

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. BImSchV ..... 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 Klärschlammasche ..... 21

3    **Stand der Forschung zum Thermochemischen Phosphor-Recycling** ..... 23

    3.1    Schwermetallreduktion ..... 24

        3.1.1    Schwermetalle in Klärschlamm und Klärschlammasche ..... 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 Klärschlammasche .....	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
<b>4</b>	<b>Angewandte Methodik und verwendete Anlagen .....</b>	<b>42</b>
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
<b>5</b>	<b>Charakterisierung der Einsatzstoffe und Rückstände .....</b>	<b>60</b>
5.1	Zusammensetzung .....	60
5.1.1	Klärschlamm .....	60
5.1.2	Klärschlammasche .....	65
5.2	Thermisches Verhalten .....	71
5.3	Ascheschmelzverhalten .....	84
<b>6</b>	<b>Untersuchungsergebnisse zum Thermochemischen Phosphor-Recycling .....</b>	<b>87</b>

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 Klärschlammasche .....	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
<b>7</b>	<b>Integrationskonzept und Herausforderungen .....</b>	<b>142</b>
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
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>164</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>169</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>178</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>180</b>
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>195</b>