

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
Formelzeichen und Abkürzungen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen der Klärschlammbehandlung	4
2.1 Entstehung und Charakterisierung	4
2.2 Aufkommen und Verwertungsstrukturen	6
2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen	7
2.3.1 AbfKlärV	7
2.3.2 DüMV	8
2.3.3 17. BlmSchV	10
2.4 Thermische Verwertung	11
2.4.1 Grundlagen der thermochemischen Konversion	11
2.4.2 Klärschlammverbrennung	13
2.4.3 Emissionsminderung und Abgasreinigung	16
2.5 Phosphorrückgewinnung	18
2.5.1 Einsatzstelle Prozesswasser und Faulschlamm	19
2.5.2 Einsatzstelle Klärschlamm und Klärschlammmasche	21
3 Stand der Forschung zum Thermochemischen Phosphor-Recycling	23
3.1 Schwermetallreduktion	24
3.1.1 Schwermetalle in Klärschlamm und Klärschlammmasche	24
3.1.2 Aschebildung und Schwermetalltransfer bei thermischer Behandlung	27
3.1.3 Einfluss von Additiven auf die Schwermetallreduktion	29

3.2	Verbesserung der Phosphorverfügbarkeit	34
3.2.1	Phosphor in Klärschlamm und Klärschlammmasche	35
3.2.2	Einfluss von Additiven auf die Phosphorlöslichkeit	36
3.3	Beispiele bestehender Verfahren	37
3.3.1	AshDec	37
3.3.2	EuPhoRe	38
3.3.3	Weitere Verfahrensansätze	40
3.4	Defizite und Forschungsbedarf	41
4	Angewandte Methodik und verwendete Anlagen	42
4.1	Laboruntersuchungen	42
4.1.1	Probenvorbereitung	42
4.1.2	Brennstoffanalytik	44
4.1.3	Elementaranalytik mineralischer Bestandteile und Schwermetalle	46
4.1.4	Thermogravimetrische Analytik	48
4.1.5	Analytik des Ascheschmelzverhaltens	49
4.1.6	Verbrennungsversuche (Muffelofen)	51
4.2	Tastversuche Industriemaßstab (stationäre Wirbelschicht)	51
4.2.1	Anlagen- und Versuchsaufbau	51
4.2.2	Versuchsablauf	54
4.3	Bestimmung der Schwermetallreduktion	55
4.4	Bestimmung der Phosphorlöslichkeit	56
4.5	Thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen	58
5	Charakterisierung der Einsatzstoffe und Rückstände	60
5.1	Zusammensetzung	60
5.1.1	Klärschlamm	60
5.1.2	Klärschlammmasche	65
5.2	Thermisches Verhalten	71
5.3	Ascheschmelzverhalten	84
6	Untersuchungsergebnisse zum Thermochemischen Phosphor-Recycling	87

6.1	Schwermetallreduktion	87
6.1.1	Laboruntersuchungen im Muffelofen	87
6.1.2	Tastversuche in großtechnischer stationärer Wirbelschicht	101
6.2	Nährstoffrückgewinnung.....	108
6.2.1	Nährstoffüberführung in die Klärschlammmasche	108
6.2.2	Löslichkeitsuntersuchungen	123
6.3	Diskussion der Ergebnisse	127
6.3.1	Schwermetallreduktion	127
6.3.2	Phosphorrückgewinnung.....	136
6.3.3	Reflexion der Methodik	138
7	Integrationskonzept und Herausforderungen	142
7.1	Technische Umsetzung.....	142
7.1.1	Anlagenkonzept	144
7.1.2	Massen- und Energiebilanz.....	150
7.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	154
7.2.1	Kapital- und Betriebskosten	154
7.2.2	Kostensenkungspotenzial	158
7.3	Bewertung des Verfahrensansatzes.....	160
8	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	164
	Abbildungsverzeichnis	169
	Tabellenverzeichnis	178
	Literaturverzeichnis	180
A	Anhang	195