

# „Effizientes und wirtschaftliches Verfahren zur Überführung von Klärschlammmaschen in Hochleistungsdünger“

Abschlussbericht über ein FuE-Projekt  
unter dem Aktenzeichen AZ: 33767/01

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

## Bewilligungsempfänger:

### Glatt Ingenieurtechnik GmbH

Nordstraße 12; 99427 Weimar  
Dr. Lars Leidolph  
Tel.: +49 3643 47-1309  
Mobil: +49 173 6586018  
E-Mail: [Lars.Leidolph@glatt.com](mailto:Lars.Leidolph@glatt.com)



## Kooperationspartner:

### Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA Weimar)

Coudraystraße 4/9, 99423 Weimar  
Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke  
Tel.: +49 3643 564-309  
E-Mail: [carsten.koenke@mfpa.de](mailto:carsten.koenke@mfpa.de)



## Assoziierter Partner:

### SERAPLANT GmbH

Breite Straße 26 a, 39638 Gardelegen OT Jävenitz



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>33767/01</b>	Referat	Fördersumme	<b>118.800 €</b>
----	-----------------	---------	-------------	------------------

<b>Antragstitel</b>	Effizientes und wirtschaftliches Verfahren zur Überführung von Klärschlammmaschen in Hochleistungsdünger
---------------------	--

<b>Stichworte</b>	Phosphorrecycling, Phosphatdünger, Klärschlammasche
-------------------	---

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>12 Monate</b>	<b>20.01.2017</b>	<b>19.01.2018</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte	jährlich
------------------	----------

<b>Bewilligungsempfänger</b>	<b>Glatt Ingenieurtechnik GmbH</b> Nordstraße 12 99427 Weimar	Tel	+49 3643 47-0
		Fax	+49 3643 47-1231
		Projektleitung <b>Dr. Lars Leidolph</b>	
		Bearbeiter <b>Dr. Lars Leidolph</b>	

<b>Kooperationspartner</b>	<b>Materialforschungs- und-prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar</b> <b>(MFPA Weimar)</b> Coudraystraße 4/9 99423 Weimar
----------------------------	---

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Im Vorhaben wurde das Ziel verfolgt, einen auf der Wirbelschichttechnologie basierenden Technologieansatz in ein praxistaugliches Herstellungsverfahren für Phosphat-Dünger zu überführen. Hierfür sollte nachgewiesen werden, dass dieses Verfahren unabhängig von der verarbeiteten Klärschlammasche und energetisch hoch effizient in produktionsrelevante Maßstäbe überführt werden kann. Damit sollten die Türen für ein erstmals wirklich wirtschaftlich zu betreibendes Phosphorrecycling aus Klärschlammaschen aufgestoßen werden.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Das in einer Laufzeit von 12 Monaten realisierte Vorhaben war durch drei Arbeitsschwerpunkte gekennzeichnet:

#### *1) Variabilität der einsetzbaren Sekundärrohstoffe*

Eine im Vorfeld des Vorhabens durchgeführte Machbarkeitsstudie basierte auf einer einzelnen Monoklärschlammasche. Daher sollte hier zunächst der mögliche Einsatz weiterer Aschen aus unterschiedlichen Monoklärschlammverbrennungsanlagen untersucht werden. Für diese musste geklärt werden, inwieweit sie sich in homogene, stabile und in der Wirbelschicht verarbeitbare Suspensionen überführen lassen. Damit sollte eine spezifische Rohstoffabhängigkeit des Verfahrens vermieden und die Übertragbarkeit auf breiter Front gewährleistet werden.

#### *2) Reduzierung des prozessspezifischen Energieverbrauchs*

Hier wurde das Ziel verfolgt, den Feststoffgehalt in den Ausgangssuspensionen zu erhöhen und somit die Menge an notwendiger Wasserverdampfung bzw. die dafür aufzuwendende Energie signifikant zu reduzieren. Es sollten die Dispergier- und Granulationsvorgaben herausgearbeitet werden, unter denen sich die Feststoffanteile auf bis zu 70 % steigern und im Gegenzug der Energiebedarf um 20 – 25 % senken lassen sollten.

#### *3) Erhöhung der energetischen Anlageneffizienz*

Im Vorhaben sollten zudem Konzepte erarbeitet werden, wie die Energie durch geeignete Prozessführung effizienter genutzt werden kann. Dies sollte sowohl die Betrachtung anlagenimmanenter Wärmerückgewinnungsmaßnahmen als auch die Nutzung exothermer Reaktionsenergie einschließen und nochmals signifikante Energieeinsparungen mitbringen.

### **Ergebnisse und Diskussion**

Die angestrebten Ziele konnten im Ergebnis erreicht werden. Aus unterschiedlichsten Klärschlammmaschen und einer Abfall-Phosphorsäure konnten über die Wirbelschichtsprühgranulation stabile, runde Granulate mit einem exakt einstellbaren Phosphorgehalten und -löslichkeiten erzeugt werden. Die Schwermetallkonzentration entsprach dabei den Vorgaben der (novellierten) Düngemittelverordnung, so dass die Einsatzvoraussetzungen in der Praxis uneingeschränkt gegeben sind. In Pilotversuchen wurden auch Mustermengen von >1 t hergestellt und dabei nachgewiesen, dass sich die im Labormaßstab erarbeiteten Prozessvorgaben auch auf technische Maßstäbe übertragen lassen. Auch die energetischen Ziele konnten erfolgreich umgesetzt werden. Einerseits ließ sich der Feststoffgehalt der Rohstoffsuspensionen sich über abgestimmte Dispergierprozesse und den Einsatz spezifischer Dispergiermittel auf 60 % steigern, was Energieeinsparungen von ca. 35 % ermöglicht, andererseits bieten speziell auf diesen Prozess abgestimmte Anlagenkonzepte energetische Einspareffekte von bis zu ca. 30 %.

Die wirtschaftlichen Argumente sprechen gleichfalls für das neue Verfahren. Durch die nachgewiesene Rohstoffvariabilität bietet sich eine sehr große Verfügbarkeit. Hinzu lassen sich mit dem Verfahren sehr günstige Produktionskosten realisieren, die eine Preisgestaltung ermöglichen, die deutlich unter den Marktpreisen für konventionelle mineralische Phosphatdünger angesiedelt sind. Vor diesem Hintergrund bieten sich hierfür sehr große Marktpotenziale.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden bereits gemeinsam mit den Partnern intensiv kommuniziert werden. So wurde das P-Recyclingverfahren und Ergebnisse aus diesem Vorhaben auf unterschiedlichen Tagungen und Konferenz dem Fachpublikum präsentiert. Auf der IFAT 2018 stellte Huber SE das Verfahren und die daraus resultierenden Düngemittel in Kooperation mit Glatt und Seraplant auf seinem Messestand vor. Auch wurde das Verfahren in verschiedenen Artikel in Fachzeitschriften kommuniziert, so beispielsweise in einem Kurzaufsatz für das Hüthig-Verlagsspecial "Industriewasser oder für die „Wasser & Abwasser“.

Seit Frühjahr 2018 zeigt Glatt das Verfahren und die Möglichkeiten zum Phosphorrecycling auf einer eigens dafür konzipierten Microsite <https://www.phos4green-glatt.com/home-3.html>. Zusätzlich wurde eine Broschüre ausschließlich zu Phosphorrecycling angefertigt, die auch auf dieser Microsite zum Download bereitsteht und die potentiellen Kunden bei Präsentationen, Tagungen, Konferenzen übergeben wird.

Aktuell werden in Kooperation mit Seraplant drei Produktionsanlagen geplant, so dass die Öffentlichkeitsarbeit in diesem Zuge wichtiger Bestandteil der Marktvorbereitung ist. Ziel ist es, den Zugang zu regionalen Klärschlammverwertern aber auch in diese Agrarbranche zu erschließen und diese vom Verwertungsmodell des Phosphorrecyclings mit der hier entwickelten Technologie zu überzeugen. Dafür sollen neben direkten Gesprächen insbesondere auch Veröffentlichungen (z. B. Müll und Abfall), Vorträge auf Fachveranstaltungen (Phosphorplattform, IFAT) und Messepräsentationen (z. B. IFAT 2018) genutzt werden. Bereits in den vergangenen Monaten konnten diesbezüglich gute Erfahrungen gemacht werden, da die gehaltenen Vorträge auf ein großes Interesse stießen.

### **Fazit**

Das abgeschlossene Projekt kann als großer Erfolg bewertet werden. Dies gilt nicht nur vor dem Hintergrund, dass die drei formulierten Zielstellungen erfolgreich realisiert werden konnten und im Ergebnis ein für verschiedenste Klärschlammmaschen geeignetes Verfahren für die Wiedergewinnung von Phosphor, mit dem in einem hocheffizienten Prozess aus dem Reststoff qualitativ hochwertige und hochkonzentrierte Phosphatdüngergranulate hergestellt werden können. Diese erfüllen ohne Einschränkungen die Vorgaben der Düngemittelverordnung und können zielgerecht eingestellt werden. Zudem erfüllt der auf der Wirbelschichttechnologie basierende Herstellungsprozess auch die marktspezifischen Preisvorgaben, so dass auch die Wettbewerbsfähigkeit der hiermit hergestellten Phosphatdünger sichergestellt werden kann. Auf dieser Grundlage lässt sich im Ergebnis der Arbeiten erstmalig ein Verfahren für die Wiedergewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen oder Klärschlammmaschen präsentiert werden, welches sich sowohl im Hinblick auf die Qualität der daraus erzeugten Produkte als auch hinsichtlich der dahinterstehenden ökologischen und ökonomischen Bilanz als praxistauglich erweist.

# 1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis.....	4
2. Verzeichnis von Bildern und Tabellen .....	5
3. Zusammenfassung.....	6
4. Einleitung .....	7
5. Hauptteil.....	10
5.1 Arbeitsschwerpunkte und erzielte Ergebnisse .....	10
5.1.1 Variabilität der Sekundärrohstoffe.....	10
5.1.2 Reduzierung des stoffspezifischen Energieverbrauchs .....	19
5.1.3 Steigerung der Anlageneffizienz .....	20
5.2 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung .....	21
5.3 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	23
5.4 Fazit .....	23

## 2. Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Stoffliche Charakterisierung der spezifizierten Phosphataschen (Auszug) .....	10
Abbildung 2: Stoffliche Charakterisierung der im Ergebnisse der Rohstoffanalysen favorisierten Phosphorsäure .....	11
Abbildung 3: Untersuchungen zur Löslichkeit der Phosphorsäure .....	12
Abbildung 4: Aschespezifische Rezepturentwicklung für verarbeitbare Suspensionen – links: Beispiel einer Suspension mit zu niedriger Viskosität und Gelierungstendenzen; rechts: Sprühfähige Rezeptur auf Basis der überarbeiteten Rezeptur .....	13
Abbildung 5: ProCell-Laboranlage für die Versuche zur Eingrenzung der Granulationsparameter für die spezifizierten Rohstoffsuspensionen .....	14
Abbildung 6: Beispiel eines Analyseprotokolls des P38-Granulats auf Basis der Klärschlammasche aus der Monoverbrennungsanlage Bonn .....	16
Abbildung 7: Aufbau der AGT-Anlage für die Pilotversuche .....	18
Abbildung 8: Untersuchte Varianten der Abwärmenutzung aus dem Abluftstrom für eine energetisch effizientere Prozessführung bei der Granulation .....	20
Abbildung 9: Energetische Bewertung des Granulationsprozesses anhand des Beispiels der Teilrückführung des Abluftstromes 50 % (Ver. 1) und 70 % (Ver. 2) .....	21
Abbildung 10: Kalkulation der Herstellungskosten auf Basis des hier verfolgten Ansatzes in der Gegenüberstellung zum Marktpreis von mineralischem Tripple-Superphosphat-Dünger .....	22

### **3. Zusammenfassung**

In diesem Bericht sind die Ergebnisse eines Projekts zur Entwicklung eines neuen, effizienten Verfahrens zur Überführung von Klärschlammaschen in Hochleistungsdünger dargestellt. Das Projekt wurde im Zeitraum vom 20.01.2017 bis 19.01.2018 durchgeführt.

Dabei ging es darum, einen aus dem RECOPHOS-Verfahrens abgeleiteten Technologieansatz in ein praxistaugliches Herstellungsverfahren für Phosphat-Dünger zu überführen. Hierfür sollte nachgewiesen werden, dass die Technologie unabhängig von der verarbeiteten Klärschlammasche und energetisch hoch effizient in produktionsrelevante Maßstäbe überführt werden kann.

Diese Projektziele inklusive der damit verbundenen Zielparameter konnten ohne Einschränkungen erreicht werden. Zudem konnte die produktionsrelevante Skalierbarkeit des Verfahrens sowie deren kostenspezifische Marktfähigkeit nachgewiesen werden.

Die Entwicklung der rohstoffspezifischen Suspensionen und der darauf abgestimmten Granulationsprozesse erfolgte bei der Glatt Ingenieurtechnik GmbH. Die Arbeiten wurden durch die MFPA Weimar unterstützt, die schwerpunktmäßig die Charakterisierung und Bewertung der Rohstoffe, Ausgangssuspensionen und Granulate verantwortete. Projektbegleitend fand ein intensiver Austausch mit der Fa. Seraplant statt, die als Referenzanwender das Ziel verfolgt, in den kommenden Monaten die erste Produktionsanlage auf dieser technologischen Basis zu betreiben.

Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (AZ 33767/01).

## 4. Einleitung

Phosphorerze sind wichtige Rohstoffquellen für die Herstellung einer großen Vielfalt von Phosphorprodukten, die in Industrie und Landwirtschaft Einsatz finden. Der größte Teil des weltweiten Phosphorverbrauchs entfällt auf Dünge- und Futtermittel. Damit stellen sie ein sehr wichtiges Wirtschaftsgut dar. Die nachgewiesenen Weltvorräte nehmen stark ab. Phosphat ist als Düngemittel nicht durch andere Stoffe substituierbar. Dies ist problematisch, da eine intensive Landwirtschaft ohne Phosphatdüngung nicht möglich ist. Aus diesem Grund ist es notwendig, die jährlich anfallenden großen Mengen Phosphat als Bestandteil von Abfällen nutzbar zu machen.

Es existiert eine ganze Reihe von Abfällen, wie beispielsweise kommunale Klärschlämme, die Phosphat enthalten. Eine zu geringen  $P_2O_5$ -Konzentrationen steht dabei jedoch oft einer direkten Verwertung als Phosphatrohstoff entgegen. Bei Aschen aus einer Monoverbrennungsanlage bzw. bei der Verbrennung des Klärschlammes mit anderen biogenen Abfällen kommt es jedoch zu einer Aufkonzentration des Phosphates. In Abhängigkeit vom eingesetzten Klärschlamm können darin Phosphatkonzentrationen von 20 % und darüber erreicht werden. Diese sind wirtschaftlich interessant. Eine direkte Verwendung solcher Aschen zum Beispiel als Düngemittel ist jedoch nicht möglich, da die wichtigen Phosphate durch den Brennprozess in eine wasserunlösliche, also nicht pflanzenverfügbare Form, überführt werden. Heute sind verschiedene Ansätze zur Nutzung oder Gewinnung von Phosphor aus der Asche von Mono-Klärschlammverbrennungen bekannt. So beispielsweise das direkte Aufarbeitung der Asche in der Düngemittelindustrie, das Auswaschen der Phosphate mit heißem Wasser und anschließender Fällung oder Kristallisation oder die Eluierung der Phosphate aus der Asche mit Schwefelsäure unter Einsatz von Ionenaustauschern. Weiterhin bekannt sind der sogenannte Kepro-Prozess, - der mit Säure und Hitze Phosphat gewinnt, das Seaborne Verfahren, der Phostrip-Prozess oder das Ashdec-Verfahren. Trotz der breiten Spanne grundsätzlicher technischer Lösungen für die Verarbeitung von phosphathaltigen Aschen zu Phosphatdünger, bietet in der Praxis bislang keines der benannten Verfahren die gewünschten Aufbereitungsergebnisse oder reale – d. h. wirtschaftlich begründete – Anwendungspotenziale.

Die diesbezüglich besten Voraussetzungen bot bisher das sogenannte RECOPHOS-Verfahren, bei dem das weitgehend unlösliche Phosphat mit Phosphorsäure aufgeschlossen wird. Dazu wird z. B. aus Monoverbrennungsaschen kommunaler Klärschlämme gegebenenfalls mit Zusätzen von Kalium- und oder eines Stickstoffträgers zunächst eine homogenen Mischung erzeugt und Orthophosphorsäure in unterschiedlichen Konzentrationen während des laufenden Mischvorgangs hinzugefügt. Dabei laufen die gewünschten Umwandlungsreaktionen und die Granulation weitgehend zeitgleich ab. Die technische Realisierung des RECOPHOS-Verfahrens wurde bereits vor einigen Jahren versucht. Dabei wurde eine technische Versuchsanlage entsprechend hergerichtet und in einer Testproduktion ca. 4.000 t Düngemittelgranulate hergestellt. Die erzeugten Düngemittelgranulate entsprachen den Anforderungen der Düngemittelverordnung und konnten entsprechend als Düngemittel zugelassen werden. Es stellten sich in diesem Zusammenhang jedoch erhebliche technologische Defizite heraus, die einer direkten Überführung des Verfahrens in die Praxis lange Zeit entgegenstanden.

Mit Hilfe eines weiterführenden Verfahrensansatzes und spezifisch abgestimmten Wirbelschichtprozesses sollten die Defizite des – prinzipiell mit einem sehr hohen wirtschaftlichen Einsatzpotenzial verbundenen RECOPHOS-Verfahrens überwunden werden, so dass die technologischen Voraussetzungen sowohl für anforderungsgerechte Qualitäten als auch den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb in einer 2015/2016

durchgeführten Machbarkeitsstudie bestätigt werden konnten. Verfahrenseitig wird hierbei aus dem phosphathaltigen Sekundärrohstoff, der Phosphorsäure, Wasser und gegebenenfalls weiterer Nährstoffkomponenten enthält, eine homogene Suspension erzeugt. Diese Suspension wird anschließend einer Sprühgranulation zugeführt, wobei sich die Düngemittelgranulate bilden. Die Suspensionsherstellung und damit die Reaktion der Phosphatumwandlung zwischen phosphathaltigem Sekundärrohstoff und Mineralsäure sind bei diesem neuen Verfahrensansatz vom Prozess der Granulation getrennt, was klare Vorteile im Hinblick auf die folgenden Punkte hat:

- erstmalige Kontrollier- und Steuerbarkeit der Reaktion zwischen phosphathaltigen Sekundärrohstoff und der Mineralsäure als grundlegende Voraussetzung für eine sichere und produktionsstaugliche Aufbereitung der Ausgangsstoffe
- Umwandlung oder Lösung der schwerlöslichen Phosphate in der Suspension unter weitgehendem Verbrauch der Mineralsäure, wodurch sich die Korrosionsbelastung von Anlagenteilen massiv verringert
- deutlich verbesserte Homogenisierung der Rohstoffkomponenten in der Suspension und daraus resultierenden, definierten Produkt- und Verarbeitungseigenschaften
- erstmalige Erzeugung der Granulate im Sprühgranulationsverfahren, welches ggü. den bisherigen Ansätzen eine exaktere Rohstoffdosierung und präzise einstellbare Partikelbildung ermöglicht
- die Trennung der beiden Prozessschritte mit dem verfahrenstechnischen Vorteil, dass die Prozessparameter gezielt und optimal für den jeweiligen Prozessschritt eingestellt werden können

Über die dem Vorhaben zugrunde liegenden Nachweis der technologischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit eines aus dem RECOPHOS-Verfahren abgeleiteten Wirbelschichtprozesses für das Phosphorrecycling in reine Phosphat-Düngergranulate hinaus, wurde jedoch deutlich, dass Lösungen gefunden werden müssen, um die Effizienz des Verfahrens zu steigern, die Variabilität der einsetzbaren Sekundärrohstoffe zu erhöhen und den Energieverbrauch bei der Sprühgranulation zu reduzieren. Damit verbanden sich gleichzeitig die drei Aufgaben- bzw. Fragestellungen die im abgeschlossenen Projekt beantwortet werden sollten:

#### (1) Variabilität der Sekundärrohstoffe

Zuvor wurde der Verfahrensansatz ausschließlich anhand einer einzigen Monoklärschlammasche untersucht. Ziel der Arbeiten war es daher, den möglichen Einsatz weiteren Aschen aus anderen Monoklärschlammverbrennungsanlagen zu untersuchen und dabei zu klären, inwieweit unterschiedliche Aschetypen in homogene, stabile und in der Wirbelschicht verarbeitbare Suspensionen überführt werden können, so dass die Übertragbarkeit des Verfahrens später auf breiter Front gegeben ist.

#### (2) Reduzierung Energieverbrauch (i. V. m. (1))

Maßgeblicher Energietreiber der zentralen Verfahrensstufe Sprühgranulation ist die notwendige Verdampfungsenergie des Wassers aus der Suspension. Ziel der war es daher, den Feststoffgehalt der Ausgangssuspensionen zu maximieren, um die notwendiger Wasserverdampfung bzw. die dafür aufzuwendende Energie signifikant reduzieren zu können, ohne die Reaktionsvoraussetzungen bzw. Granulateigenschaften zu beeinträchtigen.

### (3) Erhöhung der Prozesseffizienz (i. V. m. (1)+(2))

Ergänzend sollte ein Konzept erarbeitet werden, um die Energie durch geeignete Prozessführung effizienter nutzen zu können. Dies betraf u. a. die prozessabgestimmte Realisierung von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen oder Nutzung exothermer Reaktionsenergien bei der Suspensionsherstellung.

## 5. Hauptteil

### 5.1 Arbeitsschwerpunkte und erzielte Ergebnisse

#### 5.1.1 Variabilität der Sekundärrohstoffe

##### Auswahl und Charakterisierung der Ausgangsrohstoffe

Vordergründiges Ziel des Vorhabens war es, auf Basis des zuvor durchgeführten Grundlagenversuchs hier den Nachweis zu erbringen, dass der hier verfolgte Verfahrensansatz zum Phosphorrecycling nicht nur den spezifischen Bedingungen der damals ausgewählten Klärschlammasche gerecht wird, sondern für eine breite Auswahl relevanter Monoverbrennungsaschen verarbeitet werden kann. Auf dieser Basis sollten die technologischen Voraussetzungen für einen rohstoffseitig gesicherten Anlagenbetrieb sowie die perspektivische, regional und stoffstromunabhängige Übertragbarkeit des Konzeptes geschaffen werden.

Ausgangspunkt war dabei, dass unterschiedliche Klärschlammaschen identifiziert und aus verschiedenen Monoverbrennungsanlagen beschafft werden mussten. Die Proben wurden zunächst im Hinblick auf ihre stoffliche Zusammensetzung und Pulvermorphologie analysiert (vgl. Abbildung 1). In der Folge zeigte sich, dass sich die untersuchten Aschen z. T. trotz ihrer unterschiedlichen Herkunft klassifizieren ließen und man sich im weiteren Verlauf zunächst auf 6 „Referenzaschen“ konzentrieren konnte.

Asche Stuttgart				Asche Bonn				Asche Neu-Ulm			
Haupt- und NebenkompONENTEN				Haupt- und NebenkompONENTEN				Haupt- und NebenkompONENTEN			
	[%]		[%]		[%]		[%]		[%]		[%]
Al	5,27	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,96	Al	5,21	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,84	Al	7,56	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,28
Ca	9,87	CaO	13,81	Ca	8,79	CaO	12,30	Ca	11,02	CaO	15,42
Cl		Cl-		Cl		Cl-		Cl		Cl-	
Fe	10,46	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,94	Fe	13,12	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,76	Fe	6,86	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,81
K	0,85	K <sub>2</sub> O	1,02	K	0,98	K <sub>2</sub> O	1,18	K	1,06	K <sub>2</sub> O	1,28
Mg	2,16	MgO	3,58	Mg	1,79	MgO	2,97	Mg	1,94	MgO	3,22
Mn	0,08	MnO	0,10	Mn	0,17	MnO	0,22	Mn	0,10	MnO	0,13
Na	0,22	Na <sub>2</sub> O	0,30	Na	0,23	Na <sub>2</sub> O	0,31	Na	0,36	Na <sub>2</sub> O	0,49
P ges	7,87	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18,03	P	8,29	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18,99	P	6,75	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15,46
P am.-citr	4,90	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> am.-citr.	11,23	P am.-citr	3,52	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> am.-citr.	8,06	P am.-citr	3,10	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> am.-citr.	7,10
P wasser	0,00	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wasser	0,01	P wasser	0,00	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wasser	0,00	P wasser	0,02	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wasser	0,03
S	0,70	SO <sub>3</sub>	1,75	S	0,41	SO <sub>3</sub>	1,02	S	1,85	SO <sub>3</sub>	4,62
Si	15,30	SiO <sub>2</sub>	32,73	Si	14,54	SiO <sub>2</sub>	31,10	Si	16,24	SiO <sub>2</sub>	34,74
		Σ	96,21			Σ	96,69			Σ	99,43
Spurenelemente				Spurenelemente				Spurenelemente			
	[mg/kg]		[mg/kg]		[mg/kg]		[mg/kg]		[mg/kg]		[mg/kg]
Cd	6,3	0,0	30 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cd	17,1	9,5	30 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cd	5,4	7,7	30 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Cr	-	-	Cr-VI	Cr	98,0	2,0	Cr-VI	Cr	136,0	2,0	Cr-VI
Cu	-	-		Cu	-	-		Cu	-	-	
Ni	76,9	80,0		Ni	69,3	80,0		Ni	60,8	80,0	
Pb	59,3	150,0		Pb	152,0	150,0		Pb	64,4	150,0	
As	18,7	40,0		As	< 0,2	40,0		As	26,5	40,0	
Hg	-	1,0		Hg	< 0,04	1,0		Hg	1,8	1,0	
Zn	-	-		Zn	-	-		Zn	2989,0	-	
Tl	-	1,0		Tl	-	1,0		Tl	< 0,02	1,0	
Mo	-	-		Mo	-	-		Mo	11,8	-	
U	-	-		U	-	-		U	-	-	

Abbildung 1: Stoffliche Charakterisierung der spezifizierten Phosphataschen (Auszug)

Neben den Klärschlammaschen mussten auch für das Suspensionsmedium Phosphorsäure zunächst relevante Bezugsquellen analysiert und hinsichtlich ihrer stofflichen und wirtschaftlichen Voraussetzungen bewertet werden. Hierfür wurden verschiedene Produkte herangezogen, wobei dies von vornherein unter der Maßgabe geschah, vorzugsweise Abfallprodukte zu berücksichtigen, um den wirtschaftlichen und umweltspezifischen Grundargumenten des verfolgten Ansatzes bestmöglich entsprechen zu können.

Vor diesem Hintergrund konnten letztendlich zwei Phosphorsäuren analysiert werden, die neben den vorstehend benannten Voraussetzungen auch den prinzipiellen Anforderungen an ihre Verfügbarkeit und Verunreinigungen überhaupt gerecht wurden. Im

Ergebnis der umfangreichen Analysen konnte letztendlich eine Phosphorsäure herausgestellt werden, die als Abfallprodukt der Pigmentherstellung entspringt, für die hier angestrebten Zwecke ausreichende Ausgangsqualitäten bzw. nur moderate Verunreinigungen aufweist und in Deutschland mit einem Aufkommen zwischen 10.000 – 20.000 t pro Jahr verbunden ist. Damit konnte hier eine verfahrensrelevante Rohstoffverfügbarkeit aber auch eine im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Phosphorsäuren sehr attraktive Preisbasis attestiert werden, so dass sich die weiteren Untersuchungen dieses Produkt konzentrierten.

Phosphorsäure	
Haupt- und NebenkompONENTEN	
	[%]
Al	
Ca	74 ppm
Cl	61 ppm
Fe	< 10 ppm
K	
Mg	19 ppm
Mn	
Na	78 ppm
S	500 ppm
Si	< 10 ppm
N	< 10 ppm
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	39,80 %
As	< 10

Abbildung 2: Stoffliche Charakterisierung der im Ergebnisse der Rohstoffanalysen favorisierten Phosphorsäure

### Rezeptentwicklung Rohstoffsuspensionen

Auf Basis der ermittelten Rohstoffspezifikationen wurden im ersten Schritt auf deren chemische Zusammensetzung abgestimmte Grundrezepturen berechnet. Für die unterschiedlichen Aschen waren dabei die jeweilig grundsätzlichen Mischungsvorgaben einzugrenzen und deren konkrete stöchiometrische Umsetzung zu ermitteln. Um sich dabei in einem handhabbaren Variantenspektrum bewegen zu können, wurden mit P46 Tripple-Superphosphat, P38 Doppel-Superphosphat und P30 Superphosphat zunächst drei Zielprodukte definiert, auf die die iterative Rezeptentwicklung und damit verbundenen experimentellen Untersuchungen konzentriert werden konnten.

Die erarbeiteten Stöchiometrien wurden dann in umfangreichen laborativen Vorversuchen validiert und schrittweise abgestimmt. Hierbei galt es zu untersuchen, welche Dispergier- und Sprüheigenschaften, Reaktionsmechanismen und -zeiten sich damit tatsächlich abbildeten.

Im ersten Schritt standen Löslichkeitsuntersuchungen im Mittelpunkt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die verwendete Phosphorsäure Löslichkeitsprofile aufweist, die denen kommerzieller Phosphatdünger sehr ähnlich sind. In diesem Zuge wurde die Löslichkeit sowohl in Wasser als auch die Neutral-Ammoniumcitrat untersucht. Dabei

war insbesondere Letztere von großem Interesse, da diese die relevante, d. h. längerfristige Pflanzenverfügbarkeit abbildet, während die Wasserlöslichkeit die kurzfristig freigesetzten Phosphoranteile repräsentiert, die jedoch nach der Ausbringung schnell auch ausgespült werden.

Bei den Löslichkeitsuntersuchungen sollte auch geprüft werden, wie die Löslichkeitsveränderung messtechnisch im Prozess ermittelt werden kann. Ideenansatz war dabei, über Leitfähigkeits- und/oder pH-Wert-Messungen eine korrelierende Messgröße zu ermitteln, die grundsätzlich zur Prozessüberwachung dienen kann. Dies wurde für die Phosphorsäure in den verschiedenen Rezepturansätzen bestimmt. Abbildung 3 zeigt ein solches Messergebnis beispielhaft für die Abhängigkeit der zeitlichen Löslichkeitsveränderung im Vergleich zur Veränderung der Leitfähigkeit. Dabei bestätigten sich sowohl die anvisierten Löslichkeitsverläufe als auch der Ansatz, diese über die Leitfähigkeit zu bestimmen. Auf dieser Basis eröffnete sich so die Möglichkeit, die Lösungseigenschaften der Düngegränulate gezielt einstellen zu können.

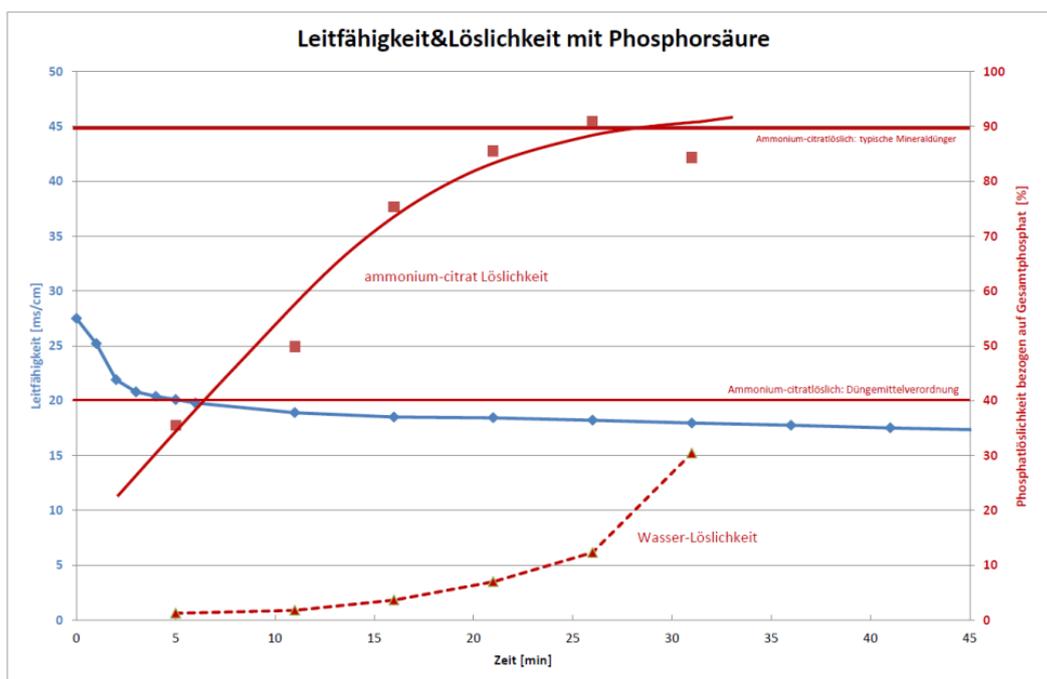


Abbildung 3: Untersuchungen zur Löslichkeit der Phosphorsäure

Ein weiterer wichtiger Untersuchungsaspekt war die Dispergierung der Aschen, die über die rein stöchiometrische Rezeptureinstellung nicht berücksichtigt werden konnte. Hierbei zeigte sich, dass die verschiedenen Aschen auch z. T. völlig verschiedene Anforderungen an die Dispergierung mitbrachten. Dementsprechend konnten mit den Ausgangsrezepturen zunächst noch sehr unterschiedliche Asche- bzw. Feststoffkonzentrationen abgebildet werden, obwohl die Säurekonzentration, Einwirkzeit und Mischabläufe auf breiter Front variiert werden konnten.

Aber auch nachdem die grundsätzlichen Voraussetzungen für die Dispergierung der einzelnen Rezepturen ermittelt werden konnten, mussten unterschiedliche rezepturspezifische Herausforderungen gelöst werden. Dies betraf u. a. zu hohe Ausgangsviskositäten, Gelierungstendenzen und Ausfällungen sowie Puffereffekte, die bei einzelnen Aschen sehr langwierige und nicht steuerbare Nachreaktionen hervorriefen (vgl. Abbildung 4). Im Ergebnis einer Vielzahl rezepturspezifischer Iterationen – auf Basis

der 6 Aschen und 3 Zielprodukte ergab sich letztendlich einer Versuchsmatrix aus etwa 180 Experimenten – konnten jedoch all diese Schwierigkeiten überwunden und für die Zielprodukte auf Basis aller Referenzaschen Suspensionsrezepturen erarbeitet werden, die den grundsätzlichen Anforderungen an ihre stoffliche Zusammensetzung, Stabilität und Verarbeitung gerecht werden konnten.

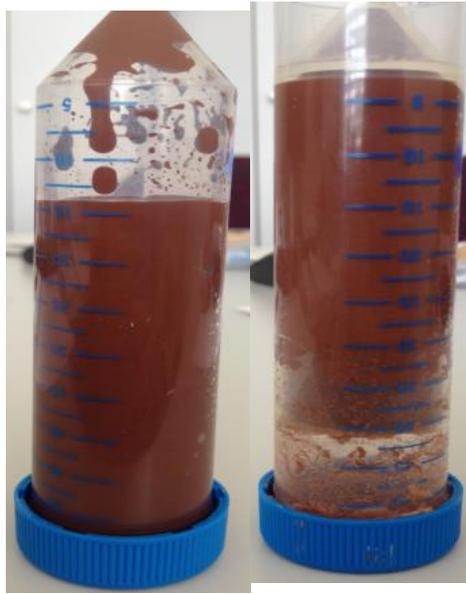


Abbildung 4: Aschespezifische Rezepturentwicklung für verarbeitbare Suspensionen – links: Beispiel einer Suspension mit zu hoher Viskosität (stichfest) und Gelierungstendenzen; rechts: Sprühfähige Rezeptur auf Basis der überarbeiteten Rezeptur

### *Entwicklung Granulationsprozess*

Auf Basis der zuvor erarbeiteten rohstoffspezifischen Dispergier- und Granulierungsvoraussetzungen konnten die Versuche zur Granulierung der Suspensionen in Angriff genommen werden. Dafür wurde zunächst eine ProCell-Laboranlage aufgebaut sowie steuerungsseitig für die Versuche parametrisiert (Abbildung 5). Darüber hinaus wurden verschiedene Prozesseinsätze untersucht und die für den hier betrachteten Sprühgranulierungsprozess geeignete strömungstechnische Kammerkonfiguration (Anströmboden und strömungstechnische Einbauten) erarbeitet.



Abbildung 5: ProCell-Laboranlage für die Versuche zur Eingrenzung der Granulationsparameter für die spezifizierten Rohstoffsuspensionen

In den folgenden Schritten wurden vielschichtige Versuche durchgeführt, um die suspensions- bzw. rohstoffspezifischen Granulationsparameter einzugrenzen. Ziel war es dabei, stabile, runde Granulate im Partikelgrößenbereich von 2 – 5 mm zu erzeugen. Wie bereits bei der Dispergierung zeigte sich auch hier, dass unterschiedliche Granulationseigenschaften mitbrachten. Nachdem die Verdüsungseigenschaften für alle Modellsysteme zuvor über die Rezeptur eingestellt werden konnten, zeigten sich in den Granulationsversuchen anfangs vor allem unerwünschte Agglomerationseffekte, die für alle Ausgangssuspensionen jedoch nach einer unterschiedlichen Zahl an Iterationen überwunden werden konnten.



Abbildung 6: Granulationsversuche – links: Laboranlage; rechts: Die aufbereitete Suspension wurde eingedüst



Abbildung 7: Granulationsversuche – links: Siebtrichter an Laboranlage; rechts: erzeugtes Mustergranulat

Nachdem die grundsätzlichen Voraussetzungen für die Erzeugung von Granulaten erarbeitet werden konnten, ging es darum, die Granulation in stabile Prozessfenster zu überführen sowie definierte und gleichbleibende Partikelzusammensetzungen nachzuweisen. Hierfür wurden in den Laborversuchen Mustermengen von jeweils 1 – 2 kg erzeugt.



Abbildung 8: Erzeugte P-Düngergranulat-Muster – links: unterschiedliche Aschen bzw. unterschiedlicher  $P_2O_5$ -Gehalt; rechts: sehr runde, feste Granulatform der Muster

Diese Muster wurden hinsichtlich der Partikeleigenschaften im eigenen Labor und bezüglich der stofflichen Zusammensetzung beim Partner MFPA charakterisiert (vgl. Abbildung 9).

Asche Bonn + Phosphorsäure --> Ziel P38						
Haupt- und NebenkompONENTEN						
		[%]			[%]	
	Al			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
	Ca			CaO		
	Cl			Cl-		
	Fe	8,10		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,58	
	K	0,45		K <sub>2</sub> O	0,54	
	Mg	0,92		MgO	1,53	
	Mn			MnO		
	Na			Na <sub>2</sub> O		
	P	17,60		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40,32	
	P am.-citr	16,54		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> am.-citr.	37,89	93,98%
	P wasser	15,03		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wasser	34,43	85,40%
	S	0,44		S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,10	
	Si			SiO <sub>2</sub>		
Spurenelemente						
		[mg/kg]		[mg/kg]		
	Cd	5,6		21,9	36 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
	Cr	61,8		2,0	Cr-VI	
	Cu			-		
	Ni	40,0		80,0		
	Pb	64,7		150,0		
	As	32,4		40,0		
	Hg	0,0		1,0		
	Zn	1945,0		-		
	Th	< 0,02		1,0		
	Mo	6,5		-		
	U			-		
	B	27,4				
organische Parameter						
	Σ Dioxine/ Furane	2,35 ng/kg		Dioxinen + dl-PCB = 8 ng/kg		
	Σ PCB	0,33 ng/kg				
	Σ PFT	< 0,1 mg/kg		< 0,1 mg/kg		

Abbildung 9: Beispiel eines Analyseprotokolls des P38-Granulats auf Basis der Klärschlammasche aus der Monoverbrennungsanlage Bonn

Nicht allein am oben angeführten Beispiel des P38-Düngegranulats konnte nachgewiesen werden, dass

- die angestrebten Partikelgrößen im Bereich von 2 – 5 mm liegen
- der Gesamt-Phosphorgehalt sicher erreicht wird
- die Phosphatlöslichkeit im angestrebten Phasenverlauf abbildbar ist
- eine ausreichende Abriebfestigkeit der Partikel gegeben ist und
- die Schwermetallkonzentration den Vorgaben der Düngemittelverordnung (auch nach der Novellierung) entspricht.

An der Laborgranulationsanlage konnten die Verfahrens- und Prozessparameter für unterschiedliche Rezepturen zu den 3 Düngerprodukten (P46 Tripple-Superphosphat, P38 Doppel-Superphosphat, P30 Superphosphat) ermittelt werden. Die hergestellten Muster entsprachen den Vorgaben der Düngemittelverordnung und waren qualitativ vergleichbar mit herkömmlichen Mineräldüngern.

Die positiven Ergebnisse ließen sich dabei letztendlich für alle Klärschlammmaschen bestätigen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass sich auch ein erweitertes Produktspektrum P 46 – P 18 über die Rezeptur frei wählen und über die Reaktions- bzw. Verweilzeit einstellen lässt.

### *Übertragung in den Pilotmaßstab*

Da der hier verfolgte Verfahrensansatz auf eine wirtschaftliche Düngemittelproduktion abzielt, sollten im Vorhaben auch belastbare Aussagen zur Skalierbarkeit der Technologie in relevante Anlagen- bzw. Verfahrensmaßstäbe getroffen werden. Hierfür wurde die zweite experimentelle Phase an einer Pilotanlage durchgeführt, die es auf Basis der in den Laborversuchen ermittelten Konfiguration einzurichten galt.



Abbildung 10: Aufbau der AGT-Anlage für die Pilotversuche

In den Pilotversuchen konnten anhand von Mustermengen  $>1$  t erstmals relevante Applikationsmengen erzeugt werden. Dabei ließen sich nach punktuellen Abstimmungen die in den Laborversuchen erarbeiteten Prozessvorgaben und erzeugten Produktqualitäten ausnahmslos bestätigen. Damit ist die Skalierbarkeit des Sprühgranulationsprozesses gegeben und konnte für alle untersuchten Aschen verifiziert werden.



Abbildung 11: Erzeugte Mustermenge aus einem (klein)-technischen Versuch

### 5.1.2 Reduzierung des stoffspezifischen Energieverbrauchs

Die als zweites zentrales Projektziel angestrebte Reduzierung des prozessspezifischen Energieverbrauchs zielte in erster Linie auf die Maximierung des Feststoffanteils in den Rohstoffsuspensionen ab, um die für die Sprühgranulation erforderliche Verdampfungsleistung reduzieren zu können. Hierfür wurden drei rezepturbasierte Ansätze untersucht:

Zunächst wurde beleuchtet, inwieweit über die Reihenfolge der in die Ausgangssuspension zugemischten Bestandteile Einfluss auf die Feststoffkonzentration genommen werden kann. Hierzu wurden vielschichtige Versreihen durchgeführt und festgestellt, dass unter Einhaltung der Zudosierungsabfolge von Phosphorsäure, Dispergiermittel und Asche bei bestimmten Dosierungsverhältnissen steigende Feststoffgehalte in die Suspension überführt werden können. Allein auf Basis der dabei herausgearbeiteten Mischvorgaben konnte der Feststoffanteil um durchschnittlich 3 – 5 % gegenüber dem Ausgangswert gesteigert werden, wobei der erreichte Fortschritt von den verwendeten Aschen abhängig war.

In der zweiten Stufe wurden der pH-Wert und dessen Einfluss auf die Feststoffeinbindung untersucht. Auch hierbei zeigte sich zwar grundsätzlich, dass die Effekte sehr rohstoffspezifisch ausfielen, über die Abstimmung der pH-Werte konnten für die meisten Aschen jedoch nochmals leicht verbesserte Feststoffgehalte nachgewiesen werden. Grundsätzlich wurde dabei deutlich, dass sich im pH-Bereich unter 2,5 die Voraussetzungen für die Stabilisierung der Feststoffanteile in der Suspension verbessern und damit höhere Feststoffgehalte handhabbar werden. Bei pH-Werten >2,5 beginnt der kritische Bereich, in dem die Gelierung einsetzen kann. In Verbindung mit den vorstehend beschriebenen, optimierten Mischstrategien konnten – ohne spezifische Berücksichtigung der Dispergiermittel – über diese Stufen Feststoffanteile von bis zu 48 % erreicht werden.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen zur Feststoffmaximierung lag jedoch auf den Dispergiermitteln. Mit diesen wurden bereits im Vorfeld des Projektes die größten Effekte verbunden. Es zeigte sich jedoch, dass diese im Zuge der Rezepturentwicklung nicht so leicht zu erschließen waren. Insgesamt wurden fast 40 unterschiedliche wasser-, säure- und alkoholbasierte sowie tensidische Dispergiermittel untersucht und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Feststoffeinbindung bewertet. Nachdem sich hierbei lange keine relevanten Vorteile nachweisen ließen, konnte in einer der letzten Versuche mit einem wasserbasierten Dispergiermittel der Durchbruch erzielt werden. Mit diesem gelang es, den Feststoffanteil zuverlässig auf 60 % zu erhöhen und zu stabilisieren. Damit konnte gegenüber dem vor Projektbeginn vorliegenden 40 %igem Feststoffanteil eine signifikante Steigerung bestätigt werden.

Dies entspricht zwar nicht der primär anvisierten Zielgröße von 70 %, ist in der Wirbelschicht aber dennoch mit einem um ca. 35 % reduzierten Energieverbrauch verbunden. Gleichzeitig ermöglicht der erreichte Feststoffgehalt die Verdopplung der Produktionskapazität bei gleicher Anlagendimensionierung, so dass hierdurch massive Effizienzvorteile gegeben sind.

Noch höhere Feststoffkonzentrationen in der Suspension scheiterten letztendlich nicht an der Herstellbarkeit sondern an deren Verdünnungsvoraussetzungen in der Wirbelschicht. Bereits ab 63 % resultierten zu hohe Viskositäten und z. T. Gelierungstendenzen, mit denen mit keinem der untersuchten Sprühdüssensysteme in den handhabbaren Druckbereichen granulierbare Tröpfchen zu erzeugen waren. Vielmehr liegt die Gefahr dann in einer zu hohen Druck- und Abrasionsbelastung des Sprühsystems, so

dass die eingehenderen Granulationsversuche nur bis zu einem Feststoffgehalt von 60 % durchgeführt wurden.

### 5.1.3 Steigerung der Anlageneffizienz

Der dritte Arbeitsschwerpunkt bezog sich auf die angestrebte Maximierung der energetischen Prozesseffizienz. Hierfür wurden zunächst die grundsätzlichen Möglichkeiten der Rückführung und Rückgewinnung der Primärwärme für eine zwei- bzw. mehrstufige Nutzung im Granulationsprozess analysiert. Im Ergebnis konnten vier anlagentechnische Varianten herausgestellt werden, die für die hier betrachteten Sprühgranulationsprozesse grundsätzlich realistische Effizienzvorteile boten. Gegenüber dem klassischen Frischluftbetrieb ging es dabei vor allem um unterschiedliche Ansätze zur Abwärmereduzierung und -nutzung, die insbesondere bei der Abluft ansetzen und anhand

[1] indirekten Luft-Flüssigkeit-Wärmeübertragern und Wärmeträgerkreislauf

[2] indirektem Luft-Luft-Wärmeübertragern

[3] Teilstromrückführung der Abluft oder

[4] Kreislaufführung der Prozessluft

bewertet werden sollte (Abbildung 12).

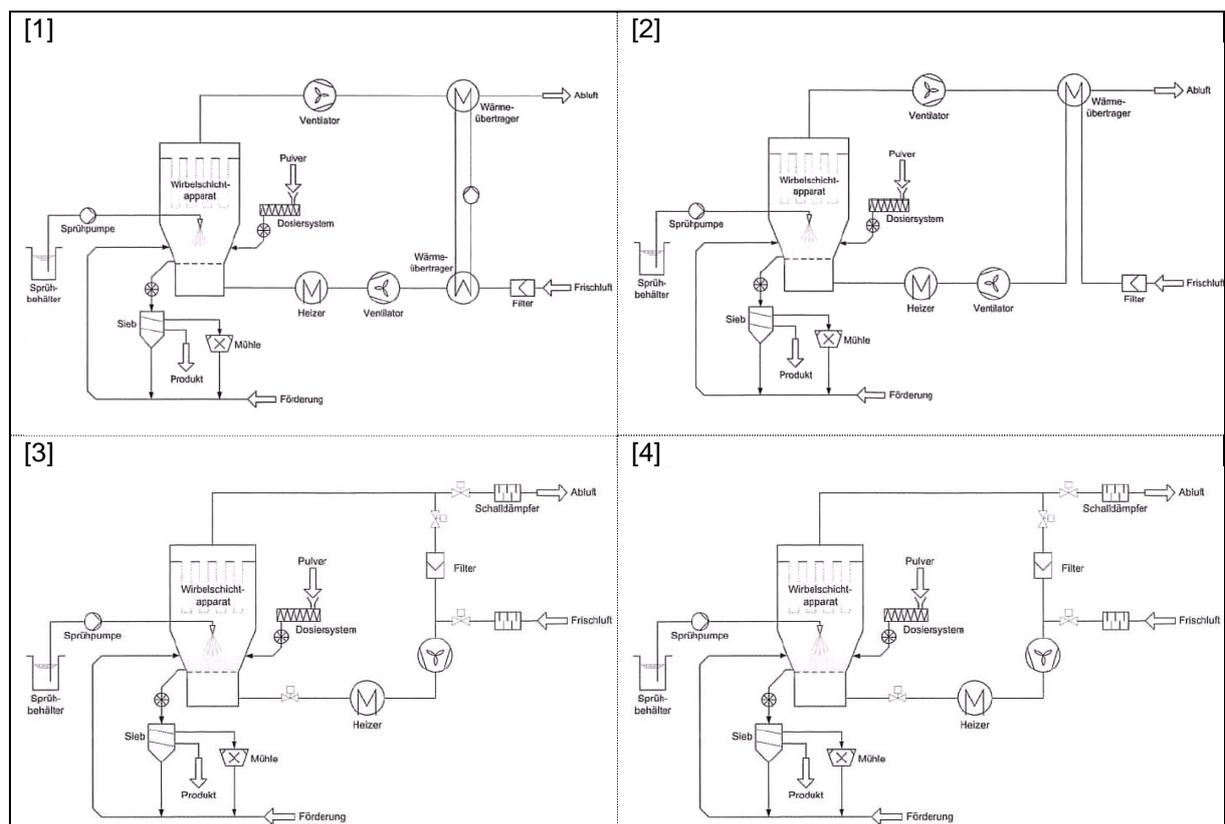


Abbildung 12: Untersuchte Varianten der Abwärmenutzung aus dem Abluftstrom für eine energetisch effizientere Prozessführung bei der Granulation

Diese Varianten wurden auf der Basis von Fließschemasimulationen in den rezepturspezifischen Prozessfenstern eingehend bewertet und energetische bilanziert. Dabei wurde deutlich, dass sich allein über eine spezifisch konfigurierte Abwärmerückgewinnung Energieeinsparungen von 8 – 12 % erzielen lassen. Noch deutlicher fielen die Effekte laut Simulation aus, wenn die Zirkulation der Prozessluft betrachtet wird. Dabei

ging es um die Zumischung der Abluft zur kälteren Frischluft, um den Primärenergiebedarf für deren Aufheizung zu senken. Eine derartige Teilstromrück- oder gar Kreislaufführung funktioniert jedoch nur in Verbindung mit einer entsprechenden Konditionierung der Prozessluft, da die veränderten Eingangsparameter, wie z. B. die dadurch erhöhte relative Luftfeuchte beim Eintritt in den Prozessraum, komplett veränderte Granulationsverläufe bewirkt. Im Falle der frischluftminimierten Kreislaufführung musste so herausgestellt werden, dass für die Entfernung der eingebrachten Feuchtigkeit die Integration eines separaten Kondensators erforderlich wird.

Die variantenspezifischen Einsparpotenziale wurden anhand der für die Phosphatgranulierung ermittelten Prozessbereiche berechnet und dem Referenzprozess bei klassischer Frischluftfahrweise gegenübergestellt. Abbildung 13 zeigt am Beispiel der Abluftteilrückführung von 50 % bzw. 70 % die gegenüber der Ausgangskonfiguration realisierbaren Einsparpotenziale, wobei insbesondere die erforderliche Heizleistung direkte energetische Rückschlüsse zulässt. Es zeigte sich, dass bereits durch eine Teilstromrückführung ohne Kondensation der Heizenergiebedarf um 14 % bzw. 21 % gegenüber den Referenzwerten reduziert werden konnte. Damit lassen sich unmittelbar die Prozesskosten beeinflussen, was zu einer weiteren wirtschaftlichen Aufwertung der Phosphorrezykling beitragen wird. Weitere Einsparungen ergeben sich aus den geringeren Zu- und Abluftmengen, indem die dafür benötigten Ausrüstungen kleiner konstruiert und mit geringeren Investitions- sowie Betriebskosten betrieben werden können.

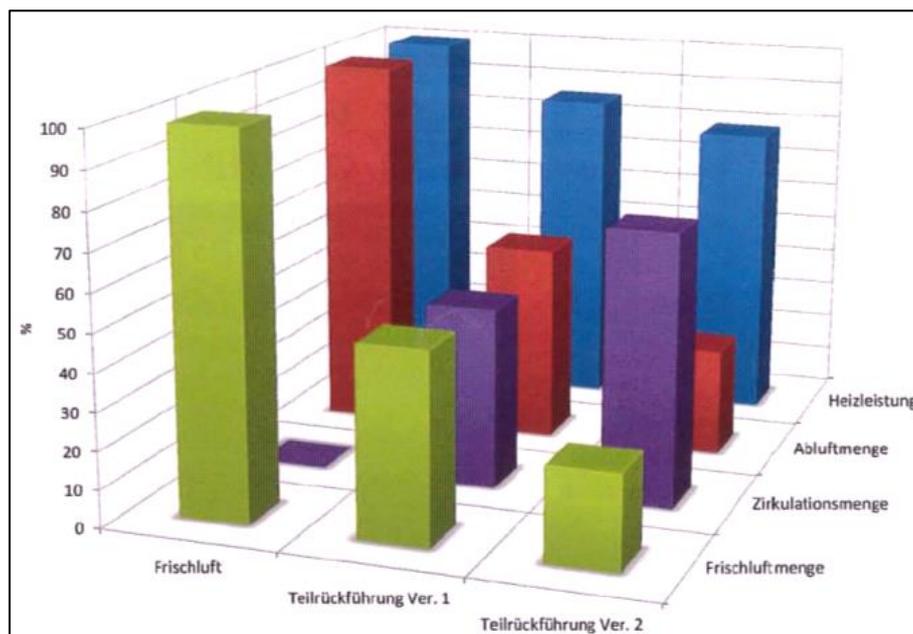


Abbildung 13: Energetische Bewertung des Granulationsprozesses anhand des Beispiels der Teilrückführung des Abluftstromes 50 % (Ver. 1) und 70 % (Ver. 2)

## 5.2 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse sind sehr positiv zu bewerten, denn es bietet in technologischer, ökologischer und ökonomischer Sicht völlig neue Perspektiven für die Rückgewinnung von Phosphor und deren Überführung in einsetzgerech konfektionierte Düngemittel.

Aus ökologischer Sicht stellen sich insbesondere



### 5.3 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Ergebnisse des Vorhabens sollen in den kommenden Monaten gemeinsam mit den Partnern intensiv kommuniziert werden. Aktuell werden in Kooperation mit Sera-plant drei Produktionsanlagen geplant, so dass die Öffentlichkeitsarbeit in diesem Zuge wichtiger Bestandteil der Marktvorbereitung ist.

Ziel ist es, den Zugang zu regionalen Klärschlammverwertern aber auch in diese Agrarbranche zu erschließen und diese vom Verwertungsmodell des Phosphorrecyclings mit der hier entwickelten Technologie zu überzeugen.

Vor diesem Hintergrund wurden auch bereits unterschiedliche Maßnahmen durchgeführt, um die wichtigen Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Vorhaben zu kommunizieren. So wurde bereits das P-Recyclingverfahren und Ergebnisse aus diesem Vorhaben beispielsweise auf folgenden Tagungen und Konferenz präsentiert:

- September 2017 Präsentation des Verfahrens auf dem Jahrestreffen der Deutschen Phosphor-Plattform in Berlin durch die DBU
- 25.01.2018 Norddeutsches Netzwerk Klärschlamm - 5. Regionalveranstaltung Region 10 - Schleswig-Holstein (Vortrag von Sludg2energy mit Teilinhalte Glatt/Seraplant-Verfahren)
- 28.02.2018 P-Forum in Osnabrück, organisiert durch die DWA
- 4.-8.5.2018 Präsentation des Verfahrens und Ergebnisse auf der IFAT bei unterschiedlichen Vorträgen in Kooperation durch Seraplant, LAV (LAV Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH); Sludg2Energy.
- 21.08.2018 Phosphor-Dialog in Rostock, organisiert Universität Rostock

Darüber hinaus wurde das Verfahren und die resultierenden Düngeprodukte auf der IFAT 2018 am Messestand von Huber SE zum Thema Phosphorrecycling präsentiert.

Auch wurde das Verfahren in verschiedenen Artikel in Fachzeitschriften kommuniziert, so beispielsweise in einem Kurzartikel für das Hüthig-Verlagsspecial "Industriewasser oder für die „Wasser & Abwasser“.

Seit Frühjahr 2018 zeigt Glatt das Verfahren und die Möglichkeiten zum Phosphorrecycling auf einer eigens dafür konzipierten Microsite <https://www.phos4green-glatt.com/home-3.html>. Zusätzlich wurde eine Broschüre ausschließlich zu Phosphorrecycling angefertigt, die auch auf dieser Microsite zum Download bereitsteht und die potentiellen Kunden bei Präsentationen, Tagungen, Konferenzen etc. übergeben wird.

Geplant sind hierzu weiterführende Maßnahmen. Dafür sollen neben direkten Gesprächen insbesondere auch Veröffentlichungen (z. B. Müll und Abfall), Vorträge auf Fachveranstaltungen (Phosphorplattform, IFAT) und Messepräsentationen (z. B. IFAT 2018) genutzt werden. Bereits in den vergangenen Monaten konnten diesbezüglich gute Erfahrungen gemacht werden, da die gehaltenen Vorträge auf ein großes Interesse stießen.

### 5.4 Fazit

Das abgeschlossene Projekt kann als großer Erfolg bewertet werden. Dies gilt nicht nur vor dem Hintergrund, dass die drei formulierten Zielstellungen erfolgreich realisiert werden konnten und im Ergebnis ein für verschiedenste Klärschlammmaschen geeignetes Verfahren für die Wiedergewinnung von Phosphor, mit dem in einem hocheffizienten Prozess aus dem Reststoff qualitativ hochwertige und hochkonzentrierte Phosphatdüngergranulate hergestellt werden können.

Diese erfüllen ohne Einschränkungen die Vorgaben der Düngemittelverordnung und können zielgerecht eingestellt werden. Zudem erfüllt der auf der Wirbelschichttechnologie basierende Herstellungsprozess auch die marktspezifischen Preisvorgaben, so dass auch die Wettbewerbsfähigkeit der hiermit hergestellten Phosphatdünger sichergestellt werden kann.

Auf dieser Grundlage lässt sich im Ergebnis der Arbeiten erstmalig ein Verfahren für die Wiedergewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen oder Klärschlammaschen präsentiert werden, welches sich sowohl im Hinblick auf die Qualität der daraus erzeugten Produkte als auch hinsichtlich der dahinterstehenden ökologischen und ökonomischen Bilanz als Praxistauglich erweist.