

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	x
Symbolverzeichnis	xi
Formelverzeichnis	xiii
Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xx
Kurzfassung	23
Abstract	25
1. Einleitung	27
1.1. Motivation	27
1.2. Ziele der Arbeit	31
1.3. Struktur der Arbeit	32
2. Grundlagen	34
2.1. Zusammensetzung und Aufkommen landwirtschaftlicher Reststoffe	34
2.1.1. Gülle	34
2.1.2. Gärprodukte	37
2.2. Thermodynamische Grundlagen von Fällungsreaktionen	39
2.2.1. Löslichkeitsprodukt	40
2.2.2. Übersättigung in Lösungen	42
2.2.3. Mechanismen von Fällungsreaktionen und Einflussparameter	43
2.3. Grundlagen der Reaktionskinetik	45
2.3.1. Reaktionsgeschwindigkeit	46
2.3.2. Reaktionsordnung	47
2.4. Kalium-Magnesium-Phosphat (KMP)	49
2.4.1. Stoffeigenschaften	50
2.4.2. Nebenprodukte bei der KMP-Fällung	51
2.5. KMP-Fällung unter Einsatz einer Magnesium-Opferanode	55
2.5.1. Elektrochemische und galvanische Zellen	56
2.5.2. Das Faraday-Gesetz	57
2.5.3. Verhalten von Magnesiumelektroden	58
2.5.3.1. Korrosionsverhalten	58
2.5.3.2. Passivierung	58
2.5.3.3. Korrosionsfördernde Ionen	59
3. Stand der Technik	60

3.1.	Aufbereitung von Gülle und Gärresten	60
3.2.	Verfahren zur Nährstoffrückgewinnung aus Gülle und Gärresten	63
3.3.	Elektrochemisches Verfahren zur Magnesium-Ammonium-Phosphat-Fällung	65
3.4.	Stand der Wissenschaft zur KMP-Fällung	66
4.	Materialien und Methoden	69
4.1.	Ermittlung des pH-Fällungsbereiches von KMP	69
4.2.	Modellierung der KMP-Fällung anhand von Modelllösungen	72
4.2.1.	Thermodynamische Betrachtung der Fällung	73
4.2.2.	Ermittlung eines Löslichkeitsproduktes von KMP	77
4.2.3.	Kinetische Betrachtung der Fällung	79
4.3.	Chemische und elektrochemische KMP-Fällung aus Modelllösungen	81
4.3.1.	Einfluss von Fremdionen auf die KMP-Fällung – Validierung des thermodynamischen Modells	81
4.3.2.	Einfluss von Fremdionen auf die Mg-Freisetzung	83
4.3.3.	Bestimmung der Reaktionsordnung	85
4.3.4.	Kontinuierliche Versuche zur KMP-Fällung aus Modell-Lösungen – Validierung des kinetischen Modells	86
4.4.	Chemische und elektrochemische KMP-Fällung aus Gülle	90
4.4.1.	Vorbehandlung von Gülle für die KMP-Fällung	91
4.4.1.1.	Erhöhung des Phosphorgehaltes in der Flüssigphase durch Säureeinsatz	91
4.4.1.2.	Entfernung von Calcium aus Gülle über Komplexierung mit Zitronensäure	91
4.4.2.	Versuche zur KMP-Fällung aus Gülle – Validierung des thermodynamischen Modells mit realen Medien	91
4.5.	Analytische Methoden	92
4.5.1.	Messung der Ionenkonzentration	92
4.5.2.	Kristalluntersuchungen	93
4.6.	Berechnungen	94
4.6.1.	Magnesiumfreisetzung	94
4.6.2.	Auslegung der kontinuierlichen KMP-Fällung	94
4.6.3.	Bestimmung der Niederschlagszusammensetzung	95
5.	Ergebnisse	97
5.1.	Ermittlung des pH-Fällungsbereiches von KMP	97
5.2.	Modellierung der KMP-Fällung anhand von Modelllösungen	100
5.2.1.	Thermodynamische Betrachtung der Fällung	100
5.2.2.	Ermittlung eines Löslichkeitsproduktes von KMP	105
5.2.3.	Kinetische Betrachtung der Fällung	108
5.3.	Chemische und elektrochemische KMP-Fällung aus Modelllösungen	111
5.3.1.	Einfluss von Fremdionen auf die chemische KMP-Fällung - Validierung des thermodynamischen Modells	111

5.3.2.	Einfluss von Fremdionen auf die Mg-Freisetzung	116
5.3.3.	Bestimmung der Reaktionsordnung der chemischen und elektrochemischen KMP-Fällung	118
5.3.4.	Kontinuierliche Versuche zur KMP-Fällung aus Modell-Lösungen – Validierung des kinetischen Modells	121
5.3.4.1.	Versuche zur KMP-Fällung mit elektrochemischer Mg-Dosierung	121
5.3.4.2.	Versuche zur KMP-Fällung mit chemischer Mg-Dosierung	126
5.4.	Chemische und elektrochemische KMP-Fällung aus Gülle	127
5.4.1.	Vorbehandlung von Gülle für die KMP-Fällung	127
5.4.1.1.	Erhöhung des Phosphorgehaltes in der Flüssigphase durch Säureeinsatz	127
5.4.1.2.	Entfernung von Calcium aus Gülle durch Zitronensäure	128
5.4.2.	Versuche zur KMP-Fällung aus Gülle	129
6.	Diskussion der Ergebnisse	131
6.1.	Ermittlung des pH-Fällungsbereiches von KMP	131
6.2.	Modellierung der KMP-Fällung anhand von Modelllösungen	134
6.2.1.	Thermodynamische Betrachtung der Fällung	134
6.2.2.	Ermittlung eines Löslichkeitsproduktes von KMP	138
6.2.3.	Kinetische Betrachtung der Fällung	141
6.3.	Chemische und elektrochemische KMP-Fällung aus Modelllösungen	143
6.3.1.	Einfluss von Fremdionen auf die KMP-Fällung – Validierung des thermodynamischen Modells	143
6.3.2.	Einfluss von Fremdionen auf die Mg-Freisetzung	147
6.3.3.	Bestimmung der Reaktionsordnung	149
6.3.4.	Kontinuierliche Versuche zur KMP-Fällung – Validierung des kinetischen Modells	152
6.3.4.1.	Fällung mit elektrochemischer Mg-Dosierung	152
6.3.4.2.	Fällung mit chemischer Mg-Dosierung	155
6.4.	Vorbehandlung von Gülle für die KMP-Fällung	157
6.5.	Chemische und elektrochemische KMP-Fällung aus Gülle	158
6.6.	Entwicklung eines Konzeptes zur Fällung von KMP aus Gülle	159
6.7.	Mögliche Nutzung anfallender Reststoffe	163
7.	Zusammenfassung	166
8.	Ausblick	168
9.	Literaturverzeichnis	169
10.	Anhang	180