

# **Wirbelschichtreaktor – Entwicklung einer Pilotanlage zur thermischen Behandlung organischer, metallischer und keramischer Mikrobauteile in der Wirbelschicht**

**Prof. Dr. Wolfgang Krcmar**  
Fakultät Werkstofftechnik  
Technische Hochschule Nürnberg

## **Wesentliche Projektziele:**

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Wirbelschichtreaktors, in dessen Reaktionskammer höchste Temperaturen von beispielsweise 1.300 °C innerhalb weniger Sekunden konstant eingestellt werden können. Bei diesen hohen Temperaturen werden kleinteilige keramische Mikrobauteile (z.B. Spulenkörper aus Steatit) im Schwebezustand gesintert. Das Verfahren soll neben der Sinterung von Elektrokeramik die thermische Behandlung von Produkten anderer Werkstoffgruppen wie Metalle oder organische Werkstoffe kleinster Produktdimensionen auch bei niedrigeren Temperaturen ermöglichen.



## 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2015
Fakultät /Institut / Kompetenzzentrum	Werkstofftechnik / Energie Campus Nürnberg (EnCN)
Projektleitung	Prof. Dr. Wolfgang Krcmar
Kontaktdaten	E-Mail: wolfgang.krcmar@th-nuernberg.de

## 2. Ausgangslage

Elektrokeramische Komponenten werden aufgrund ihrer sehr guten dielektrischen und mechanischen Eigenschaften vielfach als elektronische Bauteile in der Elektrotechnik oder bei thermischen Prozessen eingesetzt. Typische keramische Produkte sind z.B. Sockelkörper für Leistungselektronik, Grundplatten oder Reglergehäuse, Spulenträger oder Kondensatoren für Leiterplatten. Isolierperlen kommen z.B. zum Schutz der elektrischen Leitungen bei Hochtemperatur-Anwendungen zum Einsatz.

Bereits seit vielen Jahren ist bei der Produktion technischer Güter ein ständiger Drang hin zu immer kleineren Produkten zu verzeichnen. Eine Folge dieses Trends ist die Notwendigkeit der Miniaturisierung der eingesetzten Bauteile und Komponenten aus Elektrokeramik. Diese sollen neben einer reduzierten Baugröße über herausragende technische Eigenschaften und eine hohe Produktqualität verfügen. Mit den heute am Markt verfügbaren Herstellungsverfahren kann den künftigen technischen Anforderungen jedoch nicht mehr nachgekommen werden. Gleichzeitig ist durch veraltete Fertigungsanlagen der Energiebedarf zur Herstellung der elektrokeramischen Kleinteile in der geforderten Qualität stark angestiegen. Die Reduzierung des Einsatzes von Primärenergie ist jedoch eine Forderung, die in den nächsten Jahren die Hersteller und Betreiber von Thermoprozessanlagen vor enorme Schwierigkeiten stellen wird. Zum einen ist durch geänderte Verordnungen eine Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verbindlich vorgeschrieben. Zum anderen bleibt den Keramikherstellern zur Beibehaltung der Wettbewerbsfähigkeit bei steigenden Energiepreisen nur die Möglichkeit der Energieeinsparung. Steigende Qualitätsansprüche führen jedoch dazu, dass mit bestehenden Fertigungsmöglichkeiten die geforderte Qualität nur durch strengere Qualitätskontrollen und damit unter vermehrtem Ausschuss sichergestellt werden kann. Gerade bei der Herstellung energieintensiver Produkte wird daher intensiv nach Möglichkeiten gesucht, neuartige Verfahren und Methoden zur Optimierung der Produktqualität sowie des Energieverbrauches zu entwickeln.

## 3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines neuartigen Sinter-Verfahrens für kleinteilige elektrokeramische Bauteile. Mit dem neuen Sinter-Verfahren sollen in der Wirbelschicht Produkte mit verbesserter Qualität sowie optimierten elektrischen und mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitiger Reduzierung des Primärenergieeinsatzes hergestellt werden. Um dies zu erreichen, werden die Bauteile kleinster Abmessungen im vertikalen Abgasstrom einer Erdgasflamme in einen Schwebезustand versetzt und dabei gesintert.



Abb. 1: Spulenkörper aus Steatit mit den Abmessungen 2 mm x 1 mm x 1 mm

Die grundsätzliche Machbarkeit wurde innerhalb der Arbeitsgruppe im Rahmen zweier Abschlussarbeiten bereits erfolgreich getestet. Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes wurde ein massiv konstruierter Wirbelschichtreaktor neu aufgebaut. In weiteren Versuchen ist geplant, das Verfahren so zu entwickeln, das innerhalb der Reaktionskammer höchste Temperaturen von beispielsweise 1.300 °C innerhalb von nur wenigen Sekunden konstant eingestellt werden können. Bei diesen hohen Temperaturen sollen kleinstteilige keramische Mikrobauteile (z.B. Spulenkörper aus Steatit) im Schwebezustand gesintert werden. Das Verfahren soll außerdem die thermische Behandlung von Produkten anderer Werkstoffgruppen bei niedrigeren Temperaturen ermöglichen. Es soll u.a. erprobt werden, ob neben den keramischen, auch metallische und organische Werkstoffe kleinster Abmessungen im Wirbelschichtverfahren bei definierten Temperaturen thermisch behandelt werden können. Durch den modularen Aufbau des Wirbelschichtreaktors können durch Variation verschiedener Komponenten (z.B. Befuerung, Gebläse, Gas- und Abgasströmung, elektrische Widerstandsheizung, Abmessungen Reaktionskammer/Ofenraum) Bereiche mit konstantem Temperaturprofil erzeugt werden, so dass Bauteile/Werkstoffe mit unterschiedlichen Abmessungen und in verschiedenen Ofenatmosphären thermisch behandelt werden können. Das Temperaturspektrum soll dabei vergleichsweise niedrige Trocknungstemperaturen, höhere Entbinderungstemperaturen und höchste Sintertemperaturen in derselben Wirbelschichtanlage ermöglichen. Ziel ist stets ein geringer Temperaturgradient sowie eine gleichmäßige Atmosphäre innerhalb der Reaktionskammer, was zu einer sehr homogenen Qualität der thermisch behandelten Werkstoffe führen wird. Im Folgenden ist ein Querschnitt des Wirbelschichtreaktors gezeigt. Durch den heißen Abgasstrom des Brenners findet eine Fluidisierung des Wirbelguts statt. Der Feuerungskanal ist rot eingefärbt, die Richtung des Abgasstroms ist mit einem Pfeil gekennzeichnet.

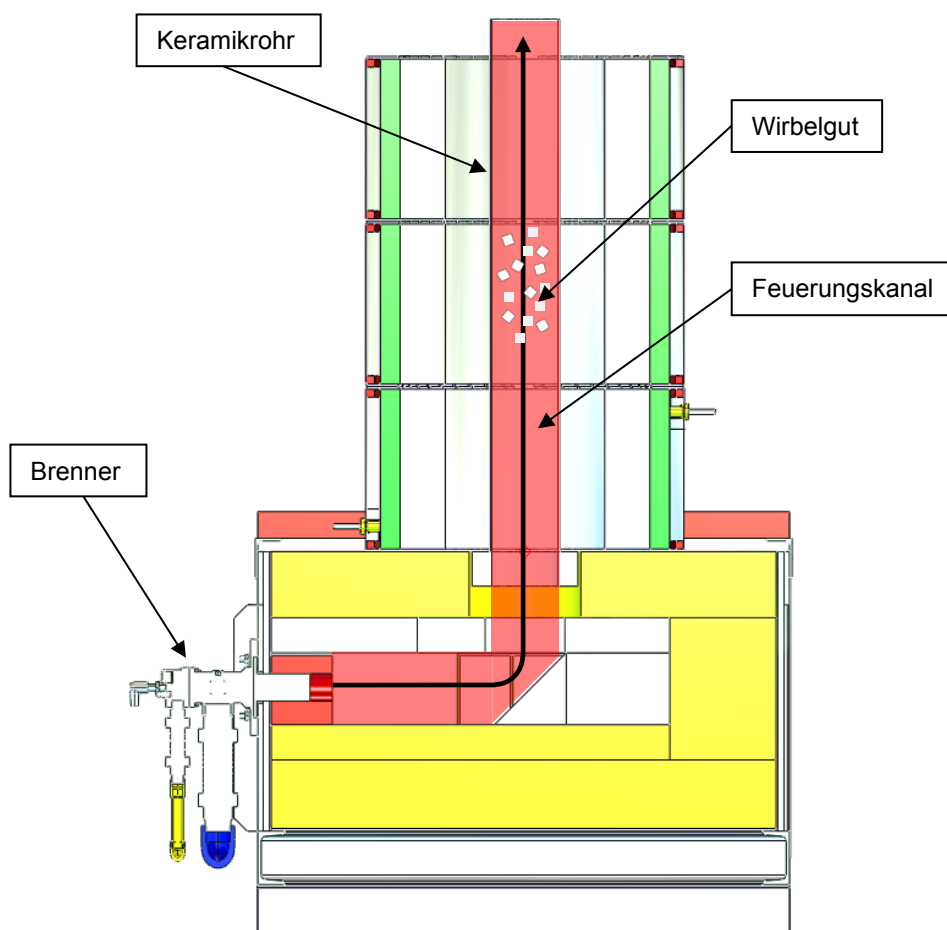


Abb. 2: Querschnitt des Wirbelschichtreaktors

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Um den Wirbelschichtreaktor leistungstechnisch auslegen zu können, wurden die unterschiedlichen Sedimentationsgeschwindigkeiten der Probekörper (ungesintert/gesintert) berechnet. Die Berechnungen wurden auf Basis der nachstehenden Parameter durchgeführt:

1.1	g	Erdbeschleunigung	9,81	[m/s <sup>2</sup> ]
1.2	R <sub>s</sub>	Spezifische Gaskonstante	287,058	[J/kg·K]
1.3	p	Luftdruck	101325	[Pa]
1.4	ϑ <sub>soll</sub>	Solltemperatur Ofenraum	1300	[°C]
1.5	D	Durchmesser der Brennkammer	0,125	[m]
1.6	T	Betriebstemperatur	1573,15	[K]
1.7	d	Äquivalenter Radius des sinkenden Partikels	0,00156	[m]
1.8	ρ <sub>s,0</sub>	Dichte des Partikels, ungesintert	1400	[kg/m <sup>3</sup> ]
1.9	ρ <sub>s,1</sub>	Dichte des Partikels, gesintert	2700	[kg/m <sup>3</sup> ]
1.10	ρ <sub>f</sub>	Dichte des Fluids (Luft) bei Betriebstemperatur T	0,22438	[kg/m <sup>3</sup> ]
1.11	ρ <sub>f,0</sub>	Dichte des Fluids (Luft) bei 293,15 K	1,2041	[kg/m <sup>3</sup> ]
1.12	c <sub>p</sub>	Spezifische Wärmekapazität Luft	1,005	[kJ/kg·K]
1.13	c <sub>w</sub>	Widerstandsbeiwert (Annahme Doppel-T-Träger, Mittelwert aus Längs-/Queranströmung)	1,46	[J/kg·K]
1.14	V <sub>s,N</sub>	Sedimentationsgeschwindigkeit (Newton)		
		- bei ρ <sub>s,0</sub> (ungesintert)	9,34	[m/s]
		- bei ρ <sub>s,1</sub> (gesintert)	12,97	[m/s]
1.15		Berechneter Luftstrom gesamt MIN (Betriebs-m <sup>3</sup> )	412	m <sup>3</sup> /h
1.16		Umrechnung in Norm-m <sup>3</sup>	77	m <sup>3</sup> /h
1.17		Leistungsbedarf Erwärmung Trägerluft MIN	33	kW
1.18		Berechneter Luftstrom gesamt MAX (Betriebs-m <sup>3</sup> )	573	m <sup>3</sup> /h
1.19		Umrechnung in Norm-m <sup>3</sup>	107	m <sup>3</sup> /h
1.20		Leistungsbedarf Erwärmung Trägerluft MAX	46	kW

Zur Berechnung der Luftdichte ρ<sub>f</sub> (1.10) bei Betriebstemperatur T (1.6) wurde **Gleichung 1** verwendet.

$$\rho = \frac{p}{R_s \cdot T} \quad (1)$$

Die Sedimentationsgeschwindigkeit V<sub>s,N</sub> (1.14) des ungesinterten bzw. gesinterten Körpers wurde nach **Gleichung 2** berechnet.

$$V_{s,N} = \sqrt{\frac{4 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot d \cdot g}{3 \cdot c_w \cdot \rho_f}} \quad (2)$$

Aus den Sedimentationsgeschwindigkeiten konnten anschließend der minimal bzw. maximal benötigte Betriebsvolumenstrom (1.15, 1.18) mit **Gleichung 3** sowie der Normvolumenstrom (1.16, 1.19) mit **Gleichung 4** für den ungesinterten bzw. gesinterten Spulenkörper ermittelt werden.

Während des Sintervorganges steigt die Dichte der Probekörper und damit die Sedimentationsgeschwindigkeit an. Um ein Absinken der Teile im Reaktor zu verhindern, muss der entgegengesetzt gerichtete Abgasstrom entsprechend ausgelegt werden. Da sich durch das Regelungskonzept des gasbeheizten Reaktors mit zunehmender Reaktortemperatur die zugeführten Luftströme ebenfalls erhöhen, ist ein Ausgleich der Stoffströme über eine separate Luftzuführung notwendig. Dies erfolgt während der Versuchsdurchführung manuell und kann nach Kenntnis des Regelverhaltens gegebenenfalls durch eine motorische Stellklappe als separater Regelkreis in den Prozess eingebunden werden.

$$\text{Betriebsvolumenstrom} = v_{s,N} \cdot 3600 \cdot D^2 \cdot \pi/4 \quad (3)$$

$$\text{Normvolumenstrom} = \text{Betriebsvolumenstrom} \cdot 293,15 \text{ K}/1573,15 \text{ K} \quad (4)$$

Aus dem Normvolumenstrom wurde der Leistungsbedarf zur Erwärmung der Trägerluft von Raum- auf Betriebstemperatur  $T$  mit **Gleichung 5** berechnet – ebenfalls jeweils für den ungesinterten (1.17) sowie für den gesinterten (1.20) Spulenkörper. Entsprechend dieser Berechnungen wurden der Brenner und das Verbrennungsluftgebläse für den Wirbelschichtreaktor dimensioniert.

$$\text{Leistungsbedarf} = \text{Normvolumenstrom} \cdot \rho_{f,0} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta \quad (5)$$

Im nächsten Schritt wurde ein 3D-Modell des kompletten Reaktors mit allen Baugruppen angefertigt. Aus diesem Modell konnten alle notwendigen Fertigungszeichnungen, z.B. für den Stahlbau und den feuerfesten Aufbau, abgeleitet werden.

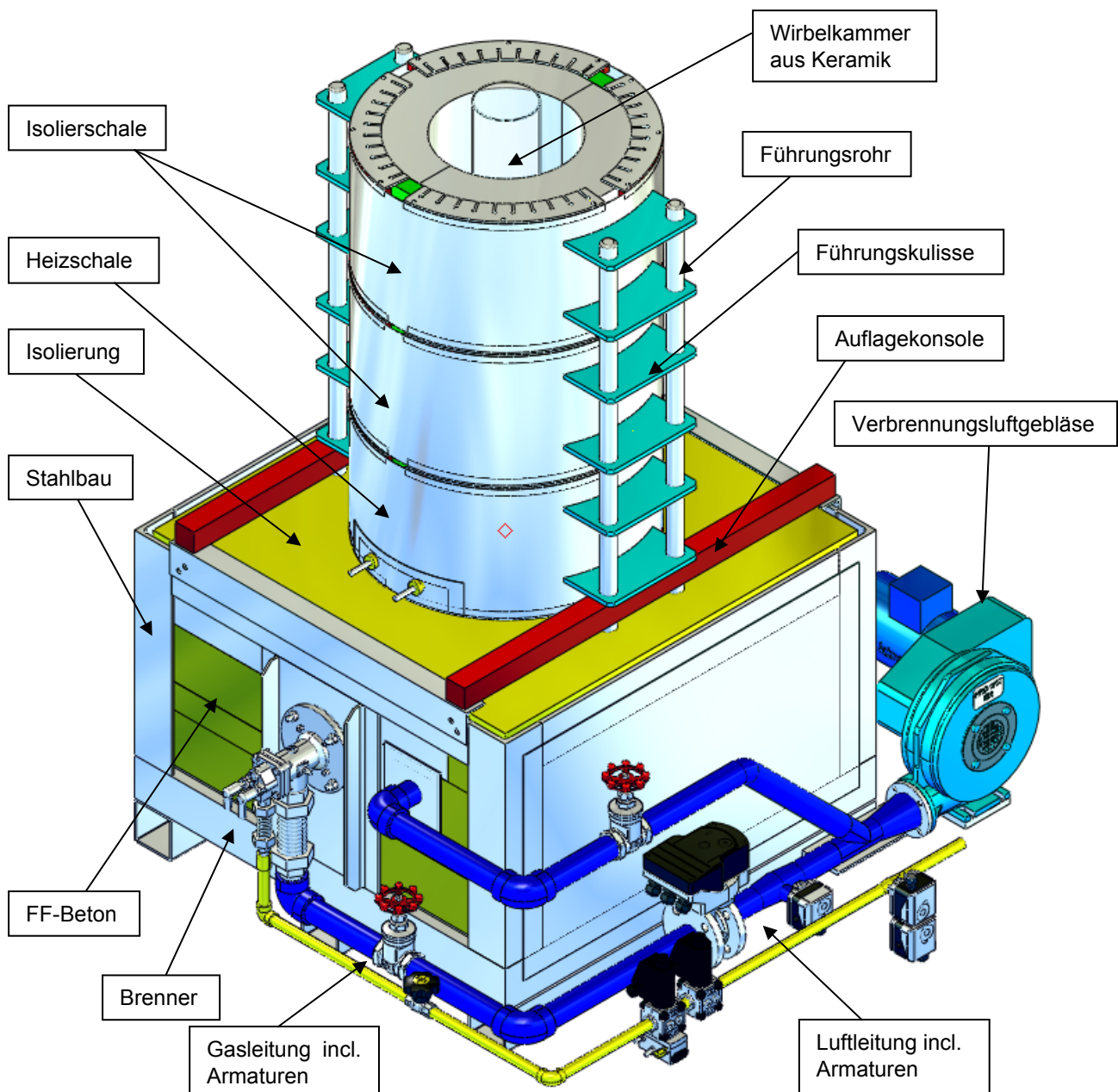


Abb. 3: 3D-Modell des Wirbelschichtreaktors

Das folgende Bild 4 zeigt die Gas- und Luftregelstrecke des Ofens. Die für die Verbrennung notwendige Luftmenge wird dem Gasbrenner über ein separates Verbrennungsluftgebläse zugeführt. Durch einen in die Gasleitung integrierten Gleichdruckregler, der mit einer Wirkdruckleitung mit der Luftleitung verbunden ist, wird automatisch die für eine vollständige Verbrennung notwendige Gasmenge angepasst. Um die Betriebssicherheit der Anlage zu gewährleisten, wurden beide Regelstrecken gemäß der DIN EN 746-2 aufgebaut. Vorgesehen sind dabei die Überwachung der minimal und maximal zulässigen Drücke in den Versorgungsleitungen sowie die Kontrolle der Brennerflamme über eine Ionisationselektrode. Bei Flammenausfall oder unzulässig hohen Drücken werden automatisch die beiden redundanten Magnetventile in der Gaszuleitung verschlossen, sodass der Austritt von unverbranntem Gas verhindert wird. Über eine separate Brennersteuerung wird die Flamme gezündet und alle Funktionen des Gasbrenners werden permanent überwacht.

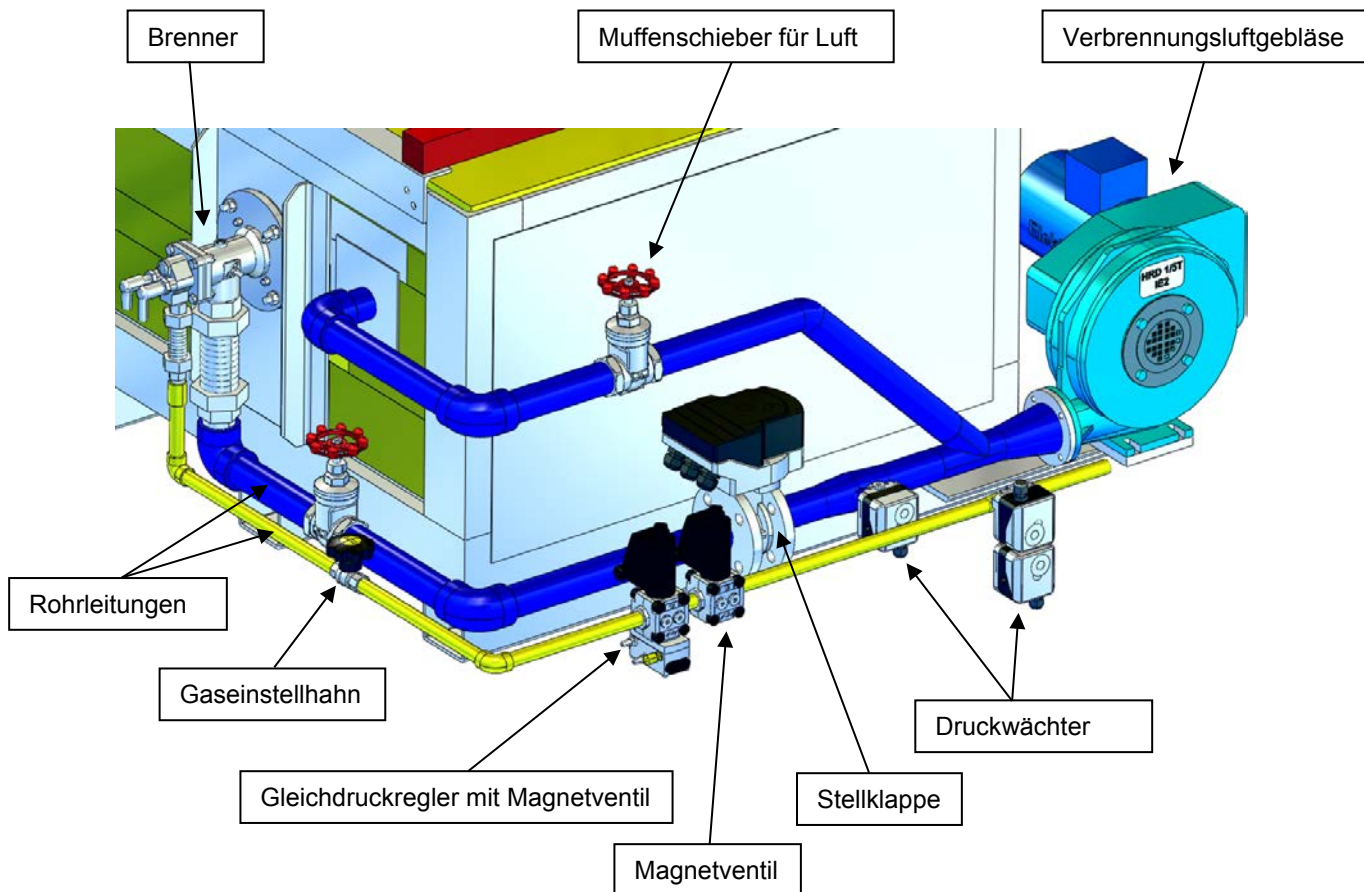


Abb. 4: Detailskizze der Gas- und Luftregelstrecke

Der Ofen ist mit einer elektrischen Zusatzheizung bzw. Heizschale ausgestattet. Diese wird benötigt, um im Reaktor eine Zone mit annähernd gleicher Temperatur, unabhängig von der Temperatur des Abgasstromes, einstellen zu können. Abhängig von der Schwebhöhe der zu sintern den Teilchen in der keramischen Wirbelkammer ist die Heizschale mit zwei Isolierschalen kombinierbar. Die Module können problemlos über Führungsrohre gegeneinander ausgetauscht werden.

Der Ofen wurde inzwischen planmäßig aufgebaut (Bild 5). Im nächsten Schritt erfolgt die Verkabelung der elektrischen Komponenten mit dem bereits vorhandenen Schaltschrank. Anschließend werden Versuche bei verschiedenen Sintertemperaturen durchgeführt und die Betriebsbedingungen optimiert. Zum Schluss erfolgt die Fertigstellung der wärmetechnischen Isolierung und der Endanstrich.

Wenn sich der neue Wirbelschichtreaktor bei den geplanten Versuchsproduktionen bewährt, soll in einem weiteren Schritt ein Teil der heißen Abgase im Kreislauf geführt werden. Dadurch kann der Energieverbrauch (Gasverbrauch) reduziert werden.





Abb. 5: Wirbelschichtreaktor mit Gasregelstrecke und Luftgebläse

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Bei erfolgreicher Entwicklung und Bewährung des neu entwickelten Wirbelschichtreaktors wird geprüft, ob das Verfahren als Patent angemeldet werden kann. Anschließend soll in Zusammenarbeit mit einem namhaften Betrieb der Elektrokeramik und einer Ofenbaufirma ein industriell tauglicher Wirbelschichtreaktor entwickelt, projiziert und gebaut werden. Die wissenschaftlich-technischen Arbeiten und Versuchsproduktionen sollen über ein neu zu beantragendes, größeres F & E-Vorhaben finanziert werden.

Der neue Industrieofen soll in kontinuierlicher Betriebsweise eine Temperaturbehandlung von Produkten ermöglichen, die sich durch vergleichsweise verbesserte Produkteigenschaften auszeichnen. Außerdem wird der neue Wirbelschicht-Reaktor eine Energieeinsparung gegenüber klassischen Thermoprozessanlagen bewirken. Industriebetriebe, die das neue Sinterverfahren einsetzen, können infolge verbesserter Produktqualität und verbesserter Energieeffizienz besonders nachhaltig wirtschaften und sich am Markt behaupten. Dadurch bleiben Arbeitsplätze erhalten und die heimische Industrie in Bayern und Deutschland wird gestärkt. Durch die vergleichsweise Einsparung von Primärenergie wird ein Beitrag zur Energiewende geleistet.

Die Durchführung der dazu notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfolgt durch zwei besonders geeignete Absolventen der Fakultät Werkstofftechnik der TH Nürnberg im Rahmen kooperierender Promotionen. Darüber hinaus bietet das Vorhaben den Studierenden die Möglichkeit, im Rahmen von Bachelor- und Master-Arbeiten sowie Praxissemestern und Projektarbeiten Erfahrungen bei der Durchführung wissenschaftlicher Arbeiten zu sammeln und Industriebetriebe kennenzulernen.

## 6. Literatur / Quellen

Alle Bilder und Zeichnungen stammen aus dem Archiv von W. Krcmar.