Inhaltsverzeichnis	I
Symbolverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	V
Einheiten	VI
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Einführung	1
1.2 Düngemittel-Produktentwicklung aus technischer Betrachtungsweise	2
1.3 Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen dieser Produktentwicklung	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Agronomische und pflanzenphysiologische Grundlagen	5
2.1.1 Klassifizierung von Düngemitteln: Primär-, Sekundär- und Mikronährstoffe	6
2.1.2 Nährstoffe und ihre Pflanzenverfügbarkeit	6
2.1.3 Pflanzenphysiologische Einflüsse von Kalium, Magnesium und Schwefel	7
2.1.4 Sojabohne als beispielhafte Kulturpflanze	7
2.1.5 Allgemeine Anforderungen an streufähige Düngemittel	8
2.2 Hauptbestandteile dieser Produktentwicklung	10
2.2.1 Mineralische Komponenten (Kaliumchlorid, Kaliumsulfat und Magnesiumsulfat)	10
2.2.2 Elementarer Schwefel	14
2.3 Agglomeration – Herstellungsverfahren körniger mineralischer Düngemittel	21
2.3.1 Bindemechanismen	21
2.3.2 Übersicht ausgewählter Agglomerationsverfahren	22
2.3.3 Pressagglomeration mittels Walzenpressen	25
3 Messmethoden und prozessspezifische Messgrößen	35
3.1 Repräsentative Probenahme	35
3.2 Partikelgrößenbestimmung und spezifische Kennzahlen	35
3.2.1 Analysemethoden	35
3.2.2 Bewertungskriterien für granulometrische Verteilungen	36
3.3 Messung physikalischer Stabilitätskriterien von Düngemittelgranulaten	37
3.3.1 Kornfestigkeit	37
3.3.2 Abriebbeständigkeit	42
3.3.3 Lagerstabilität unter klimatischen Bedingungen	44
3.4 Optische Analysemethoden	49
3.4.1 Lichtmikroskop	49
3.4.2 Rasterelektronenmikroskop (REM) mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX)	49
3.5 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung	49
3.5.1 Mineralphasenanalyse	49
3.5.2 Nasschemische Messmethoden	50

3.5.3	Bestimmungsmethode des elementaren Schwefelanteils im Kaliumchlorid–Kieserit–Schwefel System	50
3.6	Prozessspezifische Messgrößen	52
3.6.1	Bewertung der spezifischen Presskraft	52
3.6.2	Definition der theoretischen Ausbeute und Gutkornausbeute	53
4	Übersicht der verwendeten Einsatzstoffe	55
5	Produktentwicklung eines streufähigen schwefelhaltigen Kalidüngers	57
5.1	Apparate und Versuchsdurchführung – Kompaktier-Zerkleinerungsverfahren	57
5.1.1	Prozessschritte zur Herstellung von Bruchgranulat	57
5.1.2	Herstellungsprozess der Mischung bei Verwendung von Flüssigschwefel – erweiterte Versuchsdurchführung	58
5.1.3	Walzenprofil der Laborwalzenpresse	58
5.1.4	Granulatnachbehandlung	59
5.2	Schwefelhaltige Kaligranulate mit Feststoffschwefel	60
5.2.1	Übertragbarkeit auf K+S Produktportfolio (Magnesium- oder Kaliumsulfat?)	60
5.2.2	Machbarkeitsuntersuchung Kaliumsulfat mit Schwefel	61
5.2.3	Übertragung der Erkenntnisse auf das System Kaliumchlorid und Schwefel	62
5.2.4	Entwicklung der Zielformulierungen I und II (bestehend aus Kaliumchlorid, Schwefel und Kieserit)	63
5.2.5	Optimierungspotentiale der Formulierungen	63
5.3	Scale-up Problematik aus sicherheitstechnischer Betrachtungsweise	69
5.4	Schwefelhaltige Kaligranulate mit Flüssigschwefel	70
5.4.1	Schwefel als Bindemittel? – Analogie zur Brikettierung in der Steinkohle-Industrie	70
5.4.2	Flüssigschwefel und die Bindewirkung an Kaliumchlorid – Voruntersuchung	70
5.4.3	Mischprozess: Beobachtungen während der Verwendung von Flüssigschwefel	73
5.4.4	Kompaktierung: Einfluss von Presskraft und Temperatur auf die Schwefelmobilität während des Pressvorgangs	75
5.5	Vergleich der Granulate (Formulierung I und II) aus Herstellung mit Feststoff- bzw. Flüssigschwefel	79
5.5.1	Mechanische Granulatqualität	79
5.5.2	Chemische Zusammensetzung	80
5.5.3	Nährstoffverteilung – Mikronisierung des Schwefels im Einzelkorn	81
5.5.4	Lagerstabilität – Simulation klimatischer Lagerbedingungen	86
5.5.5	Agronomische Betrachtung	89
5.6	Fazit	89
6	Verfahrensentwicklung – Vom Bruchgranulat zum Brikett	91
6.1	Konzeptentwicklung – Von der Kompaktierung zur Brikettierung	91
6.2	Apparate und Versuchsdurchführung – Brikettierung	91
6.2.1	Prozessschritte zur Herstellung von Briketts	91

6.2.2	Walzenprofil der Laborwalzenpresse zur Brikettierung	92
6.3	Machbarkeitsprüfung – Brikettierung kaliumchloridhaltiger Mischungen	94
6.3.1	Brikettierung von Kaliumchlorid	94
6.3.2	Brikettierung von Kaliumchlorid mit Schwefel (fest und flüssig)	95
6.3.3	Brikettierung der Zielformulierung II (mit Fest- und Flüssigschwefel)	98
6.4	Gegenüberstellung der Herstellungsverfahren von Bruchgranulat und Briketts	99
6.4.1	Kornverteilung und Charakterisierung	99
6.4.2	Mechanische Granulatqualität (Kornfestigkeit, Abriebbeständigkeit)	100
6.4.3	Gutkornausbeute	101
6.4.4	Spezifische Presskraft	101
6.5	Fazit	101
7	Evaluation eines Prototyps zur Minibrikettierung schwefelhaltiger Kaligranulate	102
7.1	Überblick Brikettierung im mineralischen Düngemittelsektor – Entstehung der Minibrikettierung	102
7.2	Apparate und Versuchsdurchführung	103
7.2.1	Minibrikettierer DG-300	103
7.2.2	Prozessschritte zur Herstellung von Minibriketts	112
7.3	Minibrikettierung der Formulierung II mit Flüssigschwefel	113
7.3.1	Mechanische Granulatqualität	113
7.3.2	Chemische Zusammensetzung	116
7.3.3	Nährstoffverteilung im Einzelkorn	117
7.3.4	Lagerstabilität von Minibriketts	120
7.3.5	Agronomische Bewertung	120
7.4	Minibrikettierung als ein geeignetes Verfahren anwendbar? – Fazit	121
8	Wirtschaftlichkeitsaspekte – Kompaktierpresse gegenüber Minibrikettierer	122
8.1	Spezifischer Energiebedarf	122
8.2	Spezifische Investitionskosten	124
8.3	Fazit	126
9	Zusammenfassung und Ausblick	127
10	Anhang	130
10.1	Kompaktierungsanlage eines K+S Standortes	130
	Literaturverzeichnis	132
	Abbildungsverzeichnis	141
	Tabellenverzeichnis	146