

Dipl.-Ing. Manfred Wirsum, Netphen

**Theoretische Beschreibung  
und experimentelle  
Untersuchung  
der Verbrennung  
von Klärschlamm in  
blasenbildenden  
Wirbelschichtfeuerungen**

Reihe **6**: Energieerzeugung

Nr. **383**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>X</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zur Situation von Abwasserbehandlung, Klärschlammanfall und Klärschlamm- entsorgung in Deutschland . . . . .	1
1.2 Chemische Charakterisierung von Klärschlamm . . . . .	5
1.3 Aufbereitung von Klärschlamm und thermische Verwertung in Wirbelschicht- feuerungen . . . . .	7
<b>2 Modellbeschreibung</b>	<b>11</b>
2.1 Modellelemente . . . . .	11
2.2 Struktur des Modells . . . . .	12
2.3 Bilanzierung am Zellenmodell . . . . .	15
2.3.1 Wahl der bilanzierten Variablen . . . . .	15
2.3.2 Formulierung der Bilanzgleichungen . . . . .	17
2.3.2.1 Bilanzierung gasförmiger Stoffströme . . . . .	18
2.3.2.2 Bilanzierung fester Stoffströme . . . . .	19
2.3.2.3 Bilanzierung der Energieströme . . . . .	20
2.3.3 Berechnungsverfahren zur Lösung der Zellbilanzgleichungen . . . . .	21
<b>3 Strömung in blasenbildenden Wirbelschichtfeuerungen</b>	<b>24</b>
3.1 Strömungsmechanische Einordnung von blasenbildenden Wirbelschichten . . .	24
3.2 Strömungsmechanik in der Wirbelschicht . . . . .	27
3.2.1 Strömungsbereiche . . . . .	27
3.2.2 Berechnung der strömungsmechanischen Kenngrößen einer blasenbildenden Wirbelschicht . . . . .	29
3.3 Strömungsmechanik im Freiraum einer blasenbildenden Wirbelschicht . . . . .	33
3.3.1 Feststoffbewegung und Feststoffkonzentration im Freiraum . . . . .	33
3.3.1.1 Modellgleichungen. . . . .	33
3.3.1.2 Lösung der Partikelbewegungsgleichungen . . . . .	36

3.4	Austrag von Feststoff in den Freiraum . . . . .	39
3.4.1	Berechnung der Austragsrate aus dem Wirbelbett . . . . .	39
3.4.2	Berechnung der Startgeschwindigkeit der Partikel an der Wirbelschicht- oberfläche . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Wärmeübergang zwischen Freiraum und Wirbelschicht</b>	<b>42</b>
4.1	Wärmeübertragung durch „Partikelkonvektion“ . . . . .	42
4.1.1	Berechnung der instationären Partikelheizung durch analytischen Lösungsansatz . . . . .	43
4.1.2	Berechnung der instationären Partikelheizung durch numerischen Lösungsansatz . . . . .	45
4.1.3	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Freiraumgas und Partikel . . . . .	47
4.1.4	Modellrechnungen . . . . .	49
4.2	Wärmeübergang durch Strahlung . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Verteilung des Brennstoffs in der Wirbelschicht</b>	<b>58</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	58
5.1.1	Horizontale Dispersion . . . . .	58
5.1.2	Vertikale Dispersion und Segregation . . . . .	59
5.2	Wechselwirkung von Verbrennung und Vermischung . . . . .	60
5.3	Mechanismen der Vermischung und der Segregation . . . . .	60
5.4	Typische Segregationsmuster . . . . .	61
5.4.1	Flotsam-reiche Systeme . . . . .	62
5.4.2	Jetsam-reiche Systeme . . . . .	62
5.5	Experimentelle Untersuchungen zur Segregation in blasenbildenden Wirbel- schichten . . . . .	63
5.5.1	Ergebnisse aus der Literatur . . . . .	64
5.5.2	Aufbau der Versuchsanlage . . . . .	65
5.5.3	Das Ortungssystem . . . . .	68
5.5.4	Versuchsreihen . . . . .	68
5.5.5	Versuchsdurchführung und Auswertung der Meßdaten . . . . .	70
5.5.6	Ergebnisse . . . . .	71

5.6	Mathematische Modellierung der Segregation von Klärschlamm in blasenbildenden Wirbelschichten . . . . .	77
5.6.1	Das GR-Modell als Grundlage eines Segregationsmodells für Klärschlamm . . . . .	77
5.6.2	Anpassung des GR-Modells . . . . .	80
5.6.2.1	Aufspaltung der Feststoff-Zirkulationsströme . . . . .	81
5.6.2.2	Berücksichtigung des overlaying-effect . . . . .	81
5.6.2.3	Einführung eines Koeffizienten für axiale Dispersion . . . . .	82
5.6.3	Modellgleichungen des Segregationsmodells für Klärschlamm . . . . .	82
5.6.4	Bestimmung der Segregationskoeffizienten . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Trocknungs- und Reaktionsabläufe bei der Verbrennung von Klärschlamm in blasenbildenden Wirbelschichtfeuerungen</b>	<b>91</b>
6.1	Bewertung der Prozesse bei der Entgasung und Verbrennung von Klärschlamm	91
6.2	Trocknung und Pyrolyse von Klärschlamm in blasenbildenden Wirbelschichtfeuerungen . . . . .	93
6.2.1	Wärmeübergang zwischen einem Schlammklumpen und der Wirbelschicht . . . . .	93
6.2.2	Modellierung der Entgasung von Klärschlamm . . . . .	97
6.2.3	Produkte der Pyrolyse von Klärschlamm . . . . .	100
6.2.3.1	Chemische Prozesse bei der Pyrolyse von Klärschlamm . . . . .	100
6.2.3.2	Berechnung der Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte im Modell . . . . .	105
6.3	Verbrennung der flüchtigen Bestandteile des Klärschlammes . . . . .	106
6.3.1	Bewertung der Verteilungs- und Verbrennungsvorgänge der flüchtigen Bestandteile . . . . .	106
6.3.2	Lokale Freisetzung und Dispersion der flüchtigen Bestandteile aus Klärschlamm . . . . .	107
6.3.3	Verbrennung der Entgasungsprodukte in der Wirbelschicht . . . . .	110
6.3.4	Modellierung der chemisch- und mischungskontrollierten Verbrennungsreaktionen der Entgasungsprodukte . . . . .	113
6.3.4.1	Reaktionskinetische Ansätze . . . . .	113
6.3.4.2	Berücksichtigung einer nichtidealen Vermischung der Reaktanden im Simulationsmodell . . . . .	114

6.4	Verbrennung des Restkokes aus Klärschlamm . . . . .	116
6.4.1	Vorgänge bei der Entstehung von Restkoks . . . . .	116
6.4.2	Modellierung der Restkoksverbrennung . . . . .	117
6.4.3	Bestimmung der Temperatur der brennenden Kokspartikel . . . . .	120
6.5	Bildung und Abbau von Stickoxid bei der Verbrennung von Klärschlamm in einer blasenbildenden Wirbelschicht . . . . .	121
6.5.1	Freisetzung des Stickstoffs aus dem Klärschlamm . . . . .	121
6.5.2	Reaktionen des Stickstoffs . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Berechnung unterschiedlicher stationärer Betriebszustände einer Klärschlammverbrennungsanlage mit blasenbildender Wirbelschicht</b>	<b>127</b>
7.1	Beschreibung der Anlage . . . . .	127
7.2	Zusammenstellung der berechneten Betriebsfälle . . . . .	129
7.3	Vergleich der Simulationsergebnisse mit gemessenen Betriebszuständen . . . . .	132
7.4	Berechnung des Betriebsverhalten bei Verwendung von Steinkohle als Stütz- brennstoff . . . . .	151
<b>8</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur Pyrolyse und Verbrennung von Klärschlamm in Wirbelschichtfeuerungen</b>	<b>155</b>
8.1	Untersuchungen zur Kinetik der Restkoksverbrennung von Klärschlamm . . . . .	155
8.1.1	Experimenteller Teil . . . . .	155
8.1.1.1	Aufbau der Versuchsanlage . . . . .	155
8.1.1.2	Meßtechnische Einrichtung . . . . .	155
8.1.2	Charakterisierung der eingesetzten Brennstoffe . . . . .	157
8.1.3	Versuchsdurchführung und Auswertung . . . . .	157
8.1.3.1	Experimentelle Vorgehensweise . . . . .	157
8.1.3.2	Bestimmung kinetischer Parameter der Restkoksverbrennung . . . . .	158
8.1.4	Ergebnisse für Braunkohle und Klärschlamm . . . . .	162
8.2	Untersuchungen zur Entgasung von kommunalem Klärschlamm . . . . .	166
8.2.1	Pyrolyse von Klärschlamm im Gasstrom . . . . .	166
8.2.1.1	Aufbau der Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung . . . . .	166
8.2.1.2	Charakterisierung der eingesetzten Klärschlämme . . . . .	166
8.2.1.3	Ergebnisse . . . . .	167

8.2.2	Pyrolyse von Klärschlamm in einer Laborwirbelschicht . . . . .	168
8.2.2.1	Versuchsanlage mit Wirbelschicht . . . . .	168
8.2.2.2	Charakterisierung der eingesetzten Klärschlämme . . . . .	169
8.2.2.3	Versuchsdurchführung und Probenahme . . . . .	170
8.2.2.4	Auswertung der Versuche . . . . .	171
8.2.2.5	Ergebnisse . . . . .	173
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>178</b>
<b>A</b>	<b>Zusammenstellung der Ergebnisse aus Pyrolyse- und Verbrennungsversuchen</b>	<b>180</b>
	<b>Literatur</b>	<b>200</b>