

# KERAMISCHE VERBUNDWERKSTOFFE – EIN WEG ZU EINER RESILIENTEN UND NACHHALTIGEN PROZESSINDUSTRIE

Lukas Möltner<sup>\*ab</sup>, Daniel Denifl<sup>a</sup>, Verena Schallhart<sup>b</sup>, Uwe Trattnig<sup>c</sup>, Robert Hauser<sup>d</sup>, und  
Heinrich Berthold<sup>e</sup>

<sup>a</sup> MCI, Innsbruck, Österreich

<sup>b</sup> Technische Universität Wien, Wien, Österreich

<sup>c</sup> FH Joanneum, Kapfenberg, Österreich

<sup>d</sup> FH Kärnten, Villach, Österreich

<sup>e</sup> Keramik Innovation Berthold, Erlangen, Deutschland

\* Corresponding Author: Lukas Möltner, lukas.moeltner@mci.edu

**Abstract.** Vorliegender Kurzbeitrag stellt die Entwicklung eines keramischen Kompositwerkstoffes vor, welcher sich aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften für den Einsatz in der Reaktionstechnik eignet. Dieser Werkstoff kann dazu genutzt werden um chemische Reaktoren resistiv, mittels elektrischer Energie zu beheizen und in Folge die produktionsbezogenen Emissionen von Kohlendioxid zu reduzieren.

**Keywords:** Reaktionstechnik, Reaktorbeheizung, Prozessindustrie.

## 1 AUSGANGSSITUATION UND PROBLEMSTELLUNG

Produkte des täglichen Lebens, wie z.B. Lebensmittel, Kunststoffe, Textilien, Treibstoffe, Düngemittel werden teils mit erheblichem Energieaufwand industriell hergestellt. Sowohl dieser Energieaufwand als auch die verwendeten Rohstoffe, welche häufig fossilen Ursprungs sind, führen zu hohen Emissionen an treibhausrelevanten Gasen, allen voran Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>). Vor dem Hintergrund von angestrebten und notwendigen Einsparungen im CO<sub>2</sub>-Ausstoß und bei gleichzeitiger Betrachtung des Anspruchs einer modernen, wachsenden Gesellschaft an Fortschritt und Lebensstandard ist ein Zielkonflikt zu erkennen. Am Beispiel der chemischen Industrie der EU und der USA laufen intensive Bemühungen den CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2050 klimaneutral zu gestalten und zusätzlich soll die in den Prozessen verwendete Energiemenge reduziert werden. Emissionen von klimarelevanten Gasen können hinsichtlich ihrer Entstehung noch präziser unterteilt werden, nämlich in Emissionen die bedingt durch den Einsatz fossiler Rohstoffe am Ende ihres Lebenszyklus freigesetzt werden und dem Ausstoß, welcher für die Produktion dieser Produkte in Form von Prozesswärme notwendig ist. Dem derzeitigen Stand der Technik entsprechend erfolgen notwendige Heizmaßnahmen in der Prozessindustrie (chemische Industrie) zumeist mittels fossiler Energieträger wie zum Beispiel Erdgas oder Heizöl und führen somit zu einem nicht-geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf [1].

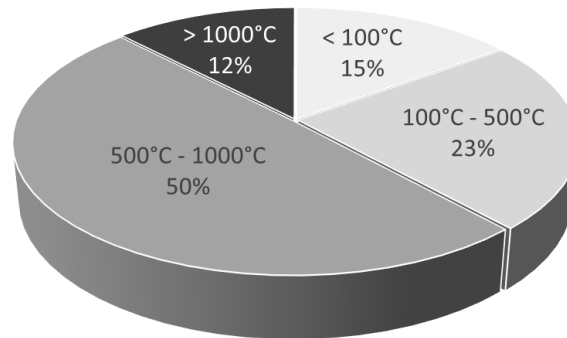


Figure 1. Gesamtenergieverbrauchs von 372 Petajoule im Jahr 2019 der chemischen Industrie in Deutschland, aufgeteilt nach Temperaturbereichen [1].

Abbildung 1 zeigt den Bedarf an Prozesswärme, eingeteilt nach Temperaturbereichen am Beispiel Deutschland [2]. Würde dieser Energieverbrauch mittels Heizöl abgedeckt werden, ergäbe sich ein Ausstoß von knapp 27 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

Im Kontext einer weitgehend CO<sub>2</sub>-neutralen chemischen Industrie bis 2050 ist die Integration von alternativen Kohlenstoffquellen und erneuerbaren Energien wie z.B. elektrischer Energie aus Wasserkraft, Windkraft oder Photovoltaik unabdingbar. Die damit verbundenen meist örtlich begrenzten und fluktuierenden Verfügbarkeiten von Reaktanden und regenerativem elektrischen Strom erfordern grundlegend neue Technologien, welche eine Toleranz gegenüber schwankenden Produktionsfaktoren aufweisen müssen. Dabei sind die Skalierbarkeit der Technologien zur Anwendung in regionalen Wertschöpfungsketten und die Anfahrtszeiten der Prozesse, um die Nutzung von Überschussstrom zu ermöglichen, als besonders kritisch zu betrachten.

## 2 ZIEL UND VERFOLGTER LÖSUNGSANSATZ

Eine Möglichkeit zur CO<sub>2</sub>-Reduktion in Hinblick auf endotherme Prozesse ist die direkte elektrische Beheizung von Reaktoren mit erneuerbaren Energien anstatt der Verbrennung von fossilen Energieträgern. Das verfolgte Ziel ist es, Technologien und Methoden zu entwickeln, um angewandte Produktionsprozesse zu elektrifizieren und somit für die Nutzung erneuerbarer, elektrischer Energie zu adaptieren. Die Umsetzung dieses vorgestellten Lösungsansatzes wird durch Abbildung 2 grafisch erläutert. Zusätzlich zur CO<sub>2</sub>-Einsparung wird durch die Elektrifizierung eine präzise Temperaturkontrolle, ein rascher Prozessstart und eine verbesserte Energieeffizienz ermöglicht. Die direkte elektrische Beheizung chemischer Reaktoren kann grundsätzlich in drei unterschiedliche Technologien unterteilt werden, welche beispielsweise für katalytische Festbetschüttungen oder beschichtete Monolith- und Rohrbündelreaktoren zur Anwendung kommen: Ohm'sche Beheizung, Induktionsheizen oder Mikrowellenheizung [3].

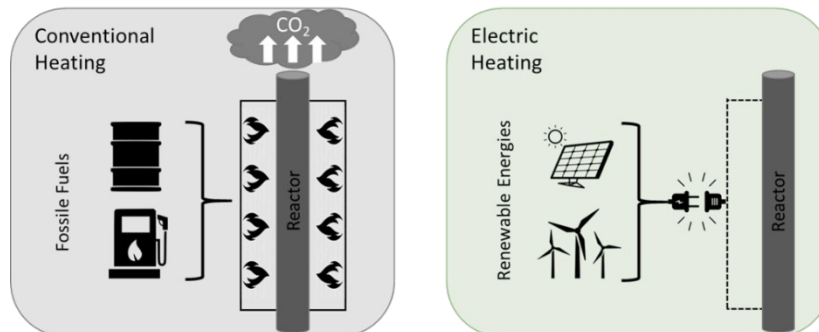


Figure 2. Prinzipielle Elektrifizierungsstrategie für die Prozessindustrie.

Im gewählten Technologieansatz spielt die Ohm'sche Beheizung von Reaktoren, auch Widerstandsheizung die größte Rolle. Im Gegensatz zum Stand der Technik, welcher aus in isolierender Keramik eingebetteten metallischen Leitern, oder aus als gesundheitsschädlich eingestuftem Molybdändisilid besteht, verfügt die hier vorgestellte Entwicklung - ein neuer keramischer Kompositwerkstoff - über eine intrinsische, elektrische Leitfähigkeit.

### 3 DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Die verfolgte Strategie bei der Entwicklung dieser elektrisch leitfähigen Keramiken ist kostengünstigen, isolierenden Silikatkeramiken elektrisch leitfähige Materialien nach dem Prinzip „so viel wie nötig, aber so wenig wie möglich“ beizumengen.

Im Detail beschreibt die Entwicklung ein Heizelement basierend auf einer Silikatkeramik, mit elektrisch isolierender Außenschicht, welches als Alternative zu bisherigen Heizelementen verwendet werden kann. Die keramische Hauptkomponente dieser entwickelten Verbundwerkstoffe ist jeweils eine Silikatkeramik, zum Beispiel Cordierit, Steatit, Mullit, oder Porzellan, wobei deren Anteil zumindest 50 m.-% ist. Besonders erwähnenswert ist hierbei Cordierit, welches sich ursprünglich durch eine gute elektrische Isolationsfähigkeit, eine sehr gute Beständigkeit gegen Vibrationen sowie eine überragende Temperaturschockbeständigkeit auszeichnet und darüber hinaus kostengünstig ist. Durch die Einbringung von Verbindungen aus Übergangs- und/oder Halbmetallen, sowie Hilfs- und Zuschlagstoffen und der Art und Weise der Prozessführung bei der Herstellung wird die erforderliche elektrische Leitfähigkeit erreicht und kann innerhalb von Grenzen eingestellt werden.

Das dazu erforderliche und eigens entwickelte Herstellverfahren umfasst die Aufbereitung und das Mischen der Rohmaterialien, das Versetzen der Rohmaterialien mit Hilfsstoffen, beispielsweise organische Komponenten und Plastifizierern, die Formgebung, dem Vorbrand, das Sintern und gegebenenfalls noch eine thermische Nachbehandlung. Eine Besonderheit der entwickelten Materialien und Prozessabläufe liegt darin, dass sich an der Werkstückoberfläche eine isolierende Schicht ausbildet, welche als Sauerstoffbarriere eine weitere

Oxidation des Materials unterbindet, hochtemperaturstabil ist (bis 1.000°C) und somit eine dauerhafte elektrische Leitfähigkeit der darunterliegenden Schichten gewährleistet. Zudem weist diese ausgebildete Schutzbarriere, je nach Zusammensetzung des Komposits, für bestimmte chemische Reaktionen eine katalytische Aktivität auf. Im Detail ermöglicht der Herstellprozess die bisher nötige nachträgliche Beschichtung von keramischen Katalysatorträgern mit Metalloxiden wie beispielsweise Titanoxid zu eliminieren. Aufgrund der genannten Eigenschaften können die entwickelten keramischen Kompositwerkstoffe für den eingangs beschriebenen Lösungsansatz als Heizeinrichtungen in der chemischen Reaktionstechnik zur Anwendung kommen, oder alternativ als Heizeinrichtungen in anderen Industriesparten wie zum Beispiel der Lebensmittelindustrie [4].

Die entwickelten keramischen Kompositwerkstoffe können zu Formkörper verarbeitet werden, beispielsweise Wabenkörper, Platten, Stäbe, und weitere Formen. Abbildung 3 zeigt die pulverförmigen Rohmaterialien einer entwickelten Rezeptur (li) und aus dem entwickelten keramischen Kompositwerkstoff, durch Extrusion hergestellte Wabenkörper (re). Je nach gewünschter Form kommen verschiedene Formgebungsverfahren zum Einsatz, wie zum Beispiel Extrusion, Pressen, Spritzguss oder auch eine für dieses Material adaptierte additive Fertigungsmethode. Gerade durch die Möglichkeit der additiven Fertigung dieser Kompositkeramik bestehen in der Formgebung sehr viele Freiheitsgrade und selbst geometrisch hochkomplexe und folglich beheizbare Strukturen können dargestellt werden. Abbildung 4 veranschaulicht eine Auswahl der derzeit in Verwendung befindlichen Fertigungsverfahren. Die Abgrenzung zu bestehenden elektrisch leitfähigen Materialien liegt darin, dass die Oberflächen der Heizelemente aus den keramischen Kompositen nicht mehr elektrisch isoliert werden müssen, die elektrische Leitfähigkeit in Maßen einstellbar ist und das keramische Grundmaterial im Vergleich zu bestehenden Technologien einen signifikanten Kostenvorteil mit sich bringt. Ein weiterer nicht zu unterschätzender Pluspunkt ist, dass Silikatkeramiken aus natürlichen Rohstoffen aufgebaut sind und das ihr Recycling seit Jahrzehnten etabliert ist.



Figure 3. Rohmaterialien bestehend aus Grundkeramik und Zuschlagstoffen (li), Formgebung durch Extrusion (re).

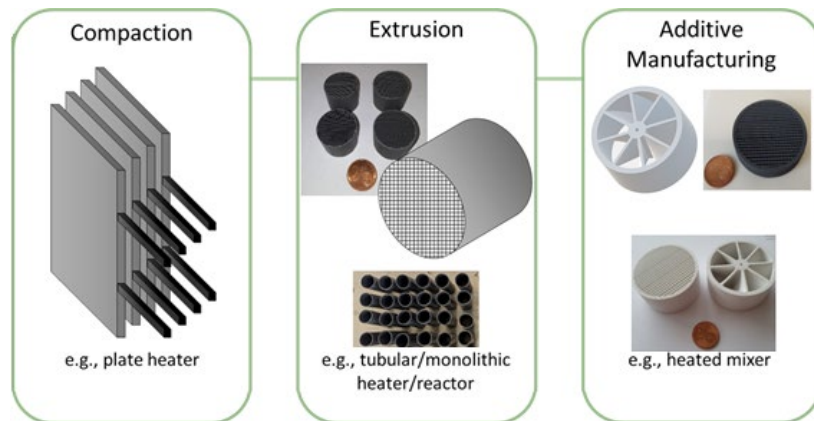


Figure 4. Derzeit mögliche Fertigungsverfahren; Pressen (li), Extrusion (Mitte) und additive Fertigung (re).

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Der Forderung nach einer drastischen Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen begegnet die chemische Industrie mit Strategien und Plänen zur Elektrifizierung von Produktionseinrichtungen. Derzeit in Diskussion befindliche Technologien sind die Beheizung mittels Mikrowellen, Induktionsheizung und Widerstandsheizung. Im Rahmen der durchgeführten Forschungsarbeiten konnten keramische Kompositwerkstoffe entwickelt werden, welche sich aufgrund Ihrer physikalischen Eigenschaften für die Widerstandsheizung von chemischen Reaktoren eignen. Die entwickelten Materialien bestehen zu einem überwiegenden Anteil aus konventionellen Silikatkeramiken, welche kostengünstig, langfristig verfügbar und mit etablierten Methoden verarbeitbar sind. Mit speziell entwickelten Paketen an Zuschlagstoffen lässt sich die notwendige elektrische Leitfähigkeit erreichen und in Grenzen auch einstellen. Der grundsätzliche Funktionsnachweis konnte im Labormassstab erbracht werden und das entwickelte Material wird in nächsten Schritten an Technikumsanlagen erprobt.

#### 5 LITERATUR

- [1] Schallhart V., Klemm E., Moeltner L., "Hybrid Ceramics – A Promising Prospect for Electrically Heated Reactors," 10. ProcessNet-Jahrestagung, 21. – 24. September 2020.
- [2] M. Nast, M. Pehnt, S. Frisch & P. Otter, „Prozesswärme im MAP.“ Stuttgart, 2010.
- [3] A. I. Stankiewicz & H. Nigar, "Beyond electrolysis: old challenges and new concepts of electricity-driven chemical reactors." *React. Chem. Eng.*, 5, 1005-1016, 2020, doi: 10.1039/D0RE00116C.
- [4] Schallhart V., Berthold H., Klemm E., Moeltner L., "Light-Off Support for Mobile DeNOx Systems," *Chem. Ing. Tech.* 2021, 93, No. 5, 814–818, doi.org/10.1002/cite.202000212.