

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18430 BR/1

## Thema

Entwicklung eines mathematischen Modells zur Simulation thermischer Prozesse in direkt und indirekt beheizten Drehrohröfen

## Berichtszeitraum

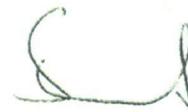
01.01.2015 - 31.12.2016

## Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft der Deutschen Keramischen Gesellschaft e.V. (FDKG)

## Forschungsstelle

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik  
Lehrstuhl für Thermodynamik und Verbrennung



Magdeburg, 13.03.2017

Prof. Dr. Fabian Herz / Prof. Dr. Eckehard Specht

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>MODELLENTWICKLUNG</b>	<b>7</b>
2.1	BILANZRAUM	7
2.2	GASPHASE	9
2.3	SCHÜTTBETTPHASE	12
<b>3</b>	<b>SCHÜTTGUTTRANSPORT</b>	<b>14</b>
3.1	TRANSVERSALE SCHÜTTGUTBEWEGUNG	14
3.2	AXIALER SCHÜTTGUTTRANSPORT	19
<b>4</b>	<b>WÄRMEÜBERGANG</b>	<b>22</b>
4.1	WÄRMEÜBERGANG DURCH KONVEKTION	22
4.2	WÄRMEÜBERGANG DURCH STRAHLUNG	28
4.2.1	DREIERAUSTAUSCH	28
4.2.2	FESTKÖRPER- UND GASSTRAHLUNG	30
4.2.3	STRAHLUNG SUSPENDIERTER FESTSTOFFPARTIKEL	34
4.2.4	RADIATIVER WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENT	38
4.3	WÄRMETRANSPORT IN DER WAND / REGENERATIVER WÄRMEÜBERGANG	39
4.4	WÄRMEÜBERGANG DURCH KONTAKT	43
4.5	WÄRMEVERLUST DURCH DIE OFENWAND	49
4.5.1	WÄRMEDURCHGANG DURCH DIE WAND	49
4.5.2	KONVEKTIVER WÄRMEÜBERGANG ZUR UMGEBUNG	51
4.5.3	RADIATIVER WÄRMEÜBERGANG ZUR UMGEBUNG	54
<b>5</b>	<b>MODELLVALIDIERUNG</b>	<b>58</b>
5.1	VERSUCHSMESSUNG IM TECHNIKUM	58
5.1.1	VERSUCHSANLAGE	58
5.1.2	ERGEBNISSE UND ANALYSE DER VERSUCHSMESSUNGEN	60

<b>5.2</b>	<b>BETRIEBSMESSUNGEN IN INDUSTRIE</b>	<b>73</b>
5.2.1	BETRIEBSANLAGE	73
5.2.2	ERGEBNISSE UND ANALYSE DER BETRIEBSMESSUNGEN	74
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>VERWENDUNG DER ZUWENDUNG</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b>NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>DARSTELLUNG DES WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEN UND WIRTSCHAFTLICHEN NUTZENS DER ERZIELTEN ERGEBNISSE INSBESONDERE FÜR KMU SOWIE IHRES INNOVATIVEN BEITRAGS UND IHRER INDUSTRIELLEN ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN</b>	<b>82</b>
<b>10</b>	<b>PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT</b>	<b>83</b>
<b>11</b>	<b>EINSCHÄTZUNG ZUR REALISIERBARKEIT DES TRANSFERKONZEPTES</b>	<b>86</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>86</b>
	<b>ANLAGE 1</b>	<b>91</b>
	<b>ANLAGE 2</b>	<b>94</b>
	<b>ANLAGE 3</b>	<b>98</b>
	<b>ANLAGE 4</b>	<b>101</b>

## **6 Zusammenfassung**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein eindimensionales mathematisches Modell zur Simulation von thermischen Prozessen in Drehrohröfen entwickelt. Dieses Prozessmodell zeichnet sich insbesondere durch die umfassende modelltechnische Abbildung der Phänomenologie der Wärmeübertragung sowie die Verknüpfung der komplexen Zusammenhänge zwischen der transversalen und axialen Bewegung des Schüttgutes und dem Wärmeübergang aus. Zur mathematischen Beschreibung der Wärmeübergangsmechanismen und des transversalen und axialen Bewegungsverhaltens des Schüttgutes wurden makroskopische Modellansätze aus der bisherigen Literatur angewendet, die sowohl theoretisch fundiert sind als auch mit experimentellen Messungen validiert wurden. Die gewählten Teilmodelle des Wärmeübergangs und der Schüttbettbewegung werden in ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung implementiert, welches auf der energetischen Bilanzierung diskreter infinitesimal kleiner Längensegmente des Drehrohrofens beruht. Infolgedessen wird es mit dem Prozessmodell ermöglicht, die axialen Temperaturverläufe der Gasphase, des Schüttbettes, der Drehrohrinnenwand und der äußeren Manteloberfläche entlang des Drehrohres zu berechnen.

Zur Beurteilung der Güte des mathematischen Prozessmodells wurden experimentelle Messungen in einem Versuchsdrehrohröfen im technischen Maßstab sowie Betriebsmessungen in Drehrohröfen industriellen Maßstabs durchgeführt. Für die Sensitivitätsanalyse des Modells wurden die Parameter Energieeintrag, Drehzahl und Neigung des Drehrohres und die Durchsatzrate des Schüttgutes variiert und deren Einfluss analysiert. Bei dem Vergleich der Modellberechnungen mit den Messwerten zeigen sich gute Übereinstimmungen, so dass sich das theoretische Modell zur Simulation von Prozessen in Drehrohröfen im technischen und industriellen Maßstab eignet.