

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	2
1.2 Zielsetzung	6
1.3 Aufbau der Arbeit	7
2 Chemische und thermodynamische Grundlagen	11
2.1 Chemische Gleichgewichte	11
2.2 Löslichkeitsprodukt	15
2.3 Übersättigung und metastabiler Bereich	17
2.4 Keimbildung	19
2.4.1 Primäre Keimbildung	19
2.4.1.1 Homogene Keimbildung	20
2.4.1.2 Heterogene Keimbildung	21
2.4.2 Sekundäre Keimbildung	22
2.5 Kristallwachstum	22
2.6 Begleitende Mechanismen	24
2.6.1 Agglomeration	25
2.6.2 Reifung	26
2.6.3 Transformation	27
3 Bildung von Magnesium-Ammonium-Phosphat	29
3.1 Charakterisierung von Struvit	29
3.2 Löslichkeit und Sättigung	31
3.3 Einflussgrößen auf die Kristallisation	34
3.3.1 pH-Wert	34
3.3.2 Temperatur	36
3.3.3 Ionenkonzentration	37
3.3.4 Mg:P:N-Verhältnis	38
3.3.5 Fremdbestandteile	39
3.3.6 Weitere Einflussgrößen	41
3.4 Transformationsprozesse	42
3.4.1 Charakterisierung der Transformationsprodukte	43
3.4.1.1 Dittmarit	43

3.4.1.2	Bobierrit	44
3.4.1.3	Amorphe Transformationsprodukte	45
3.4.2	Transformation in wässriger Lösung	45
3.4.3	Dekomposition an Luft	46
4	Charakterisierung des Bezugssystems	49
4.1	Vorgehensweise: Charakterisierung	50
4.1.1	Bereitgestellte Proben	50
4.1.2	Analyse der Ablagerungen	51
4.1.2.1	Kristalline Bestandteile	51
4.1.2.2	Amorphe Komponenten und äußeres Erscheinungsbild	52
4.1.2.3	Chemische Beständigkeit	53
4.1.3	Analyse relevanter Gärresteigenschaften	53
4.1.3.1	pH-Wert	53
4.1.3.2	Ionenkonzentration	54
4.1.3.3	Ionenstärke	55
4.2	Ergebnisse und Diskussion	57
4.2.1	Charakterisierung der Ablagerungen	57
4.2.1.1	Kristalline Bestandteile	57
4.2.1.2	Amorphe Komponenten und äußeres Erscheinungsbild	58
4.2.1.3	Chemische Beständigkeit	61
4.2.2	Charakterisierung des Gärreste	63
4.2.2.1	pH-Wert	63
4.2.2.2	Konzentrationen	65
4.2.2.3	Ionenstärke	66
5	Temperatureinfluss auf die MAP-Bildung	69
5.1	Methodisches Vorgehen	69
5.1.1	Vorhersage auf Basis thermodynamischer Zusammenhänge	70
5.1.1.1	Ermittlung der Stoffdaten	70
5.1.1.2	Löslichkeit	72
5.1.1.3	Phasenübergang	75
5.1.1.4	Übersättigung	76
5.1.2	Experimentelle Validierung	77
5.1.2.1	Vorgehensweise	77
5.1.2.2	Versuchsplan	79
5.1.2.3	Ausbeute	80

5.1.2.4	Phasenzusammensetzung	81
5.1.2.5	Gleichgewichtskonzentrationen	84
5.1.3	Exkurs: Phasenübergang an der Luft	85
5.1.3.1	Vorgehensweise	85
5.1.3.2	Versuchsplan	86
5.1.3.3	Transformationsprodukte	86
5.2	Ergebnisse und Diskussion	87
5.2.1	Vorhersage anhand thermodynamischer Zusammenhänge	87
5.2.1.1	Stoffdaten	88
5.2.1.2	Löslichkeit	92
5.2.1.3	Phasenübergang	94
5.2.1.4	Übersättigung	95
5.2.2	Experimentelle Validierung bei geringem Ammoniumüberschuss	98
5.2.2.1	Übersättigung	99
5.2.2.2	Phasenübergang	101
5.2.2.3	Löslichkeit	103
5.2.3	Experimentelle Validierung bei erhöhtem Ammoniumüberschuss	106
5.2.3.1	Übersättigung	107
5.2.3.2	Phasenübergang	108
5.2.3.3	Löslichkeit	111
5.2.4	Exkurs: Phasenübergang an der Luft	113
6	Experimentelle Untersuchung des Gesamtsystems	119
6.1	Methodisches Vorgehen	119
6.1.1	Systemdefinition	120
6.1.1.1	Zielgrößen	120
6.1.1.2	Eingangsgroßen	121
6.1.1.3	Versuchsraum	121
6.1.2	Versuchsplan: One-factor-at-a-time-Analyse	123
6.1.2.1	Definition Referenzzustand	123
6.1.2.2	Screening	124
6.1.2.3	Parametervariation	126
6.1.3	Versuchsplan: Effektkombinationen	127
6.1.3.1	Erstellung des Versuchsplans	128
6.1.3.2	Kontrolle des Versuchsplans	130
6.1.4	Versuchsdurchführung	131
6.1.4.1	Verwendete Versuchslösungen	131

6.1.4.2	Versuchsaufbau	132
6.1.4.3	Ablauf	132
6.1.4.4	Analytik	133
6.1.5	Datenauswertung	133
6.1.5.1	Bestimmung der Zielgrößen	133
6.1.5.2	OFAT	134
6.1.5.3	Effektkombination	136
6.2	Ergebnisse und Diskussion	141
6.2.1	Screening	141
6.2.2	Parametervariation	144
6.2.2.1	pH-Wert	144
6.2.2.2	Konzentration	145
6.2.2.3	Mg:P-Verhältnis	146
6.2.2.4	N:P-Verhältnis	147
6.2.2.5	Temperatur	148
6.2.3	Effektkombination	150
6.2.3.1	Evaluierung des Versuchsplans	151
6.2.3.2	Versuchsplandaten	152
6.2.3.3	Analyse der Gesamtmasse	154
6.2.3.4	Analyse der Zielgröße MAP-Masse	161
6.2.3.5	Analyse der Struvit- und Dittmaritmasse	170
7	Schlussbetrachtung	181
7.1	Zusammenfassung	182
7.2	Fazit und Ausblick	191
	Literaturverzeichnis	193
A	Analysemethoden	211
B	Berechnung der Gleichgewichtskonzentrationen	231
C	Statistische Versuchsplanung	237
D	Ergänzende Ergebnisse	253