

BMFTR-Fördermaßnahme

# Regionales Phosphor-Recycling

## Verfahrenssteckbriefe

Kennwerte und Anwendungshinweise für  
kommunale Entscheidungsträger

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**

Forschung für Nachhaltigkeit



# Inhalt

<b>Einführung</b>	<b>5</b>
<b>Technologiestandorte der Verbundprojekte</b>	<b>6</b>
<b>Verfahrenssteckbriefe der Verbundprojekte</b>	<b>8</b>
<b>AMPHORE</b>	<b>10</b>
Regionales Klärschlamm- und Aschen-Management zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum	
<b>DreiSATS</b>	<b>14</b>
Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen	
<b>KlimaPhoNds</b>	<b>22</b>
Klimaneutrale und reststofffreie Klärschlammverwertung mit Phosphorsäureproduktion in Südost-Niedersachsen	
<b>P-Net</b>	<b>26</b>
Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide	
<b>RePhoRM</b>	<b>30</b>
Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main-Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe	
<b>R-Rhenania</b>	<b>34</b>
Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern	
<b>SATELLITE</b>	<b>40</b>
Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling	
<b>Impressum</b>	<b>46</b>



# Einführung

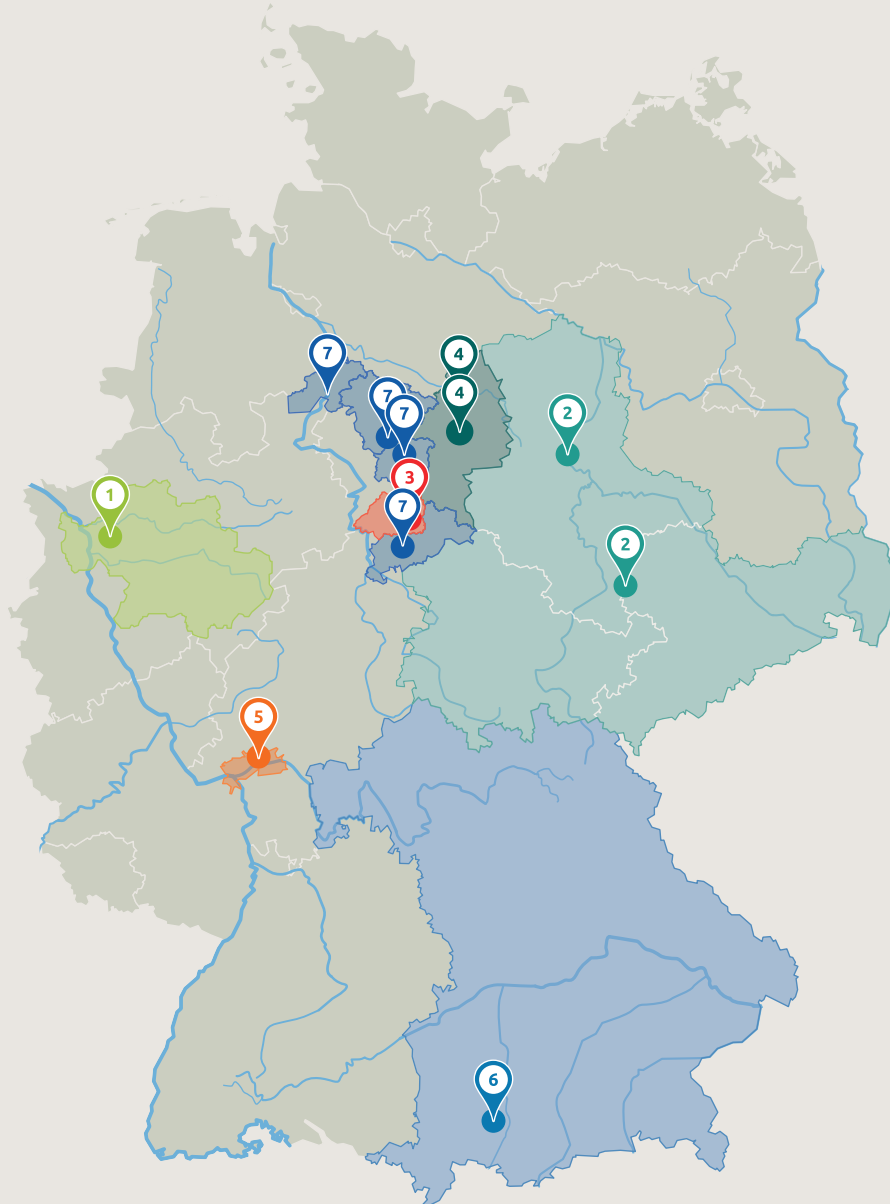
Mit der Fördermaßnahme „Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR)“ adressiert das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFT) die Aspekte der nachhaltigen Nutzung von Ressourcen und der stärkeren Schließung von Stoffkreisläufen.

Ziel der Fördermaßnahme ist es, durch innovative wirtschaftliche Lösungen zum regionalen P-Recycling einen Beitrag zur Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung zu leisten. Dabei nehmen die Entwicklung und Umsetzung innovativer Technologien zur Steigerung der Ressourceneffizienz einen hohen Stellenwert ein. Im Rahmen von RePhoR werden hierzu seit 2020 verschiedene Technologien zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungsasche großtechnisch untersucht, um wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse und praktische Erfahrungen unter realen Bedingungen zu sammeln.

Um kommunalen Entscheidungsträgern und der wasserwirtschaftlichen Praxis einen Überblick über die betrachteten Rückgewinnungsverfahren und eine erste Einschätzung des Umsetzungsaufwandes in vereinfachter Form zu geben, haben die RePhoR-Verbundprojekte zehn Verfahrenssteckbriefe zusammengestellt. Die Steckbriefe geben einen ausführlichen Einblick in die Funktionsweise, den FuE-Charakter, den Entwicklungsstand (technologischen Reifegrad) und die standortspezifischen Vorteile der untersuchten Verfahren. Sie enthalten zudem die Kontaktdaten der Projektkoordination und der Verfahrensgeber.



# Technologiestandorte der Verbundprojekte



## 1 AMPHORE

Regionales Klärschlamm- und Aschen-Management zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum

Koordinatorin: Hanna Evers (Ruhrverband, Essen)

Technologie: Parforce-Verfahren

## 2 DreiSATS

DreiSATS: Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen

Koordinator: Matthias Hoger (Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH, Markranstädt)

Technologie: Carbotechnik Staubfeuerung; PontesPabuli Verfahren

## 3 KlimaPhoNdS

Klimaneutrale und reststofffreie Klärschlammverwertung mit Phosphorsäureproduktion in Südost-Niedersachsen

Koordinator: Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers (TU Clausthal)

Technologie: KlimaPhoNdS-Verfahren

## 4 P-Net

Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide

Koordinator: Prof. Dr.-Ing. Thomas Dockhorn (TU Braunschweig)

Technologie: Peco-Verfahren

## 5 RePhoRM

Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main- Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe

Koordinator: Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart (TU Darmstadt)

Technologie: PHO4green-Verfahren

## 6 R-Rhenania

Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern

Koordinator: Dr.-Ing. Christian Adam (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin)

Technologie: AshDec®-Verfahren; R-Rhenania-Verfahren

## 7 SATELLITE

Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling

Koordinatorin: Dr.-Ing. Maïke Beier (LU Hannover)

Technologie: Klärschlamm-trocknung mit sequentieller Stickstoffrückgewinnung; Düngemittelherstellung On-Demand

## Übersicht zu den untersuchten Rückgewinnungsverfahren

Verbundprojekt	Technologie	Entwicklungsstand	Stand der Umsetzung	Produkte
<b>AMPHORE</b>	PARFORCE-Verfahren (Nasschemisches Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammmaschen)	TRL 7	Inbetriebnahme der großtechnischen Anlage auf dem Standort Bottrop im 2024, Kampagnenbetrieb seit 2025	Phosphorsäure
<b>DreisATS</b>	Staubfeuerung (Thermochemisches Verfahren Behandlung im Staubbrenner zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm)	TRL 6	Testbetrieb der Versuchsanlage in Magdeburg seit Mitte 2025	Kalzinierte Asche mit CaNaPO <sub>4</sub>
<b>KlimaPhoNds</b>	Pontes Pabuli-Verfahren (Nasschemisches Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammmaschen)	TRL 6	Testbetrieb der Versuchsanlage in Markranstädt seit 2022	Dünger
<b>P-Net</b>	Thermisch-biologische Hydrolyse mit anschließender Struvit-Fällung zur P-Rückgewinnung aus Überschussschlamm	TRL 8-9	Fertigstellung der großtechnischen Anlage (Vollstrom) auf der Kläranlage Northheim (75.000 EW) bis Anfang 2026	Struvit (MAP)
<b>RePhoRM</b>	Anaerob-biologische Hydrolyse (PECO-Verfahren) mit anschließender Struvit-Fällung zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm und Schlammwasser	TRL 7-8	Großtechnische Umsetzung auf der Kläranlage Braunschweig (350.000 EW) seit 2023 und Testbetrieb auf der Kläranlage Gifhorn (65.000 EW) seit 2024	Struvit (MAP)
<b>R-Rhenania</b>	PHOS4green-Technologie (Nasschemisches Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammmaschen)	TRL 7-9 (ohne Schwermetallanreicherung) TRL 5-6 (mit Schwermetallanreicherung)	Produktionsanlage Seraplant in Haldensleben Fertigstellung Pilotanlage zur Schwermetallanreicherung auf Industriepark Höchst seit 2023	Dünger
<b>SATELLITE</b>	Modifiziertes AshDec® Verfahren (Thermochemisches Verfahren im Drehrohfen zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammmaschen)	TRL 7	Messkampagne im Pilotmaßstab seit 2018	Kalzinierte Asche mit CaNaPO <sub>4</sub>
	R-Rhenania-Verfahren (Thermochemisches Verfahren in der Rostfeuerung zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm)	TRL 8	Messkampagne seit 2022, Umrüstung der großtechnischen Rostfeuerung seit 2023, Fertigstellung und Demonstration in Altenstadt seit 2024	Kalzinierte Asche mit CaNaPO <sub>4</sub>
	Klärschlamm-trocknung mit sequentieller Stickstoffrückgewinnung	TRL 5	Betrieb der Versuchsanlage auf der Kläranlage Hildesheim von 2022 bis 2024	Hochkonzentrierte Ammoniaklösung
	Düngemittelherstellung On-Demand	TRL 5-6	Betrieb der Anlage in Hünxe von 2022 bis 2024 in verschiedenen Testläufen	Harnstofflösung



# **Verfahrenssteckbriefe der RePhoR-Verbundprojekte**

## AMPHORE

# Regionales Klärschlamm- und Aschenmanagement zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum

### Kurzbeschreibung

In AMPHORE wurde mit der Demonstrationsanlage in Bottrop erstmalig die patentierte PARFORCE-Technologie® im großtechnischen Maßstab umgesetzt. Die Anlage ist auf eine Nennkapazität von 1.000 t Klärschlamm-Asche pro Jahr ausgelegt und läuft weitestgehend automatisiert. Die in der Anlage verbauten Aggregate entsprechen industriellen Standards und könnten daher auch bei großtechnischer Umsetzung Anwendung finden. Somit können die Untersuchungen an der Demonstrationsanlage unter realen Betriebsbedingungen durchgeführt werden. In der Anlage können einzelne Aschen, aber auch Mischungen unterschiedlicher Aschen prozessiert werden und so eine Bandbreite verschiedener Eingangszusammensetzungen abgebildet werden. Neben der Rückgewinnung und Wiedernutzbarmachung des Phosphors kann mit Hilfe des PARFORCE-Verfahrens insbesondere eine weitestgehende Schadstoffentfrachtung fokussiert werden. Es entsteht ein hochwertiges Produkt in Form von Phosphorsäure, welches in verschiedenen industriellen Anwendungen einsetzbar ist. Nebenprodukte, die in dem Prozess entstehen (Fe-, Al-, Ca-Chloridlösungen), könnten bei Einhaltung der jeweiligen Qualitätsanforderungen ebenfalls einer nachfolgenden Nutzung zugeführt werden.

Aus verfahrenstechnischer Sicht sind in der Anlage die nachfolgend beschriebenen sieben wesentlichen Prozessschritten umgesetzt:

Im ersten Schritt werden die in der Asche-Matrix enthaltenen Phosphate durch einen Säureaufschluss mobilisiert. Als Aufschlusslösung wird verdünnte Salzsäure in technischer Qualität verwendet. Neben Phosphaten werden auch viele der in der Asche enthaltenen Begleitstoffe (u.a. Eisen, Aluminium und Calcium sowie Schwermetalle) aus der Asche gelöst und in den nachfolgenden Schritten von der phosphorhaltigen Lösung abgetrennt. Im nachfolgenden Filtrationsschritt werden die Feststoffe (silikatische Rückstände) in einer Kammerfilterpresse von der Aufschlusslösung getrennt. Im ersten Ionenaustauscher (IAT 1) werden Eisenionen abgetrennt. Der Ionenaustauscher wird mit Salzsäure regeneriert und das Eisen in Form einer Eisenchlorid-Lösung gewonnen.

In der nachfolgenden Elektrodialyse werden ein- und zweiwertige Kationen, u.a. Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Kalium ( $\text{K}^+$ ), Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) sowie Schwermetallionen wie Nickel ( $\text{Ni}^{2+}$ ), Kupfer ( $\text{Cu}^{2+}$ ), Blei ( $\text{Pb}^{2+}$ ), Cadmium ( $\text{Cd}^{2+}$ ) und Zink ( $\text{Zn}^{2+}$ ) und einwertige Anionen, insbesondere Chlor ( $\text{Cl}^-$ ), abgetrennt. Die Elektrodialyse ist ein elektrochemischer Membranprozess, mit dem ein Diluat (hier: Roh-Phosphorsäure) und ein Konzentrat (hier: abgetrennte Salze und Schwermetalle in Lösung) gewonnen wird. Das Konzentrat wird nachfolgend mit Kalkmilch neutralisiert, wobei die Schwermetallbestandteile als schwerlösliche Salze ausfallen und als Rückstand (Salzabfall) abfiltriert werden. Nach der Filtration verbleibt ein Calciumchlorid-Konzentrat, welches für die Gewinnung einer Salzsole durch Vakuum-Eindampfung auf einen Calciumchlorid-Gehalt von ca. 26 Gew.-% gebracht wird. Im Hauptstrom werden aus dem Diluat nach der Elektrodialyse (Roh-Phosphorsäure) im Ionenaustauscher 2 (IAT 2) die Aluminiumionen abgetrennt. Der Ionenaustauscher wird ebenfalls mit Salzsäure regeneriert und das Aluminium in Form einer Aluminiumchlorid-Lösung gewonnen. Im letzten Schritt wird die Roh-Phosphorsäure durch Vakuumverdampfung auf eine handelsübliche Konzentration gebracht. Marktüblich sind Konzentrationen von ca. 75 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

Insgesamt kommen bei dem Verfahren, wie es in AMPHORE umgesetzt wird, neben der Klärschlamm-Asche als phosphathaltiger Ausgangsstoff auch Salzsäure und Kalkmilch als Edukte zum Einsatz. Hauptprodukt des Prozesses ist ca. 75 %-ige Phosphorsäure. Als Nebenprodukte entstehen eine Eisen- und eine Aluminiumchlorid-Lösung und ein Calciumchlorid-Konzentrat. Als Reststoffe des Prozesses verbleibt der silikatische Rückstand („ausgelaugte Asche“) sowie der Salzabfall („Schwermetallsenke“).

Das Vorhaben AMPHORE befasst sich mit der Konzeptionierung der Phosphorrückgewinnung im Einzugsgebiet der fünf in NRW angesiedelten sondergesetzlichen Wasserwirtschaftsverbände Ruhrverband (RV), Emschergenossenschaft (EG), Lippeverband (LV), Wupperverband (WV) und Linksniederrheinische-Entwässerungs-Genossenschaft (LINEG).

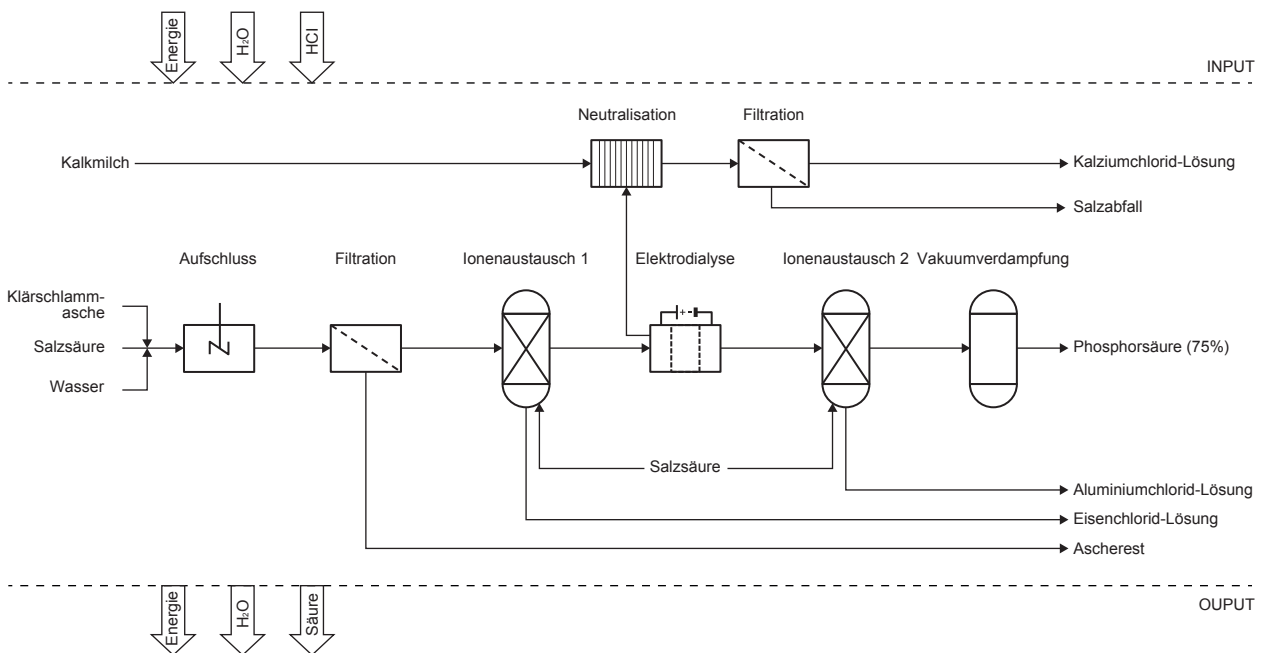


Die Projektpartner betreiben insgesamt 142 Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von rund 12,3 Mio. EW. Die in diesen Anlagen produzierten Klärschlämme halten überwiegend die Anforderungen der DümV bzw. AbfklärV für eine bodenbezogene Verwertung nicht ein (insb. für die Parameter Cadmium und Nickel). Die betrachteten Klärschlämme werden ausschließlich in den vier derzeit vorhanden verbandseigenen Monoverbrennungsanlagen thermisch verwertet. Außerdem werden an drei Verbrennungsstandorten zusätzlich Schlämme weiterer Betreiber verbrannt. In Summe werden vrsl. ab 2029 100.000–120.000 t Klärschlammaschen anfallen. Der durchschnittliche Phosphorgehalt beträgt bis zu 6%, was bei einer Rückgewinnungsquote von 80% einem Rückgewinnungspotential von mindestens 4.800 t P/a entspricht.

Im Projektgebiet sind potenzielle Standorte vorhanden, die den im Projekt definierten Vorgaben hinsichtlich eines möglichen Standortes einer P-Rückgewinnungsanlage entsprechen.

Hierzu zählen u.a. Produktionsstandorte der chemischen Industrie, der Düngemittelindustrie oder von Chemielogistikern. Diese Standorte bieten den Vorteil, dass die für den Recyclingprozess erforderlichen Betriebsmittel (Chemikalien) (teilweise) vor Ort verfügbar sind und/oder eine direkte Abnahmemöglichkeit der Produkte besteht. Optimalerweise verfügen die Standorte über eine gute bis sehr gute Verkehrsinfrastruktur sowie über Lagerungsmöglichkeiten für Betriebsmittel, Produkte und ggf. Klärschlammaschen. Weitere Optionen bieten ausgewählte Verbrennungsstandorte im Gebiet. Das Projektgebiet verfügt über ein dichtes Straßen- und Fernstraßennetz in Ost-West und in Nord-Süd-Richtung. Außerdem führen mehrere Bahnlinien, die für den Güterverkehr genutzt werden, durch die Region. Des Weiteren sind der schiffbare Rhein und Wasserschiffahrtsstraßen im Kernbereich vorhanden. Diese verkehrliche Infrastruktur lässt somit ein Logistikkonzept bis zur Tri-Modalität zu.

### Prozess-Schema



Verfahrensfließschema des AMPHORE-Verfahrens. © Ruhrverband

## Prozessdaten

**Prozesstyp:** Nasschemisch

**Anlagentyp:** 100% Maschinen- und MSR-Technik

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL 7 (Prototyp im Einsatz von 1–5 Jahren)

**Eingangsmaterial:** Klärschlamm-Asche aus der Mono-verbrennung

**Input:** Salzsäure, Kalkmilch (zur Neutralisation des Ascherestes sowie des Salzabfalls)

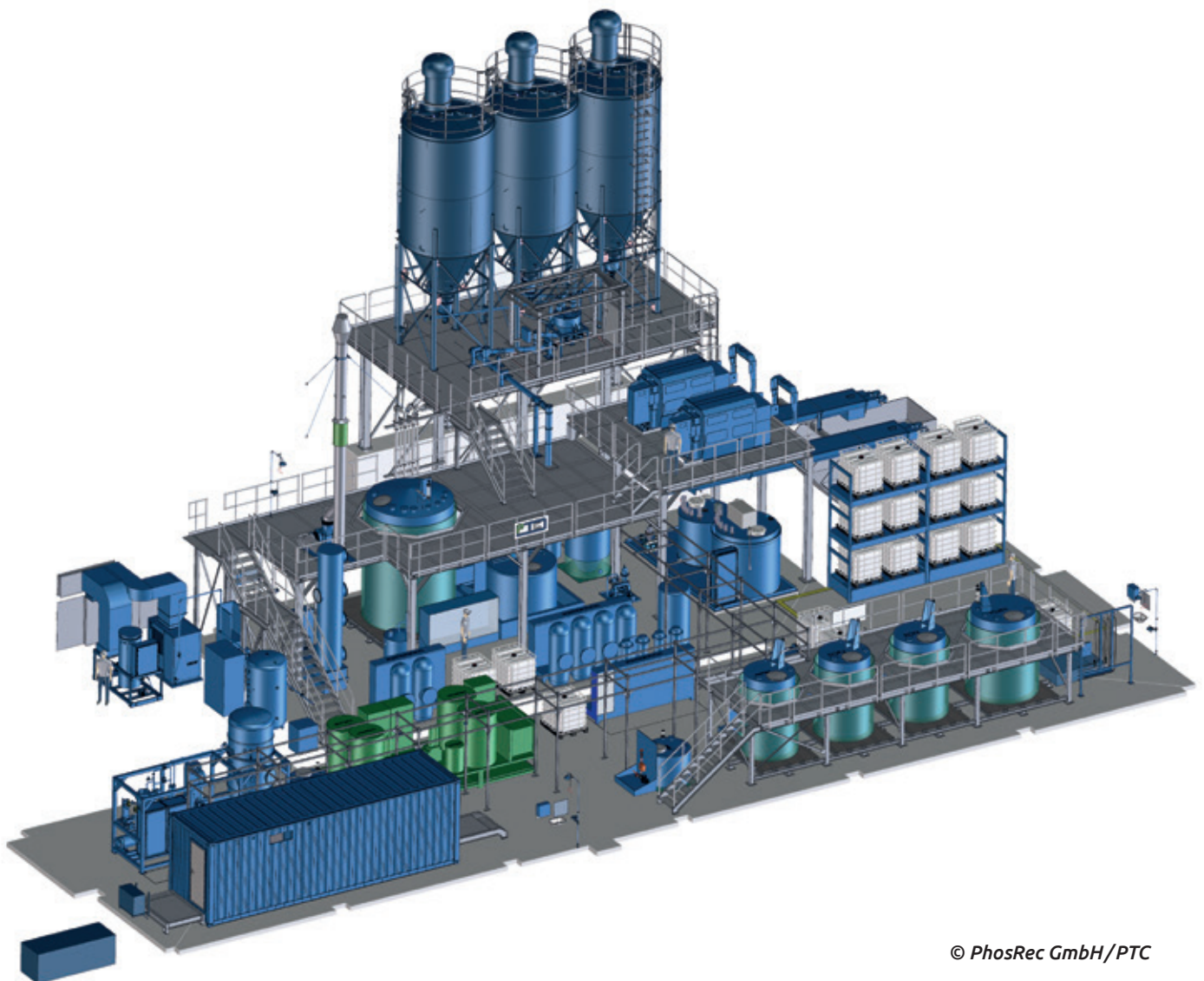
**Output:**

- » **Produkte:** Phosphorsäure (75 %ig) 0,21 t/tKSA bei P-Gehalt in KSA von 6% (sonst > 80% des in der KSA enthaltenen Phosphors)
- » **Nebenprodukte** (Mengen sind abhängig von den Gehalten und dem Aufschlussverhalten der KSA): Eisenchlorid-Lösung, Aluminiumchlorid-Lösung, Calciumchlorid-Sole jeweils < 1 m<sup>3</sup>/tKSA im Demonstrationsbetrieb

**Abfall:**

- » Abgereicherte Asche, rd. 0,50 bis 0,65 t/tAsche als Trockenmasse in Abhängigkeit von den Material- und Mineralphasen der KSA, Abfallschlüsselnummer (in Abhängigkeit von der ASN der Eingangsasche) z. B. 19 01 12/19 01 13.
- » Salzabfall/Neutralisationsrückstand, Menge ist abhängig von den Gehalten und dem Aufschlussverhalten der KSA in der Regel < 0,05 t/tKSA, Abfallschlüsselnummer 19 02 06.

**Rückgewinnungsrate:** > 80%



© PhosRec GmbH/PTC

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz<sup>1</sup>

### Stromverbrauch, Wärmeverbrauch/Wärmeabgabe:

Diese Daten können nicht aus den Werten der Demonstrationsanlage hochgerechnet werden.

- » Zum Stromverbrauch ist keine differenzierte Angabe möglich, da in der Demonstrationsanlage der Bedarf an thermischer Energie (z. B. Eindampfung der P-Säure) durch elektrische Energie erzeugt wird. In der Demonstrationsanlage ist keine Wärmeintegration über das Gesamtverfahren realisiert.
- » Der Wärmebedarf liegt vielfach im niederkalorischen Bereich und könnte standortabhängig in einer Großanlage durch die Nutzung von Abwärme gedeckt werden.

**Chemikalienverbrauch** (unter Berücksichtigung von Kreislaufführungen und prozessinternen Rückgewinnungen):

- » Salzsäure (bilanziert als 30%ige): ca. 1,2 t/tKSA
- » Löschkalk (Fest): 0,02 bis 0,04 t/tKSA

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Phosphorsäure (75 %ig)

**P-Konzentration:** 24 %

**NAC-Löslichkeit:** k. A. (nicht relevant)

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** k. A. (nicht relevant)

**Sonstige Nährstoffe:** k. A.

**Weitere Produkteigenschaften:** flüssig

## Betriebsanforderungen

**Platzbedarf:** Nach aktueller Abschätzung ca. 15.000 m<sup>2</sup> (inkl. Umschlagsflächen) für eine Anlage zur Verarbeitung von ca. 25.000 t KSA pro Jahr

### Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:

Qualifiziertes Personal zum Betrieb einer Chemieanlage (Berufsbilder: Chemikant:innen, Chemiefacharbeiter:innen und Chemie-/Verfahrenstechnikingenieur:innen)

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:** sauer (Salzsäure), basisch (Kalkmilch)

**Kategorie der Abfallentsorgung:** Entsorgung der abgereicherten Asche individuell (Deklarationsanalysen der einzelnen Aschereste notwendig (DK I oder DK II). Einordnung nach Deponieklassen, die DK der eingesetzten KSA wird in der Regel für den Ascherest erhalten oder dieser zum Teil sogar um eine DK verbessert); Deklarationsanalyse des Salzabfalls ebenfalls notwendig. Einordnung nach Deponieklassen

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

**Pilotierung:** Bottrop, ausgelegt auf einen theoretischen Jahresdurchsatz von 1.000 t bei kontinuierlichem Betrieb, Baujahr 2023, Inbetriebnahme 2024, Laufzeit: 01/2025 – 06/2026

**Forschung:** Freiberg, Durchsatz 1 t Edukt pro Tag, Baujahr 2016, Inbetriebnahme 2017, Laufzeit: weiterhin in Betrieb (bspw. Großversuche).

### Innovativer Charakter/Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

- » Umsetzung der PARFORCE-Technologie® im großtechnischen Maßstab mit einer Nennkapazität der Anlage von 1.000 t KSA/a
- » Industrieller Standard der eingebauten Aggregate und weitestgehende Automatisierung
- » Betrieb unter realen Bedingungen und unter Einsatz unterschiedlicher Ausgangsaschen mit großer Spannbreite hinsichtlich der chemischen und physikalischen Eigenschaften
- » Fokussierung der Untersuchungen auf die P-Rückgewinnung unter Einhaltung der gesetzlichen P-Rückgewinnungsquote von 80 % sowie eine weitestgehende Schadstoffentfrachtung

## Kontakt

### Verfahrensgeber/ Patenteigentümer:

**PARFORCE Engineering & Consulting GmbH**  
Am St.-Niclas-Schacht 13 | 09599 Freiberg,  
[www.parforce-technologie.de](http://www.parforce-technologie.de)

### Betreiber der Demonstrationsanlage:

**PhosRec Phosphor-Recycling GmbH**  
In der Welheimer Mark 190 | 46238 Bottrop

### Dr. Dennis Blöhse

[info@phosrec.de](mailto:info@phosrec.de)  
[www.phosrec.de](http://www.phosrec.de)

### Projektkoordination:

#### Ruhrverband

Kronprinzenstraße 37 | 45128 Essen

#### Hanna Evers

[hev@ruhrverband.de](mailto:hev@ruhrverband.de)  
[www.ruhrverband.de](http://www.ruhrverband.de)

## DreiSATS

# Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen

## Dezentrale thermische Verwertung mit Staubfeuerung

### Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Verbundprojekts DreiSATS wurde im Teilprojekt ein innovatives Verfahren zur thermischen Verwertung von entwässertem Klärschlamm mittels Staubfeuerung entwickelt. Ziel ist es, erstmals eine wirtschaftliche Umsetzung in deutlich kleineren Anlagengrößen zu ermöglichen als bei konventionellen Wirbelschichtverbrennungsanlagen – und damit insbesondere für kleinere und mittlere Kommunen eine dezentrale Lösung zur Erfüllung der gesetzlichen Rückgewinnungspflicht ab 2029 bereitzustellen.

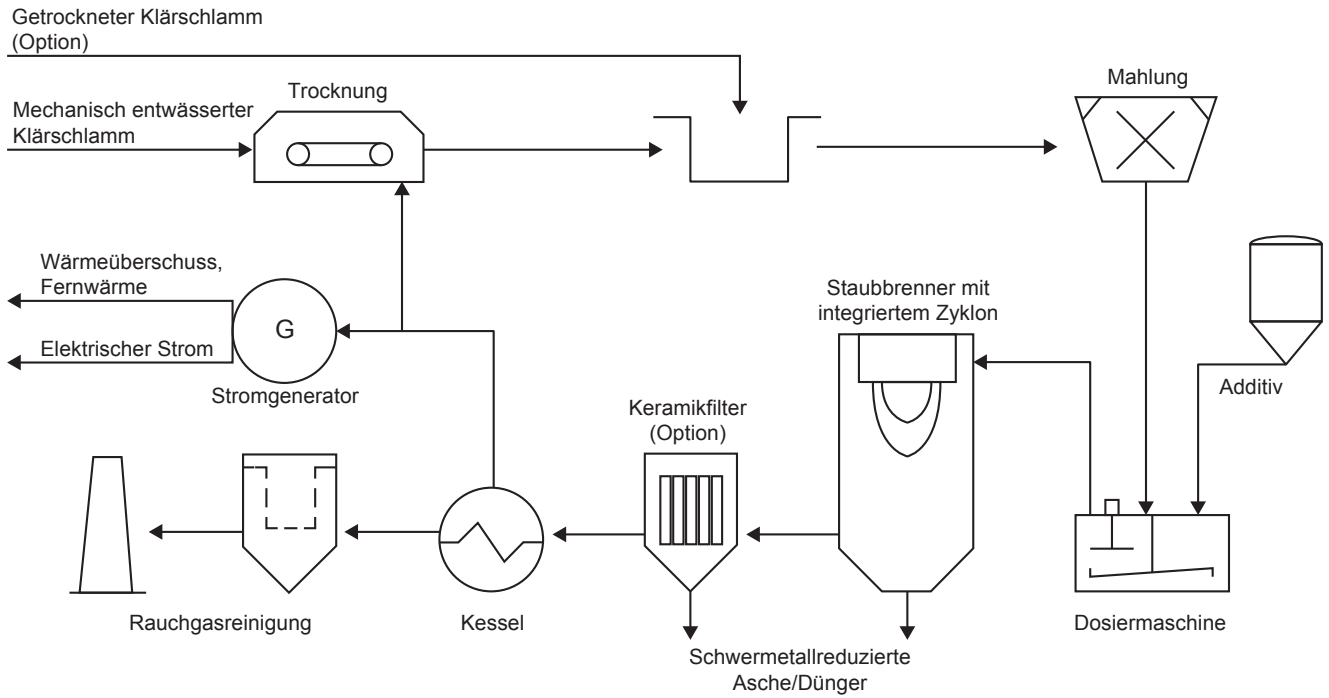
Der getrocknete und gemahlene Klärschlamm wird vor Eintritt in den Brennraum gezielt mit Additiv versetzt. Die prozessintegrierte Schwermetallentfrachtung wirkt direkt in der Verbrennung (thermochemischer Prozess) und basiert auf dem Prinzip unterschiedlicher Flüchtigkeiten von Aschebestandteilen bei hohen Temperaturen. In der nachgelagerten Abgasreinigung werden die Schwermetallverbindungen auskondensiert und entfernt. Die resultierende Asche ist feinkörnig, schadstoffentfrachtet, weist eine hohe Phosphorkonzentration auf und kann den Vorgaben der Düngemittelverordnung entsprechen. Die Aschen aus der Staubfeuerung kamen bei Pflanzversuchen im standardisierten Pflanzenversuchsstand des Projektpartners Fraunhofer IKTS Dresden zum Einsatz. Dabei zeigte sich eine gute Düngewirkung.

Der FuE-Anteil des Teilprojekts umfasst die Entwicklung eines modularen Anlagenkonzepts mit integriertem LTC-Heißgasfilter, flexibler Steuerungstechnik und variabler Aschebehandlung. Ziel war die Optimierung der Verbrennungsparameter und die Erprobung verschiedener Strategien zur Rückgewinnung und Verwertung der Asche.

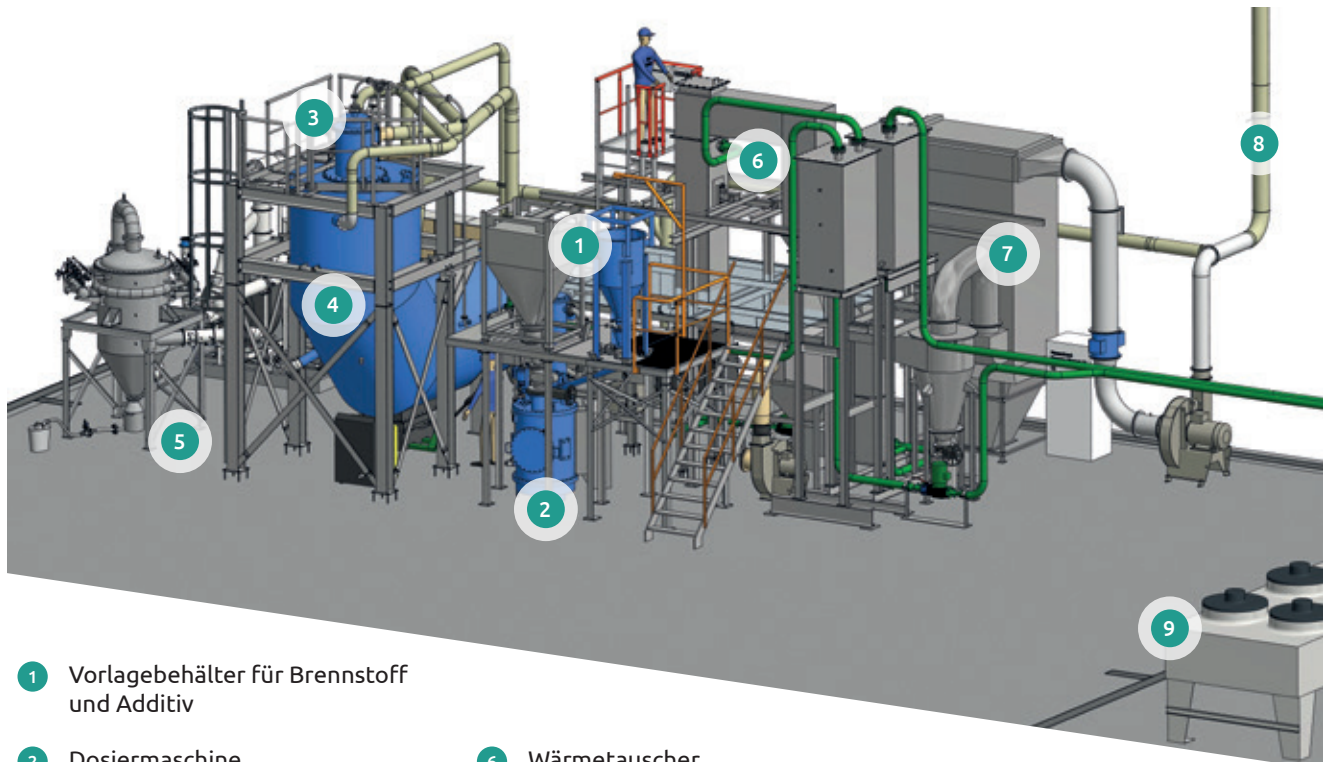
Die Technologie wurde im Technikum am Standort Magdeburg getestet und wissenschaftlich durch das Fraunhofer IKTS Dresden begleitet. Die Pilotanlage hat eine Feuerungswärmeleistung von 1 MW und entspricht bezogen auf mechanisch entwässerten Klärschlamm einer Durchsatzleistung von rund 8.000 t/a. Die Anlage arbeitet vollautomatisch und verfügt über ein intelligentes Regelungskonzept für ein optimales Brennstoff-Luftverhältnis. Dadurch kann das System robust auf Heizwertschwankungen des Klärschlammes reagieren und einen stabilen, emissionsarmen Betrieb sicherstellen. Die Anlage benötigt keine Stützflamme und erfüllt die Anforderungen der 17. BImSchV.

Durch seine klare regionale Ausrichtung verbindet das Verfahren praxisnahe Phosphorrückgewinnung mit einer dezentralen und strukturell gut anschlussfähigen Umsetzung. Die Staubfeuerung stärkt lokale Wertschöpfungsketten, reduziert Transportaufkommen und ermöglicht eine wirtschaftlich robuste, genehmigungssichere und zeitnah realisierbare Umsetzung der Anlagentechnik. Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse liefern belastbare Kennwerte und Anwendungshinweise und können als übertragbares Modell für weitere Regionen dienen.

## Prozess-Schema



Dezentrales Konzept Trocknung und Staubfeuerung mit Heißgasfiltration. © Carbotechnik



- |  |                     |
|--|---------------------|
| 1 Vorlagebehälter für Brennstoff und Additiv | 6 Wärmetauscher     |
| 2 Dosiermaschine                             | 7 Rauchgasreinigung |
| 3 Staubbrenner                               | 8 Kamin             |
| 4 Nachbrennkammer mit Zyklon                 | 9 Tischkühler       |
| 5 Heißgasfilter                              |                     |

Pilotanlage der Staubfeuerung in Magdeburg: 8.000 t/a 25% TS, 1 MW. © Carbotechnik



Pilotanlage der Carbotechnik Staubfeuerung am Standort Magdeburg. © Carbotechnik

## Prozess-Daten

**Prozesstyp:** thermochemisch

**Anlagentyp:** Staubfeuerung (Impulsbrenner),  
100 % Maschinen- und MSR-Technik

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL 6

**Eingangsmaterial:** mechanisch entwässert und/oder getrockneter Klärschlamm

**Input:** Additiv als Natriumhydrogencarbonat (andere Carbonate möglich)

**Output:**

- » Asche/Dünger: ca. 100 kg/t entwässertem Klärschlamm
- » Adsorpt der Rauchgasreinigung ca. 15 kg/t entwässertem Klärschlamm
- » Rückgewinnungsrate: 95–100 %

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz<sup>1</sup>

**Stromverbrauch:** abhängig von der Anlagenkonfiguration

**Wärmeverbrauch/Wärmeabgabe:** thermisch autark, Wärmeüberschuss

**Chemikalienverbrauch:** Additiv  $\text{NaHCO}_3$  ca. 70 kg/t TM

**Rauchgasreinigung:** Sorbent  $\text{NaHCO}_3$  ca. 12 kg/t entwässertem Klärschlamm

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Pulver bzw. staubförmig, optional granuliert

**P-Konzentration:** ca. 15–20 Gew.-%  $\text{P}_2\text{O}_5$

**NAC-Löslichkeit:** bis ca. 70 %

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** möglich

**Sonstige Nährstoffe:** abhängig vom Materialinput

**Weitere Produkteigenschaften:** reduzierte Auswaschverluste mit P-Depotwirkung

Die bei der Staubfeuerung entstehende Asche ist feinkörnig, homogen und praktisch frei von organischen Reststoffen. Durch die prozessintegrierte Schwermetallentfrachtung weist sie deutlich reduzierte Schadstoffgehalte auf und besitzt gleichzeitig eine hohe Phosphorkonzentration. Abhängig vom Materialinput kann die Einhaltung der Düngemittelverordnung (DüMV) erreicht werden. Aufgrund ihrer feinen Kornstruktur und chemischen Zusammensetzung eignet sich die Asche auch sehr gut für die Aufbereitung zu einem definierten Düngemittel.

<sup>1</sup> Alle Angaben auch vom Materialinput abhängig

## Betriebsanforderungen

Die Anlage zeichnet sich durch ihre kompakte Bauweise und einen hohen Automatisierungsgrad aus. Sie ist wartungs- und benutzerfreundlich konzipiert, was den täglichen Betrieb deutlich erleichtert. Synergieeffekte mit benachbarten Anlagen sowie mit dem vorhandenen Personal können effizient genutzt werden. Für den Betrieb der Feuerung ist ein Kesselwärter erforderlich; die entsprechende Qualifikation kann in einem etwa 14-tätigen Lehrgang erworben werden.

**Platzbedarf:** abhängig von der Anlagenkonfiguration

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:**  $\text{NaHCO}_3$ , kein Gefahrstoff

**Kategorie der Abfallentsorgung:** Filterasche (gefährlicher Abfall)

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

### Technische Kenndaten der Pilotanlage

- » **Standort:** Magdeburg, OT Rothensee
- » **Feuerungswärmeleistung:** 1 MW
- » **Durchsatz:** umgerechnet ca. 8.000 t/a bei 25 % TS
- » **Grundfläche:** 190 m<sup>2</sup>
- » **Betriebsweise:** kontinuierlich
- » **Automatisierung:** vollautomatisierter Anlagenbetrieb

Die errichtete Pilotanlage zur Staubfeuerung mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW befindet sich am Standort Magdeburg. Dort wurden umfangreiche Untersuchungen zur Klärschlammverbrennung sowie zur Schwermetallabtrennung mit Additivzugabe und Heißgasfiltration durchgeführt. Die für den Dauerbetrieb ausgelegte Anlage erreicht, bezogen auf mechanisch entwässerten Klärschlamm, eine Durchsatzleistung von rund 8.000 t/a und benötigt dafür weniger als 190 m<sup>2</sup> Grundfläche. Auf Wunsch können Klärschlämme hinsichtlich ihrer Aschequalitäten untersucht werden.

## Innovativer Charakter / Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

### Dezentrale thermische Verwertung von Klärschlämmen

- » Reduktion des Transportaufkommens durch regionale Behandlung
- » Erhöht Akzeptanz durch standortnahe, kompakte Anlagen
- » Unabhängigkeit von großskalierten Entsorgungsstrukturen und deren Preisentwicklung
- » Stärkung der lokalen Wertschöpfung durch regionale und eigenständige Energie- und Nährstoffrückgewinnung

### Innovative Prozessmerkmale

- » Prozessintegrierte Schwermetallentfrachtung durch thermochemischen Prozess
- » Gezielte Additivierung und hohe Phosphorrückgewinnung
- » Hoher Ausbrand und stabile Verbrennungsbedingungen durch Impulsbrenner mit Luftstufung
- » Breiter und stufenloser regelbarer Leistungsbereich (1:2) ermöglicht eine flexible Anpassung an Stoffstromschwankungen sowie an variierende Anforderungen der Wärmeauskopplung (z. B. saisonale Unterschiede bei Fernwärmeeinspeisung).

### Regionale & nachhaltige Verwertung

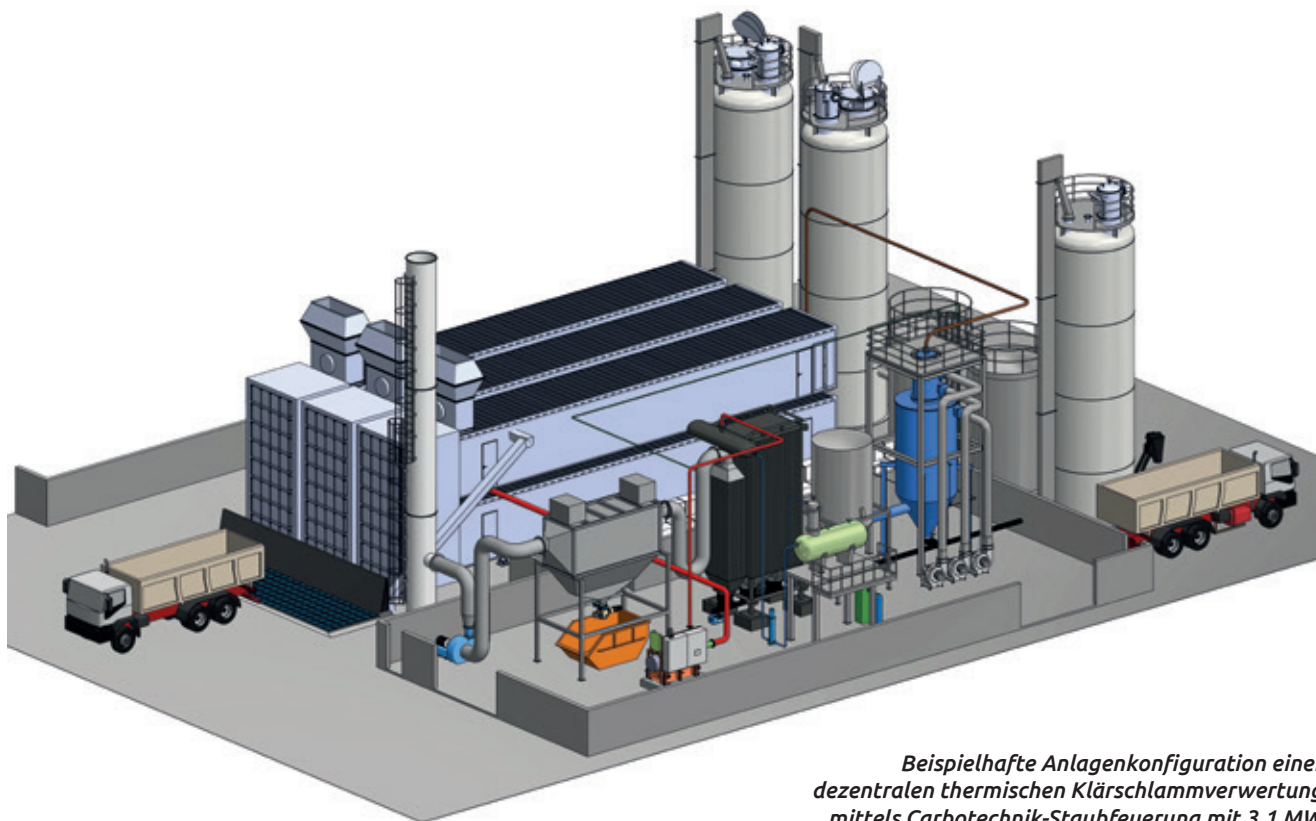
- » Minimierung von Schadstoffemissionen durch optimierte Verbrennung und moderne Abgasreinigung
- » Schließung regionaler Nährstoffkreisläufe durch die Nutzung der Asche als Düngemittel bzw. Aufbereitung zu definiertem Düngeprodukt.
- » Beitrag zur Versorgungssicherheit durch lokale Phosphorrückgewinnung

### Qualität der erzeugten Feinasche

- » Feinkörnige, homogene und schadstoffentfrachtete Asche
- » Kann, je nach Input, die Anforderungen der DÜMV erfüllen
- » Hohe Phosphorrückgewinnungsrate und gute Pflanzenverfügbarkeit

### Wirtschaftlichkeit & Zukunftssicherheit

- » Geringer Flächenbedarf und hoher Automatisierungsgrad reduzieren Investitions- und Betriebskosten
- » Thermisch autarker Betrieb ohne Stützfeuerung erhöht die Energieeffizienz
- » Hohe Entsorgungssicherheit im Hinblick auf die AbklärV-Pflichten ab 2029



*Beispielhafte Anlagenkonfiguration einer dezentralen thermischen Klärschlammverwertung mittels Carbotechnik-Staubfeuerung mit 3,1 MW Feuerungswärmeleistung. © Carbotechnik*

## Grundkonzept einer möglichen dezentralen Anlage

Das dargestellte Grundkonzept der dezentralen thermischen Klärschlammverwertung basiert auf realen Mengengerüsten und Stoffströmen, wie sie in regionalen Entsorgungsstrukturen typischerweise auftreten. Die Annahmen zu Klärschlamm-mengen, Trocknungsgraden und Transportbeziehungen wurden im Rahmen einer praxisnahen Systemanalyse ermittelt und mit den Ergebnissen des Forschungsprojekts abgeglichen. Damit stützt sich das Konzept auf belastbare und übertragbare Rahmenbedingungen und nicht auf theoretische Modellannahmen.

Im Beispiel wird die thermische Verwertung am Standort der größten Kläranlage konzentriert, während mechanisch entwässertes Klärschlamm aus umliegenden Anlagen angeliefert wird. Ergänzend wird extern getrockneter Klärschlamm aus Abwärmenutzung einbezogen, sodass typische Varianten eines dezentralen Verwertungssystems abgebildet sind. Die Anlage kann auch ohne die Anlieferung getrockneten Materials thermisch autark betrieben werden. Überschüssige Wärme kann sowohl zur Fernwärmeeinspeisung als auch zur Stromerzeugung genutzt werden.

Das dargestellte Konzept ist als Beispiel zu verstehen, das mögliche Dimensionierungen und Stoffströme einer dezentralen Lösung veranschaulicht. Die konkrete Auslegung einer Anlage einschließlich Feuerungswärmeleistung, Gebäude-

größe, Trocknungskonzept und Einbindung externer Stoffströme erfolgt stets standortspezifisch und wird individuell an lokale Mengen, logistische Strukturen, Wärmeabnehmer und genehmigungsrechtliche Anforderungen angepasst.

### Eckdaten der beispielhaften dezentralen thermischen Klärschlammverwertung:

- » Größte Kläranlage am Standort der Staubfeuerung, 8.500 t, 25 % TS
- » Kläranlagen im benachbarten Umland, 8.500 t, 25 % TS
- » Annahme von extern getrocknetem Klärschlamm, 2.000 t, 90 % TS
- » Feuerungswärmeleistung 3,1 MW
- » Grundfläche für Anlagentechnik 35 m x 31 m (LxB)
- » Davon Gebäude: 30 m x 17 m x 10 m (LxBxH)

---

## Kontakt

### Verfahrensgeber

**Carbotechnik Energiesysteme GmbH**

Lauterbachstraße 12 | 82538 Geretsried

**Dipl.-Ing. Peter Schöfmann**

schoefmann@carbotechnik.de

www.carbotechnik.de

## Pontes Pabuli-Verfahren

### Kurzbeschreibung

Mit dem Pontes Pabuli-Verfahren erfolgt die Überführung des in den phosphathaltigen Aschen enthaltenen Phosphors in gebrauchsfertiges Düngegranat, was den am Markt verfügbaren konventionellen Düngegranulaten in der Wirkung, im Handling und im Ausbringverhalten gleichwertig ist. Bei dem Verfahren wird zunächst eine Suspension aus phosphathaltiger Asche, Wasser und Säure hergestellt. Dabei erfolgt eine Aufschlussreaktion zwischen dem Phosphat in der Asche und der Säure. Nach einer definierten Reaktionszeit erfolgt eine mechanische Trennung von festen und flüssigen Bestandteilen. Die abgetrennte Flüssigkeit wird im Kreislauf geführt, während der feuchte Feststoff weiterverarbeitet wird. Durch präzise Zugabe zusätzlicher Nährstoffe (wie beispielsweise Kalium oder Stickstoff) wird die Nährstoff-Zusammensetzung des Endprodukts exakt auf den gewünschten Düngertyp abgestimmt, wodurch nicht nur Phosphat- sondern auch Mehrnährstoffdünger hergestellt werden können. Das resultierende Nährstoffgemisch wird granuliert und getrocknet. Das Endergebnis ist ein gebrauchsfertiger Dünger, der in seiner Qualität konventionellen Mineraldüngern entspricht.

Ein besonderer Vorteil des Pontes Pabuli-Verfahrens ist die Möglichkeit, Schwermetalle selektiv aus der flüssigen Phase zu entfernen, was die Sicherheit und Qualität des Endprodukts weiter erhöht. Die Intensität der Schwermetallabreicherung kann individuell angepasst werden, basierend auf der vorliegenden Schadstoffkonzentration und wirtschaftlichen Überlegungen. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass außer den gezielt abgetrennten Schwermetallen

keine zusätzlichen Abfallstoffe entstehen. Diese Option gewährleistet nicht nur die Einhaltung aktueller und zukünftiger gesetzlicher Vorschriften, sondern entspricht auch den Anforderungen an eine nachhaltige Prozessführung.

Zur optimalen Standortwahl wurde ein GIS-basiertes Tool entwickelt, das Faktoren wie Klärschlammaufkommen, Infrastruktur und landwirtschaftlichen Bedarf analysiert. Aus der Analyse ergibt sich außerdem, dass der aktuelle Phosphatbedarf in der DreiSATS-Modellregion („Mitteldeutsches Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen) zu ca. 60 % mit dem regional anfallenden Klärschlamm bzw. entsprechend aufbereiteten Recyclaten gedeckt werden könnte. Dabei müssen sowohl saisonale als auch anlagenspezifische Schwankungen in der Klärschlammzusammensetzung berücksichtigt werden. Das entwickelte Tool ermöglicht die Übertragung des Konzepts auf andere Regionen.

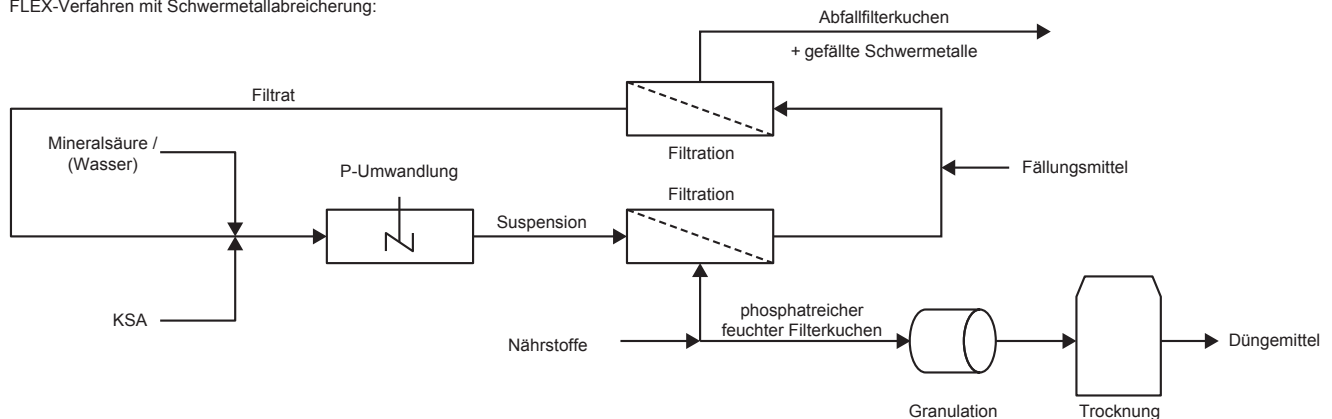
Das Projekt DreiSATS zeigt, dass das Pontes Pabuli-Verfahren eine Vielzahl von Aschetypen mit und ohne Schwermetallabtrennung verarbeiten kann. Diese Vielseitigkeit ermöglicht die Herstellung unterschiedlichster Düngerprodukte, führt jedoch gleichzeitig zu einer breiten Parametrix mit hoher Varianz in den Mengen- und Energiebilanzen. Aus diesem Grund können im Projekt noch keine technischen und energetischen Kennzahlen genannt werden. Eine Skalierung wird derzeit über das Projekt DemoPhos (BMWE-Förderkennzeichen: 13BDB50033) für den Demonstratorstandort Boxberg umgesetzt.



Einblick in die Pilotanlage Pontes Pabuli auf dem Gelände der Veolia in Markranstädt. © Veolia

## Prozess-Schema

FLEX-Verfahren mit Schwermetallanreicherung:



Prozessschema Pontes Pabuli-Verfahren. © Veolia

## Prozessdaten

**Prozesstyp:** Nasschemisch

**Anlagentyp:** chemische, physikalische Aufbereitungsanlage zur Düngemittelproduktion

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL 6

**Eingangsmaterial:** Klärschlammasche

**Input:** Mineralsäure, Nährstoffadditive, Fällungsmittel

**Output:**

- » Produkte: 0,5–5 t Düngemittel/t Asche je nach Rezeptur und Verfahrenstechnik
- » Abfall: ggfs. gefällter Schwermetallschlamm

**Rückgewinnungsrate:** > 90 %

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz<sup>1</sup>

**Stromverbrauch:** k. A.

**Wärmeverbrauch/Wärmeabgabe:** k. A.

**Chemikalienverbrauch:** k. A.

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Düngergranulat

**P-Konzentration:** 6 % bis 40 % in Abhängigkeit von der Konzentration in der Asche, von der Düngerrezeptur und von der Verfahrensauswahl

**NAC-Löslichkeit:** > 90 %

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** Ja

**Sonstige Nährstoffe:** Die Nährstoffkomponenten hängen von der Asche, der Auswahl von Säure (z. B. N oder S-Komponente im Produkt) und gezielter Dosierung von Nährstoffen (Rezepturabhängigkeit) ab.

**Weitere Produkteigenschaften:**

- » Sehr gute P-Verfügbarkeit und Pflanzenverträglichkeit (vergleichbar mit TSP)
- » Eigenschaften mit herkömmlichen Düngergranulaten vergleichbar und mit üblicher Ausbringungstechnik verarbeitbar

## Betriebsanforderungen

**Platzbedarf:** k. A.

**Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:** k. A.

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:** k. A.

**Kategorie der Abfallentsorgung:** k. A.

Die Betriebsanforderungen müssen aufgrund der sehr unterschiedlichen Standortanforderungen und den spezifischen Behandlungsbedingungen der Aschen je nach physikalisch-chemischer Konstitution standortspezifisch für eine effiziente Prozessgestaltung angepasst werden. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und die Möglichkeit von projektbezogenen Optimierungsuntersuchungen an der Versuchsanlage bilden hierzu die Basis. Darüber hinaus befindet sich das Verfahren gegenwärtig in einer iterativen Optimierungsphase, in der systematische Prozessverbesserungen und Parameteranpassungen vorgenommen werden. Folglich können zum jetzigen Entwicklungszeitpunkt keine finalen verfahrenstechnischen Parameter oder Prozessspezifikationen definiert werden, da diese noch Gegenstand laufender Optimierungszyklen sind.

<sup>1</sup> Aufgrund des Versuchsmaßstabs können keine belastbare Verbrauchsdaten und keine energetischen Kennzahlen genannt werden.



Einblick in die Pilotanlage Pontes Pabuli auf dem Gelände der Veolia in Markranstädt. © Veolia

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

Versuchsanlage auf dem Gelände der Veolia in Markranstädt

### Innovativer Charakter / Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

- » Abfall- und abwasseroptimierter Prozess mit geringem Energieaufwand aufgrund der größtenteils mechanischen statt thermischen Wasserabtrennung
- » Vollaufschluss der Klärschlammaschen mit Verwertung aller in den Aschen enthaltenen Nährstoffkomponenten
- » Qualität der Düngemittel mit konventionellen Düngergranulaten vergleichbar
- » DüMV konform
- » sehr gute P-Verfügbarkeit
- » selektive Schwermetallabreicherung für besonders hohe Produktqualitäten
- » Nachhaltige Prozessführung

### Kontakt

#### Verfahrensgeber

##### Pontes Pabuli GmbH

Harkortstraße 8 | 04107 Leipzig

Dr. Lars Leidolph | [l.leidolph@pontes-pabuli.de](mailto:l.leidolph@pontes-pabuli.de)

[www.pontes-pabuli.de/angebot.html](http://www.pontes-pabuli.de/angebot.html)

#### Projektkoordinator

##### Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH

Nordstraße 15 | 04420 Markranstädt

##### Matthias Hoger und Claudyn Kidszun

[matthias.hoger@veolia.com](mailto:matthias.hoger@veolia.com)

[www.veolia.de/vkd-klaerschlamm](http://www.veolia.de/vkd-klaerschlamm)

# KlimaPhoNds

## Klimaneutrale und reststofffreie Klärschlammverwertung mit Phosphorsäureproduktion in Südost-Niedersachsen

### Kurzbeschreibung

Das KlimaPhoNds-Verfahren zielt auf eine dezentrale Rückgewinnung von Phosphor direkt auf der Kläranlage und eignet sich für Kläranlagen, die nicht an eine Monoverbrennungsanlage angebunden sind. Die Phosphor-Rückgewinnung erfolgt unter Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben alleinig aus Überschussschlamm (ÜSS) in Form von Struvit. Der verbleibende, phosphatarme Klärschlamm kann flexibel verwertet werden, z. B. durch Mitverbrennung. Das gewonnene Struvit-Rezyklat erfüllt die Qualitätsanforderungen an Recyclingdünger, kann aber auch zur Weiterverarbeitung zu Phosphorsäure oder Phosphordünger abgegeben werden.

Der auf 4–5 % Trockensubstanz (TS) eingedickte ÜSS wird zunächst einer eigens entwickelten thermisch intensivierten Hydrolyse bzw. Schlammversäuerung unterzogen. Bei einer Temperatur von 50–60°C und einer Hydrolysedauer von 24–48 Stunden werden ca. 75 % der im Schlamm gebundenen Phosphate in das Schlammwasser rückgelöst. Eine ausreichend hohe Rücklösungsrate wird bei saisonal bedingten Schwankungen der Bio-P-Aufnahme durch Zugabe von Zitronensäure erzielt. Die ohne Zugabe von Zitronensäure erreichbare Rücklösungsrate hängt maßgeblich vom Anteil des leicht mobilisierbaren biologisch gebundenen Phosphors (Bio-P) ab und beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Die Hydrolyse wird über das vorhandene Heizwassernetz temperiert und der eingedickte zufließende ÜSS wird über das abfließende ÜSS-Hydrolysat vorerwärmt. Das ÜSS-Hydrolysat wird anschließend entwässert (TS-Gehalte > 20 %), um Schlammwasser für eine nachfolgende Struvitfällung abzutrennen. Die Struvitfällung erfolgt kontinuierlich in einem angepassten Fällungsreaktor, mit einer optimierten Fällungsreaktionszone durch Zugabe von Natronlauge (pH 8,5–9) und Magnesiumchlorid. Die entstehenden Kristalle steigen zunächst auf und sinken bei ausreichender Größe im erweiterten Sedimentationsbereich auf den Reaktorboden ab. Dort werden sie diskontinuierlich abgezogen und anschließend filtriert.

Das entwässerte ÜSS-Hydrolysat wird mit dem phosphatarmen Zentratwasser auf einen TS-Gehalt von etwa 4–5 % rückverdünnt und in den Faulbehälter gefördert, so dass eine gemeinsame Faulung von phosphatarmen ÜSS und PS erfolgt. Das Verfahren greift somit nicht in die Abwasserbehandlung ein, und auch nur minimal in die Schlammbehandlung (Bypasslösung), weil sich ÜSS und hydrolysierter ÜSS im Feststoffgehalt nicht unterscheiden.

Das KlimaPhoNds-Verfahren ermöglicht eine dezentrale Rückgewinnung von Phosphor direkt auf Kläranlagen, ohne den Umweg über Klärschlammmonoverbrennung und Ascherückgewinnung. Dabei wird Struvit erzeugt, das als Recyclingdünger für die regionale Landwirtschaft genutzt werden kann und so die Kreislaufwirtschaft vor Ort unterstützt. Alternativ kann das Phosphorrezyklat als Rohstoff in der Düngemittelindustrie eingesetzt werden.

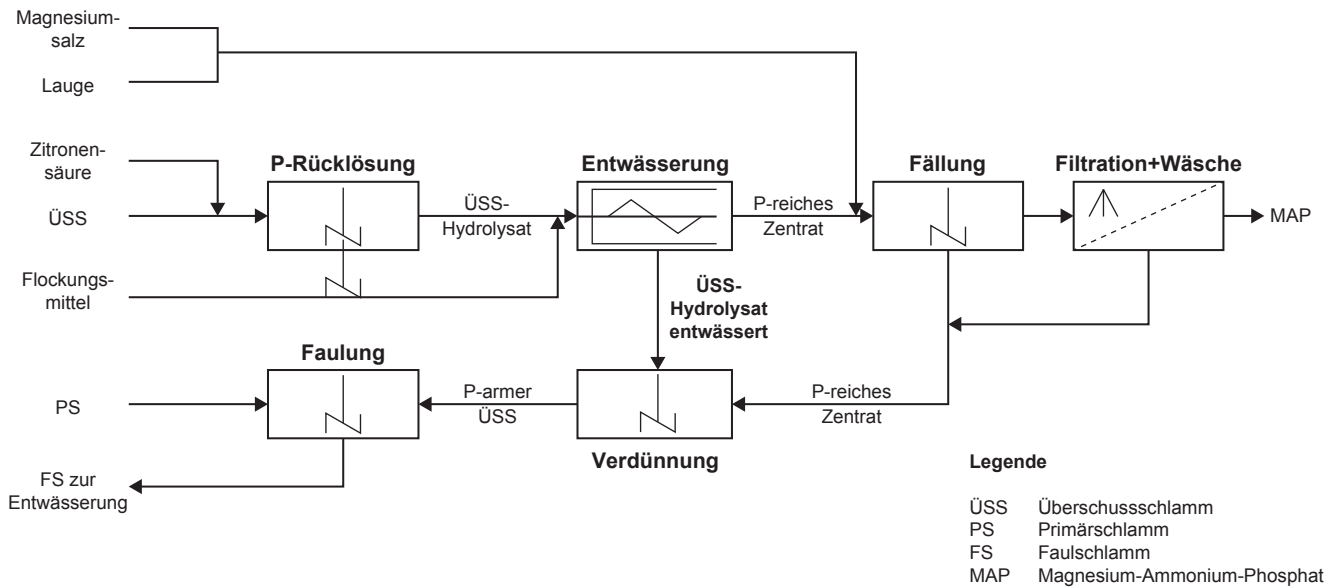
Durch die Nutzung bestehender Heizungsinfrastruktur und zusätzlicher Wärmerückgewinnung arbeitet das Verfahren besonders energieeffizient. Die optimierte Phosphorrücklösung erfolgt chemikalienfrei über eine thermisch intensiviert Hydrolyse. Optional kann Zitronensäure zur Stabilisierung der Phosphatrücklösung eingesetzt werden. Da ausschließlich eingedickter Überschussschlamm behandelt wird und keine externe Ammoniumquelle für die Struvitfällung nötig ist, fallen nur geringe Volumenströme an.

Der gesamte phosphatarme Schlamm wird in die Schlammfaulung zurückgeführt, sodass die ursprüngliche Schlammlinie aufrecht erhalten bleibt. Die Integration des Verfahrens beeinträchtigt die Abwasserlinie nicht. Im Gegenteil trägt die Phosphorrückgewinnung dazu bei, die Rückbelastung der Kläranlage mit Phosphor und Stickstoff zu reduzieren. Zudem können durch die flexible Verwertung des phosphatarmen Schlammes Transport- und Entsorgungskosten gesenkt werden. Weiterhin wird die Betriebssicherheit erhöht, da unkontrollierte Struvitfällungen in Faulung und Entwässerung vermieden werden.

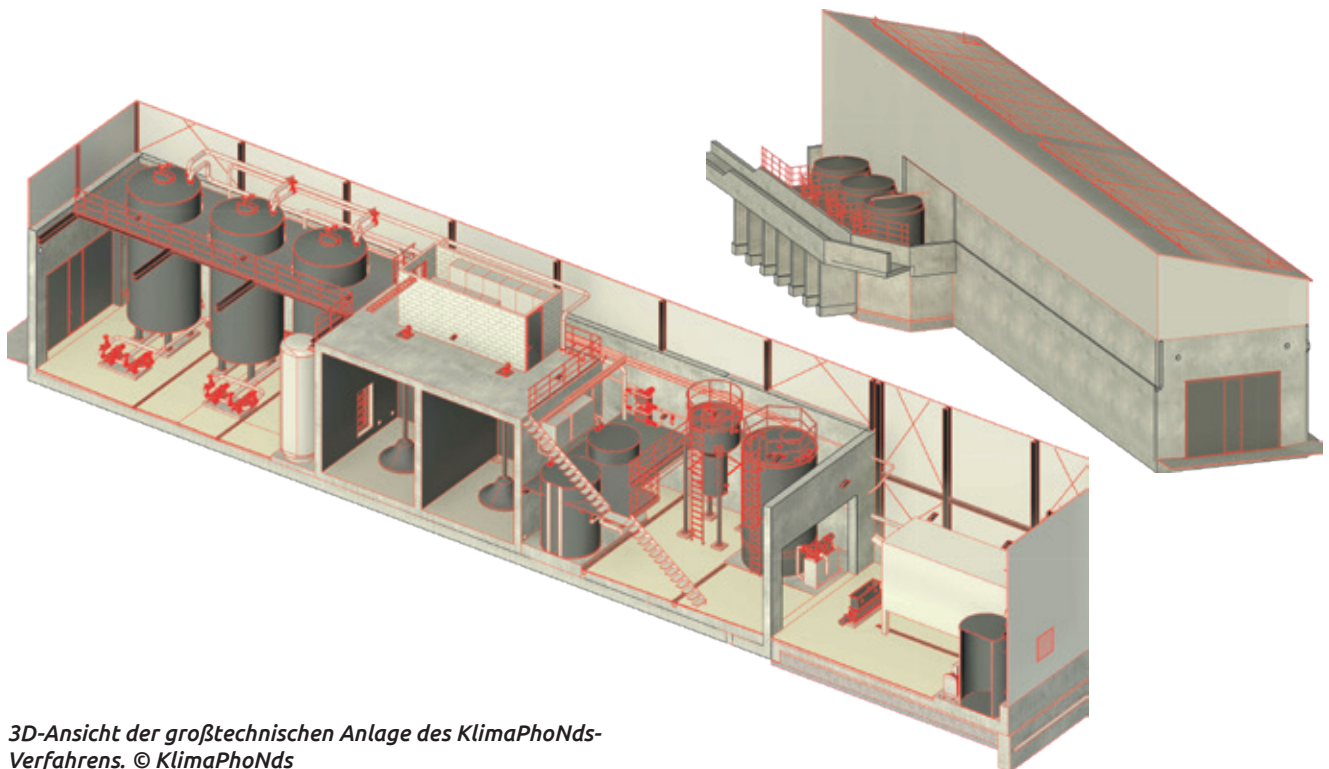
Auf der Kläranlage Northeim wird das KlimaPhoNds-Verfahren großtechnisch im Vollstrom demonstriert. Die Anlage besitzt eine Ausbaugröße von 75.000 Einwohnerwerten (EW) und ist aktuell mit rund 40.000 EW belastet. Die Phosphorelimination erfolgt vorrangig über eine biologische Phosphatentfernung (Bio-P) mit unterstützender Dosierung von Eisenfällmitteln. Die Kläranlage verfügt über eine anae-

robe Schlammfäulung, deren erzeugtes Biogas im betriebseigenen Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Erzeugung von Strom und Wärme verwertet wird. Pro Tag werden in der Kläranlage rund 7.000 m<sup>3</sup> Abwasser behandelt. Der dabei anfallende Klärschlamm weist eine Phosphorfracht von ca. 38 g P/kg Trockenmasse (TM) auf.

## Prozess-Schema



Verfahrensschema des KlimaPhoNds-Verfahrens. © TU Clausthal



3D-Ansicht der großtechnischen Anlage des KlimaPhoNds-Verfahrens. © KlimaPhoNds



## Prozessdaten

**Prozesstyp:** Thermisch-biologische Hydrolyse und Struvitfällung

- » Thermisch intensiviert Schlamhydrolyse/-versäuerung mit unterstützender Zitronensäuredosierung und nachgeschalteter Struvitfällung aus Schlammwasser des Hydrolysats.

**Anlagentyp:** 40 % Bautechnik, 35 % Maschinenteknik, 25 % MSR-Technik<sup>1</sup>

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL 8 bis 9

**Eingangsmaterial:** Eingedickter Überschussschlamm mit 4–5 % TS (überwiegend Bio-P)

**Input:**

- » Polymere Flockungsmittel zur Entwässerung des hydrolysierten Überschussschlamm
- » Zitronensäure 50 %-ig zur Rücklösung chemisch gebundener Phosphate bei unzureichender biologisch-thermischer Rücklösung aus Überschussschlamm
- » Magnesiumchloridlösung 30 %-ig als Magnesiumquelle für die Struvitfällung
- » Natronlauge 50 %-ig zur pH-Wert Regulierung in der Struvitfällung

**Output:**

- » Produkt: Struvit: 8–9 kg/Tonne eingedicktem Überschussschlamm 5 % TS
- » Nebenprodukte: keine
- » Abfall: keinen

**Rückgewinnungsrate:**

- » 60–65 % (bezogen auf ÜSS)
- » 45–50 % (bezogen auf P-Zulaufkraft)

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz

Bezogen auf 1 t eingedicktem Überschussschlamm mit einem TS-Gehalt von 5 %.

**Stromverbrauch:** 12–14 kWh/t

**Wärmeverbrauch/Wärmeabgabe:** 25–27 kWh/t. Nahezu vollständige Deckung des Wärmebedarfs durch Eigenwärme Kläranlage (BHKW) bei anteiliger Wärmerückgewinnung.

1 Bezogen auf der Kläranlage Northeim mit einer Ausbaugröße von 75.000 EW  
2 Zustand aus dem Fällungsreaktor, gemäß Technikum-Maßstab Kristallgröße von 1–2 mm

**Chemikalienverbrauch:**

- » Zitronensäure (50 %-ig): 2–3 kg/t
- » Magnesiumchlorid (30 %-ig): 8–10 kg/t
- » Natronlauge (50 %-ig): 4–5 kg/t
- » Polymere Flockungsmittel: 0,2–0,4 kg Wirksubstanz/t

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Fest, kristallin<sup>2</sup>

**P-Konzentration:** ca. 12,5 Gew.-%

**NAC-Löslichkeit:** > 90 %

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** Ja

**Sonstige Nährstoffe:**

- » N-Konzentration: ca. 5 Gew.-%
- » Mg-Konzentration: ca. 10 Gew.-%

**Weitere Produkteigenschaften:** keine

Das im KlimaPhoNds-Verfahren erzeugte Struvit zeichnet sich durch eine geringe organische Belastung aus, da es aus annähernd feststofffreiem Zentratwasser gewonnen wird. Aufgrund der milden Rücklösebedingungen werden kaum Schwermetalle aus dem Überschussschlamm mobilisiert bzw. in das Produkt eingetragen. Es entsteht ein schadstoffarmes P-Rezyklat.

## Betriebsanforderungen

**Platzbedarf:** Im KlimaPhoNds-Verfahren erfolgt die P-Rückgewinnung ausschließlich aus eingedicktem ÜSS. Der Platzbedarf für die gesamte Anlagentechnik inkl. Behälter für die Chemikalien- und Schlammvorlage liegt bei ca. 100 m<sup>2</sup> pro 10.000 EW.

**Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:** Das KlimaPhoNds-Verfahren basiert auf bewährter, in Kläranlagen etablierter Technik, wodurch kein spezielles Zusatzwissen für Betrieb und Wartung notwendig ist. Die Prozesssteuerung ist einfach und kann bei Bedarf vollständig automatisiert werden. Aufgrund stabiler und kontinuierlicher Prozessbedingungen ist keine dauerhafte Überwachung erforderlich, sodass der Personalbedarf gering bleibt. Für den Betrieb der Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage Northeim wird ein Personalbedarf von 5–7 Stunden pro Tag erwartet.

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:**

- » **Magnesiumchloridlösung (30 %-ig)**
  - » Anorganische Salzlösung, nicht kennzeichnungspflichtig.
  - » Wassergefährdungsklasse 1
  - » Lagerklasse TRGS 510: 12
- » **Zitronensäure (50 %-ig)**
  - » Starke organische Säure
  - » Wassergefährdungsklasse 1
  - » Lagerklasse TRGS 510: 10
- » **Natronlauge (50 %-ig)**
  - » Anorganische, stark alkalische Base
  - » Wassergefährdungsklasse 1
  - » Lagerklasse TRGS 510: 8b

**Kategorie der Abfallentsorgung:** Keine Abfälle.

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

### Forschungsanlage

Ort: TU Clausthal – CUTEC Forschungszentrum, 38678 Clausthal-Zellerfeld

- » **Durchsatz:** Batch-Betrieb, 2 kg eingedickter ÜSS
- » **Baujahr und Inbetriebnahme:** 2021

### Technikumsanlage / Pilotierung

Ort: TU Clausthal – CUTEC Forschungszentrum, 38678 Clausthal-Zellerfeld

- » **Durchsatz:** Batch-Betrieb, 100 kg eingedickter ÜSS
- » **Baujahr und Inbetriebnahme:** 2022/23

### Demonstrationsanlage im Großmaßstab

Kläranlage Northeim (75.000 EW), 37154 Northeim

- » **Durchsatz:** 25–30 Tonnen/Tag eingedickter ÜSS
- » **Inbetriebnahme:** August 2026

### Innovativer Charakter / Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

- » **Dezentrale Phosphorrückgewinnung**  
Besonders geeignet für Kläranlagen mit (teilwei-  
ser) Bio-P-Elimination und ohne Anbindung an  
Monoverbrennungsanlagen.
- » **Direkte Rückgewinnung auf der Kläranlage**  
Kein Umweg über Monoverbrennung und Asche-  
rückgewinnung – direkte Rückführung in den  
Nährstoffkreislauf.
- » **Struvit als Rohstoff- oder Recyclingdünger**  
Nutzung des Produkts in der Landwirtschaft vor  
Ort im Sinn einer regionalen Kreislaufwirtschaft  
oder in der Düngemittelherstellung bzw. Phos-  
phorsäureproduktion im Sinne einer vielseitigen  
Nutzung in der chemischen Industrie.
- » **Energieeffiziente Schlammerwärmung**  
Nutzung vorhandener Infrastruktur (Heizwasser-  
netz); zusätzliche Wärmerückgewinnung durch  
Wärmeaustausch mit versäuertem Schlamm.
- » **Optimierte Phosphorrücklösung**  
Chemikalienfreie P-Rücklösung mittels thermisch  
intensivierter Schlammhydrolyse. Optionaler  
Zusatz von Zitronensäure zur Steigerung und  
Mobilisierung chemisch gebundener Phosphate  
aus dem Schlamm.
- » **Geringe Volumenströme**
  - » P-Rückgewinnung nur aus eingedicktem ÜSS.
  - » Keine externe Ammoniumquelle notwendig –  
Rücklösung bei der Versäuerung ausreichend.
- » **Kein Eingriff in die Abwasserreinigung**  
Rückführung von phosphatarmem Schlamm in  
den bestehenden Faulprozess  
→ keine Störung der Abwasserlinie.

- » **Reduktion von Transport- und Verwertungskosten**  
Grenzwertunterschreitung im entwässerten Klär-  
schlamm  
→ flexible Verwertung ermöglicht geringere Kosten.

- » **Betriebssicherheit**  
Reduzierung der P- und N-Rückbelastung und  
Vermeidung von Störfällen durch ungewollte  
Struvitfällung in der Schlammfäulung und -ent-  
wässerung.

#### Bemerkungen

- » **Geeignet für Bio-P-Anlagen**  
Hohe Rücklösungsraten insbesondere bei hohem  
Bio-P-Anteil im Überschussschlamm.
- » **Optionale Zitronensäurezugabe als Absicherung**  
Sichert Prozessstabilität auch bei jahreszeitlich  
bedingten Schwankungen der Bio-P-Aufnahme.
- » **Integration in bestehende Prozesse**  
Keine Änderungen in der Abwasserlinie notwen-  
dig – hohe Kompatibilität mit Bestandsanlagen.  
Durch Bypasslösung auch keine Änderung der  
bestehenden Schlammlinie erforderlich. Der  
behandelte Schlamm kann in die ursprüngliche  
Schlammlinie zurückgeführt werden.

### Kontakt

#### Verfahrensgeber und Projektkoordinator

TU Clausthal – CUTEC Forschungszentrum  
Leibnizstraße 23 | 38678 Clausthal-Zellerfeld

**Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers**

michael.sievers@cutec.de | michael.sievers@tu-clausthal.de

**M.Sc. René Schumann**

rene.schumann@cutec.de

www.klimaphonds.de

## P-Net

# Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide

### Kurzbeschreibung

Im Verbundprojekt „P-Net“ wird das von der Technischen Universität Braunschweig entwickelte Peco-Verfahren zur dezentralen Rückgewinnung von Phosphor aus kommunalem Klärschlamm untersucht. Das Verfahren basiert auf einer anaeroben Remobilisierung von Phosphor aus Überschussschlamm und setzt somit vor der Schlammfäulung an. Je nach Anwendungsfall kann der TS-Gehalt des Schlammes variieren und angepasst werden. Im Gegensatz zu chemischen Extraktionsmethoden wird hierbei vollständig auf die Zugabe von mineralischen Säuren verzichtet. Dem Überschussschlamm (ÜS) wird lediglich ein geeignetes Co-Substrat als Kohlenstofflieferant zugegeben. Im Laufe des Projekts hat sich die Zugabe von eingedicktem Primärschlamm (PS) als funktionale und kostenneutrale Lösung erwiesen. Die Mischung der beiden Schlämme ist standortspezifisch und bedarf vorheriger Untersuchungen im Labor. Der Prozess kann im Durchlauf betrieben werden, die hydraulische Aufenthaltszeit liegt dabei zwischen 5 und 10 Tagen. Der geeignete Temperaturbereich liegt zwischen 15 und 40°C. Während der Remobilisierung werden organische Säuren gebildet, die den pH-Wert auf einen Wert zwischen 5–5,5 abfallen lassen. Für die vollständige Integration des Verfahrens muss auf der Anlage zusätzliches Remobilisierungsvolumen sowie Anlagentechnik installiert werden. Mit steigender Einwohnerzahl sinken die Investitionskosten.

Die eigentliche Phosphor-Remobilisierung erfolgt auf unterschiedlichen Wegen. Zum einen wird aufgrund des anaeroben Milieus der biologisch gebundene Phosphoranteil rückgelöst, zum anderen werden Magnesium- und Calciumphosphate durch den niedrigen pH-Wert aufgeschlossen und in Lösung gebracht. Darüber hinaus ist als Alleinstellungsmerkmal des Peco-Verfahrens hervorzuheben, dass auch Eisen aufgrund mikrobiologischer Prozesse reduziert und damit Eisenphosphat rückgelöst wird. Somit stellt das Peco-Verfahren nicht nur eine Lösung für Bio-P-Anlagen dar, sondern auch für Anlagen, die mittels Eisenfällung Phosphor eliminieren. Einzig Aluminium-Phosphatverbindungen sind für diese Remobilisierung nicht zugänglich. Das dabei entstehende Remobilisat wird entwässert. Dabei wird die phosphatreiche Flüssigphase zusammen mit dem Faulschlamm-Zentrat einer Struvit-Fäl-

lung zugeführt. Durch den Fällungsprozess wird das Phosphor als Struvit fixiert und kann als Feststoff abgezogen werden. Das gefällte Struvit ist frei von Schwermetallen und organischen Verunreinigungen, da die Fällung aus der feststofffreien Phase erfolgt. Der Feststoff wird nach der Entwässerung zusammen mit dem restlichen Primärschlamm der Fäulung zugeführt. Der resultierende Faulschlamm ist phosphorabgereichert und kann die gesetzlichen Vorgaben für die Mitverbrennung erfüllen. Somit steht den Betreibern weiterhin dieser kostengünstige Entsorgungsweg offen.

Im Projektkonsortium von P-Net sind die kommunalen Kläranlagen Braunschweig (Größenklasse 5, 350.000 Einwohnerwerte) und Gifhorn (Größenklasse 4, 65.000 Einwohnerwerte) vertreten. Auf diesen Kläranlagen wurde das Verfahren bereits im großtechnischem betrieb erprobt. Die beiden Kläranlagen verfügen über unterschiedliche Verfahren zur Phosphor-Elimination aus dem Abwasser. In Braunschweig geschieht dies hauptsächlich durch biologische P-Elimination (Bio-P), in Gifhorn basiert die Elimination überwiegend auf Eisenfällung.

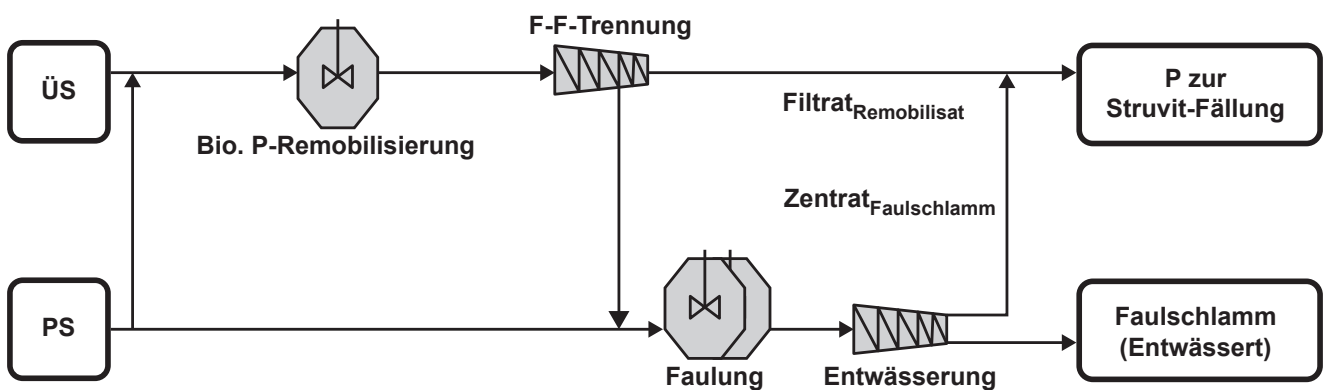
In Versuchen im Technikumsmaßstab sowie in Upscaling-Untersuchungen konnten Remobilisierungsraten von über 70 Prozent erzielt werden. Seit 2023 werden auf der Kläranlage Steinhof in Braunschweig zudem erste großtechnische Versuchsreihen des Verfahrens im Durchlaufbetrieb durchgeführt. Für den Probetrieb konnte die bestehende Anlagentechnik dabei weitgehend genutzt werden, ohne dass größere bauliche Veränderungen nötig waren.

Das Projekt P-Net befindet sich in der Region Harz und Heide, in der bereits vor Projektbeginn eine gewisse Anzahl von Struvit-Anlagen existierte. Die übergeordnete Idee des Projekts besteht darin, die Effizienz der P-Rückgewinnung über die Struvit-Schiene so zu steigern, dass bestehende und neue Struvit-Anlagen in Kombination mit dem Peco-Verfahren die Anforderungen der AbfklärV bezüglich der P-Rückgewinnung zukünftig erfüllen können. Die Projektregion bietet daher ideale Voraussetzungen für den Aufbau eines Netzwerks zum P-Recycling über die Struvit-Schiene.

In Braunschweig besteht darüber hinaus ein enger regionaler Bezug zwischen Abwasserreinigung und der landwirtschaftlichen Nutzung von Nährstoffen und gereinigtem Wasser, der sich über die Jahre entwickelt hat. Das Netzwerk aus Landwirten des Abwasserverbands Braunschweig kann auch in Zukunft gesetzeskonform mit den Nährstoffen der Stadt versorgt werden, indem das erzeugte Struvit auf den Feldern ausgebracht wird. Durch den engen regionalen Bezug leistet P-Net einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Nährstoffstrategie in Niedersachsen. Das Forschungspotenzial des Projekts liegt in der weiteren Optimierung

des biologischen Remobilisierungsprozesses sowie in der Entwicklung wirtschaftlicher Integrationskonzepte für kommunale Kläranlagen. Darüber hinaus bietet das Verfahren großes Potenzial, international als modellhafte Technologie für ressourceneffizientes Phosphorrecycling eingesetzt zu werden. Nichtsdestotrotz unterscheiden sich die jeweiligen Schlämme und Standorte. Aus diesem Grund sind im Vorfeld Untersuchungen erforderlich, um zu klären, wie sich das Peco-Verfahren am besten auf der jeweiligen Anlage implementieren lässt.

## Prozess-Schema



Das vereinfachte Fließschema des Peco-Verfahrens. © ISWW



## Prozessdaten

**Prozesstyp:** Anaerob – biologische P-Remobilisierung (PECO-Verfahren) mit anschließender Struvit-Fällung

**Anlagentyp:** Für die drei betrachteten Modellkläranlagen-größen von 20.000 / 100.000 / 1.000.000 Einwohnern ergibt sich folgende anteilige Aufteilung der Investitionskosten:

	20.000 EW	100.000 EW	1.000.000 EW
Bautechnik	44 %	48 %	62 %
Maschinenteknik	38 %	35 %	29 %
EMSR-Technik	18 %	17 %	9 %

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL 7–8

**Eingangsmaterial:** Überschussschlamm (TS = 0, 5–5 %) und anteilig Primärschlamm (TS = 4–5 %)

**Input:**

- » Für die P-Remobilisierung: Energie, Polymer zur Fest/Flüssig-Trennung des Remobilisats
- » Für die Struvit-Fällung abhängig von vorliegender PO<sub>4</sub>-P Konzentration und pH-Wert: Energie, Lauge (NaOH 33 %) (1–2 l/m<sup>3</sup>), Magnesium-Quelle (MgCl<sub>2</sub> 33 %) (1–2 l/m<sup>3</sup>)

**Output:**

- » Produkt: Struvit
- » Nebenprodukte: ggf. Anteilig CaP, FeP
- » Abfall (mit Angabe der Abfallschlüssel): Keinen

**Rückgewinnungsrate:**

- » ca. 50 % bezogen auf Rohschlamm
- » ca. 40–50 % bezogen auf P-Zulauf fracht Kläranlage

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz

Parameter	Einheit	20.000 EW	100.000 EW	1.000.000 EW
Spez. Stromverbrauch	kWh/t TM Rohschlamm	84	78	73
Spez. zusätzlicher Wärmeverbrauch	kWh/t TM Rohschlamm	45	45	45
Spez. MgCl <sub>2</sub> -Verbrauch	kg/t TM Rohschlamm	63	63	63
Spez. NaOH-Verbrauch	kg/t TM Rohschlamm	93	93	93



*Faulbehälter, die zur Remobilisierung eingesetzt wurden im Großmaßstab am Standort Braunschweig (links) und am Standort Gifhorn (rechts). © P-Net*

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform (Körnung):** amorph, fein bis grob sandig

**P-Konzentration (chargenabhängig):** 22–26 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

**NAC-Löslichkeit:** 100 % des Gesamt-P

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** Ja

**Sonstige Nährstoffe (chargenabhängig):** P: 12,5 %;

N: 4–5 %; Mg 10–12 %

**Weitere Produkteigenschaften:** keine

## Betriebsanforderungen

**Platzbedarf:** Behälter zur Remobilisierung für HRT 6–10 Tage, Aggregat zur Eindickung und Peripherie, Anlage zur Struvit-Fällung und Peripherie.

**Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:** (leicht) erhöhtes Know-How, Personalbedarf 1,5 h pro Tag

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:** NaOH: Wassergefährdungsklasse 1; MgCl<sub>2</sub>: Wassergefährdungsklasse 1

**Kategorie der Abfallentsorgung:** Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV): 190805 Schlämme aus der Behandlung von kommunalem Abwasser

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

### Pilot- und Forschungsanlage

**Ort:** Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

- » Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW)
- » Verfahrensentwicklung seit 2005, seit 2020 intensivierete Untersuchungen

### Demonstrationsanlage im Großmaßstab

**Kläranlage Braunschweig (350.000 EW)**

- » **Verhältnisse Input:** 89 % ÜSS und 27 % PS
- » **Betriebszeiten:** 2023 (11/23–02/24, 05/24–06/24, 10/24–04/25)

**Kläranlage Gifhorn (50.000 EW)**

- » **Verhältnisse Input:** 100 % ÜSS und 100 % PS
- » **Betriebszeiten:** 2024 (09/24–12/24)

## Innovativer Charakter/Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

### Innovative Aspekte

- » Dezentrales Phosphorrecycling geeignet für Anlagen mit Bio-P und Eisenfällung
- » Adaption bestehender Struvit-Technologie: Die Methode erweitert etablierte Struvit-Verfahren durch biologische Phosphor-Remobilisierung, um Recyclingquoten signifikant zu steigern.
- » Integrierter Systemansatz: Kombiniert technische Anpassungen mit regionalen Vermarktungskonzepten, um sowohl Recyclingziele als wirtschaftliche Nachhaltigkeit zu gewährleisten.

### Hauptvorteile

- » Einfache Betriebsführung und Einsatz von bewährten Technologien.
- » Geeignet für Eisenelimination und Bio-P-Anlagen
- » Kein Einsatz von gefährlichen Betriebsmitteln
- » Dezentrale Produktion eines hochwertigen Düngemittels
- » Dezentrales Phosphorrecycling geeignet für Anlagen mit Bio-P und Eisenfällung
- » Erfüllung regulatorischer Anforderungen: Es ermöglicht Kläranlagenbetreibern die Einhaltung zukünftiger Vorgaben der Klärschlammverordnung durch höhere P-Rückgewinnungsraten. Somit Wirtschaftliche Vorteile bei Klärschlamm-entsorgung.
- » Regionale Kreislaufschließung: Es sichert Absatzmärkte für P-Rezyklate durch standortnahe Verwertungskonzepte.
- » Das Verfahren ist übertragbar auf andere Standorte und integrierbar in vorhandene Anlagentechnik.
- » Der interdisziplinäre Ansatz (technisch-logistisch-regulatorisch) stellt eine ganzheitliche Lösung für das Phosphor-Recycling dar.

## Kontakt

**Verfahrensgeber und Projektkoordinator**  
**Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig**  
**Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW)**  
 Pockelsstr. 2a | 38106 Braunschweig  
**Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Dockhorn**  
 t.dockhorn@tu-braunschweig.de

# RePhoRM

## Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main-Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe

### Kurzbeschreibung

Das im Projekt RePhoRM bevorzugt verwendete Rückgewinnungsverfahren besteht aus zwei Verfahrensblocken.

Im ersten Verfahrensblock werden schwermetallbelastete Klärschlammaschen (KSA) einem mechano- und nasschemischen Extraktionsprozess unterzogen. In diesem Prozess erfolgt die Trennung von Schwermetallen und Phosphor durch Einsatz von Mineralsäure bei pH-Werten um  $\text{pH} = 1$  in einem diskontinuierlich betriebenen Rührreaktor. Zur Rücklösung des Phosphors aus Calciumphosphaten werden die KSA in einem Säure-Wasser-Gemisch suspendiert. Das Massenverhältnis Wasser/KSA wird auf max. 8 kg  $\text{H}_2\text{O}$ /kg und max. 2 kg Säure (100 %)/kg KSA begrenzt. Durch diesen Ansatz wird bevorzugt Phosphor aus den Mineralphasen rückgelöst und in die wässrige Phase überführt, während gering lösliche Schwermetalle zu großen Anteilen in der Feststoffphase verbleiben. Nach einer kurzen Reaktionszeit werden der sauren Suspension Fällmittel zugesetzt und leichter lösliche Schwermetalle gefällt. Dadurch können – in Abhängigkeit der Schwermetalle – Abreicherungsraten von 50–80 % (Cr, Cu, Cd) bis zu 95 % (Ni, Pb, Zn) erzielt werden. In einer anschließenden Fest-Flüssig-Trennung werden die ungelösten Mineralphasen (maßgeblich Silikate und Eisenoxide) sowie gefällte Schwermetalle von der sauren Flüssigphase separiert, und in einer zusätzlichen Filterkuchenwäsche aufbereitet. Die Flüssigphase und das Waschwasser werden als P-reiches Filtrat vereint und dem nächsten Verfahrensblock zugeführt. Der entwässerte Feststoff verbleibt zur Entsorgung oder in Abhängigkeit des Schwermetallanteils zur weiteren Verwertung.

Im zweiten Verfahrensblock wird im PHOS4green-Prozess in zwei Schritten unter Nutzung weiterer, düngemittelkonformer Klärschlammasche ein Düngemittelgranulat erzeugt. In einem ersten Schritt wird die düngemittelkonforme Klärschlammasche unter optionaler Verwendung weiterer Zuschlagstoffe, wie zum Beispiel Ammoniumsulfat, in einer erneuten, nasschemischen Reaktion mit der aus dem Extraktionsprozess stammenden Phosphorsäure aufgeschlossen. Durch die Verwendung zusätzlicher Phosphorsäure kann zudem der Phosphormassenanteil auf den Wert handelsüblicher P-Düngemittel (bspw. P 30) eingestellt werden. Nach

einer ausreichenden Reaktionszeit werden die primären Mineralphasen in lösliche Calcium- und Magnesiumdihydrogenphosphate überführt. Nach der Reaktion erfolgt in einem zweiten Prozessschritt die Erzeugung eines Düngemittelgranulats in einer Wirbelschicht-basierten Sprühgranulation. In der sogenannten Aufbaugranulation wird durch hohen Wärmeaustausch der Flüssigkeitsanteil verdampft und es entstehen um einen Trägerkern schichtweise wachsende Granulate, die durch Windsichtung bei einer definierten Größe aus dem Granulationsprozess ausgetragen werden. Die gewünschte Korngröße, die Restfeuchte und der Feststoffgehalt können im Granulationsprozess gezielt eingestellt werden, um die einfache Verwendung in der Landwirtschaft zu ermöglichen. Alle in der Sprühgranulation eingesetzten Zuschlagstoffe verbleiben unter Wasserentzug im Düngemittelgranulat als Verkaufsprodukt. Der als Kondensat zurückgewonnene Wasserdampf und die Abwärme werden möglichst quantitativ in den Prozess zurückgeführt.

Das Projekt RePhoRM ist im Ballungsraum der Metropolregion FrankfurtRheinMain mit ungefähr 2,4 Millionen Einwohnern in den Bundesländern Hessen und Rheinland-Pfalz angesiedelt. In der Region werden ungefähr 8,35 % der deutschen Wertschöpfung erarbeitet, vor allem durch Dienstleistungen (Finanz- und Automobilindustrie) und produzierendes Gewerbe aus der Chemieindustrie.

Im Ballungsraum selbst befinden sich drei Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen mit Wirbelschichtfeuerung der Projektpartner Thermische Verwertung Mainz GmbH (TVM, Kapazität 35.000 Mg TM/a), Stadtentwässerung Frankfurt (SEF, Auslastung 40.000 Mg TM/a) und Infraserb GmbH & Co. Höchst KG (ISH, Kapazität 52.000 Mg TM/a) in einem maximalen Radius von 20 km um den avisierten Standort der P-Rückgewinnungsanlage im Industriepark Höchst. Die Verbrennungsanlage der SEF verwertet Klärschlämme der im Stadtgebiet befindlichen Kläranlagen Niederrad und Sindlingen, während die Verbrennungsanlagen der anderen Partner Klärschlämme von Betreibern und Kommunen aus ganz Rheinland-Pfalz, Hessen und teilweise sogar darüber hinaus verwerten. Der Industriepark Höchst stellt in seinem

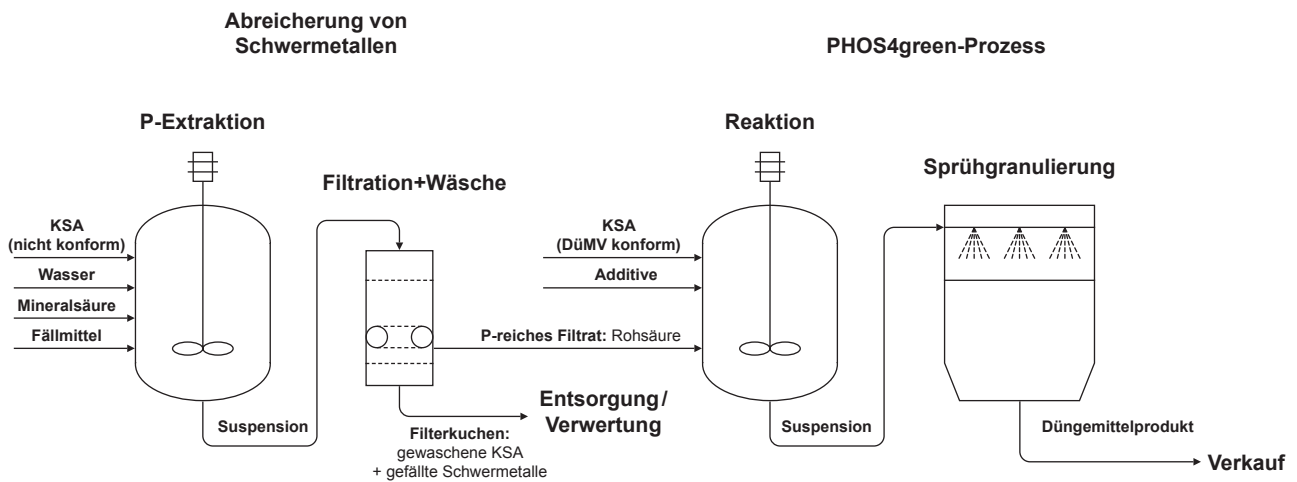
Versorgungsverbund über Leitungsnetze sowohl Energie (Strom, Prozesswärme) als auch Medien und Rohstoffe (Dampf, Wasser, Säure) zur Verfügung.

Aufgrund der bestehenden Entsorgungsinfrastruktur für Klärschlämme erfolgt für die Projektpartner in RePhoRM die P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche. Durch anthropogene Belastungen weist die Klärschlammasche der SEF erhöhte Kupfergehalte auf, während für Asche der ISH mit erhöhten Nickelanteilen gerechnet werden muss. Die Massenanteile von Phosphor der Aschen schwanken im Bereich 40–90 g P/kg TS. Eine Abreicherung von Schwermetallen aus der Klärschlammasche ist zwingend vorzusehen. Da thermochemische Verfahren die Abreicherung für die

kritischen Elemente nicht sicher darstellen können, wird ein nasschemischer Prozess im industriellen Umfeld eingesetzt.

Als Verkaufsprodukt werden phosphathaltige Dünger (P30, NPS) als gebrauchsfertiges Düngemittelgranulat mit einem Schüttgewicht von 900–1100 g/l und Korngrößen  $2 \text{ mm} \leq x \leq 5 \text{ mm}$  erzeugt (98% > 2 mm). Die staubfreien, fließfähigen Granulate können durch ihre hohe Abriebfestigkeit mit handelsüblichen Düngemittelstreuern (meist Schleuderstreuern) auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden. Die Lagerung der Granulate kann als Sackware, in Big-Packs oder in Silos trocken und geschützt vor Witterungseinflüssen erfolgen.

## Prozess-Schema



Erweitertes PHO4green-Verfahren der P-Rückgewinnung im Projekt RePhoRM. © IWAR, TU Darmstadt



## Prozessdaten

### Prozesstyp:

- » Mechano- und nasschemischer Aufschluss von nicht-düngemittelkonformen Klärschlammaschen zum Herauslösen des darin enthaltenen Phosphors mit paralleler Fällung der Schwermetalle
- » Anschließende Granulation der erhaltenen, schwermetallabgereicherten Phosphorsäure mit düngemittelkonformer Klärschlammasche sowie Ammoniumsulfatlösung zur Herstellung von konformen Düngemitteln P30 und NPS 12-24-7

**Anlagentyp:** 100 % Maschinen- und MSR-Technik

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL: ohne Schwermetallabreicherung [7–8]; mit Schwermetallabreicherung [5–6]

### Input:

- » Klärschlammasche (ISH, TVM, SEF)
- » Schwefelsäure (50 %, 98 %)
- » Natronlauge (50 %)
- »  $H_3PO_4$  (40 %, 75 %)
- »  $H_2O_2$  (30 %)
- » Fällungsmittel (5–15 %)

### Output:

- » Produkte 1,5t Granulat/t Asche
- » Nebenprodukte in dem Prozess werden keine Nebenprodukte erhalten
- » Abfall (mit Angabe der Abfallschlüssel) 0,8–1,1 t Filterkuchen (AVV 190205)/t Asche

**Rückgewinnungsrate:** Die Gesamtrückgewinnungsrate des Phosphors beträgt 85–95 % der eingesetzten Klärschlammaschen.



Prozessbehälter der RePhoRM Anlage.  
© Glatt Ingenieurtechnik GmbH

### Eingangsmaterial:

Klärschlammaschen aus Eisen- und Aluminium-gefällten Klärschlämmen aus Monoverbrennungsanlagen.

**Teilstrom A:** nichtkonforme Asche zum Herauslösen des Phosphors und Fällung der Schwermetalle.

**Teilstrom B:** konforme Asche für die Granulation zu Düngemitteln. Die makroskopische Zusammensetzung der zu verarbeitenden Aschematrix ist wie folgt gekennzeichnet.

Makros	Al mg/kg TS	Ca mg/kg TS	Fe mg/kg TS	K mg/kg TS	Mg mg/kg TS	Na mg/kg TS	P mg/kg TS	S mg/kg TS
Aschematrix	50.000– 90.000	70.000– 200.000	30.000– 95.000	4.500– 8.000	12.000– 14.000	2.500– 8.000	40.000– 80.000	3.000– 22.000

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz

### Stromverbrauch Elektrische Anschlussleistung:

0,04 kW/t Asche

**Wärmeverbrauch/Wärmeabgabe:** Aktuell keine Angabe möglich

### Chemikalienverbrauch:

- » Flusswasser: 0,01–0,02 m<sup>3</sup>/h/t Asche
- » Erdgas: 0,008 Nm<sup>3</sup>/h / t Asche
- » Dampf (4 bar): 0,08–0,1 kg/h/t Asche
- »  $H_2SO_4$  (100 %): max. 2 t/t Asche
- »  $H_3PO_4$  (100 %): NPS 0,10–0,15 t/t Asche, P30 0,04–0,06 t/t Asche
- »  $H_2O_2$  (100 %): <1 kg/t Asche
- » Fällungsmittel (100 %): <1 kg/t Asche
- » Natronlauge (100 %): <10 kg/t Asche

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Düngemittelgranulat P30/NPS 12-24-7

**P-Konzentration:** P30 (30wt %  $P_2O_5$ ), NPS (24wt %  $P_2O_5$ )

**NAC-Löslichkeit:** > 80%

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** ja

**Sonstige Nährstoffe:** NPS (12wt %N, 7wt %S),

Makronährstoffe Ca, Mg, K, Fe > 10%

### Weitere Produkteigenschaften:

- » Mehrkomponentendünger mit Mikronährstoffen mit <0,5wt %,
- » Granulat mit 2–3 mm im Korngröße und hoher Kornhärte, staubarm, rieselfähig

Außenansicht der RePhoRM Anlage.  
© Infracore GmbH & Co. Höchst KG



## Betriebsanforderungen

### Platzbedarf:

- » zur Verfügung stehende Grundfläche 11.200 m<sup>2</sup>
- » Nutzfläche 7500 m<sup>2</sup>

**Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:** Betriebsdauer 8.000 h/a, 24/7

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:** H251, H272, H290, H302, H301, H302, H311 H314, H318, H319, H332, H400

**Kategorie der Abfallentsorgung:** Filterkuchen AVV 190205

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

**PHOS4green Labor- und Pilotanlagen im Technologiezentrum der Glatt Ingenieurtechnik GmbH am Standort Weimar**

### Seraplant GmbH, Haldensleben

- » Prozessentwicklung/Verfahrensentwicklung
- » Anlage zum Phosphorrecycling mit der Düngerherstellung vorgeschaltete Schwermetallabreicherung
- » 60.000 t/a P-haltiges Düngemittelgranulat, 330 Arbeitstage à 3 Schichten
- » Zeitraum 06/2018–06/2021
- » Planung inkl. Genehmigungsplanung
- » Lieferung aller Ausrüstungen
- » Montage und Installation
- » Regie für Inbetriebnahme

## Innovativer Charakter / Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

- » Modularer Aufbau zur Extraktion des Phosphors aus belasteter Asche und Granulation der erhaltenen Phosphorsäure mit düngemittelkonformer Asche zu P30- und NPS-Düngemittelgranulat
- » Herstellung von düngemittelkonformem Mehrkomponentendünger
- » Düngemittelgranulat gekennzeichnet durch hohe Löslichkeit des Phosphats
- » Einstellbare Produkteigenschaften durch Wirbelschichtgranulation (Korngröße, Kornhärte,...)
- » Nahtlose Integration in bestehende landwirtschaftliche Betriebsabläufe ermöglicht
- » Sichere Verteilung über den Ballungsraum der Metropolregion wird gewährleistet
- » Hohe Phosphor-Rückgewinnungsraten
- » Hohe Schwermetallentfrachtung
- » Bestehende Entsorgungsinfrastruktur
- » Bestehende Energie- und Medieninfrastruktur am Standort Höchst

## Kontakt

### Verfahrensgeber

**Glatt Ingenieurtechnik GmbH**

Nordstraße 12 | 99427 Weimar

**Jan Kirchof**

info.we@glatt.com

### Projektkoordinator

**Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR,**

**Fachgebiet Abwassertechnik**

Franziska-Braun-Straße 7 | 64287 Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart**

m.engelhart@iwar.tu-darmstadt.de

## R-Rhenania

### Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern

#### AshDec<sup>®</sup>-Verfahren

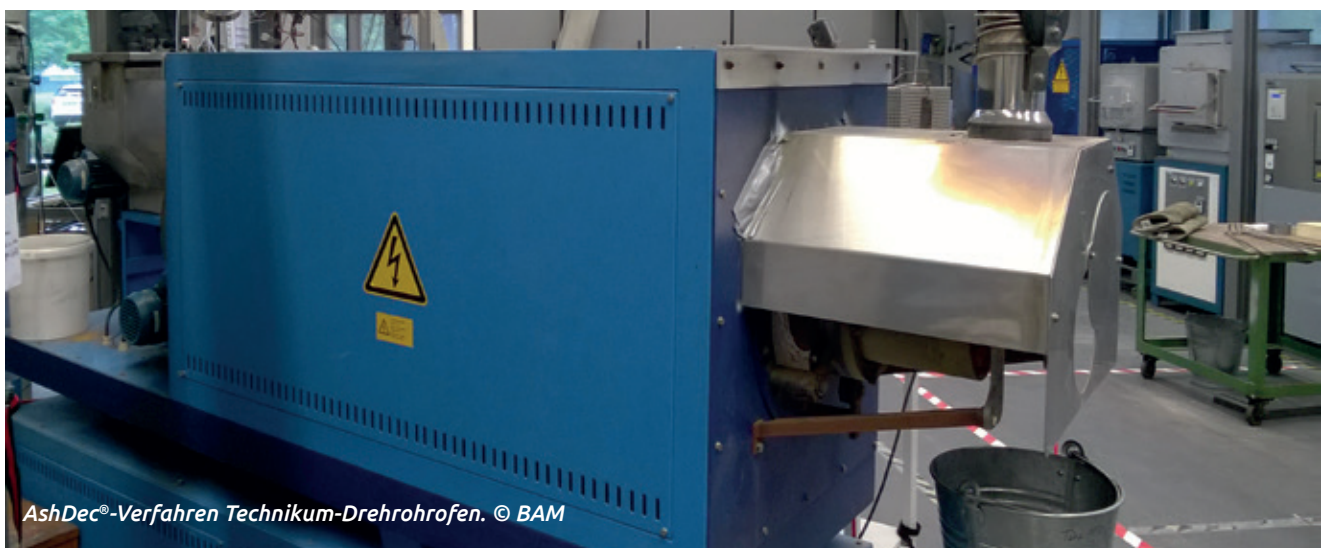
##### Kurzbeschreibung

Das AshDec<sup>®</sup>-Verfahren ist ein von Outotec und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) entwickeltes und patentiertes (DE 10 2014 108 199) thermochemisches Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen, um einen hochwirksamen Phosphatdünger herzustellen. Die Asche wird in einen Drehrohrofen eingebracht, wo sie mit einer Alkali-Komponente (z. B. Natriumcarbonat) als Reaktionspartner gemischt und bei 850–1000°C behandelt wird. Bei diesem Kalzinierungsprozess reagiert die Alkali-Komponente mit den schlecht verfügbaren Phosphaten in der Asche und es entsteht die Phosphatverbindung Calcium-Natrium-Phosphat (CaNaPO<sub>4</sub>), welche auch die pflanzenverfügbare Phosphatphase des bekannten Rhenaniaphosphats war. Einige Schwermetalle in den Aschen, wie etwa Cadmium, Arsen, Blei, Quecksilber und Thallium, können über die Gasphase separiert und in den Filtern der Anlage aufgefangen werden. Der Prozess der Schwermetallentfernung kann durch die Wahl der Betriebsparameter beeinflusst werden.

In mehreren Versuchs- und Produktionskampagnen wurden bisher in einem Drehrohrofen im semi-industriellen Maßstab über 5 t AshDec<sup>®</sup>-Produkt hergestellt. Die hohe Dün-

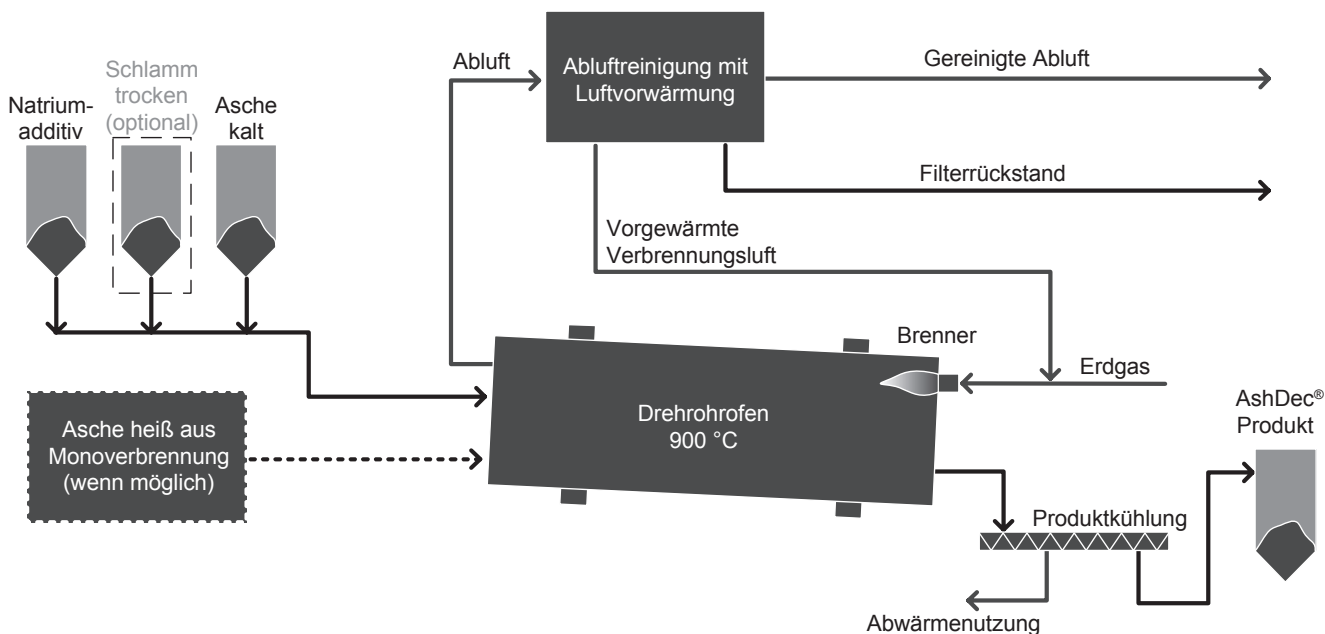
gewirkung des hergestellten AshDec<sup>®</sup>-Produktes konnte in vielen Gefäß- und Feldversuchen bestätigt werden und ist vergleichbar zu konventionellen wasserlöslichen Phosphatdüngern wie Triplesuperphosphat. Die Wasserunlöslichkeit des AshDec<sup>®</sup>-Produktes ist positiv für die Düngung und ökologisch wünschenswert. Das AshDec<sup>®</sup>-Produkt kann durch eine mechanische Nachbehandlung zu marktfähigen Phosphor- und Mehrnährstoffdüngern aufbereitet werden.

Das AshDec<sup>®</sup>-Verfahren stellt ein robustes und erprobtes P-Recyclingverfahren für die Aufbereitung von Klärschlammaschen und weiteren phosphathaltigen Materialien dar. Aktuell werden mehrere Umsetzungsprojekte für die thermochemische Behandlung von Klärschlammaschen in Bayern geplant. Eine erfolgreiche Umsetzung des AshDec-Prozesses wird begünstigt durch ein optimiertes Wärmekonzept wie Abwärmerückgewinnung/-nutzung und die Übernahme heißer Asche aus der Monoklärschlammverbrennung. Das AshDec<sup>®</sup>-Produkt erfüllt die Anforderungen für Düngemittel nach deutschem als auch europäischem Recht und kann über eine REACH Registrierung (verfügbar ab Ende 2025) als Dünger vermarktet werden.



AshDec<sup>®</sup>-Verfahren Technikum-Drehrohrofen. © BAM

## Prozess-Schema



Vereinfachtes Fließschema des AshDec®-Verfahrens. © Metso

## Prozessdaten

**Prozesstyp:** Thermochemisch

**Anlagentyp:** 100 % Maschinen- und MSR-Technik

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL 7

**Eingangsmaterial:** Klärschlammasche und (weitere P-reiche Aschen<sup>i</sup>)

**Input:** Natriumcarbonat (andere Alkali-Chemikalien wie  $K_2CO_3$  möglich)

**Output:**

- » AshDec-Produkt: 1,1 t Produkt/t Klärschlammasche
- » Filterasche: 80 kg/t Klärschlammasche

**Rückgewinnungsrate:** 95–100 %

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz<sup>ii</sup>

**Stromverbrauch:** 40 kWh/t KSA

**Wärmeverbrauch:** 410 kWh/t KSA<sup>iii</sup>

**Chemikalienverbrauch:** Additiv  $Na_2CO_3$ : 250–300 kg/t KSA<sup>iv</sup>

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Pulver, Granulat

**P-Konzentration:** 7–9 %

**NAC-Löslichkeit:** 80–100 % (einstellbar über  $Na_2CO_3$ -Dosierung nach Anforderung)

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** Ja, für die meisten kommunalen KS<sup>v</sup>

**Sonstige Nährstoffe:** K 0,5–1,5 %; Zn 0,1–0,2 %; Cu 0,03–0,07 %

**Weitere Produkteigenschaften:** Keine Wasserlöslichkeit (optimierte Düngewirkung)

## Betriebsanforderungen

**Platzbedarf:** 1200 m<sup>2</sup><sup>ii</sup>

**Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:** Speziell ausgebildetes Personal oder zusätzliche Ausbildung für KA-Personal erforderlich

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:** keine

**Kategorie der Abfallentsorgung:** Filterasche – gefährlicher Abfall

i Aschen aus der Verbrennung von Gülle oder Hühnerstreu, von Rückständen aus anaerober Faulung oder Schlachthöfen. Stark mit Schwermetallen belastete Aschen sind für das Verfahren ungeeignet

ii Bezogen auf 30.000 t/a Klärschlammasche eines durchschnittlichen kommunalen Klärschlammes aus Deutschland

iii Wärmeverbrauch beim Einsatz von warmer Asche

iv Abhängig von chemischer Zusammensetzung der KSA und gewünschter NAC-Löslichkeit

v Abreicherung im Prozess: As, Cd, Hg, Pb, Tl



## Innovativer Charakter/Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

- » Robuste und bekannte Drehrohrtechnologie
- » Kein gefährlichen Eingangs- bzw. Inputmaterialien
- » Sehr geringe Rückstände, keine Nebenprodukte
- » Verschiedene Eingangsstoffströme (Biomasse-Aschen: z. B. Klärschlamm, Gülle, Hühnerkot).
- » Energieeinsparung durch Synergien mit vorhandener Monoverbrennungsanlagen und Wärmerückgewinnung (Einsparpotential 2/3)
- » Thermochemische P-Rückgewinnung mit Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit und Reduzierung des Schwermetallgehaltes.
- » Geringer Gehalt an Verunreinigungen wie Schwermetalle (Cd, U, As, Pb, Ni), keine organischen Verbindungen und frei von Krankheitserregern
- » Pflanzenverfügbarer Phosphatdünger (~ 15–25 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).
- » Düngewirkung in Gefäß- und Feldversuchen getestet
- » Als Dünger einsetzbar nach deutschem und europäischem Gesetz (REACH vorhanden)
- » Voraussetzungen für Einsatz im ökologischen Landbau erfüllt

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

**Pilotierung:** 2014, 2018, 2020 (insgesamte AshDec®-Produkt > 5 t)

**Pilotanlage (Vorgängerprozess):** Leoben, Österreich 300 kg KSA/h, 2008-2010

### Forschung:

- » R-Rhenania – Umsetzungsprojekt für Standort Altenstadt (Oberbayern) (2020–2026)
- » CLOOP-Entwicklung eines NextGen Düngers (2017–2020)
- » ReNu2Farm – Erhöhung der NPK-Recyclingraten in NW-Europa (2017–2020)
- » InPhos – Entwicklung einer P-Strategie für das Baltikum (2018–2019)
- » P-Rex – Evaluation von Techniken zur P-Rückgewinnung (2012–2015)

## Kontakt

### Verfahrensgeber

**Outotec GmbH & Co.KG**

Ludwig-Erhard-Str. 21 | 61440 Oberursel

**Julian Künstler, Tanja Schaaf**

julian.kunstler@metso.com

### Projektkoordinator

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)**

Richard-Willstätter-Straße 11 | 12489 Berlin

**Hannes Herzel, Christian Adam**

hannes.herzel@bam.de

## R-Rhenania-Verfahren

### Kurzbeschreibung

Das von der Firma Emter GmbH und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) entwickelte R-Rhenania Verfahren behandelt Klärschlamm thermochemisch, um hochwirksamen Phosphatdünger herzustellen. Der entwässerte Klärschlamm wird vor der Trocknung mit Natriumcarbonat oder anderen Alkali-Salzen gemischt. In der thermochemischen Behandlung reagiert das Phosphat aus dem Klärschlamm bei ungefähr 900°C mit der Alkali-Komponente und bildet die Phosphatverbindung Calcium - Natrium - Phosphat ( $\text{CaNaPO}_4$ ), welche auch die pflanzenverfügbare Phosphatphase des bekannten Rhenaniaphosphats war. Das R-Rhenania Verfahren wurde für den Standort Altenstadt der Firma Emter GmbH entwickelt und konnte dort im Jahr 2024 in die Rostfeuerung einer vorhandenen Klärschlammmonoverbrennungsanlage integriert werden. Neben der Rostfeuerung sind weitere thermische Aggregate wie Drehrohfen und Paddelofen für zukünftige Anlagen geeignet.

Einige Schwermetalle in dem Klärschlamm, wie etwa Arsen, Blei, Cadmium, Quecksilber und Thallium, können mit dem R-Rhenania Verfahren über die Gasphase separiert und in den Filtern der Anlage aufgefangen werden. Der Prozess der Schwermetallentfernung kann durch die Wahl der Betriebsparameter beeinflusst werden. Das erzeugte Produkt, das R-Rhenania Phosphat, ist chemisch und mineralogisch identisch mit dem AshDec-Produkt, welches bei dem anderen von der BAM entwickelten thermochemischen AshDec-Verfahren hergestellt wird. Die aktuell durchgeführten

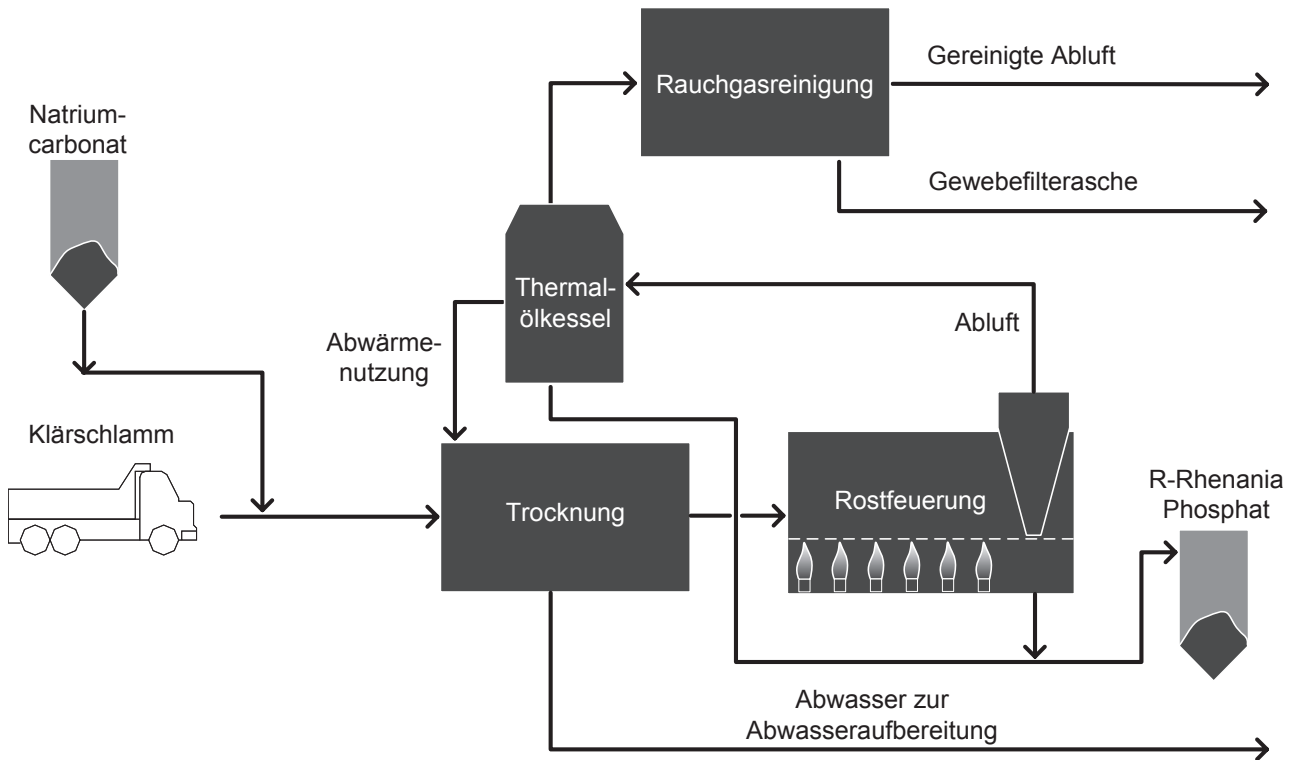
Gefäßversuche bestätigen die vergleichbare Düngewirkung des R-Rhenania Phosphats gegenüber dem AshDec-Produkt, somit sind die bisherigen Gefäß- und Feldversuche zum AshDec-Produkt auf das R-Rhenania Phosphat übertragbar. Die hohe Düngewirkung ist vergleichbar zu konventionellen wasserlöslichen Phosphatdüngern wie Triplesuperphosphat. Die Wasserunlöslichkeit des R-Rhenania Phosphats ist positiv für die Düngung und ökologisch wünschenswert. Das R-Rhenania Phosphat kann durch eine mechanische Nachbehandlung zu marktfähigen Phosphor- und Mehrnährstoffdüngern aufbereitet werden. Das R-Rhenania Phosphat erfüllt die Anforderungen für Düngemittel nach deutschem als auch europäischem Recht und kann über die vorhandene REACH Registrierung (verfügbar ab Ende 2025) als Dünger vermarktet werden.

Das R-Rhenania Verfahren wurde erfolgreich in der großtechnischen Monoverbrennungsanlage Altenstadt implementiert, weil die eingesetzte Klärschlamm schadstoffarm ist und eine Rostfeuerung für die Integration geeignet ist. Es können am Standort bis zu 15.000 t R-Rhenania Phosphat pro Jahr hergestellt werden. Andere Standorte mit vergleichbaren Verbrennungsanlagen (Rostfeuerung, Drehrohfen, Paddelofen) können mit dem R-Rhenania Verfahren nachgerüstet werden. Mit diesem robusten und erprobten P-Recyclingverfahren können neue thermochemische R-Rhenania Anlagen für die Klärschlammaufbereitung errichtet werden.



Monoverbrennungsanlage Altenstadt mit integrierten R-Rhenania-Verfahren. © RePhoR/Hupp-Dobusch

## Prozess-Schema



Vereinfachtes Fließschema des R-Rhenania Verfahrens am Standort Altenstadt. © Metso

## Prozessdaten

**Prozesstyp:** Thermochemisch

**Anlagentyp:** 100 % Maschinen- und MSR-Technik

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL 8

**Eingangsmaterial:** Klärschlamm (entwässert bis getrocknet)

**Input:** Natriumcarbonat (andere Alkali-Chemikalien möglich)

**Output:**

- » R-Rhenania Phosphat: 440 kg Produkt/t TS Klärschlamm
- » Filterasche: 80 kg/t TS Klärschlamm

**Rückgewinnungsrate:** 95–100%

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz<sup>ii</sup>

**Strombilanz:** ausgeglichen

**Wärmeüberschuss:** 150 kWh/t TS Klärschlamm

**Chemikalienverbrauch:**

- » Additiv  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ : abhängig vom Klärschlamm
- » Rauchgasreinigung:
  - Ca(OH)<sub>2</sub>: 40 kg /t TS Klärschlamm
  - Aktivkohle: 1 kg /t TS Klärschlamm

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Pulver, Granulat

**P-Konzentration im Outputmaterial:** 7–9%

**NAC-Löslichkeit:** 80–100 % (einstellbar über  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -Dosierung nach Anforderung)

**Einhaltung Grenzwerte nach DüMV:** Ja, für die meisten kommunalen KS<sup>iii</sup>

**Sonstige Nährstoffe:** K 0,5–1,5%; Zn 0,1–0,2%; Cu 0,03–0,07%

**Weitere Produkteigenschaften:** Keine Wasserlöslichkeit (optimierte Düngewirkung)

i Bezogen auf entwässertes Klärschlamm OS mit 25% Trockensubstanz

ii Werte für Neuanlagen

iii Abreicherung im Prozess As, Cd, Hg, Pb, Tl

## Betriebsanforderungen

**Platzbedarf:** k. A.

**Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:** Speziell ausgebildetes Personal oder zusätzliche Ausbildung für KA-Personal erforderlich

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:** Gefahrstoff –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

**Kategorie der Abfallentsorgung:** Filterasche – nicht gefährlicher Abfall

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

**Forschung:** Projekt R-Rhenania – Umsetzungsprojekt für Standort Altenstadt/Oberbayern (2020–2026)

**Industrieanlage:** Altenstadt (Oberbayern) mit einer jährlichen Produktionskapazität von 15.000 t R-Rhenania Phosphat; betriebsbereit seit 2024

## Innovativer Charakter/Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

- » Umsetzung R-Rhenania-Verfahren mit verschiedenen Aggregaten möglich, wie Rostfeuerung, Drehrohrofen, Paddelofen
- » Keine gefährlichen Chemikalien im R-Rhenania Prozess eingesetzt
- » Sehr geringe Rückstände, keine Nebenprodukte
- » Energieautarker Prozess und direkte Gewinnung eines marktfähigen P-Düngers in einem thermochemischen Prozess
- » Thermochemische P-Rückgewinnung mit Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit und Reduzierung des Schwermetallgehaltes.
- » Geringer Gehalt an Verunreinigungen, z. B. Schwermetalle (Cd, U, As, Pb), keine organischen Verbindungen und frei von Krankheitserregern
- » Pflanzenverfügbare Phosphordünger (~ 15–25 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).
- » Düngewirkung in Gefäß- und Feldversuchen getestet
- » Als Dünger einsetzbar nach deutschem und europäischem Gesetz
- » Voraussetzungen für Einsatz im ökologischen Landbau erfüllt

## Kontakt

### Verfahrensgeber

**Emter GmbH**

Alpenstraße 50 | 86972 Altenstadt

**Johann Emter**

info@emter-gmbh.de

### Projektkoordinator

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)**

Richard-Willstätter-Straße 11 | 12489 Berlin

**Hannes Herzel, Christian Adam**

hannes.herzel@bam.de

# SATELLITE

## Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling

### Klärschlamm-trocknung mit sequentieller Stickstoffrückgewinnung

#### Kurzbeschreibung

Die Klärschlamm-trocknung mit sequentieller Stickstoff-rückgewinnung ist ein thermisches Verfahren zur Vorbe-handlung von entwässertem Faulschlamm mit dem Ziel der Stickstoffentfrachtung bei gleichzeitiger Erzeugung einer hochkonzentrierten Ammoniaklösung. Hierbei wird der im Vergleich zu Wasser niedrigere Siedepunkt von Ammonium-stickstoff ausgenutzt, sodass bereits zu Beginn der ther-mischen Einwirkung ein wesentlicher Anteil der ursprüng-lichen Ammoniumfracht des Ausgangsmaterials in die Brüden überführt wird. Durch nachgeschaltete Rektifikation kann die Ammoniaklösung auf einen Gehalt von 25 % N auf-

konzentriert werden. Das Verfahren wurde erfolgreich in einem Schnecken-trockner mit drei Brüdenabzügen erprobt. Das Verfahrensprinzip kann aber auch mithilfe einer vorge-schalteten Trocknung zur Stickstoffrückgewinnung in be-stehende Trocknungsanlagen integriert werden, wobei der vorgeschaltete Trockner wie der erste Abzug des erprobten Schnecken-trockners wirkt. Im Folgenden ist das Verfahren als leicht zu implementierende Vortrocknung beschrieben.

Die Erprobung des Verfahrens erfolgte an einer Versuchs-anlage im halbtechnischen Maßstab. Das Verfahrensprinzip

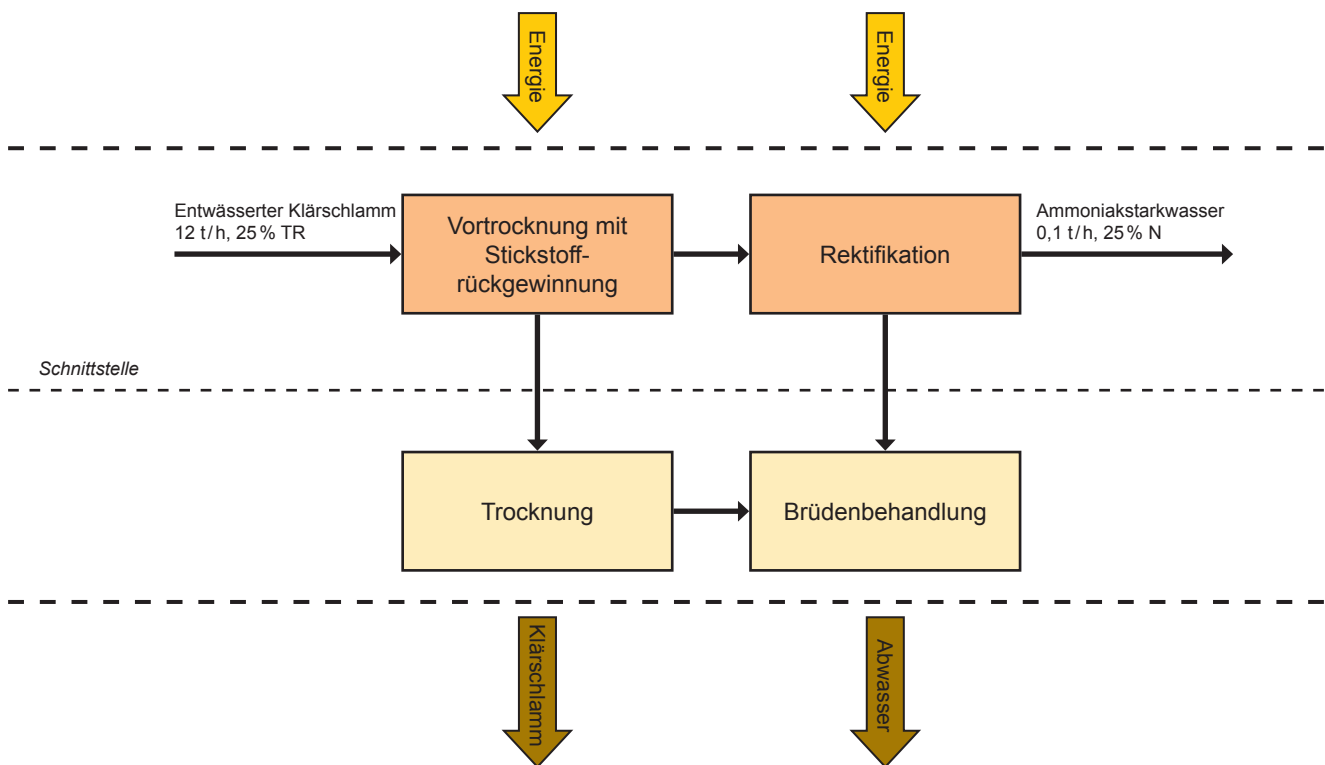


wurde erstmalig im Rahmen des Forschungsprojekts KompGG-N (FKZ: 02WQ1516A-D) zur Aufbereitung landwirtschaftlicher Substrate (Gärreste, Gülle) als fraktionierte Eindampfung untersucht. In Abgrenzung hierzu waren für die Anwendung des Verfahrens auf Klärschlamm einige verfahrenstechnische Anpassungen erforderlich. Zum einen weist der entwässerte Klärschlamm einen deutlich höheren Trockensubstanzgehalt im Vergleich zu Gärrest und Gülle auf (25 % TR im Vergleich zu 4 – 6 % TR), sodass für die Umsetzung des Verfahrens anstelle eines Rührwerksbehälters ein Schneckentrockner genutzt wurde. Zum anderen wurde die fraktionierte Eindampfung im Batch-Betrieb erprobt, wobei die Erzeugung von Kondensatfraktionen mit unterschiedlichen Stickstoffgehalten durch den Abzug von zuvor definierten Volumenströmen umgesetzt wurde, während die Klärschlamm-trocknung kontinuierlich erfolgt. Die Frak-

tionierung der Ströme in abnehmende Stickstoffkonzentrationen erfolgte hierbei durch die Anordnung von drei Brüdenabzügen über die Länge des Schneckentrockners. Durch die Übertragung des Prinzips auf eine vorgeschaltete Trocknung zur Stickstoffrückgewinnung ist das Verfahren zudem leichter in bestehende Anlagen zu integrieren.

Die Stickstoffentfrachtung während der Klärschlamm-trocknung kann für kommunale Kläranlagen einen wesentlichen Beitrag zur Senkung von Energie- und Betriebskosten leisten, da eine Verringerung der Rückbelastung der biologischen Stufe aus der Brüdenbehandlung erfolgt. Zudem kann die erzeugte Ammoniaklösung u.a. zur Herstellung von Düngemittel für nährstoffarme Gebiete genutzt werden, sodass das Verfahren auch über die in SATELLITE betrachtete Modellregion hinaus angewendet werden kann.

## Prozess-Schema



Prozessschema der Klärschlamm-trocknung mit sequentieller Stickstoffrückgewinnung. © SATELLITE

## Prozessdaten

**Prozesstyp:** Thermisch

**Anlagentyp:** 100 % Maschinen- und MSR-Technik  
Entwicklungsstand Technologie: TRL 5

**Eingangsmaterial:** Entwässertes Klärschlamm nach Faulung, ca. 25 % TR

**Input:** Kein weiterer Materialeinsatz erforderlich

**Output:**

- » Produkte
  - » Hochkonzentrierte Ammoniaklösung: 0,008 t/t

» Nebenprodukte

- » Brüdenkondensate (zur Behandlung): 0,148 t/t
- » Klärschlamm (zur Volltrocknung): 0,844 t/t

» Abfall (mit Angabe der Abfallschlüssel): –

**Rückgewinnungsrate:** Anteil der N-Rückgewinnung aus Eingangsmaterial: 54 %

## Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz

**Stromverbrauch:** 15 kWh/t/a

**Wärmeverbrauch/Wärmeabgabe:** 278 kWh/t/a

**Chemikalienverbrauch:** –

## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Die erzeugte Ammoniaklösung kann neben der Düngemittelherstellung auch in den Prozess der thermischen Klärschlammbehandlung zur Rauchgasreinigung zurückgeführt werden oder auch außerhalb der Landwirtschaft als Grundchemikalie vermarktet werden

**N-Konzentration:** 25 Gew.-%

**NAC-Löslichkeit:** –

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** –

**Sonstige Nährstoffe:** –

**Weitere Produkteigenschaften:** –

## Betriebsanforderungen

**Platzbedarf:** Die entwickelte Technologie wird als vorge-schaltetes Modul in die bestehende Klärschlamm-trocknung integriert. Der Platzbedarf variiert mit der Kapazität der Trocknungsanlage. Für eine Kapazität von 12 t/h wird eine Aufstellfläche von etwa L x B x H = 6.000 x 2.000 x 7.500 mm benötigt. Die Rektifikationskolonne hat eine Aufstellfläche von etwa 6.000 x 2.000 mm.

**Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:** Für das vorgeschaltete Modul zur Stickstoffentfrachtung wird kein zusätzliches Know-How benötigt, welches über die übliche Klärschlamm-trocknung hinaus geht. Die nachgeschaltete Rektifikation läuft automatisiert. Der Personalbedarf be-trägt etwa 730 h/a.

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:** –

**Kategorie der Abfallentsorgung:** –

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

### Betrieb einer halbtechnischen Versuchsanlage im Rahmen des Forschungsprojekts SATELLITE

- » **Ort:** Stadtentwässerung Hildesheim
- » **Durchsatz:** 12 kg/h
- » **Baujahr/Inbetriebnahme:** 2022
- » **Betrieb:** 2022 – 2024

## Innovativer Charakter/Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

Der innovative Kern des Verfahrens liegt in der Stickstoffrückgewinnung durch die Ausnutzung des niedrigeren Siedepunkts von Ammonium im Vergleich zu Wasser in Kombination mit der weiteren Aufkonzentrierung durch nachgeschaltete Rektifikation. Das Verfahren ermöglicht eine Kreislaufschließung aus der kommunalen Abwasserbehandlung und industriellen Anwendungen. Durch die **Rückgewinnung von Stickstoff als hochkonzentrierte Ammoniaklösung** kann das erzeugte Produkt z.B. zur Rauchgasreinigung, Düngemittelherstellung oder für weitere Anwendungen in der chemischen Industrie genutzt werden. Durch die Ausschleusung des Stickstoffs aus der Abwasserbehandlung werden zum einen **Betriebskosten eingespart**, zum anderen kann der Energiebedarf für die Ammoniak-synthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren mit den damit einhergehenden **CO<sub>2</sub>e-Emissionen** reduziert werden.

## Kontakt

### Verfahrensgeber

**BIORESTEC GmbH**

Karlsruher Straße 20a | 30880 Laatzen

**Dr.-Ing. Paul Stopp**

p.stopp@biorestec.de

### Projektkoordinator

**Leibniz Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik**

Welfengarten 1 | 30167 Hannover

**Dr.-Ing. Maike Beier**

beier@isah.uni-hannover.de

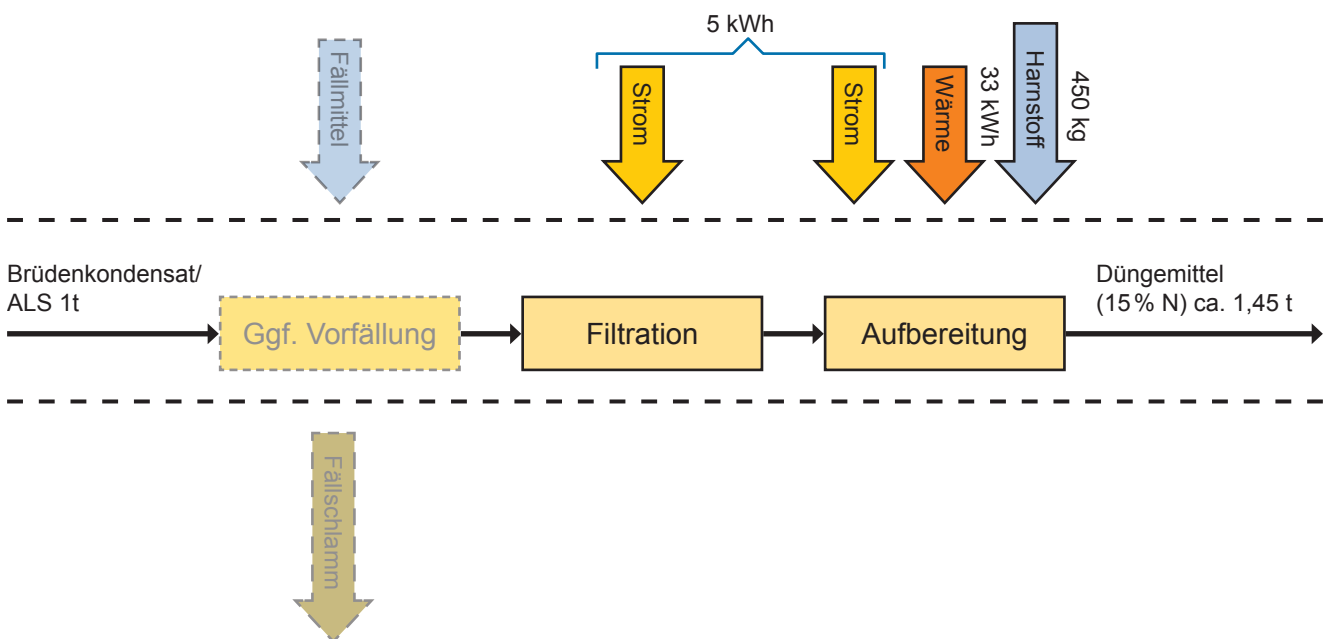
## Düngemittelherstellung On-Demand

### Kurzbeschreibung

Stickstoffhaltige Brüdenkondensate aus der Klärschlamm-trocknung werden zu einem flüssigen Düngemittel aufgearbeitet. Hierbei wird ein regionaler Ansatz verfolgt, bei dem die Aufbereitung direkt am Standort der Klärschlamm-trocknung erfolgt und das Düngemittel so auf einfachem Wege in der Region verfügbar gemacht werden kann. Der Nährstoffgehalt des Düngemittels kann gezielt eingestellt werden, um dem spezifischen Bedarf der Region gerecht zu werden. Neben der Dezentralität der Aufbereitung wird auch eine eigens für diese Anwendung entwickelte automatisierte Bestimmung von  $\text{NH}_3$  und  $\text{NH}_4^+$  eingesetzt. Anfallende Brüdenkondensate werden vorab filtriert und ggf. werden Stör-

stoffe mittels Flockung entfernt. Anschließend erfolgt die automatisierte volumetrische N-Bestimmung. Abschließend erfolgt die Anpassung der Nährstoffkonzentration an die jeweilig gewünschte Zielzusammensetzung durch eine Zudosierung von stickstoffhaltigen Stoffen (bspw. Harnstoff) und bei Bedarf Phosphorsäure. Im Folgenden wird der Prozess zur Herstellung einer Harnstofflösung beschrieben, bei der kein Phosphor im Produkt gewünscht ist. Die Erzeugung eines Düngemittels kann auf gleichem Wege auch aus anderen Stickstoffhaltigen Strömen (bspw. Ammonium-Sulfat-Lösung, ASL) erfolgen.

### Prozess-Schema



Prozess-Schema der Düngemittelherstellung On-Demand. © SATELLITE

### Prozessdaten

**Prozesstyp:** Nasschemisch

**Anlagentyp:** 100% Maschinen- und MSR-Technik

**Entwicklungsstand Technologie:** TRL 5–6

**Eingangsmaterial:** Stickstoffhaltiges Brüdenkondensat

**Input:** Harnstoff, ggf. Phosphorsäure

**Output:**

- » Produkte: Harnstofflösung (ca. 1,5 t/t)
- » Nebenprodukte: –
- » Abfall: Fällschlamm bei notweniger Vorfällung

**Rückgewinnungsrate:** Anteil der N-Rückgewinnung aus Eingangsmaterial: 100%

### Weitere Daten zur Erstellung der Prozess-Massenbilanz

**Stromverbrauch:** 5 kWh/t (optimiert, während den Versuchen ca. 20 kWh/t)

**Wärmeverbrauch:** ca. 37 kWh/t

**Chemikalienverbrauch:**

- » Harnstoff, in Abhängigkeit der N-Konzentration im Input: max. 322 kg
- » Säure, je nach Qualität und N-Konzentration des Inputs



## Eigenschaften des Rezyklats

**Darreichungsform:** Flüssigdünger

**N-Konzentration:** 15 Gew.-%

**NAC-Löslichkeit:** –

**Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV:** ja

**Sonstige Nährstoffe:** ggf. P nach Zugabe von Phosphorsäure

**Weitere Produkteigenschaften:** –

## Betriebsanforderungen

**Platzbedarf:** 20-Fuß-Container für die Düngemittelherstellung. Je nach Anfallmenge des Brüdenkondensats/der ASL-Lösung und Düngemittellagerung vor Ort einen entsprechend großen Speicher. Zusätzlich Platz für Harnstoff und ggf. Säure.

**Know-How Betrieb/Unterhalt/Personalbedarf:** Nach Erreichen von TRL 9 weitestgehend automatisierter Betrieb. Wartungsarbeiten an Pumpen und Harnstoffförderung sowie am Ammoniumanalysator sind dennoch notwendig. Der Personalbedarf ist abhängig von der Menge der anfallenden Brüdenkondensate

**Kategorie der eingesetzten Chemikalien:** Harnstoff zur Stickstoffanreicherung

**Kategorie der Abfallentsorgung:** ggf. Fällschlämme

## Auszug aus Referenzliste des Betriebs der Verfahren

### Betrieb einer halbtechnischen Versuchsanlage im Rahmen des Forschungsprojekts SATELLITE

- » **Ort:** Hünxe
- » **Betrieb:** 2022 – 2024 in verschiedenen Testläufen

## Innovativer Charakter/Vorteile des Verfahrens & Bemerkungen

Das Verfahren erlaubt eine Düngemittelproduktion vor Ort aus Brüdenkondensaten oder ASL und somit eine dezentrale Wertschöpfung.

## Kontakt

### Verfahrensgeber

**SF-SoepenberG GmbH**

Emil-Fischer-Straße 14 | 46569 Hünxe

**Dr. Joachim Clemens**

j.clemens@soepenberG.com

### Projektkoordinatorin

**Leibniz Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik**

Welfengarten 1 | 30167 Hannover

**Dr.-Ing. Maike Beier**

beier@isah.uni-hannover.de



## Impressum

### Herausgeber

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft  
an der RWTH Aachen (FiW) e. V.  
An der Ölmühle 4 | 52074 Aachen  
Fon +49 241 80 2 68 25 | Fax +49 241 80 2 28 25  
transphor@fiw.rwth-aachen.de

### Redaktion

TransPhoR – Vernetzungs- und Transfervorhaben der  
BMFTR-Fördermaßnahme

### Fachredaktion:

Dr.-Ing. Thu Nguyen

### Fachliche Unterstützung:

Dr.-Ing. Maïke Beier (Leibniz Universität Hannover)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt  
bei den Autoren der einzelnen Beiträge. Die Broschüre ist nicht  
für den gewerblichen Vertrieb bestimmt.

### Fotonachweise (wenn nicht am Bild vermerkt)

Titel: Kläranlage © Ruhrverband, Blühende Landschaft  
© Christian Schwier/adobestock.com, Industriepark  
© 360degreeAerial/shutterstock.com; S. 4–5 FiW e. V.;  
S. 8 © Yves/pixabay.com; S.45 Industriepark © 360degree-  
Aerial/shutterstock.com

### Layout

FiW e. V., Aachen | design@fiw.rwth-aachen.de

### Bezug über

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft  
an der RWTH Aachen (FiW) e. V.  
Download: [www.bmbf-rephor.de](http://www.bmbf-rephor.de)

### BMFTR-Fördermaßnahme

#### „RePhoR – Regionales Phosphor-Recycling“

#### Ansprechpartner:in beim Projektträger

Projektträgerschaft Ressourcen, Kreislaufwirtschaft;  
Geoforschung (PTRKG), Projektträger Karlsruhe (PTKA),  
Wassertechnologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 | 76344 Eggenstein-  
Leopoldshafen

#### Dr.-Ing. Carsten Jobelius

carsten.jobelius@kit.edu

#### Dr.-Ing. Thu Nguyen

le.nguyen@kit.edu

#### Dr. Thomas Deppe

thomas.deppe@kit.edu

### Auflage

1. Auflage, Mai 2026



## INNOVATIONSATLAS WASSER

Hier finden Sie weitere innovative Produkte aus der BMFTR-geförderten Wasserforschung. Die Produkte umfassen neben Technologien und Verfahrenen auch Managementkonzepte, Software-Tools und Bildungsmaterialien zum nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser.

[www.innovationsatlas-wasser.de](http://www.innovationsatlas-wasser.de)





Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**  
Forschung für Nachhaltigkeit

[www.bmbf-rephor.de](http://www.bmbf-rephor.de)