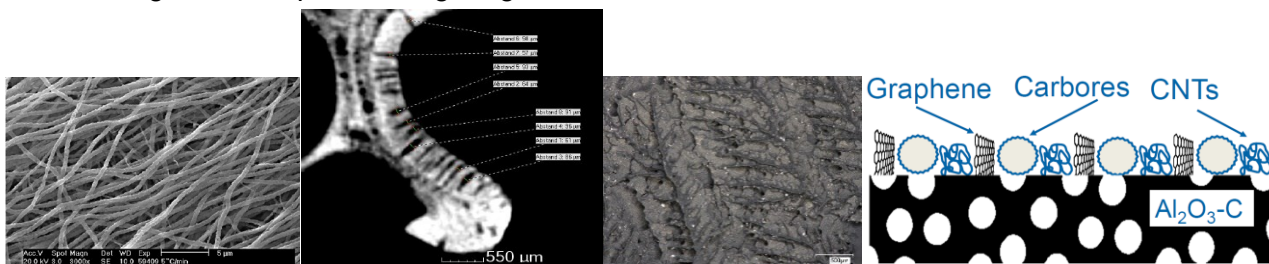


Abb. 16: Oberflächenfunktionalisierung, links Electrospinning (reprinted from [Sto18b] © 2018 with permission from Elsevier), Mitte links Elektrophorese ([Mor19], [Die18] mit Genehmigung von C. Dietze), Mitte rechts Freeze Casting, rechts schematische Oberflächenstrukturierung u.a. mit Graphenoxid und CNT [Jan18].

#### 4.2.6 Generatives Hybrid-Flammgespritzverfahren

Von großer Bedeutung für die Gestaltungsfreiheit von funktionalen Filterkörpern in Anlehnung an die Modellierung ist das in Freiberg entwickelte **Generative Hybrid-Flammgespritzverfahren**. Wasserlösliche Kerne auf Basis Zucker, Salz oder Polyvinylalkohol (PVA) werden mit Laserdrucken zu 3D-Skelettstrukturen verarbeitet (Abb. 17 links) und anschließend mit oder ohne weitere kalt aufgebraute Schutzschichten mittels Flammgespritzern zu Filtern überführt. Nach dem Wasserlösen des Kerns und der Trocknung können die oxidischen, kohlenstofffreien funktionalen Filtersysteme mit hervorragender Thermoschockbeständigkeit eingesetzt werden; diese Prozesstechnologie ermöglicht auch die Großbauteil-Filterfertigung, da nur sehr geringe, lokale Eigenspannungen generiert werden. Diese 3D-Herstellung wird durch die computergesteuerte Fertigung von Kohlenstoff-, SiC- oder Oxid-Spaghetti-Strukturen mittels der Alginate route unterstützt, Abb. 17 rechts.

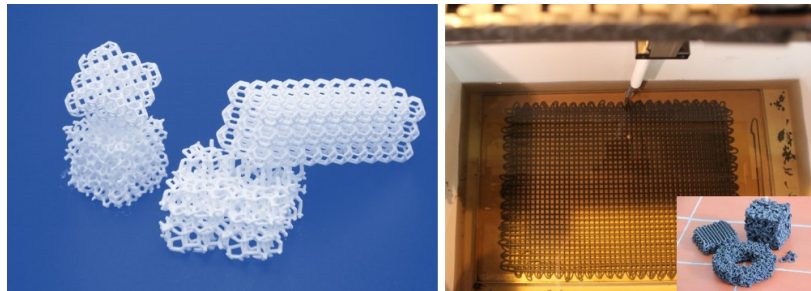


Abb. 17: Links generatives Hybridflammspritzen [Ane20, Her19, Wet22], computerunterstützte Strukturfertigung mittels der Alginatrouten [Ane17, Wet20].

#### 4.2.7 Transferprojekte

Die fünf abgeschlossenen Transferprojekte und die drei weiterlaufenden Transferprojekte bereichern durch den intensiven, wechselseitigen Know-How-Transfer der Doktoranden als auch der Mitglieder des Industriebeirates den SFB 920. Am Beispiel des T01 Transferprojektes mit der Fa. ThyssenKrupp Steel Europe AG werden neuartige, wechselbare Filtersysteme auf Basis der Erkenntnisse aus den TP A01 und B06 in einer Verteilerrinne beim kontinuierlichen Stranggießen von aluminiumberuhigten Weißbandgütern hinsichtlich ihrem Beitrag und ihrer Funktionalität zur Entfernung von nichtmetallischen Einschlüssen aus der Schmelze erforscht. In der Abb. 18 wird der Vorversuch im Stahlgussimulator ca. 12 min und ein Filterkörper nach dem Einsatz für 45 min in einem 86 t Verteiler gezeigt. In beiden Fällen werden in situ Schichten und Abscheidung von Einschlüssen an den Oberflächen registriert. Der im Verteiler eingesetzte Filter fungiert – solange Kohlenstoff im Filter vorhanden ist und die Oberfläche porös ist – überwiegend als reaktiver Filterkörper (in situ Schichtbildung, Gasblasenentwicklung / Flotation, Abscheidung von Einschlüssen auf den in situ gebildeten Schichten) und anschließend überwiegend als aktiver (Abscheidung von Einschlüssen) Filterkörper mit progressiver Sinterung der keramischen Schichten mit den abgeschiedenen Einschlüssen bzw. chemische Wechselwirkung mit den Legierungselementen des Stahlschmelze, Abb. 18 rechts. Am Institut für Mechanik und Fluidodynamik werden mit Hilfe von numerischen Simulationen die Wechselwirkungen zwischen Filterstrukturen und der Schmelzeströmung, die Entwicklung endogener Einschlussteilchenpopulationen in der Strömung sowie die Einschlussabscheidung an den Filteroberflächen erforscht.

Basierend auf den Erkenntnissen des TP C04 des SFB 920 wird im Rahmen von T02 das Ziel verfolgt, Stahlkolbenlegierungen hinsichtlich ihrer zyklischen Eigenschaften im praxisrelevanten Temperaturbereich zwischen 200 °C und 500 °C bis in den Bereich von  $10^9$  Lastwechseln zu untersuchen. Im Fokus stehen dabei insbesondere die Einflüsse von Herstellungsbedingungen (Guss-, Knetwerkstoff), chemischer Zusammensetzung, Gefüge und Defekten (Poren, Mikrolunker, nichtmetallische Einschlüsse) auf die Ermüdungslebensdauer der Stahlkolbenlegierungen. Einen besonderen Schwerpunkt stellen dabei die Untersuchungen zur kritischen Defektgröße und zur Schadensakkumulation bei der Langzeitermüdung dar. Die zu erwartenden Ergebnisse können einen Beitrag zur Aufklärung der ablaufenden Schädigungsmechanismen im Stahlkolben bei erhöhten Temperaturen leisten und somit zum Design veränderter Kolbengeometrien beitragen. Die Untersuchungen werden sowohl an der aktuell in PKW-Dieselmotoren zum Einsatz kommenden Stahllegierung 42CrMo4 als auch der LKW-Diesel Stahlkolbenlegierung 38MnVS6 durchgeführt.

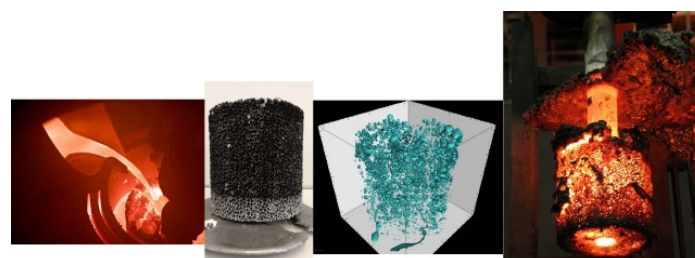


Abb. 18: Links großformatige Filter als wechselbare Filter für das Stahlstranggießen [AEM17] © 2017 Wiley, Mitte links reprinted form [Wet18a] © 2018 with permission from Elsevier, Mitte rechts CT-Aufnahmen nach der Beanspruchung im Stahlgussimulator [Wet18a], rechts großformatiger Filter nach dem Einsatz (45 min, ein Pfannenwechsel einer 400 t Stahlpfanne) in einem 86 t Verteiler [AEM20] © 2020 Wiley, [Wet18b].

#### 4.2.8 Zusammenfassende Bemerkungen

Mit einer Filteroberfläche auf Basis aktiver, kohlenstofffreier, keramischer Beschichtungen (mit ähnlicher Chemie wie die der Einschlüsse) und in Kombination mit maßgeschneiderten Druckverhältnissen in den porösen Funktionshöhlräumen der Filter wird durch Oberflächenstrukturierung (Erhöhung des Benetzungswinkels) angestrebt, die Abscheidung der Einschlüsse an der Filteroberfläche erheblich zu verbessern. Dieser Beitrag ist sowohl für Stahl- als auch für die Aluminium- und Magnesiumschmelzen signifikant. Einen essentiellen Beitrag leisten reaktive, kohlenstoffhaltige Filteroberflächen, die erst in Kontakt mit den Metallschmelzen reagieren, gasförmige Produkte generieren und mit den in den Schmelzen gelösten Gasen oder Legierungselementen

- a) zu in situ Schichtbildungen auf den Filtern mit eingebetteten oder abgeschiedenen endogenen Einschlüssen beitragen bzw.
- b) Gasblasen generieren – überwiegend CO-Blasen –, die eine Art Flotation von Einschlüssen ermöglichen und damit erstmalig in kürzester Behandlungszeit von ca. 10 sec eine Reduzierung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einschlüssen bis nahe 100 % realisieren. Dieser Reinigungsbeitrag wurde in der dritten Förderperiode schwerpunktmäßig mit Hilfe der sehr reaktiven, oxidischen Füllstoffe auf Calciumaluminatbasis hinsichtlich der Reaktionskinetik bei der Entfernung von Einschlüssen in noch kürzeren Zeiten als auch deren Beitrag zur Vergrößerung von Einschlüssen qualitativ und quantitativ erforscht.

Diese Art Reinigung der Schmelze kann nur dann erfolgreich umgesetzt werden, wenn geeignete Strömungsbedingungen zur Abfuhr der beladenen Blasen in Richtung Schmelzoberfläche zur Verfügung stehen bzw. Schlacken oder Filterkollektoren zur Abführung dieser Einschlüsse an der Stahlschmelzoberfläche vorgesehen sind. Damit entfaltet sich eine neue Art Betrachtung von Filtersystemen - Kombination von unterschiedlichen Wirkungsmechanismen mit Hilfe von Filtersystemen an unterschiedlichen Stellen der Prozess-Metallurgie mit bahnbrechendem Potential zur Reinigung der Metallschmelzen am Beispiel a) Formguss von kleinen und größeren Schmelzen (Gießzeiten bis ca. 30 sec), b) Unterguss (bis ca. 45 min) und c) kontinuierlichem Strangguss mit wechselbaren Filtereinheiten (über 45 min) oder fest angebrachten, flammgespritzten Filtereinheiten.

Zur Erreichung der Ziele des erkenntnisgetriebenen funktionalen Oberflächendesigns als auch die Erforschung und Entwicklung der umweltfreundlichen Filterstrukturen sind wesentliche Informationen erforderlich, die nur über die Modellierung erzielbar sind:

- Berechnung thermochemischer Daten für hydrolysierbare und kondensierte Tannine als Benchmark der neuartigen FLO-SIC-Methode im Vergleich zur Standard-Dichtefunktionaltheorie (TP A04)
- XRD Simulation von kohlenstoffhaltigen Strukturen (TP A05)
- Thermodynamische Beschreibung der mehrphasigen Schichten mit oder ohne Kohlenstoff mit CALPHAD (TP A03)
- Thermodynamische Beschreibung von carbothermischen Reaktionen (TP A03, A04)
- Phasenfeldanalyse mit Schwerpunkt der Porositätsänderung von in situ gebildeten Schichten am reaktiven Filter, Zeitpunkt/Übergang von reaktiven zu überwiegend aktiven Filtrationsbeiträgen (TP B05)
- MD-Simulation zur Gewinnung von Eingangsparametern für die mesoskopische Simulation der Agglomeration (TP B04)
- Thermodynamische Beschreibung der Wechselwirkung Metallschmelze-Filterkeramik (TP A05, A06, A04)
- Analyse der Partikelbewegung und -agglomeration (TP B04)
- Strömungs- und Partikel-Abscheidungssimulation (TP B02, B03, B04, B06)
- Kontinuumsmechanische Modellierung von viskoplastischen Vorgängen in kohlenstoffhaltigen Filterstrukturen und Thermoschock (TP B05, C02, C03)

Insbesondere der Einsatz moderner in situ Methoden, bei denen Grenzflächenphänomene direkt bildgebend oder direkt durch Beugungsmethoden oder die Aufnahme der akustischen Emission oder die Aufnahmen von thermischen Signalen zur ortsspezifischen Bestimmung von bruchauslösenden Fehlern im Endprodukt eingesetzt werden, tragen wesentlich zur Aufklärung des Wirkungsmechanismus

und des Beitrags (physikalisch/chemisch und Effizienz im Sinne des Reinheitsgrades der Metallschmelze) der aktiven und/oder reaktiven Filterwerkstoffe bei. In diesem Kontext werden die folgenden Techniken zur Anwendung kommen:

- Konfokales Laser Scanning Mikroskop zur Erforschung von Attraktionskräften und Abscheidungseffizienz von aktiven und reaktiven Filterwerkstoffen unterschiedlicher Rauigkeit in Kontakt mit Metallschmelzen (TP A01)
- Hochtemperatur-Magnetschwebewaage zur Bestimmung von Gaslöslichkeit und Diffusionskoeffizienten von Gasen in Metallschmelzen (TP B03)
- Druckversuche an komplexen Schaum- und Spaghetti-Filtersubstraten mit funktionalen Filterschichten im Computertomographen (TP S01)
- In situ Ramanspektroskopie als Funktion der Temperatur für die umweltfreundlichen, kohlenstoffhaltigen Filterstrukturen (TP A04)
- In situ Beobachtung der Phasenumwandlungen von funktionalen, metastabilen Aluminiumoxidphasen bzw. Rissgenerierung und Haftung an der Grenzfläche Filtersubstrat/funktionale Schicht im atmosphärischen Rasterelektronenmikroskop mit eingebauter Heizbank (TP A01)
- Schallemissionsanalyse zur Identifizierung der Riss-Initiierung von kohlenstoffgebundenen Filterwerkstoffen an der Material-Prüfmaschine mit Vakuum-/Schutzkammer und Induktionsheizung (TP C02)
- Applikation der 3D-Thermographie bei Ermüdungsversuchen der metallischen Proben zur Bestimmung des Ortes des kritischen Einschlusses (TP C04)
- In situ Hochtemperatur XRD-Untersuchungen von aktiven Filterwerkstoffen in Kontakt mit Metallschmelzen (TP A05)

Dabei ergänzen experimentelle Versuche die Modellierung für die Werkstoff-, Mikrostruktur- und Makrogeometrieauswahl:

- Untersuchung der Grenzschichtgenerierung Schmelze/Filterwand und Agglomerationsneigung von Einschlüssen in einer Spark Plasma Sinteranlage (TP A06)
- Kalttiegeschwebeschmelzanlage mit der Methode des kalten Bodens zur Erforschung des Entkupferungsverhaltens (TP C01)
- Kurzzeitversuche im Lichtbogenofen zur Herstellung von Proben aus aktiven Filterwerkstoffen in Kontakt mit metallischen Schmelzen für DTA-, DSC-Analysen (TP A03, TP A07)
- Einsatz der Sekundärneutralteilchenmassenspektrometrie zur Charakterisierung der reaktiven Filteroberflächen für die Aluminium- und Magnesiumschmelze-Filtration (TP C06)
- Bestimmung der Aktivierungsenergien der drei Benetzungsstadien (Benetzungsbeginn, Ausbreitungsstadium, Infiltrations- und Reaktionsstadium) und der Adhäsionsarbeit in einem speziellen Hochtemperatur-Erhitungsmikroskop mit Kippmöglichkeit für eisenhaltige Schmelzen (TP A01)
- Bestimmung des Benetzungswinkels von Aluminiumschmelzen in Kontakt mit aktiven und reaktiven Filtersubstraten in einem speziellen Hochtemperatur-Erhitungsmikroskop mit thermischer Vorkammer (TP C06, Kooperation des TP A02/C06 mit dem Gießerei-Institut in Krakau)
- Automatisches Rasterelektronenmikroskop (ASPEX) zur Erfassung der Anzahl, der Größe und der Chemie der Einschlüsse im Gussstück, (TP C01, A01)
- Erfassung der van-der-Waals-Wechselwirkungen in einer Flüssigkeitszelle eines Raster-Kraft-Mikroskops (Atomic-Force-Microscope /AFM), (TP B01, B04)
- Erfassung von Wechselwirkungs-Haftkräften zwischen „Filteroberfläche“ und „Einschluss“ in einem Hochtemperatur Raster-Kraft-Mikroskop in Aluminiumschmelze (TP B01, B04)
- Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Filterstrukturen (TP B03)
- Erfassung des Elastizitätsmoduls von kohlenstoffhaltigen und oxidhaltigen Filterwerkstoffen als Funktion der Temperatur (bis 1600 °C), (TP C01)
- Untersuchung der mechanischen Hochtemperatur-Eigenschaften von kohlenstoffhaltigen Filterwerkstoffen und -strukturen (bis 1500 °C) in Druck-, 4-Punkt-Biegungs- und Kriechversuchen (TP C02)
- Hochtemperatur-Small-Punch-Test-Einrichtung zur Ermittlung von  $K_{Ic}$  (bis 1000 °C), (TP C03)

- Post mortem-Untersuchungen der eingesetzten Filter in einem Computertomographen (TP S01)
- Quantitative und zeitliche Analyse der Filtrierwirkung unterschiedlicher Filter während des Gießvorganges mit Hilfe eines adaptierten LiMCA- und PREFIL-Systems, (TP S03)
- Statische, zyklische (inkl. Ultra High Cycle Fatigue) und dynamische Prüfung von Gussproben zum Nachweis der Eigenschaftsverbesserung und zur Analyse der schadensrelevanten Einschlüsse/Cluster (TP C04, C05)
- Quantitative Analyse der Partikelverteilung sowie chemische (EDS) bzw. kristallographische (EBSD) Analyse von Einschlüssen im Gussteil, Morphologie von Einschlussclustern durch Tiefenätzen (TP C04)
- Erfassung von Clogging-Phänomenen der aktiven und reaktiven Filterwerkstoffe in einem Metallgussimulator (TP C01)

#### 4.2.9 Management der Forschungsdaten

Die Universität unterstützte die Forschungsarbeiten im SFB durch zusätzliche Bereitstellung von zentralem Speicherplatz als CIFS Share zum Datenaustausch und zur Datensicherung auf Bandlaufwerken durch ein Sicherungs-Script der abgelegten Daten im dafür speziell eingerichteten Archiv-Ordner „Archiv SFB 920“. Hier stehen den Forschern zurzeit 20 TB Speichervolumen zur Verfügung und kann bedarfsgerecht erweitert werden. Damit kommt die TU Bergakademie Freiberg der Forderung zur nachhaltiger Sicherung und Bereitstellung von Forschungsdaten (Primärdaten) als Grundlage für Veröffentlichungen im Sinne der „Regeln guter wissenschaftlichen Praxis“ nach. Den am SFB 920 beteiligten Personen wird ein Austausch- bzw. gemeinsames Arbeitsverzeichnis zum Datenaustausch vom zentralen Dateiserver des Universitätsrechenzentrums bereitgestellt, welches über das Internet benutzt werden kann. Die darin angelegte Ordnerstruktur wurde um einen Archivordner zur Datenspeicherung und -sicherung ergänzt. In diesem Verzeichnis können die Mitarbeiter ihre Arbeitsstände (digitale Daten) selbstständig als Kopie ablegen. Dies erfolgte immer beim Erreichen von Meilensteinen, Abschluss einer Publikation oder bei größeren Änderungen am Datenbestand eines Teilprojektes. Übereinen Sicherungs-Skript werden die Zugriffsberechtigungen der Unterverzeichnisse im Archiv-Ordner gescannt. Ist ein neuer Ordner hinzugekommen, so wird allen zugriffsberechtigten Personen der Schreib-, Änderungs- und Löschzugriff verweigert. Auf diese Weise werden die Arbeitsstände eingefroren und Zugriffsberechtigte besitzen nur noch Leserechte. Somit ist sichergestellt, dass keine Änderungen mehr an den Kopien, die sich im Archivverzeichnis befinden, vorgenommen werden können. Alle auf dem Dateiserver des Rechenzentrums abgelegt Daten werden in regelmäßigen Abständen auf ein anderes Speichermedium gesichert und archiviert, um die Datensicherheit gemäß den gesetzlichen Vorgaben (10 Jahre Aufbewahrung) zu gewährleisten. Die dafür notwendige Hardware wird regelmäßig durch die Hochschule gewartet und erneuert. Dadurch werden alle Daten unkompliziert der gesamten SFB 920 Arbeitsgruppe zur Verfügung gestellt und stehen auch für eine längerfristige Speicherung nach dem Ende des SFB 920 bereit. Es ist nicht vorgesehen, nach Ende des SFB 920 weitere Inhalte in die Datenbank einzupflegen, so dass sich der Datenbestand nach Ende des SFB 920 kaum ändern wird. Der Zugriff ist nur berechtigten Personen möglich und wird über einen Administrator der Universität verwaltet.

#### 4.2.10 Literatur

- AEM17 Front Cover: Multi-Functional Filters for Metal Melt Filtration, Advanced Engineering Materials 9/2017. Special Issue, Vol. 19 Iss. 9 (2017), 1770030, © 2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/adem.201770030>
- AEM20 Cover Picture: Multi-Functional Filters for Metal Melt Filtration, Advanced Engineering Materials, Special Issue, Vol. 22 Iss. 2 (2020), 2070004, © 2020 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/adem.202070004>
- Ane17 Aneziris, C.G., Dudczig, S., Emmel, M., Ode, C., Wetzig, T.: Verfahren zur Herstellung von kohlenstoffhaltigen keramischen Bauteilen. Internationale Patentanmeldung PCT/EP2016/076647, WO2017/077024A1, Anmeldetag: 04.11.2016, Veröffentlichungstag: 11.05.2017, Espacenet, Patent-Scope
- Ane20 Aneziris, C.G., Gehre, P., Storti, E.: Hybrid-Filterssysteme für die Metallschmelzefiltration. Deutsche Patentanmeldung 10 2017 000979.1, Neuanmeldung unter Inanspruchnahme der inneren Priorität der Patentanmeldung Nr. 10 2017 000 979.1, DE 10 2018 201 577 B4, Veröffentlichungstag: 06.02.2020, DPMA, Espacenet

- Die18 Dietze, C.: Erzeugung einer Beschichtung mit kanalartigen Poren auf Plättchen und Schaum-strukturen mittels elektrophoretischer Abscheidung. Diplomarbeit, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2018
- Dit16 Ditscherlein, L., Fritzsche J., Peuker, U.A.: Study of nanobubbles on hydrophilic and hydrophobic alumina surfaces, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 497 (2016), pp. 242–250, © 2016 Elsevier B.V. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.03.011>
- Geh18 Gehre, P., Schmidt, A., Dudczig, S., Hubálková, J., Aneziris, C.G., Child, N., Delaney, I., Rancoule, G., DeBastiani, D.: Interaction of slip- and flame-spray coated carbon-bonded alumina filters with steel melts, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 101 Iss. 7 (2018), pp. 3222-3233, © 2018 The American Ceramic Society. <https://doi.org/10.1111/jace.15431>
- Gle18 Gleinig, J., Weidner, A., Fruhstorfer, J., Aneziris, C., Volkova, O., Biermann, H.: Characterization of nonmetallic inclusions in 18CrNiMo7-6, *Metallurgical and Materials Transaction B*, Vol. 50 Iss. 1 (2018), pp. 337–356. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1431-4>
- Hen17 Henschel, S., Gleinig, J., Lippmann, T., Dudczig, S., Aneziris C.G., Biermann, H., Krüger, L., Weidner, A.: Effect of crucible material for ingot casting on detrimental non-metallic inclusions and the resulting mechanical properties of 18CrNiMo7-6 steel, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 19 Iss. 9 (2017), pp. 1700199 (1-12), © 2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/adem.201700199>
- Her19 Herdering, A., Abendroth, M., Gehre, P., Hubálková, J., Aneziris, C.G.: Additive manufactured polyamide foams with periodic grid as templates for the production of functional coated carbon-bonded alumina foam filters, *Ceramics International*, Vol. 45 Iss. 1 (2019), pp. 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.146>
- Jan18 Jankovský, O., Storti, E., Schmidt, G., Dudczig, S., Sofer, Z., Aneziris, C.G.: Unique wettability phenomenon of carbon-bonded alumina with advanced nanocoating, *Applied Materials Today*, Vol. 13 (2018), pp. 24-31, © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.08.002>
- Mor19 Moritz, K., Dietze, C., Voigt, C., Hubálková, J., Aneziris, C. G.: Porous alumina coatings on carbon-bonded foam filters by electrophoretic deposition, *Ceramic International*, Vol. 45 Iss. 8 (2019), pp. 10701-10706. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.02.141>
- Sal19 Salomon, A.: Untersuchung von mittels Spark-Plasma-Sintertechnologie und unter Ausschluss von Strömungseffekten erzeugten Grenzflächen zwischen Metallschmelzen und Filterkeramik, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2019
- Sal21 Salomon, A., Motylenko, M., Rafaja, D.: Formation of interface layers between corundum-based refractory ceramics with carbon additions and molten 42CrMo4 steel, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 24 Iss. 2 (2022), 2100690, pp. 1-11. © 2021 The Authors. *Advanced Engineering Materials* published by Wiley-VCH GmbH. <https://doi.org/10.1002/adem.202100690> – Open Access (CC BY-NC)
- Sch16 Schmidt, A., Salomon, A., Dudczig, S., Aneziris, C.G., Rafaja, D.: Kinetics of the interactions of carbon-bonded alumina filter in steel contact. 4<sup>th</sup> International Conference on Cellular Materials - CellMat 2016, Dresden, 07.-09. Dezember 2016, Vortrag
- Sch17 Schmidt, A., Salomon, A., Dudczig, S., Berek, H., Rafaja, D., Aneziris, C.G.: Functionalized Carbon-Bonded Filters with an Open Porous Alumina Coating: Impact of Time on Interactions and Steel Cleanliness, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 19 Iss. 9 (2017), pp. 1700170 (1-12). © 2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/adem.201700170>
- Sch23 Schramm, A.: Applicability of uncoated or functionally coated carbon-bonded alumina ceramic foam filters in AZ91 magnesium alloy melts, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2023
- Sel20 Seleznev, M., Henschel, S., Storti, E., Aneziris, C.G., Krüger, L., Weidner, A., Biermann, H.: Effect of filter functional coating on detrimental non-metallic inclusions in 42CrMo4 steel and its resulting mechanical properties, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 22 Iss. 2 (2020), pp. 1900540 (1-11), © 2019 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/adem.201900540> - Open Access (CC BY)
- Sto16 Storti, E., Roso, M., Modesti, M., Aneziris C.G., Colombo, P.: Preparation and morphology of magnesium borate fibers via electrospinning, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 36 (2016), pp. 2593-2599, © 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2016.02.049>
- Sto17a Storti, E., Dudczig, S., Schmidt, A., Schmidt, G., Aneziris, C.G.: Filter functionalization with carbon nanotubes and alumina nanosheets for advanced steel filtration, *steel research international*, Vol. 88

- No. 10 (2017), pp. 1700142 (1-9), © 2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/srin.201700142>
- Sto17b Storti, E., Farhani, M., Aneziris, C.G., Wöhrmeyer, C., Parr, C.: Calcium aluminates reactive filter coatings on carbon-bonded alumina filters for clean steel approaches. *steel research international*, Vol. 88 No. 11 (2017), pp. 1700247 (1-10), © 2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/srin.201700247>
- Sto18a Storti, E., Berek, H., Aneziris, C.G.: Focused ion beam preparation and microscopy investigation of secondary layer on carbon-bonded alumina filter after steel contact, *Ceramics International*, Vol. 44 Iss. 12 (2018), pp. 14502-14509, © 2018 Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.065>
- Sto18b Storti, E., Jankovský, O., Colombo, P., Aneziris, C.G.: Effect of heat treatment conditions on magnesium borate fibers prepared via electrospinning, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 38 Iss. 11 (2018), pp. 4109-4117, © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.04.050>
- Sto23 Storti, E., Kerber, F., Dudczig, S., Wagner, R., Weidner, A., Biermann, H., Aneziris, C.G.: Combined steel melt filtration through reactive and active filters, *Open Ceramics*, Vol. 15 (2023), pp. 100415, © 2023 The Authors. Published by Elsevier Ltd on behalf of European Ceramic Society. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100415> - Open Access (CC BY-NC-ND)
- Voi18 Voigt, C., Ditscherlein, L., Werzner, E., Zienert, T., Nowak, R., Peuker, U., Sobczak, N., Aneziris, C.G.: Wettability of AlSi7Mg alloy on alumina, spinel, mullite and rutile and its influence on the aluminum melt filtration efficiency. *Journal of Materials & Design*, Vol. 150 (2018), pp. 75-85, © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.026>
- Wag22 Wagner, R., Lehnert, R., Storti, E., Ditscherlein, L., Schröder, C., Dudczig, S., Peuker, U.A., Volkova, O., Aneziris, C.G., Biermann, H., Weidner, A.: Nanoindentation of alumina and multiphase inclusions in 42CrMo4 steel, *Materials Characterization*, Vol. 193 (2022), pp. 112257, © 2022 Elsevier Inc. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112257>
- Wet18a Wetzig, T., Luchini, B., Dudczig, S., Hubáľková, J., Aneziris, C.G.: Development and testing of carbon-bonded alumina foam filters for continuous casting of steel, *Ceramics International*, Vol. 44 Iss.15 (2018), pp. 18143-18155, © 2018 Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.022>
- Wet18b Wetzig, T., Baaske, A., Karrasch, S., Brachhold, N., Rudolph, M., Aneziris, C.G.: Application of exchangeable carbon-bonded alumina foam filters in an industrial tundish for the continuous casting of steel, *Ceramic International*, Vol. 44 Iss. 18 (2018), pp. 23024-23034, © 2018 Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.105>
- Wet20 Wetzig, T., Schmidt, A., Dudczig, S., Schmidt, G., Brachhold, N., Aneziris, C.G.: Carbon-bonded alumina spaghetti filters by alginate-based robo gel casting, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 22 Iss. 2 (2020), pp. 1900657 (1-11). <https://doi.org/10.1002/adem.201900657> - Open Access (CC BY-NC-ND)
- Wet22 Wetzig, T., Neumann, M., Schwarz, M., Schöttler, L., Abendroth, M., Aneziris C.G.: Rapid prototyping of carbon-bonded alumina filters with flame-sprayed alumina coating for bottom-teeming steel ingot casting, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 24 Iss. 2 (2022), pp. 2100777 (1-10). <https://doi.org/10.1002/adem.202100777> - Open Access (CC BY-NC-ND)

### 4.3 Wissenschaftliche Veranstaltungen und Wissenschaftskommunikation

Besonderes Augenmerk lag auf dem jährlich stattfindenden Freiburger Feuerfestforum verbunden mit der Tagung des DGM/DKG-Fachausschuss „Feuerfestwerkstoffe“. Hier präsentierten alle Doktorandinnen und Doktoranden sowie Teilprojektbearbeiter die aktuellen Ergebnisse ihrer Forschungsarbeit auf Postern. Diese Form der Ergebnispräsentation in einer Postersession ermöglicht den jungen Wissenschaftlern, vor Ort einmal im Jahr in aktiven Diskussionen mit ca. 80 internationalen Fachspezialisten aus der Industrie und ca. 40 internationalen Wissenschaftlern in einen intensiven Erfahrungsaustausch zu treten.

Thema	Termin	Ort	Teilnehmer
Freiburger Feuerfestforum	2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022	Freiberg	Nationale und internationale Wissenschaftler, Industrie, externes Fachpublikum, Mitglieder DGM, DKG, MORE-Freiberg e.V., FOR 3010, GRK 2802, ZeHS, TU BAF



WTK-Werkstofftechnisches Kolloquium, Session „SFB 920 – Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration“ (5 Vorträge)	2012	Chemnitz	National und internationale Wissenschaftler
Unitecr - Unified International Technical Conference on Refractories (6 Vorträge)	2013	Victoria, Kanada	Internationale Wissenschaftler, Fachpublikum, Industrie
DGM-WerkstoffWoche, Messe und Kongress, gemeinsamer Messestand mit dem SFB 799, mehrere Vorträge zum Kongress	2015, 2017, 2019	Dresden	wissenschaftliches Fachpublikum, Industrie, Forschungseinrichtungen
CellMAT – International Conference on Cellular Materials, Special Session “CRC 920: Multi-Functional Filters for Metal Melt Filtration”, Chair: Prof. Aneziris (14, 7, 17, 3 Vorträge)	2016 2018 2020 2022	Dresden Bad Staffelstein Erlangen (online) Dresden	Nationale und internationale Wissenschaftler, externes Fachpublikum
ICC – International Congress on Ceramics, Session “Cellular and porous ceramics” Chair: Prof. Aneziris, (7 Vorträge)	2016	Dresden	Nationale und internationale Wissenschaftler, externes Fachpublikum
ICR – International Colloquium on Refractories, Session “Processing Technology” (5 Vorträge)	2017	Aachen	Nationale und internationale Wissenschaftler, Industrie, externes Fachpublikum
WFC – World Foundry Congress, Sessions „Materials“ und „Technology“ (9 Vorträge, 5 Poster)	2018	Krakau, Polen	Internationale Wissenschaftler, Fachpublikum, Industrie
ICC – International Congress on Ceramics, Session “Cellular and porous ceramics” (5 Vorträge)	2018	Foz do Iguacu, Brasilien	Internationale Wissenschaftler, externes Fachpublikum
DKG – Jahrestagung der Deutschen Keramischen Gesellschaft (7, 3 Vorträge)	2018, 2019, 2023	München Leoben Jena	Nationale und internationale Wissenschaftler, Industrie, externes Fachpublikum
MSE – Material Science Engineering Congress (3 Vorträge, 1 Posterbeitrag, Messestand SFB 920)	2018 2020 2022	Darmstadt	Nationale und internationale Wissenschaftler
CIMTEC - International Conference on Modern Materials and Technologies (4, 5 Vorträge)	2018	Perugia, Italien	Internationale Wissenschaftler, externes Fachpublikum
Unitecr - Unified International Technical Conference on Refractories (10, 5 Vorträge)	2017 2019	Santiago, Chile Yokohama, Japan	Internationale Wissenschaftler, Fachpublikum, Industrie
DGM-Arbeitskreis FA Aluminium “Begleitelemente im Aluminium“	2022	Freiberg	Nationale und internationale Wissenschaftler, DGM
DGM-Arbeitskreis GA Rasterelektronenmikroskopie (EBSD) „Mikrostrukturcharakterisierung im REM“	2022	Freiberg	Nationale und internationale Wissenschaftler, DGM

Weiterhin fand ein intensiver Ergebnis- und Erfahrungsaustausch der Doktoranden/-innen des SFB 920 mit nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen und Unternehmen statt.

Thema	Termin	Ort	Teilnehmer
Workshop Aluminiumfiltration	2011	Diez, Koblenz	Mitarbeiter SFB 920 und Fa. Drache Umwelttechnik GmbH, Diez (Dipl.-Ing. Schnelle) und Fa. Aleris Aluminium Koblenz GmbH, Koblenz (Dipl.-Ing. Wonnemann)
International Spring-School SUPSI and CRC 920	2013	Freiberg	Mitarbeiter SFB 920 und University of Applied Science – SUPSI, Manno Schweiz (Prof. Ortona, Prof. Barbato)
International Workshop Cleaness of Si	2013	Freiberg	Mitarbeiter SFB 920 und Fa. ELKEM AS, Norwegen (Dr. Forwald)

International Workshop on the mechanical modeling of random open cell foams	2013	Freiberg	Mitarbeiter SFB 920 und TU BAF, Prof. Kyriakides (Univ. of Texas, USA), Prof. Ostoja-Starzewski (Univ. of Illinois, USA), Prof. Kraynik (Nat. Laboratories, Albuquerque, USA), Prof. Redenbach (Uni Kaiserslautern)
International Autumn-School of EMPA and CRC 920	2014	Freiberg	Mitarbeiter SFB 920 und Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt – EMPA, Dübendorf, Schweiz (Prof. Graule)
International Workshop of Sinosteel and CRC 920	2015	Freiberg	Mitarbeiter SFB 920 und Sinosteel Luoyang Institute of Refractories Research, Luoyang, China (Dr. Hongxia Li)
Workshop Herstellung Flachstahl	2016	Salzgitter	Mitarbeiter SFB 920 und Fa. Salzgitter Flachstahl GmbH (Dipl.-Ing. Pischke)
International Spring School of AGH Krakow and CRC 920	2016	Freiberg	Mitarbeiter SFB 920 und Akademia Górniczo-Hutnicza - AGH Krakau, Polen (Prof. Szszerba)
International Autumn School of UFSCar São Carlos and CRC 920	2016	Freiberg	Mitarbeiter SFB 920 und Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, Brasilien (Prof. Pandolfelli)
International Workshop of Foseco Intern. and CRC 920	2017	Freiberg	Mitarbeiter SFB 920 und Fa. Foseco International Ltd., Tamworth, Großbritannien (Ian Delaney)
International Workshops of UFSCar and CRC 920	2017 2018	Freiberg São Carlos, Brasilien	Mitarbeiter SFB 920 und Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, Brasilien (Prof. Pandolfelli)
Workshop ThyssenKrupp für Frauen	2019	Duisburg	Mitarbeiterinnen SFB 920, SFB 799, TU BAF und ThyssenKrupp
online-Seminar VŠCHT Praha and CRC 920	2022	online	Mitarbeiter SFB 920 und Mitarbeiter VŠCHT Praha (Prof. Jankovský)

Wichtige Maßnahmen, um Forschungsaktivität und -ergebnisse des SFB 920 in der Öffentlichkeit sichtbar zu machen waren der barrierefreie Internetauftritt über die Homepage des SFB 920 in deutscher und in englischer Sprache, zwei professionell erstellte Imagefilme, der zweimal jährlich erscheinene Newsletter (deutscher und englischer), Flyer und Roll-Ups des SFB 920 mit allgemeinen Informationen (deutsch, englisch), weitere Ausstattungsgegenstände für Veranstaltungen (Button, Magnete mit SFB-Logo).

Außerdem wurde die breite Öffentlichkeit regelmäßig in Form von Kurzartikeln unterschiedlicher Herausgeber (Humboldt-Gesellschaft für Wissenschaft, Kunst und Bildung e.V., Mannheim, Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e.V., Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM), Institut für wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV), Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Freie Presse, Der Tagesspiegel, ZeHS-Schriften, AMAP Forum, Bundesvereinigung-GRAT e.V.) und Pressemeldungen auf der Homepage des SFB 920 oder der TU BA Freiberg über die Arbeit des SFB 920 informiert.

Ferner wurden von den Doktoranden des SFB 920 Veranstaltungen in ihren Fachbereichen zum MINTec-Camp „Ceramics meet steel“, MINTec-Girls'-Camp „Zukunft Werkstoffe“, „Campus-Tag“, GirlsDay für Schülerinnen sowie Projekttag und Studienwerbung an Gymnasien der Klassenstufe 8 bis 11 bzw. 11 bis 13 organisiert und durchgeführt. Als Ergebnis des gemeinsamen Kunstprojekts „Zukunft Keramik“ konnten Freiburger Gymnasiasten ihre Werke in einer öffentlichen Ausstellung in Freiberg und einem Ausstellungskatalog präsentieren. Damit wurden vor allem junge Menschen für die Ingenieurwissenschaften begeistert und die vielfältigen Möglichkeiten der Materialwissenschaften und Werkstofftechnik nahe gebracht.

#### 4.4 Nationale und internationale Kooperationen

Neben zahlreichen Vorträgen und Forschungsaufenthalten ausländischer Wissenschaftler im SFB 920 unterstützte die DFG mit ihrem Mercator-Fellow-Programm die Forschungsarbeiten und internationale Zusammenarbeit. In der zweiten Förderperiode des SFB 920 unterstützte **Prof. Paolo**

**Colombo** von der Università di Padova, Italien im Rahmen einer Mercator-Professur (6 Monate) die wissenschaftlichen Arbeiten in den TP A01, A02 und C01. Vor allem auf dem Gebiet der Funktionalisierung der Oberflächen der Filterstrukturen mit Nano-Materialien und der besonderen Anwendung des Electrospinning-Verfahrens fand ein intensiver Austausch statt. So wurden mittels Electrospinning u.a. Magnesiumborat-Fasern entwickelt, die im TP A01 auf kohlenstoffgebundene Filter aufgetragen und im TP C01 im Stahlgussimulator abgegossen wurden.

**Prof. Victor C. Pandolfelli** von der Universidade Federal de São Carlos in Brasilien unterstützte in der dritten Förderperiode des SFB 920 im Rahmen einer Mercator-Professur die wissenschaftlichen Arbeiten vor allem in den TP A01, A02, C01 und C02. Mit seiner Hilfe wurde der Herstellungsprozess für Filterbauteile mit definierte Mikrostruktur und verbesserten thermomechanischen Eigenschaften entwickelt.

**Prof. Ondrej Jankovský** von der University of Chemistry and Technology Prague in der Tschechischen Republik unterstützte die Arbeiten in den TP A01, C01 und T04 um durch Nanofunktionalisierung mit Graphen bzw. Graphenoxid von keramischen dichten und porösen großvolumigen Funktionalbauteilen deren thermomechanischen Eigenschaften und Zuverlässigkeit in Hochtemperaturanwendungen erheblich zu verbessern. Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung und Anwendung neuartiger Bindersysteme für die additive Herstellung poröser Filterstrukturen.

#### Gastwissenschaftler im SFB 920

Name	Heimatinstitution	Aufenthaltsdauer	Tätigkeit im SFB
Prof. Kostakis, Georgios	Polytechn. Univ. Crete, Griechenland	13.10.-16.12.2011	längerer Forschungsaufenthalt und Blockvorlesung
Prof. Poirier, Jacques	European Center of Ceramic, Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, Frankreich	14.-15.03.2012	Gastvortrag
Prof. Smith, Jeffrey D.	Missouri University of Science and Technology, USA	14.-15.03.2012	Gastvortrag
Prof. Binner, Jonathan	Loughborough University, Großbritannien	26.03.2012	Gastvortrag
Prof. Kim, Ik Jin	Hanseo University, Korea	28.-30.05.2012	Gastvortrag
Prof. Talukdar, Prabal	Indian Institute of Technology Delhi, Indien	01.06.-15.07.2012 03.03.-15.07.2014	längere Forschungsaufenthalte und Gastvorträge
Prof. Ma, Guojun	Wuhan University of Science and Technology, China	12.07.2012	Gastvortrag
Prof. Seetharaman, Seshadri	Royal Institute of Technology Stockholm, Schweden	13.09.2012	Gastvortrag
Dr. Nakano, Jinichiro	US Department of Energy, Albny, USA	03.-05.10.2012	Gastvortrag
Dr. Dietrich, Benjamin	Karlsruher Institut für Technologie, KIT	08.-09.10.2012	Gastvortrag
Dr. Moritz, Tassilo	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, IKTS Dresden	08.-09.10.2012	Gastvortrag
Prof. Colombo, Paolo	Università di Padova, Italien	05.-07.11.2012	Forschungsaufenthalte und Gastvorträge
		10.02.2016	
		2015-2019	Mercator-Professur
Prof. Ortona, Alberto	University of Applied Science and Arts of Southern Switzerland, SUPSI, Schweiz	25.-27.03.2013	Gastvortrag
Prof. Barbato, Maurizio	University of Applied Science and Arts of Southern Switzerland, SUPSI, Schweiz	25.-27.03.2013	Gastvortrag
Prof. Semler, Charles E.	Co. Semler Materials Services, Arizona, USA	17.-21.06.2013	Gastvortrag
Prof. Kyriakides, Stelios	University of Texas, Austin, USA	27.-29.08.2013	Gastvortrag

Prof. Ostoja-Starzewski, Martin	University of Illinois, Urbana, USA	27.-29.08.2013	Gastvortrag
Prof. Kraynik, Andrew M.	National Laboratories, Albuquerque, USA	27.-29.08.2013	Gastvortrag
Prof. Rodrigues, José de Anchieta	Universidade Federal de São Carlos UFSCAR, Brasilien	22.-28.09.2012	Forschungsaufenthalt
		25.-28.11.2013	Gastvortrag
Dr. Nold, Peter	Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG, Hardheim	22.10.2013	Workshop
Prof. Martynenko, Valeriy	Ukrainian Research Institute of Refractories, Ukraine	27.11.2013	Gastvortrag
Prof. Yawei, Li	Wuhan University of Science and Technology, China	27.11.2013	Gastvortrag
Prof. Na, Li	Wuhan University of Science and Technology, China	27.11.2013	Gastvortrag
Dr. Dreval, Liya	Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine	01.06.-31.08.2014	längerer Forschungsaufenthalt, Gastvorträge
Dr. Matěj, Zdeněk	Charles University in Prague, Czech Republic	01.08.-30.09.2014	längerer Forschungsaufenthalt, Gastvortrag
Prof. Graule, Thomas	EMPA Dübendorf, Schweiz	06.11.2014, 14.12.2022	Gastvortrag
Dr. Aneziris, Olga N.	Demokritos National Centre for Scientific Research, Energy and Safety, Athens, Griechenland	14.04.2015	Gastvortrag
Dr. Li, Hongxia	Luoyang Institute of Refractories Research, Luoyang, China	21.09.2015	Gastvortrag
Prof. Chattopadhyay, Kinnor	University of Toronto, Kanada	01.05.-31.07.2016	längerer Forschungsaufenthalt und Vorlesungsreihe (9 Wochen)
Prof. Szczerba, Jacek	AGH Krakau, Polen	23.-24.05.2016 28.06.2017	Gastvortrag und Forschungsaufenthalt
Prof. Pandolfelli, Victor C.	Universidade Federal de São Carlos, Brasilien	23.-24.05.2016 01.-03.11.2017 26.06.2018 17.11.2020 09.-13.05.2022	Forschungsaufenthalte, Blockvorlesungen und Gastvorträge
		2019 – 2023	Mercator-Professur
Dr. Salvini, Vânia R.	FATEC Sertãozinho, Brasilien	23.-24.05.2016 05.02.2019 08.12.2021 09.-13.05.2022	Forschungsaufenthalte und Gastvorträge
Dr. da Luz, Ana P.	Universidade Federal de São Carlos, Brasilien	23.-24.05.2016 01.-03.11.2017 26.06.2018	Forschungsaufenthalt und Gastvorträge, Blockvorlesung
Prof. Jung, In-Ho	McGill University Montreal, Kanada	14.12.2016	Gastvortrag
Dr. Nourbakhsh, Amirabas	University of Isfahan, Iran	14.12.2016	Gastvortrag
Dr. Parr, Christopher	Kerneos S.A., Frankreich	14.12.2016	Gastvortrag
Dr. Ekonomakou, Antonia	Innovative Insulating & Inorganic Materials Laboratory, Lavrion, Griechenland	22.-23.08.2017	Gastvortrag
Prof. Favier, Veronique	Arts et Métiers Paris Tech - PIMM, Frankreich	03.-05.12.2017	Gastvortrag
Prof. Jankovský, Ondrej	University of Chemistry and Technology Prague, VŠCHT, Tschechische Republik	18.09.-17.11.2017 11.12.2019 01.09.-31.12.2021 01.10.2022- 31.03.2023	längere Forschungsaufenthalte und Gastvorträge

		01.03.-31.08.2018	Humboldt-Stipendiat am IKFVW
Prof. Zhang, Rui	Zhengzhou University of Aeronautics, China	13.12.2017	Gastvortrag
Prof. Sobczak, Natalia	Foundry Research Institute, Krakau, Polen	13.12.2017	Gastvortrag
Prof. Danzer, Robert	Montanuniversität Leoben, Österreich	21.08.2018	Gastvortrag
Prof. Reichstein, Simon	Technische Hochschule Nürnberg, Georg-Simon-Ohm	07.11.2022	Gastvortrag
Dr. Zocca, Andres	BAM Berlin	14.12.2022	Gastvortrag
Dr. Kühne, Hans-Carsten	BAM, Berlin	14.12.2022	Gastvortrag
Dr. Wöhrmeyer, Christoph	Imerys Murg GmbH, Oberhausen	14.12.2022	Gastvortrag

## 5 Schwerpunktbildung und internationale Sichtbarkeit

Die Technische Universität Bergakademie Freiberg besitzt als Ressourcen-Universität ein klares Profil, das die Schwerpunkte Geo, Material/Werkstoffe, Energie und Umwelt umfasst. In diesem Rahmen war der Sonderforschungsbereich in einem der Kernbereiche der Universität, der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, angesiedelt. Dieser Bereich zeichnet sich durch eine überdurchschnittliche Aktivität im Bereich der Grundlagenforschung aus, wie durch verschiedene Indikatoren nachgewiesen wird. Eindrücklich zeigen dies die beiden geförderten Sonderforschungsbereiche 920 und 799 sowie die Leitung von bzw. Beteiligung an mehreren Schwerpunktprogrammen, Forschungsgruppen und Graduiertenkollegs der DFG. Die meisten dieser Initiativen wurden durch Mitglieder des SFB 920 geleitet bzw. koordiniert. Auch andere Aktivitäten, wie die Einrichtung einer sächsischen Landesexzellenzinitiative (ADDE - Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch Atomares Design und Defekt-Engineering) und deren Nachfolgeprojekt (AMARETO - Sächsische Allianz für Material- und RessourcenEffiziente TechnOlogien) zeigen auf Landesebene, dass das Fachgebiet eine herausgehobene Bedeutung für die TU Bergakademie Freiberg besitzt. In der Förderstatistik der Deutschen Forschungsgemeinschaft wird dies auch dadurch deutlich, dass die TU Bergakademie Freiberg im erweiterten Fachgebiet Materialwissenschaft und Werkstofftechnik auf Platz 3 der Fördersumme liegt.

Im Jahr 2021 wurde der Forschungsbau nach §91b GG, das „Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung“ (ZeHS) übergeben. Im Kompetenzzentrum „Hochtemperaturprozesse – Vom Mechanismus zur Anwendung“ des ZeHS werden die Forschungsaktivitäten für Technologien für effiziente Hochtemperaturprozesse hin zu chemischen Hochtemperaturprozess-Reaktoren und allgemein Hochtemperaturprozess-Anlagen gebündelt, die für die Erzeugung der meisten industriellen Grundstoffe (z.B. Metalle, Keramik, Glas und Basischemikalien) von essentieller Bedeutung sind. Im Kompetenzzentrum „Hochtemperaturmaterialien – Vom Material zum Bauteil“ werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ZeHS für synthetische feuerfeste Materialien und refraktäre Verbundwerkstoffe gebündelt. Diese bilden die Voraussetzung für den Aufbau der Prozessumgebung bei allen maßgeblichen Hochtemperaturprozessen. Die meisten Mitglieder des SFB 920 sind auch Mitglieder des ZeHS bzw. Mitglieder des Vorstands und Leiter der beiden Kompetenzzentren des ZeHS.

Neben der Einrichtung von Integrierten Graduiertenkollegs in den SFB 799 und 920 wurden weitere Graduiertenschulen auf materialwissenschaftlichen Feldern etabliert (Graduiertenschule „Photovoltaik“, „Dr. Erich Krüger Forschungskolleg - Freiburger Hochdruckforschungszentrum“, Graduiertenkolleg 2802 „Feuerfest Recycling“). Dach dieser Graduiertenschulen und -kollegs ist die Graduierten- und Forschungsakademie der TU Bergakademie Freiberg, die die laufenden Aktivitäten wesentlich unterstützt. Darüber hinaus bietet das neue Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (Frau Prof. Scharf – Hochschul- und Helmholtz Berufung, Prof. van den Boogaart – Überführung seiner Professur zur Helmholtz-Gesellschaft bei weiterer Mitgliedschaft in der TU Bergakademie Freiberg) die ideale Synergie-Plattform im Bereich des Recyclings an, insbesondere bei der

Erfassung von einheitlichen Rohstoff- und Energiebilanzen bzw. die Nutzung der Grundlagenergebnisse des SFB 920 für die Filtration bzw. das Recycling von weiteren Schmelzsystemen.

Schließlich fließen die wissenschaftlichen Erkenntnisse des SFB 920 in das „International Joint Labor on New Technologies of Refractories and Metallurgy“ ein, das auf Grundlage der langjährigen Kooperationen der TU Bergakademie Freiberg mit der Wuhan University of Science and Technology im Jahr 2019 eröffnet wurde und an dem Wissenschaftler aus Europa, China und den USA beteiligt sind.

Auch auf dem Gebiet der Gießereitechnik, Metallurgie und Recycling sowie Simulation und Modellierung wurde der im SFB gelegte Schwerpunkt durch weitere Berufungen deutlich gestärkt. Vier der neu berufenen Professuren wurden durch Nachanträge bzw. Förderung aus den Pauschalen Mitteln in den SFB 920 integriert.

Zudem wurden auf Grundlage der methodischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse des SFB 920 weiterführende, koordinierte Vorhaben gefördert, wie die DFG-Forschungsgruppe 3010 (seit 2020), das Schwerpunktprogramm SPP 2315 (seit 2021), die BMBF-Nachwuchsgruppe „PurCo - Purification of Cooper“ (seit 2022) sowie das DFG-Graduiertenkolleg 2802 (seit 2022).

Auch auf dem Gebiet der methodischen Kompetenzen wurde der Fachbereich Materialwissenschaft und Werkstofftechnik durch strategische Investitionen in Großgeräte – sowohl im Rahmen des Programms Forschungs Großgeräte (früher HBF) als auch im Rahmen des Forschungsbaus ZeHS – durch die Universität sowie das Land Sachsen bzw. mit Bundesmitteln deutlich unterstützt.

International hat der SFB 920 eine Reihe von engen Kooperationen ermöglicht. Hierbei sind insbesondere die zwei Mercator-Professoren Paolo Colombo (Università di Padova, Italien) und Victor C. Pandolfelli (Universidade Federal de São Carlos, Brasilien) zu nennen. Daneben bestehen durch die Förderung von Gastwissenschaftlern und Auslandsaufenthalten auch weitere enge Beziehungen zu Forschern weltweit, wie z.B. zu Prof. Kim (Hanseon University, Seosan, Süd-Korea), Dr. Nakano (U.S. Department of Energy Albany/OR, USA), Prof. Ortona (SUPSI, Manno, Schweiz), Prof. Graule (EMPA, Dübendorf, Schweiz), Prof. Chattopadhyay (University of Toronto, Kanada), Prof. Sobczak (Foundry Research Institute, Krakau, Polen), Prof. Szczerba (AGH Krakau, Polen), ass. Prof. Jankovský (University of Chemistry and Technology, Prague, Tschechien), Prof. Tangstad (Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegen), Prof. Pellizzari (University Trento, Italien), Prof. Li (Wuhan University, China), Prof. Yan (Wuhan University, China) Dr. da Luz (Universidade Federal de São Carlos, Brasilien), Prof. Giesche (Alfred University, Alfred, USA), Dr. Dreval (Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine), Prof. Talukdar (Indian Institute of Technology, Dehli, Indien), Prof. Vinogradov (Togliatti State University, Russland), Prof. Kyriakides (Texas University, USA), Prof. Pantleon (Technical University of Denmark, Dänemark) die auch nach dem Abschluss des SFB 920 weitergeführt werden.

Die weitere internationale Vernetzung und Sichtbarkeit des SFB 920 bildeten Vorträge auf internationalen Fachtagungen und Konferenzen. So wurden eigene Sessions des SFB 920 auf der aller 2 Jahre stattfindenden CellMAT 2016, 2018, 2020, der ICC 2016, der UNITECR 2013, 2017, 2019, dem WFC 2018 und der DKG-Jahrestagung 2018 eingerichtet. Neben den über 500 Publikationen wurden die Forschungsergebnisse des SFB 920 in den Sonderausgaben „Multi-Functional Filters for Metal Melt Filtration“ der begutachteten wissenschaftlichen Zeitschrift „Advanced Engineering Materials“ (AEM) und als zusammenfassende Abschlussveröffentlichung in Buchform beim Verlag Springer Nature veröffentlicht:

- Sonderheft, AEM, Vol. 15, No. 12, December 2013, ISBN 1438-1656
- Sonderheft, AEM, Vol. 19, No 9, September 2017, ISSN online 1527-2648
- Sonderheft, AEM, Vol. 22, No. 2, February 2020, ISSN online 1527-2648
- Sonderheft, AEM, Vol. 24, No. 2, February 2022, ISSN online 1527-2648
- „Multifunctional Ceramic Filter Systems for Metal Melt Filtration - Towards Zero-Defect Materials“, Herausgeber C.G. Aneziris und H. Biermann, Springer Series in Materials Science 337 (2023), accepted: 21.06.2023. ISBN 978-3-031-40929-5 (34 Kapitel, 950 Seiten)

Darüber hinaus waren die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an zahlreichen internationalen Tagungen vertreten, teilweise mit eingeladenen Vorträgen, mehreren Präsentationen und Postern: MSE (2016, 2018, 2020, 2022), Intermetallics (2017, 2021), CIMTEC (2018, 2022), UNITECR (2015,

2023), ECerS (2017, 2019, 2022), CellMat (2012, 2014, 2022), Calphad (2017, 2018, 2019, 2022), ICREF (2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2022), ICC (2018), REFRA (2017, 2019, 2022), Fatigue (2018), Dymat (2015, 2018, 2021), Euromat (2015, 2017, 2019, 2021), FDM (2016, 2017), FDMD (2014, 2020), SSTT (2012, 2014, 2016, 2018), WFC (2016), WCPT (2018, 2022), STEELSIM (2015), TMS (2019, 2021, 2022, 2023), HPC (2016), GAMM (2021, 2022), TOFA (2016, 2020, 2022), FILTECH (2016, 2018, 2022, 2023), VHCF (2017, 2021) sowie Symposien und Tagungen verschiedener Fachverbände wie DGM, DKG, DVM, DPG, DECHEMA.