



BMFTR-Fördermaßnahme

# Regionales Phosphor-Recycling

Statusbericht 2025

Erkenntnisse und Impulse für die Praxis

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**

Forschung für Nachhaltigkeit



BMFTR-Fördermaßnahme

**RePhoR**  
**Regionales Phosphor-Recycling**

**Statusbericht 2025**  
**Erkenntnisse und Impulse für die Praxis**

# Inhalt

Autorenschaft .....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	8
<b>1 Hintergrund und aktuelle Situation .....</b>	<b>10</b>
1.1 Globale Situation.....	10
1.2 Aktuelle Marktsituation und Preisentwicklung.....	11
1.3 Rückgewinnungspflicht ab 2029.....	13
1.4 Aktuelle Situation in Deutschland.....	14
<b>2 BMFTR-Fördermaßnahme Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR) .....</b>	<b>16</b>
2.1 Verbundprojekte .....	18
2.1.1 AMPHORE.....	19
2.1.2 DreiSATS .....	22
2.1.3 KlimaPhoNds.....	25
2.1.4 P-Net .....	27
2.1.5 RePhoRM .....	29
2.1.6 R-Rhenania .....	31
2.1.7 SATELLITE.....	33
<b>3 Verfahren.....</b>	<b>36</b>
3.1 Übersicht und Einteilung der Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung.....	36
3.2 Übersicht und Einteilung der Verfahren zur Stickstoff-Rückgewinnung.....	38
3.3 Beschreibungen der Verfahren der RePhoR-Projekte .....	39
3.3.1 AMPHORE.....	39
3.3.2 DreiSATS .....	40
3.3.3 KlimaPhoNds.....	43
3.3.4 P-Net .....	46
3.3.5 RePhoRM .....	48
3.3.6 R-Rhenania .....	51
3.3.7 SATELLITE.....	54

<b>4</b>	<b>Produkte und Märkte .....</b>	<b>55</b>
4.1	Arten und Qualitäten der Rezyklate .....	55
4.2	Co-Produkte und Reststoffe.....	58
4.3	Abnahmemärkte und deren Anforderungen.....	59
4.4	Markteintrittsbarrieren und Chancen von Rezyklaten.....	62
4.5	Versuche zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor.....	64
4.6	Regionale Bedarfsplanung aus Sicht der Landwirtschaft.....	68
4.7	Sozialakzeptanz von Sekundärdüngern.....	69
<b>5</b>	<b>Recht .....</b>	<b>71</b>
5.1	Organisationsmodelle und Zusammenschlüsse verschiedener Betreiber.....	72
5.2	Abfallrecht.....	74
5.3	Düngemittelrecht .....	75
5.4	Genehmigungsrecht .....	78
<b>6</b>	<b>Planung und Bewertung der regionalen Phosphor-Rückgewinnung .....</b>	<b>80</b>
6.1	Ökobilanzierung der Rückgewinnungsverfahren.....	80
6.2	Szenarienanalyse der regionalen Phosphor-Rückgewinnung.....	84
6.2.1	Vorgehen zur Ermittlung von strategischen Bewertungsgrößen für das Gesamtsystem .....	85
6.2.2	Werkzeuge und Modelle zur Szenarienanalyse aus der RePhoR-Maßnahme .....	87
6.3	Wirtschaftlichkeit.....	89
<b>7</b>	<b>Kernaussagen .....</b>	<b>91</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>94</b>
<b>9</b>	<b>Kontaktdaten.....</b>	<b>99</b>
	<b>Impressum .....</b>	<b>104</b>

# Autorenschaft

Kapitel 1.1 .....	Pinnekamp, J.; Schüller, S.
Kapitel 1.2 .....	Pinnekamp, J.; Schüller, S.
Kapitel 1.3 .....	Pinnekamp, J.; Schüller, S.
Kapitel 1.4 .....	Pinnekamp, J.; Schüller, S.
Kapitel 2.....	Jobelius, C.; Nguyen, T.
Kapitel 2.1.1 .....	AMPHORE-Gesamtkonsortium
Kapitel 2.1.2 .....	Kidszun, C.; Lincke, M.; Schöfmann, P.
Kapitel 2.1.3 .....	Schuhmann, R.; Sievers, M.
Kapitel 2.1.4 .....	Dockhorn, T.; Kolb, A.; Mohammadi, H.
Kapitel 2.1.5 .....	Krix, B.; Engelhart, M.
Kapitel 2.1.6 .....	Adam, C.; Emter, J.; Herzel, H.
Kapitel 2.1.7 .....	Beier, M.; Breitenkamp, S.; Martens, T.; Reiter, J.; Saadlou, K.
Kapitel 3.1 .....	Pinnekamp, J.; Schüller, S.
Kapitel 3.2 .....	Beier, M.; Grömping, M.; Reiter, J.
Kapitel 3.3.1 .....	Blöhse, D.; Evers, H.; Frehmann, T.; Schneider, Y.
Kapitel 3.3.2 .....	Kidszun, C.; Leidolph, L.; Lincke, M.; Schöfmann, P.
Kapitel 3.3.3 .....	Schuhmann, R.; Sievers, M.
Kapitel 3.3.4 .....	Dockhorn, T.; Kolb, A.; Mohammadi, H.
Kapitel 3.3.5 .....	Buchheim, J.; Engelhart, M.; Sharifov, I.
Kapitel 3.3.6 .....	Adam, C.; Brey, C.; Emter, J.; Herzel, H.; Künstler, J.
Kapitel 3.3.7 .....	Beier, M.; Krajewski, J.; Reiter, J.; Stopp, P.
Kapitel 4.1 .....	Beier, M.; Clemens, J.; Engelhart, M.; Goldbach, H.; Herzel, H.; Keßeler, P.; Kidszun, C.; Kolisch, G.; Krajewski, J.; Kratz, S.; Krebber, K.; Leimkötter, D.; Niederste-Hollenberg, J.; Pinnekamp, J.; Reiter, J.; Schöfmann, P.; Schüller, S.; Schumann, R.; Sievers, M.; Stopp, P.
Kapitel 4.2 .....	Brey, C.; Clemens, J.; Engelhart, M.; Goldbach, H.; Kidszun, C.; Kolisch, G.; Krajewski, J.; Krebber, K.; Krix, B.; Niederste-Hollenberg, J.; Pinnekamp, J.; Reiter, J.; Schöfmann, P.; Schüller, S.
Kapitel 4.3 .....	Beier, M.; Clemens, J.; Engelhart, M.; Goldbach, H.; Hermann, L.; Herzel, H.; Keßeler, P.; Kidszun, C.; Kolisch, G.; Kratz, S.; Krebber, K.; Krix, B.; Niederste-Hollenberg, J.; Pinnekamp, J.; Reiter, J.; Schüller, S.; Winker, M.
Kapitel 4.4 .....	Beier, M.; Clemens, J.; Engelhart, M.; Goldbach, H.; Herzel, H.; Kolisch, G.; Krebber, K.; Krix, B.; Niederste-Hollenberg, J.; Pinnekamp, J.; Reiter, J.; Schüller, S.
Kapitel 4.5 .....	Burkhardt, J.; Domurath, N.; Goldbach, H.; Heck, C.; Keßeler, P.; Kidszun, C.; Kratz, S.; Leers, K.; Engelhart, M.; Urbatzka, P.
Kapitel 4.6 .....	Ahneemann, H.; Beier, M.; Reiter, J.
Kapitel 4.7 .....	Luthin, A.; Meyer, R.

Kapitel 5.....	Pinnekamp, J.; Schüller, S.
Kapitel 5.1 .....	Allmann, K.; Deutzmann, F.; Kramer, B.; Wischer, H.D.
Kapitel 5.2 .....	Pinnekamp, J.; Schüller, S.
Kapitel 5.3 .....	Clemens, J.; Hermann, L.; Herzel, H.; Leimkötter, D.; Winker, M.
Kapitel 5.4 .....	Allmann, K.; Blöhse, D.; Deutzmann, F.; Kramer, B.; Wischer, H.D.
Kapitel 6.....	Beier, M.; Breitenkamp, S.; Meyer, R.
Kapitel 6.1 .....	Meyer, R.
Kapitel 6.2 .....	Beier, M.; Breitenkamp, S.; Martens, T.; Reiter, J.; Saadlou, K.
Kapitel 6.3 .....	Leuschner, E.; Loderhose, M.; Pinnekamp, J.; Schröder, M.; Schröder, W.; Schüller, S.; Weber, F.-A.

# Abkürzungsverzeichnis

A.....	Annuitätenfaktor
a.....	Jahr
AbfklärV.....	Klärschlammverordnung
AO.....	Abgabenordnung
AVV.....	Abfallverzeichnis-Verordnung
BGBL.....	Bundesgesetzblatt
BImSchG.....	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV.....	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMFTR.....	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (ehemals: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF))
BMEL.....	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV.....	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BNatSchG.....	Bundesnaturschutzgesetz
CLP.....	Classification, Labelling and Packaging
CO <sub>2</sub> e.....	Kohlenstoffdioxid Äquivalente
CMC.....	Komponentenmaterialkategorien
DAP.....	Diammoniumphosphat
DCP.....	Dicalciumphosphat
DepV.....	Deponieverordnung
DG Agri.....	Directorate-General for Agriculture and Rural Development
DIN.....	Deutsche Industrienorm
DK.....	Deponieklasse
DPP.....	Deutsche Phosphor-Plattform DPP e. V.
DüMV.....	Düngemittelverordnung
DWA.....	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
E.....	Einwohner
EBA.....	Eigenbetrieb Abwasserbeseitigung
ECHA.....	Europäische Chemikalienagentur
EGTOP.....	Expert Group for Technical Advice on Organic Production
EN.....	Europäische Norm
EU.....	Europäische Union
EU-DüngProdV.....	EU-Düngemittelverordnung
EW.....	Einwohnerwerte
EWG.....	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EWIV.....	Europäische Wirtschafts- und Interessenvereinigung
FPR.....	EU-Düngeprodukteverordnung
GIS.....	Geographisches Informationssystem
GK.....	Größenklasse
GWB.....	Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> .....	Phosphorsäure
IAT.....	Ionenaustauscher
IBC.....	Intermediate Bulk Container



ICP-OES.....	Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
ICP-MS.....	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
IE-Richtlinie .....	Industrie-Emissions-Richtlinie
IPCC .....	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO .....	Internationale Organisation für Normung
KA .....	Kläranlage
KAG .....	Kommunalabgabengesetze
KEK .....	Kreislaufwirtschaft, Energie und Klärschlamm
KNRN.....	Kommunale Nährstoffrückgewinnung
KompaGG-N .....	Komplettaufbereitung von Gülle und Gärresten
KrWG .....	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KS.....	Klärschlamm
KSA .....	Klärschlammasche
KS-VO .....	Klärschlammverordnung
LAGA .....	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LANUV.....	Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen
LAWA .....	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
MAP .....	Magnesium-Ammonium-Phosphat
MAG.....	Merchant Grade Acid
MKVA .....	Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen
NP-Dünger.....	Mehrnährstoffdünger mit Stickstoff, Phosphor
NPK-Dünger .....	Mehrnährstoffdünger mit Stickstoff, Phosphor und Kalium
NPS-Dünger .....	Mehrnährstoffdünger mit Stickstoff, Phosphor und Schwefel
OS .....	Originalsubstanz
P .....	Phosphor
PAR.....	photosynthetisch aktive Strahlung
PFC .....	Produktfunktionskategorien
PPA .....	Purified Phosphoric Acid
PRR .....	P-Remobilisierungsrate
PS .....	Primärschlamm
RFA .....	Röntgenfluoreszenzanalyse
STR.....	Struvit
SVA.....	Schlammverbrennungsanlage
TM .....	Trockenmasse
TR .....	Trockenrückstand
TRL .....	Technologiereifegrad
TS.....	Trockensubstanz
TSP.....	Triple-Superphosphat
UBA.....	Umweltbundesamt
ÜS/ÜSS.....	Überschussschlamm
VgV .....	Vergabeverordnung
VKU.....	Verband kommunaler Unternehmen
WFA .....	Wirbelschichtfeuerungsanlage
wRP .....	weicherdiges Rohphosphat

# 1 Hintergrund und aktuelle Situation

## 1.1 Globale Situation

Phosphor ist ein essenzieller und nicht substituierbarer Baustein in allen Lebewesen, der als Nährstoff für den Energiestoffwechsel sowie für die Bildung von DNA und Proteinen unverzichtbar ist. In natürlichen Kreisläufen wird Phosphor durch den Abbau abgestorbener Biomasse in den Boden zurückgeführt. In der Landwirtschaft jedoch wird dieser Kreislauf durch die Ernte von Nutzpflanzen unterbrochen, sodass der entnommene Phosphor durch den Einsatz von Düngemitteln ersetzt werden muss. Rund 90% des weltweit genutzten Phosphors werden zur Herstellung von Phosphatdüngern für die Lebensmittelproduktion genutzt. Darüber hinaus findet Phosphor in der Industrie vielfältige Anwendungen, etwa in Korrosionsschutzmitteln und Reinigungsmitteln. Auch in der Lebensmittelindustrie wird er als Stabilisator, Bindemittel, Trennmittel, Konservierungsmittel und Säuerungsmittel verwendet. Mit der wachsenden Weltbevölkerung und dem steigenden Bedarf an Lebensmitteln wird daher auch der Bedarf an Phosphatdüngern und industriell genutztem Phosphor weiter zunehmen.

Phosphor kommt in der Erdkruste ausschließlich als Phosphatgestein aus fossilen Lagerstätten vor. Die bergmännische Förderung ist mit erheblichen ökologischen Belastungen verbunden. Der großflächige Tagebau verursacht Landschaftszerstörung und beansprucht enorme Wassermengen in oft wasserarmen Regionen (etwa für den Abbau und die Aufbereitung des Erzes). Zudem sind viele Lagerstätten mit Schadstoffen (Uran, Cadmium) belastet.

Die abbauwürdigen Phosphaterz-Reserven sind endlich und auf wenige, teilweise politisch instabile Regionen in der Welt begrenzt. Die globalen, wirtschaftlich abbaubaren Phosphatreserven belaufen sich schätzungsweise auf 74 Milliarden Tonnen Phosphatgestein [47]. Davon gelten nur jene Anteile als Reserven, die mit heutiger Technik und zu aktuellen Preisen rentabel förderbar sind. Darüber hinaus existieren größere Ressourcen an Phosphor, die zwar geologisch vorhanden, unter aktuellen Bedingungen aber nicht wirtschaftlich gewinnbar sind. Wie lange die bekannten Reserven reichen, lässt sich nur unsicher prognostizieren. Bei konstanter Förderung der gegenwärtig bekannten, technisch und wirtschaftlich abbaubaren Reserven wird die statische Reichweite aktuell auf etwa 300 Jahre veranschlagt, wobei diese Angabe je nach zur Rate gezogener Literatur, den getroffenen

Annahmen zu Verbrauch, Bevölkerungsentwicklung und den berücksichtigten Reserven stark schwankt.

### EXKURS

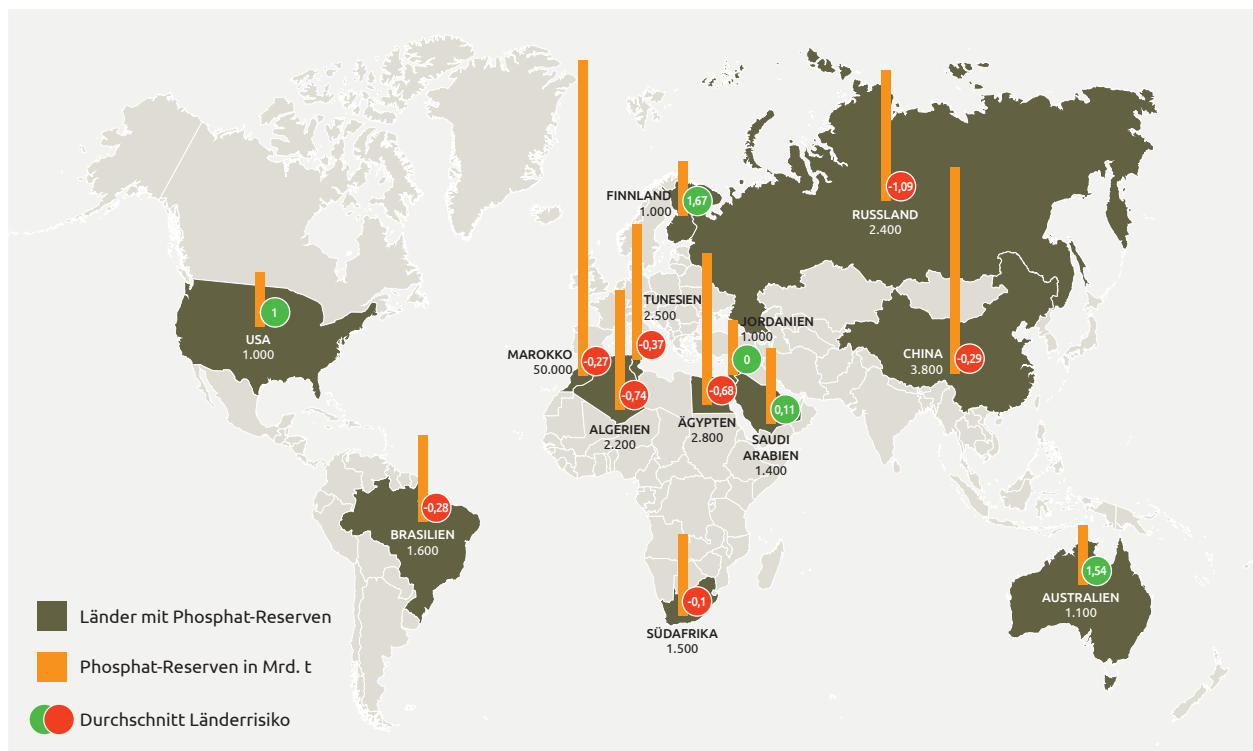
**Reserven:** Rohstoffmenge einer mineralischen Lagerstätte, die technisch und wirtschaftlich unter den derzeit gegebenen Marktbedingungen gewinnbar ist.

**Ressourcen:** Rohstoffmenge einer mineralischen Lagerstätte, die irgendwann in der Zukunft gewinnbar ist.

**Statische Reichweite:** Reichweite der gegenwärtig bekannten Reserven bei konstanter Förderung.

Etwa 70% der wirtschaftlich abbaubaren Reserven liegen in Marokko, welches damit eine Schlüsselrolle in der globalen Phosphorversorgung einnimmt. Weitere bedeutende Vorkommen befinden sich z.B. in China, Russland, den USA sowie in einigen Ländern des Nahen Ostens und Nordafrikas. Mitunter wurde in den letzten Jahren in den Medien auch von signifikanten Phosphatvorkommen in Norwegen berichtet – diese sind jedoch nicht wirtschaftlich abbaubar und können daher nicht in die globalen Reserven einbezogen werden [11].

Deutschland, wie auch nahezu alle Länder der Europäischen Union (EU), besitzt keine eigenen Rohphosphat-lagerstätten und ist deshalb vollständig auf Importe angewiesen. Dies führt zu großen Risiken bei der Versorgungssicherheit und zur Anfälligkeit gegenüber Preisschwankungen. Zur besseren Einschätzung wird mitunter das sogenannte gewichtete Länderrisiko genutzt: dieser Index basiert auf den Worldwide Governance Indicators der Weltbank, die jährlich die Regierungsführung in über 200 Staaten anhand von sechs Schlüsselindikatoren bewertet und eine quantitative Einschätzung der politischen, wirtschaftlichen und finanziellen Stabilität eines Landes bietet. Diese Indikatoren sind z.B. „Voice and Accountability“ (Mitspracherecht und Rechenschaftspflicht) oder „Government Effectiveness“ (Effektivität der Regierung). Werden die Indikatoren gemittelt, stellt 2,5 den theoretisch besten Indexwert dar, -2,5 den theoretisch schlechtesten erreichbaren Wert. Je niedriger



**Abbildung 1: Globale Verteilung der bekannten Phosphatlagerstätten mit dem jeweiligen gemittelten Länderrisikoindex (eigene Darstellung, Daten entnommen aus [47], [50]).**

der Index, desto unsicherer sind die sechs Indikatoren gewichtet und umso mehr kann von einem höheren Versorgungsrisiko ausgegangen werden [10]. Wie in Abbildung 1 dargestellt ist, befindet sich der überwiegende Teil der Phosphor-Lagerstätten in Ländern, die als risikoreich eingestuft sind.

Aufgrund seiner wirtschaftlichen Bedeutung und der potenziellen Versorgungsrisiken hat die EU Phosphatgestein deshalb bereits im Jahr 2014 auf die Liste der kritischen Rohstoffe gesetzt, die einen Anreiz für Recycling-

tätigkeiten geben soll. Im Jahr 2017 wurde die Liste auch um Phosphor (P4) ergänzt. Eine wichtige Rolle zur Sicherung der zukünftigen Versorgung spielt die Rückgewinnung von Phosphor aus P-reichen Abfallströmen wie Abwasser und Klärschlamm. Jährlich fallen in Deutschland große Mengen phosphorhaltiger Abfälle an, die künftig verstärkt zur Phosphorgewinnung genutzt werden sollen. Diese Schließung des Phosphorkreislaufs soll einen Beitrag dazu leisten, Phosphor nachhaltig und unabhängig von Primärrohstoff-Importen bereitzustellen.

## 1.2 Aktuelle Marktsituation und Preisentwicklung

Rund 88 % des gesamten Phosphats werden für Pflanzennährstoffe genutzt. Im Jahr 2019 wurde 211.000 Tonnen Phosphatdünger in der Landwirtschaft in Deutschland eingesetzt. Damit ist der Verbrauch in den letzten Jahren leicht gesunken (vgl. Abbildung 2).

Die Preisentwicklung hat im letzten Jahrzehnt eine erhebliche Volatilität erfahren und dürfte auch künftig größeren Schwankungen unterworfen sein, was die Kalkulationen unsicherer und schwieriger macht. In Abbildung 3 ist die Preisentwicklung von Rohphosphat und Triple-Superphosphat zwischen 2009 und 2024 dargestellt. Triple-Superphosphat (TSP) ist ein hoch konzentrierter Phos-

phordünger mit einem Phosphorpentoxid-Gehalt ( $P_2O_5$ ) von etwa 45 %. Es wird durch die chemische Behandlung von Phosphatgestein mit Phosphorsäure hergestellt, wodurch der Phosphor wasserlöslich und somit für Pflanzen leicht verfügbar wird. Damit gilt er als „Goldstandard“ unter den Phosphatdüngern und kann als exemplarisch für die Preisentwicklung gesehen werden.

Als Vergleichswert sei zudem auf den Abgabepreis von Diammonphosphat-Dünger hingewiesen (18 % N + 46 %  $P_2O_5$ ). In Nordrhein-Westfalen lag der exemplarische Abgabepreis am 17.03.2025 bei 718,50 EUR/t (bei Abnahme ab 10 Tonnen lose, ab Lager) [36].

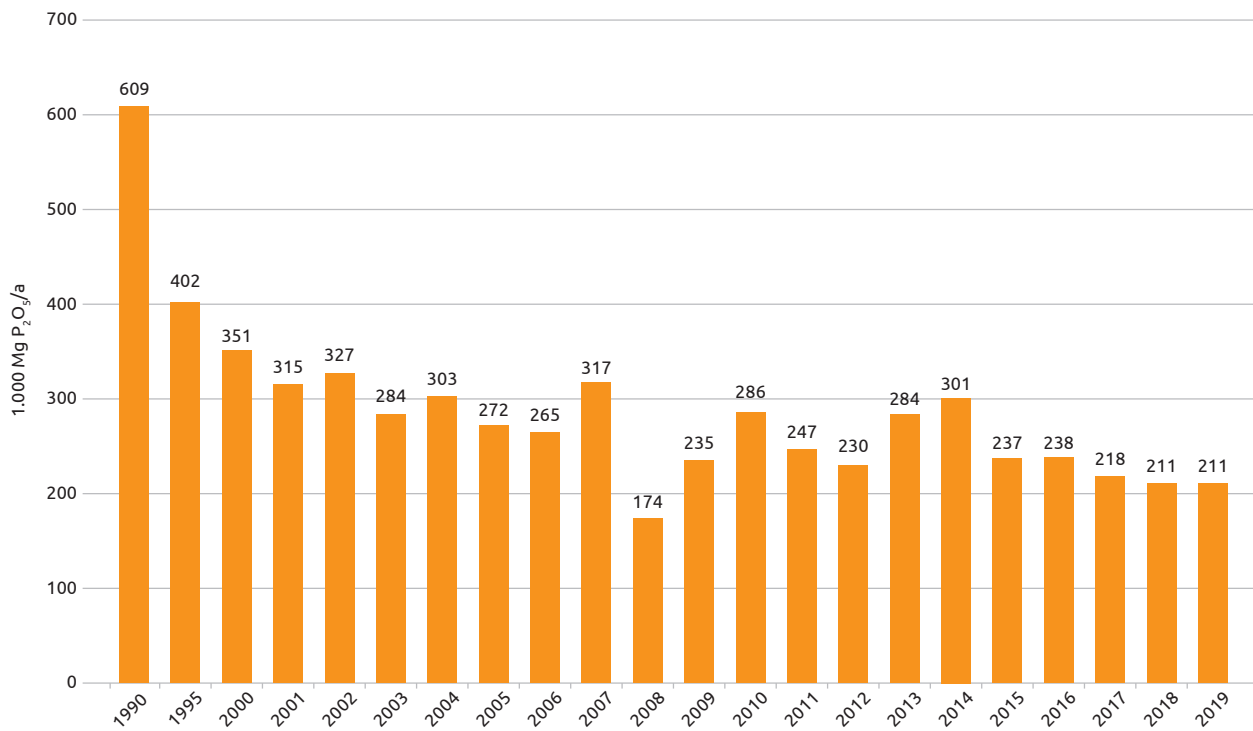


Abbildung 2: Verbrauch von Phosphatdünger in der Landwirtschaft in Deutschland (eigene Darstellung nach [21]).

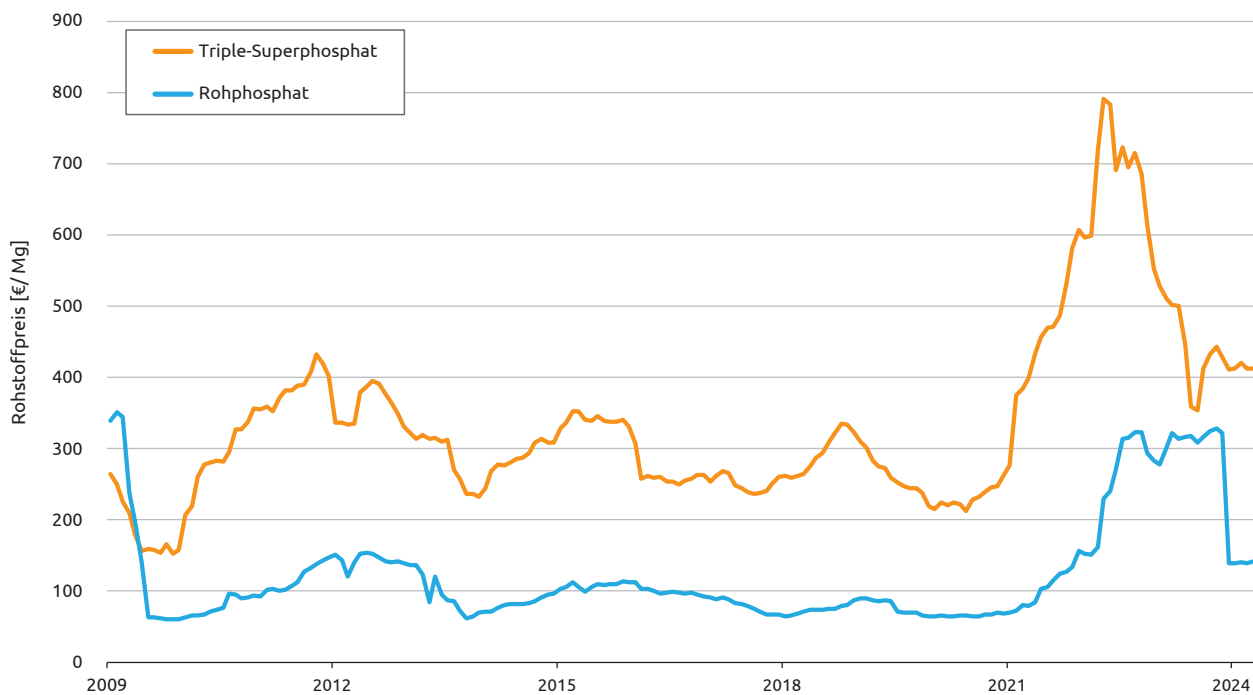


Abbildung 3: Preisentwicklung von Rohphosphat und Triple-Superphosphat zwischen 2009 und 2024 (eigene Darstellung nach [26]).

Die Preisschwankungen sind eng mit globalen politischen und wirtschaftlichen Ereignissen verknüpft. So sanken während der Wirtschaftskrise 2009 die Preise für Phosphatdünger aufgrund der reduzierten Nachfrage. Ab 2021 führten geopolitische Spannungen, insbesondere der Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine zu Befürchtungen hinsichtlich einer Verknappung von

Rohstoffen, was einen erneuten Preisanstieg zur Folge hatte. Solche Preissprünge beeinflussen die globalen Lebensmittelkosten erheblich. Während wohlhabendere Länder diese Preissteigerungen aktuell größtenteils noch abfedern können, stellen sie für ärmere Nationen eine erhebliche Herausforderung dar und gefährden die Ernährungssicherheit.

### 1.3 Rückgewinnungspflicht ab 2029

Angesichts der dargelegten Risiken hat Deutschland regulatorische Schritte unternommen, um Phosphor aus Abfällen zurückzugewinnen. Mit der Novelle der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) im Jahr 2017 wurde erstmals eine verbindliche Phosphor-Rückgewinnung vorgeschrieben. Kern der Vorgaben ist, dass kommunale Kläranlagen künftig den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor rückgewinnen müssen, anstatt den Schlamm weiterhin unbehandelt in der Landwirtschaft zu verwerten. Aktuell muss der Klärschlammherzeuger in Deutschland den anfallenden Klärschlamm lediglich möglichst hochwertig verwerten, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist.

Es existieren verschiedene Verfahren zur Rückgewinnung, die an unterschiedlichen Stellen des Abwasserreinigungsprozesses ansetzen: beim Klärschlamm, den Schlammwässern und der Klärschlammasche. Die bekannten und relevanten Verfahren sind in Kapitel 3.1 dargestellt. Es besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, aus weiteren Sekundärquellen Phosphat zurückzugewinnen, z. B. aus Gärrückständen oder Garten- und

Parkabfällen. Das wichtigste Ziel ist es, den Import von Phosphatdüngern zu substituieren. Daher wird der Fokus primär auf das im Klärschlamm enthaltene Phosphat gelegt, welches eine wichtige Quelle darstellt.

Konkret greift ab dem 1. Januar 2029 die Pflicht zur Phosphor-Rückgewinnung für alle kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 100.000 Einwohnerwerten (EW). Ab 2032 wird diese Schwelle auf Anlagen über 50.000 EW gesenkt. Damit sind in Deutschland rund 500 Kläranlagen, die den überwiegenden Teil des Abwassers behandeln, betroffen.

Verankert ist die Rückgewinnungspflicht über die Klärschlammverordnung. Kriterium hierfür ist ein Phosphorgehalt von  $\geq 2\%$  in der Klärschlamm-Trockenmasse, welches bei den meisten kommunalen Klärschlämmen ohne Umstellung der Phosphorelimination (meist Simultanfällung oder Bio-P) greift. Parallel zum in der AbfKlärV verankerten Rückgewinnungsgebot wurde das bundesweite Verbot der bodenbezogenen Klärschlammverwertung für Kläranlagen  $> 50.000$  EW ausgesprochen. Kleinere

**Tabelle 1: Regelungen zur P-Rückgewinnung nach der novellierten Klärschlammverordnung (Quelle: Dr. Andrea Roskosch, UBA).**

Ausbaugröße	$\leq 50.000$ EW	$> 50.000 - 100.000$ EW	$> 100.000$ EW
bisher	bodenbezogene Verwertung möglich		
in 2023	Berichtspflicht zu Maßnahmen der geplanten P-Rückgewinnung, zur bodenbezogenen Verwertung oder sonstigen Entsorgung		
	Pflicht zu Untersuchungen auf P-Gehalt (und basisch wirksame Stoffe)		
ab 01.01.2029	Bodenbezogene Verwertung möglich	Bodenbezogene Verwertung möglich	Bodenbezogene Verwertung nicht zulässig
	<b>P-Rückgewinnungspflicht (<math>\geq 2\%</math> P)</b>	<b>P-Rückgewinnungspflicht (<math>\geq 2\%</math> P)</b>	<b>P-Rückgewinnungspflicht (<math>\geq 2\%</math> P)</b>
ab 01.01.2032	Bodenbezogene Verwertung möglich	Bodenbezogene Verwertung <b>nicht</b> zulässig	Bodenbezogene Verwertung <b>nicht</b> zulässig
	<b>P-Rückgewinnungspflicht (<math>\geq 2\%</math> P)</b>	<b>P-Rückgewinnungspflicht (<math>\geq 2\%</math> P)</b>	<b>P-Rückgewinnungspflicht (<math>\geq 2\%</math> P)</b>

Anlagen unter 50.000 EW dürfen die Phosphorrückführung in den Kreislauf auch weiterhin über den direkten Einsatz ihrer Schlämme auf landwirtschaftliche Flächen umsetzen, was natürlich wie bisher die Einhaltung aller vorgeschriebenen Schadstoffgrenzwerte voraussetzt. Die Verordnung schreibt für die Rückgewinnungsverfahren je nach Verfahren bestimmte Rückgewinnungsquoten vor (z. B. mindestens 80 % des Phosphors aus der Asche), um sicherzustellen, dass der Großteil des Nährstoffs in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt wird. Ausnahmen gibt es für Klärschlämme mit einem Phosphorgehalt unter 20 g/kg Trockenmasse.

Die Regelungen nach AbfklärV für die Rückgewinnung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Von der Regelung betroffen sind somit alle mittleren und großen Städte und Gemeinden. Diese müssen entweder eigene Phosphor-Rückgewinnungsanlagen errichten oder Kooperationslösungen finden (z.B. gemeinsame Mono-Verbrennungsanlagen und zentrale P-Rückgewinnungsanlagen für mehrere Klärwerke). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Leistung im Rahmen eines Ausschreibungsverfahrens an Dritte zu vergeben. Auch Betreiber von Klärschlammverbrennungsanlagen sind eingebunden, da sie mit der Übernahme der Schlämme zur Entsorgung auch die Rückgewinnungspflicht – dann

aus der Asche – übernehmen. Die Pflicht zur P-Rückgewinnung wird damit zu einem zentralen Thema für Kläranlagenbetreiber und Technologielieferanten (Verfahrensgeber). Sie erfordert eine Neuaufstellung der Entsorgungsstrategie, Investitionen in neue Anlagentechnik und ggf. Prozessumstellungen in der Schlammbehandlung.

Acht Jahre nach Inkrafttreten der novellierten Klärschlammverordnung und vier Jahre vor Beginn der Phosphor-Rückgewinnungspflicht gibt es jedoch nur wenige konkrete Pläne zum Bau entsprechender Anlagen, sodass bis 2029 voraussichtlich nur ein Bruchteil der jährlich anfallenden Klärschlammengen behandelt werden kann. Die Umsetzung stockt aus verschiedenen Gründen, darunter langen Genehmigungsverfahren, fehlenden wirtschaftlichen Anreizen und Unsicherheiten bei der Technologieauswahl [8]. Der verbleibende Zeitraum für Planung, Bau und Genehmigung ist äußerst knapp, was die rechtzeitige Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben erschwert. Das BMUV und die Länder reagieren darauf mit einer gemeinsamen Erklärung und dem Ziel, bis 2029 die notwendigen Kapazitäten zur Verbrennung von Klärschlamm und der schadstoffarmen Phosphor-Rückgewinnung zu schaffen. Der schleppende Ausbau ist also als erhebliches Hemmnis erkannt.

## 1.4 Aktuelle Situation in Deutschland

Laut Prognosen des Umweltbundesamtes fallen jährlich etwa 1,7 Millionen Tonnen Trockenmasse an behandlungspflichtigem Klärschlamm an, aus dem sich ein Rückgewinnungspotenzial von rund 50.000 Tonnen Phosphor pro Jahr ergibt [8]. Dieses Potenzial entspricht etwa 40 % des aktuellen mineralischen Phosphatdüngerbedarfs der deutschen Landwirtschaft. Bisher wird jedoch nur ein Bruchteil dieses Potenzials tatsächlich erschlossen, da erst wenige Anlagen in Betrieb sind.

Aufgrund des KS-Ausbringungsverbots ab 2029/2032 wird zukünftig ein weiter steigender Anteil des Klärschlammes verbrannt werden. Setzen die Anlagen verfahrenstechnisch nicht auf eine vorgeschaltete Phosphor-Abreicherung der Schlämme, muss der Phosphor anschließend mittels Aufbereitungsverfahren aus der Asche zurückgewonnen werden. Alternativ kann dies auch mittels Verbrennung mit einer thermochemischen bzw. integrierten Aschemodifikation geschehen. Aus diesem Grund sollen hinsichtlich einer Analyse der bestehenden und künftigen Kapazitäten nachfolgend auch kurz die Anlagenkapazitäten für Monoverbrennungsanlagen beleuchtet werden.

In Deutschland existieren derzeit rund 29 Klärschlammverbrennungsanlagen mit einer genehmigten Gesamtkapazität von über 1.000.000 Tonnen Trockenmasse pro Jahr, wobei nicht die gesamte Kapazität in der praktischen Umsetzung zur Verfügung steht. Darüber hinaus befinden sich aktuell 39 Neubauprojekte für Monoverbrennungsanlagen in Planung oder Bau. Diese neuen Anlagen sind v. a. in Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Bayern vorgesehen. [38]

Spezielle Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm oder Klärschlamm-Asche gibt es bislang erst vereinzelt in Deutschland. Nach dem 3. Bericht der LAGA an die Umweltministerkonferenz existierten zum Stand Ende 2021 die in Tabelle 2 aufgelisteten Anlagen. Insgesamt befinden sich aktuell nur wenige Anlagen im regulären Betrieb.

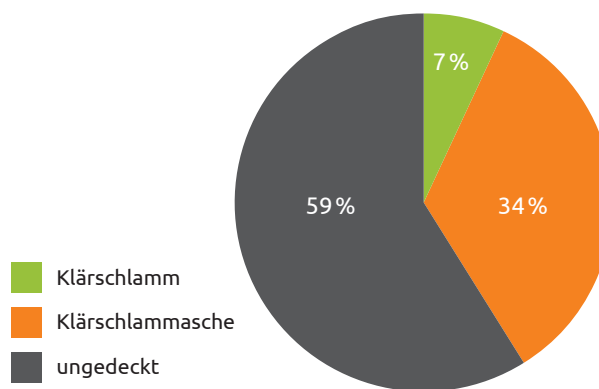
Darüber hinaus sind mehrere Anlagen in Planung. Aktuellen Prognosen zufolge werden bis 2029 etwa 100.000 t Trockenmasse pro Jahr an Kapazitäten zur Phosphor-Rückgewinnung direkt aus Klärschlamm und rund 500.000 t Trockenmasse pro Jahr aus Verbren-

**Tabelle 2: Vorhandene Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung in Deutschland nach LAGA [7].**

Bundesland	Vorhandene Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung
Baden-Württemberg	Kläranlage Göppingen: Erweitertes AirPrex®-Verfahren mit integrierter thermisch-chemischer Desintegration
Berlin	Berliner Wasserbetriebe: AirPrex®/MAP-Verfahren („Berliner Pflanze“)
Hamburg	Anlage zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche: REMONDIS TetraPhos-Verfahren
Hessen	Kläranlage Lorsbach: Trocknungs- und Karbonisierungsanlage
	Hünfeld: Struvit-Verfahren (Molkereiabwasser)
Niedersachsen	Stadtentwässerung Gifhorn: Seaborne-Verfahren (abgewandelt)
	Kläranlage Uelzen: AirPrex®/MAP Verfahren
	Kläranlage Braunschweig: AirPrex®/MAP Verfahren
	Kläranlage Salzgitter: AirPrex®/MAP Verfahren
	Kläranlage Wolfsburg: AirPrex®/MAP Verfahren
	Kläranlage Lingen: EloPhos®-Anlage/MAP Verfahren
Nordrhein-Westfalen	Kläranlage Mönchengladbach-Neuwerk: Air-Prex®/MAP-Verfahren
Saarland	Kläranlage Homburg/Saar: Klärschlamm-Mineralisierungsanlage
Sachsen-Anhalt	Anlage zur Phosphatdüngerproduktion aus Klärschlammasche (SERAPLANT Haldensleben)

nungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Dies deckt etwa 7 % des in der Studie geschätzten Gesamtklärschlammaufkommens von 1,5 Mio. t Trockenmasse pro Jahr bei der direkten Rückgewinnung ab, während im Bereich der Verbrennungsmasse rund 34 % abgedeckt werden könnten. Insgesamt werden somit bei Realisierung der zum Zeitpunkt Sommer 2023 bekannten Projekte maximal etwa 41 % des Klärschlammaufkommens mit den vorhandenen Kapazitäten versorgt, sodass für rund 59 % bislang keine Möglichkeiten zur Phosphor-Rückgewinnung bestehen [38]. Es sei an der Stelle auf den Abschlussbericht des UBA-geförderten Projekts „Evaluierung verfügbarer Kapazitäten thermischer Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphor-Rückgewinnung“ von der RWTH Aachen verwiesen, der die Situation detaillierter beleuchtet.

Aufgrund der bisher noch nicht vorliegenden Langfristerfahrungen und vielfach nur im halbtechnischen oder Pilotmaßstab vorliegenden Betriebserfahrungen haben viele Kläranlagenbetreiber ihren Verfahrensweg der Phosphor-Rückgewinnung noch nicht final festgelegt, sodass bundesweit noch erheblicher Handlungsbedarf besteht. Eine Umfrage der Deutschen Phosphor-Plattform aus dem Jahr 2022 ergab, dass ca. 40 % der befragten Kläranlagenbetreiber noch nicht wussten oder keine Angabe machten, wie sie die Phosphor-Rückgewinnung in der Zukunft verfolgen wollen [12].



**Abbildung 4: Kapazitätsvergleich der Phosphor-Rückgewinnung (eigene Darstellung nach [37]).**

Nach aktuellen Prognosen werden die Kapazitäten für die thermische Vorbehandlung wohl knapp erreicht werden, die Kapazitäten für die Phosphor-Rückgewinnung dagegen 2029 nicht ausreichend vorhanden sein [28].

## 2 BMFTR-Fördermaßnahme Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR)

Die Bundesregierung hat die Rückgewinnung von Phosphor bereits 2016 im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes II) als wichtigen Baustein zur Etablierung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft verankert und mit der im Oktober 2017 in Kraft getretenen Novellierung der Klärschlammverordnung die gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen. Daraus resultierte ein großer Bedarf an wirtschaftlichen und nachhaltigen Lösungen zur P-Rückgewinnung. Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2018 die Bekanntmachung zur Fördermaßnahme „Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR)“ vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) veröffentlicht (siehe Abbildung 5). RePhoR ist Teil der BMFTR-Strategie „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA, [www.fona.de](http://www.fona.de)) und adressiert darin vor allem die Aspekte der nachhaltigen Nutzung von Ressourcen und der stärkeren Schließung von Stoffkreisläufen.

Ziel der Fördermaßnahme RePhoR ist es, durch innovative wirtschaftliche Lösungen zum regionalen P-Recycling einen Beitrag zur Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung zu leisten. Durch die daraus resultierende verstärkte Nutzung von Sekundärphosphor aus der Kreislaufwirtschaft sollen der Verlust von Phosphor und die Abhängigkeit Deutschlands von Phosphorimporten maßgeblich verringert werden. Die Entwicklung und Umsetzung von innovativen Technologien zur Ressourceneffizienz nehmen dabei einen hohen Stellenwert ein. In RePhoR werden hierzu verschiedene Technologien zur P-Rückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungssasche großtechnisch umgesetzt und wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse und praktische Erfahrungen unter realen Bedingungen gesammelt. Es wird regional die Lücke zwischen P-Rückgewinnung und

P-Recycling geschlossen und der rückgewonnene Phosphor über die Landwirtschaft in den Nährstoffkreislauf oder als Rohstoff in die Industrie zurückführt.

Die Ergebnisse und Erfahrungen aus den Realisierungen des regionalen P-Recyclings innerhalb von RePhoR sollen die relevanten Entscheidungsträger (in der Wasserwirtschaft) dabei unterstützen, das aus der AbklärV resultierende P-Rückgewinnungsgebot in Ihrer jeweiligen regionalen Einheit wirtschaftlich und nachhaltig umzusetzen. Sie dienen als Vorbild für andere Regionen mit vergleichbaren Bedingungen.

Die Fördermaßnahme RePhoR ist in 2 Phasen aufgeteilt (siehe Abbildung 5). Die 6-monatige erste Phase („Konzeptphase“) mit 19 geförderten Projekten endete im Juli 2019. Die Schwerpunkte lagen im Bereich der Planung und Vorbereitung der regionalen Konzepte. Aus den daraus eingereichten Konzepten zum regionalen P-Recycling wurden die sieben besten für die bis zu 6-jährige Umsetzungsphase zur Realisierung ihrer Konzepte ausgewählt. Diese Verbundprojekte starteten ab Juli 2020. Sie bestehen aus mehreren Teilprojekten und Arbeitspaketen, in denen die Konsortien aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis miteinander die Aufgaben und Zielsetzungen der Fördermaßnahme umsetzen. Die geografischen und strukturellen Ausgangsbedingungen der Verbundprojekte (z.B. ländliche Regionen und Ballungsgebiete) wurden mit Bedacht so heterogen ausgewählt, dass unterschiedliche regionale Gegebenheiten sowie Aufbereitungs- und Verwertungspfade untersucht werden (siehe Abbildung 7).

Innerhalb der Umsetzungsphase lag der Schwerpunkt auf folgenden Aspekten, die von allen Umsetzungsprojekten berücksichtigt werden mussten:

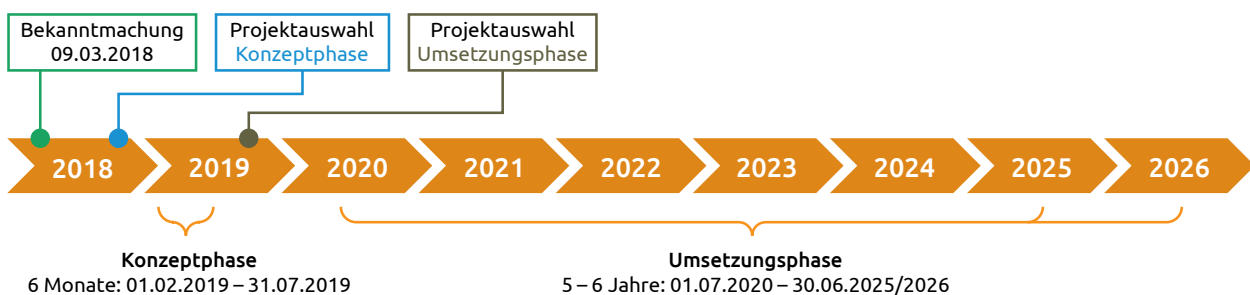


Abbildung 5: Zeitrahmen der BMFTR-Fördermaßnahme RePhoR.



## Regionaler Ansatz

Die spezifischen örtlichen Gegebenheiten und Infrastrukturen der Abwasserreinigung und Klärschlammverwertung sowie möglichst kurze Transportwege für Klärschlämme, Klärschlammverbrennungsgaschen und Phosphor-Rezyklate werden berücksichtigt. Ferner ist die Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette wichtig, um den rückgewonnenen Phosphor regional über die Landwirtschaft in den Nährstoffkreislauf oder als Rohstoff in die Industrie zurückzuführen. Dabei wird darauf geachtet, dass alle regional relevanten Agierenden aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Gesellschaft von Anfang an mit eingebunden werden (z. B. potenzielle Abnehmer der Phosphor-Rezyklate oder Genehmigungsbehörden).

## Großtechnische P-Rückgewinnung

Es werden Verfahren zur P-Rückgewinnung unter realen Bedingungen für verschiedene Anlagengrößen und -typen großtechnisch umgesetzt. Im Fokus stehen dabei die P-reichen Stoffströme Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungsgasche. Möglich ist auch die Einbindung von bestehenden Anlagen zur P-Rückgewinnung in die regionalen Konzepte. Die Erfahrungen aus großtechnischen Umsetzungen sind essenziell, um die Produktqualität der Phosphor-Rezyklate sowie Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb und die Klärschlammmentsorgung vernünftig beurteilen zu können.

## Qualität der Phosphor-Rezyklate

Es werden Qualitätsuntersuchungen der erzeugten Phosphor-Rezyklate durchgeführt, als eine wichtige Voraussetzung für dessen Akzeptanz bei potenziellen Abnehmern. Denn nur wenn sie in guter Qualität, kontinuierlich und in ausreichender Menge erzeugt werden, können sie sich am Markt durchsetzen. Je nach Verwendungszweck müssen dabei unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden. Bei einer Verwendung als Düngemittel zum Beispiel ist eine gute Pflanzenverfügbarkeit bei Einhaltung aller rechtlicher Vorgaben entscheidend.

## Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und Bilanzierungen

Innerhalb der regionalen Konzepte und Umsetzungen sollen möglichst wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen zum P-Recycling realisiert werden. Zur Abschätzung werden hierfür Wirtschaftlichkeitsanalysen und Ökobilanzierungen mit etablierten Verfahren durchgeführt.

## RePhoR (Umsetzungsphase) in Zahlen

- » **Laufzeit:** 5–6 Jahre (Start: 01.07.2020)
- » **Anzahl Verbundprojekte:** 7
- » **geförderte Verbundpartner:** 59
- » **Fördervolumen:** ca. 32 Mio. €

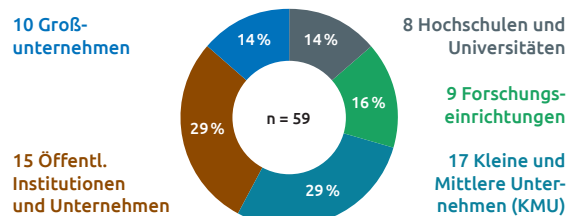
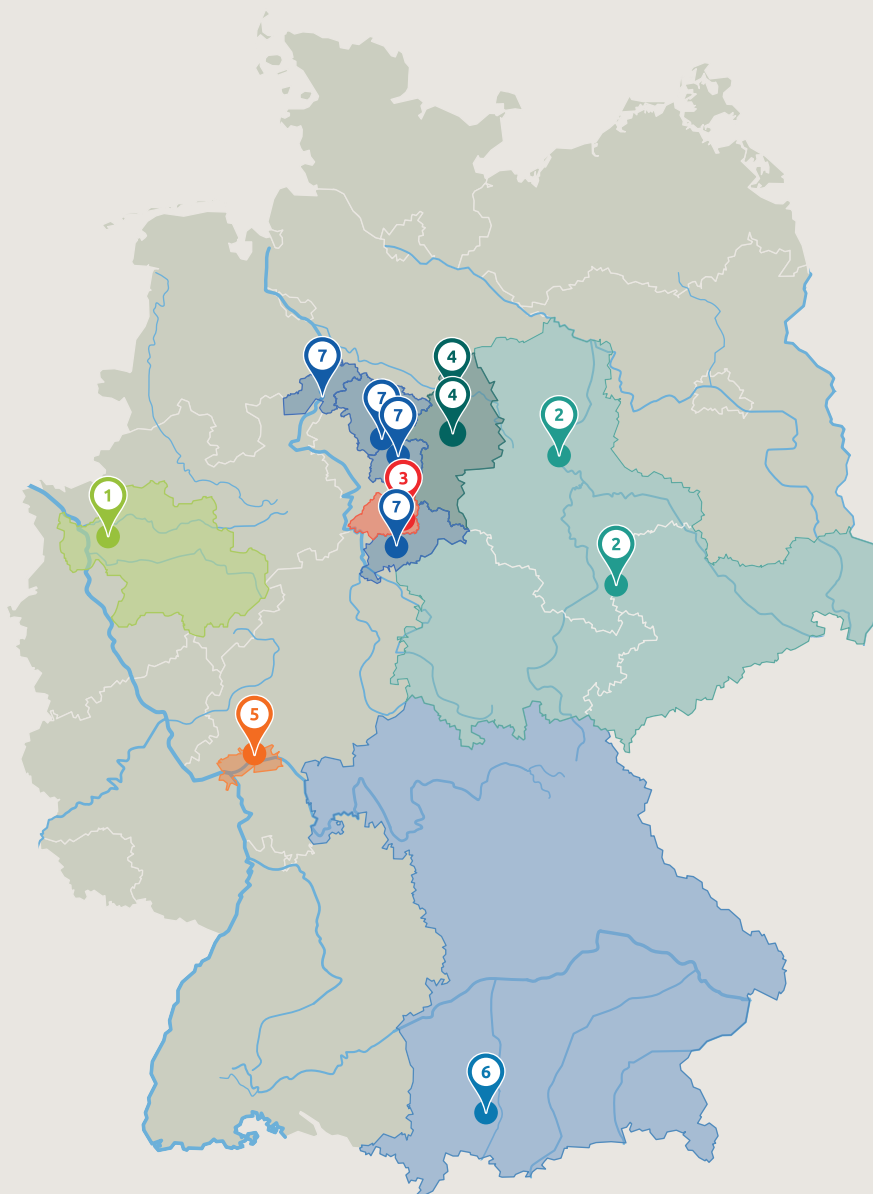


Abbildung 6: Übersicht zur Umsetzungsphase der Fördermaßnahme RePhoR. © Projektträger Karlsruhe

Die Fördermaßnahme RePhoR wird über die gesamte Laufzeit durch das Vernetzungs- und Transfervorhaben TransPhoR (Koordination: Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e.V.) begleitet, das inhaltliche und organisatorische Aufgaben wahrnimmt. Wesentliche Ziele sind die Synthese und Aufbereitung der Ergebnisse aus den Umsetzungsprojekten für unterschiedliche Zielgruppen, die öffentlichkeitswirksame Darstellung der Fördermaßnahme sowie die Vernetzung mit entsprechenden nationalen und internationalen Aktivitäten. Zusätzlich bearbeitet es auch übergeordnete fachliche Fragestellungen. Hier geht es etwa um die Weiterentwicklung standardisierter Prüfverfahren und Produktkriterien für P-Rezyklate (siehe Kapitel 4.5), die Beurteilung von Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz der entwickelten Verfahren (siehe Kapitel 6.1 und Kapitel 6.3) sowie um rechtliche Rahmenbedingungen des P-Recyclings (siehe Kapitel 5).

Darüber hinaus wurde ein Lenkungskreis zur Fördermaßnahme eingerichtet, der sich aus den Koordinatorinnen und Koordinatoren der Verbundprojekte und des Vernetzungsvorhabens sowie Expertinnen und Experten aus Wirtschaft, Verbänden, Behörden und Ressorts zusammensetzt. Er dient der projektübergreifenden Vernetzung zwischen den Forschungsprojekten, der Diskussion übergreifender Fragestellungen sowie für Impulse aus der Praxis. Dabei wurden unter anderem die Querschnittsthemen „Produkte und Märkte“, „Nachhaltigkeitsbewertung“ und „Rechtliche Aspekte“ definiert, an denen alle Umsetzungsprojekte im Verlauf der Fördermaßnahme zusammenarbeiten. Die Ergebnisse fließen in die Kapitel 4, 5 und 6.

## 2.1 Verbundprojekte



- 1 AMPHORE**  
Regionales Klärschlamm- und Aschen-Management zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum  
Koordinatorin: Hanna Evers (Ruhrverband, Essen)
- 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)
- 3 KlimaPhoNdS**  
Klimaneutrale und reststofffreie Klärschlammverwertung mit Phosphorsäureproduktion in Südost-Niedersachsen  
Koordinator: Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers (TU Clausthal)
- 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)
- 5 RePhoRM**  
Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main- Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe  
Koordinator: Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart (TU Darmstadt)
- 6 R-Rhenania**  
Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern  
Koordinator: Dr.-Ing. Christian Adam (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin)
- 7 SATELLITE**  
Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling  
Koordinatorin: Dr.-Ing. Maike Beier (LU Hannover)

Abbildung 7: Übersicht zu den sieben RePhoR-Verbundprojekten der Umsetzungsphase mit Projektregionen (farbige Flächen) und (großtechnischen) Versuchsstandorten.

## 2.1.1 AMPHORE

### Ziel des Verbundprojekts

Ziel in AMPHORE ist die Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts für die zukunftssichere Gestaltung der Phosphor-Rückgewinnung in der Projektregion. Neben der technischen Demonstration der Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen stehen damit einhergehende Fragestellungen im Fokus. Dies sind insbesondere die regionale Verwertung der Produkte und Co-Produkte sowie der Umgang mit Reststoffen, die ökonomische und ökologische Bewertung, ein Konzept zum Klärschlamm- und Aschen-Management sowie die Betrachtung möglicher Zukunftsszenarien des Konzepts.

### Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

In dem Vorhaben „Regionales Klärschlamm- und Aschen-Management zum Phosphor-Recycling für einen Ballungsraum“ (AMPHORE) erarbeiten erstmals fünf sondergesetzliche Wasserverbände in Nordrhein-Westfalen gemeinsam ein umfassendes, regionales Lösungskonzept zum Phosphor-Recycling für einen der größten und vielschichtigsten Ballungsräume in Deutschland. Dafür wird ein öffentlich-rechtlich organisiertes Management- und Betriebskonzept über die gesamte Wertschöpfungskette

bis hin zum Phosphor-Rezyklat als integraler Bestandteil der Klärschlammverwertung entwickelt. Die fünf Wasserverbände gründeten dazu die gemeinsame PhosRec Phosphor-Recycling GmbH als beispielhaftes Organisationsmodell für eine öffentlich-rechtliche Kooperation. Diese führt die Phosphor-Rückgewinnung inklusive Schwermetallausschleusung mit der nasschemischen aschebasierten PARFORCE-Technologie® in einer großtechnischen Demonstrationsanlage durch. Die dabei in anwendungsspezifischen Qualitäten erzeugte Phosphorsäure ermöglicht eine Demonstration der regionalen Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Industriezweigen. Um sowohl eine möglichst hochwertige Verwertung als auch eine weitestgehende Entsorgungssicherheit garantieren zu können, werden auch Qualitäten und mögliche Verwertungspfade der Nebenprodukte und Reststoffe betrachtet. Durch die Entwicklung eines verbandsübergreifenden Klärschlamm- und Aschen-Managements sollen zukünftig sowohl schwach als auch hoch mit Schadstoffen belastete Klärschlämme spezifisch geeigneten Verwertungspfaden zugeführt werden, um ein umweltgerechtes Recycling des enthaltenen Phosphors zu ermöglichen. Mit der erfolgreichen Umsetzung des Konzepts sollen exemplarisch Wege zur Lösung der hochkomplexen rechtlichen, organi-

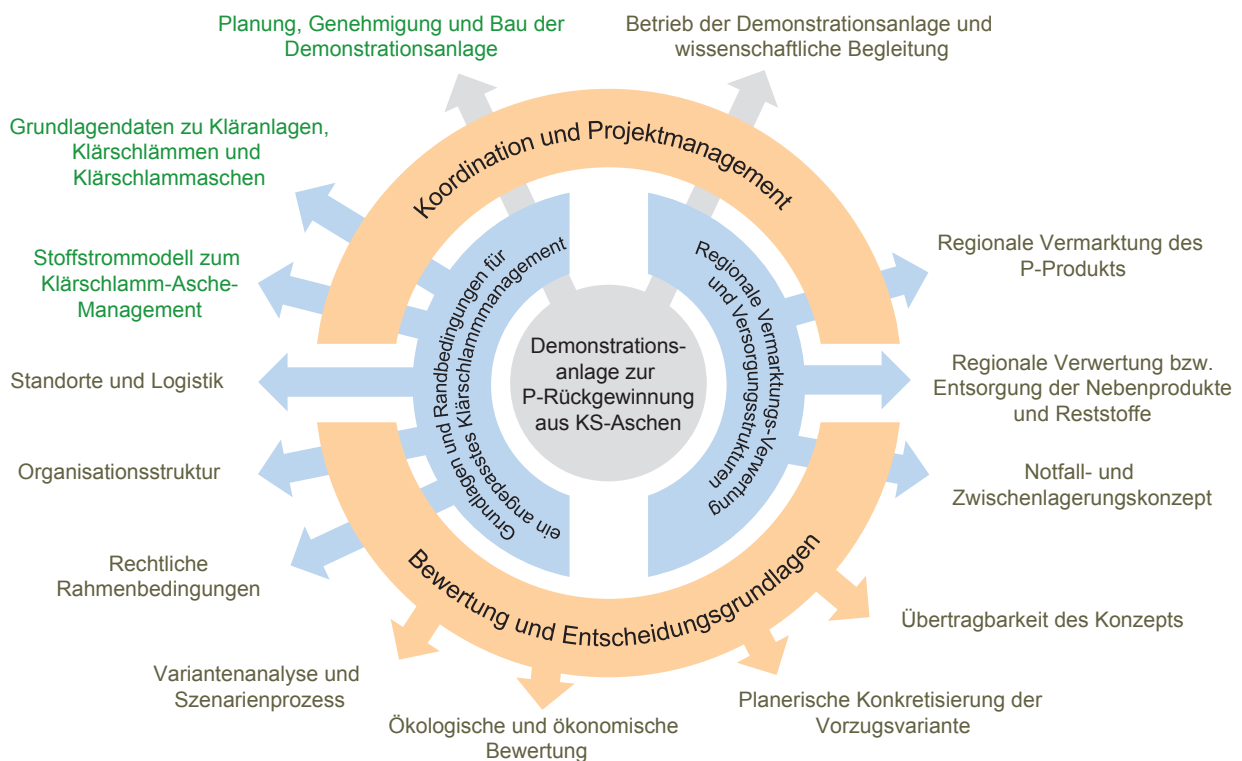


Abbildung 8: Schematische Übersicht der AMPHORE-Projektstruktur und -Inhalte (grüne Arbeiten = abgeschlossen).

satorischen, logistischen und wirtschaftlichen Herausforderungen demonstriert werden. Die für die Projektregion ausgewählte Vorzugsvariante soll in eine konkrete Planung für eine sich anschließende, langfristig angelegte Umsetzung überführt werden.

Die beteiligten Wasserverbände bzw. die zugehörigen Verbrennungsanlagen verfügen über eine große Menge Klärschlamm bzw. Klärschlammasche unterschiedlicher Qualität in einem verhältnismäßig geringen Umkreis. Diese Ausgangssituation hat zu der Idee geführt, ein verbandsübergreifendes Klärschlamm- und Asche-Management zu konzipieren. Das Entsorgungsregime aus konventioneller Abwasserbehandlung und einer thermischen Klärschlammverwertung soll dabei nicht grundsätzlich in Frage gestellt werden. Neben dem PARFORCE-Prozess werden zwei weitere Verfahrensansätze in den Untersuchungskonzepten berücksichtigt, die prozesstechnisch etwas weniger aufwendig sind, dafür jedoch geringere Schadstoffgehalte im Input erfordern. Das Stoffstrommanagement zielt darauf ab, von der Abwasserreinigung bis zur Verwertung der Produkte und Reststoffe Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren sowie verschiedene Varianten einer optimierten Prozesskette zu entwickeln und zu bewerten. Am Ende erfolgt zudem eine Rückkopplung aus dem Pilotanlagenbetrieb des PARFORCE-Prozesses, um das Stoffstrommanagement mit erarbeiteten Realdaten zu aktualisieren.

## Standortspezifische Randbedingungen

Das Vorhaben AMPHORE befasst sich mit der Konzeptionierung der Phosphor-Rückgewinnung im Einzugsgebiet von Ruhrverband (RV), Emschergenossenschaft (EG), Lippeverband (LV), Wupperverband (WV) und der Linksniederrheinische-Entwässerungs-Genossenschaft(LINEG). Insgesamt umfasst das Einzugsgebiet eine Fläche von 11.658 km<sup>2</sup> mit 9,42 Mio. Einwohnern. Allein im dicht besiedelten urbanen und industriell geprägten Kernbereich des Projektgebietes („Ruhrgebiet“) leben rund 55% der Bevölkerung, was zu einer Einwohnerdichte von bis zu 2.000 Einwohnern/km<sup>2</sup> führt. Relevante Wirtschaftszweige sind u.a. produzierendes Gewerbe (Metall, Chemie, Lebensmittel), Logistik und der Dienstleistungssektor. Umgeben wird der Ballungsraum von kleineren, dünner besiedelten Kommunen mit einer mittel- und kleingewerblichen sowie land- und forstwirtschaftlichen Nutzung (vgl. Abbildung 9).

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.

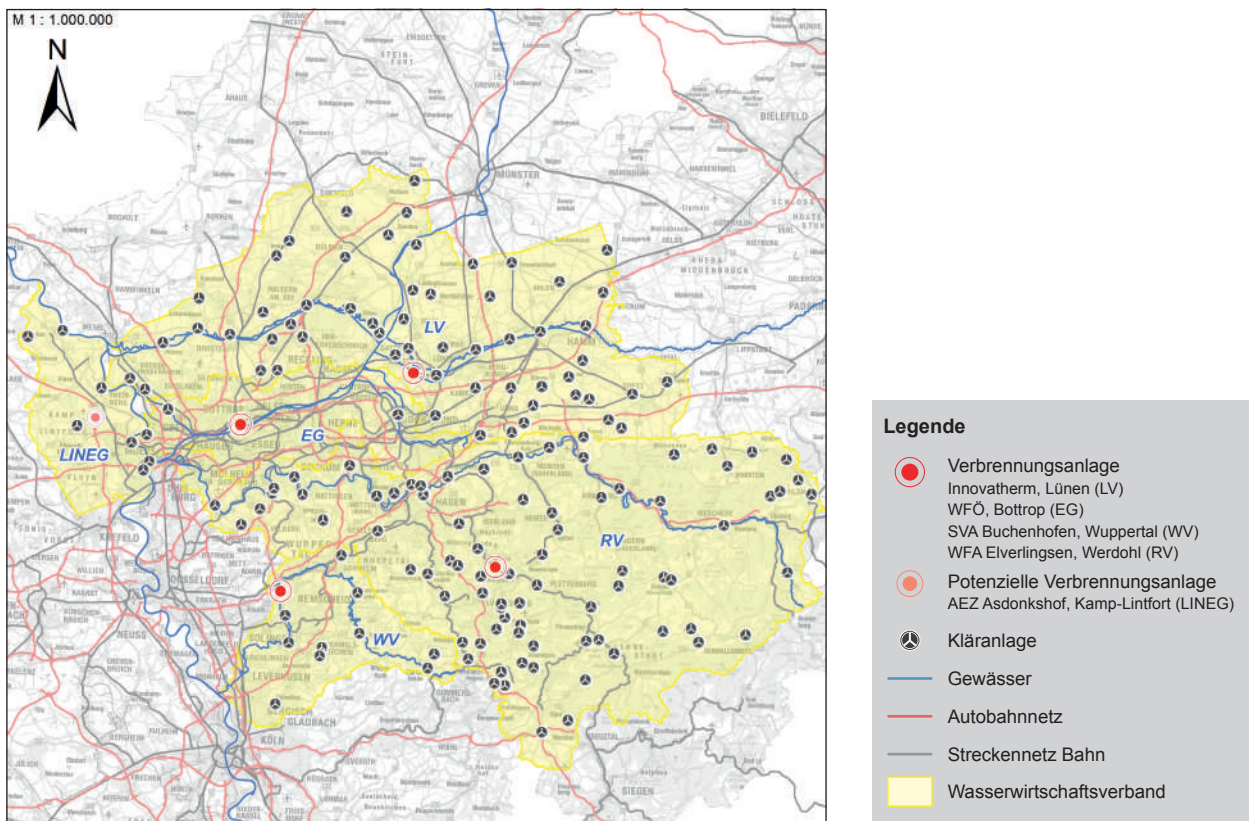


Abbildung 9: Projektgebiet des AMPHORE-Verbundprojekts. © AMPHORE

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. Hierbei führen insbesondere die Parameter Cadmium und Nickel zu Überschreitungen der Grenzwerte. Des Weiteren werden die Blei-, Chrom- und Selen-Gehalte gegenüber dem Mittelwert deutscher Klärschlammaschen zum Teil deutlich überschritten. Daher werden die betrachteten Klärschlämme ausschließlich in den vier derzeitigen vorhandenen und zukünftig fünf verbandseigenen Monoverbrennungsanlagen thermisch verwertet. Außerdem werden an drei Verbrennungsstandorten zusätzlich Schlämme weiterer Betreiber verbrannt. In Summe werden voraussichtlich ab 2029 100.000 – 120.000 t Klärschlammaschen anfallen. Der durchschnittliche Phosphorgehalt beträgt bis zu 6 %, was bei einer Rückgewinnungsquote von 80 % einem Rückgewinnungspotenzial 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.

**Tabelle 3: Steckbrief AMPHORE-Projekt Daten**

## AMPHORE

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



Untersuchungsstandort  
**Bottrop**

**Koordination**  
**Ruhrverband**  
 Kronprinzenstraße 37, 45128 Essen  
**Hanna Evers, M. Sc.**  
 Tel. +49 201 178-2380  
 hev@ruhrverband.de

**Projektpartner**

- » Emschergenossenschaft | Lippeverband
- » Wupperverband
- » Linksniederrheinische Entwässerungs-Genossenschaft
- » Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen University (ISA)
- » Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
- » Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH (ifeu)
- » Emscher Wassertechnik GmbH
- » Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH
- » PhosRec Phosphor-Recycling GmbH

**Assoziierte Partner**

- » BETREM GmbH
- » INNOVATHERM Gesellschaft zur innovativen Nutzung von Brennstoffen mbH
- » WFA Elverlingsen GmbH
- » SF-SoepenberG GmbH
- » Yara GmbH & Co. KG
- » WKW GmbH & Co. KG
- » COMPO EXPERT GmbH
- » Wocklum GmbH & Co. KG

**Verbundprojekt-Webseite**  
[www.ruhrverband.de/wissen/projekt-amphore/](http://www.ruhrverband.de/wissen/projekt-amphore/)

**Laufzeit**  
 01.07.2020 – 30.06.2026

## 2.1.2 DreiSATS

### Ziel des Verbundprojekts

Ziel des Verbundprojektes DreiSATS ist die praxisnahe, prototypische Erprobung und Demonstration einer innovativen, wirtschaftlich und technisch tragfähigen sowie dezentralen Prozesskette zur thermischen Klärschlammverwertung mit Phosphor-Recycling und Produktverwertung. Beteiligt sind neben dem Projektkoordinator Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH (VKD) die Projektpartner Carbotechnik GmbH, LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH, Pontes Pabuli GmbH sowie die Forschungseinrichtungen Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme (IKTS) und Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA).

### Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

Im technisch relevanten Maßstab soll für die Modellregion "Mitteldeutsches Dreiländereck" gezeigt werden, dass marktfähige Düngerprodukte aus Klärschlämmen in gleichbleibend guter Qualität und Menge erzeugt werden können.

Die regionale thermische Verwertung mittels der Staubfeuerung von Carbotechnik ist die erste Prozessstufe der Verwertungsstrategie. Zur Vermeidung der bei zentralen großen Anlagen oftmals vorhandenen Probleme wie hohes Transportaufkommen und mangelnde Akzeptanz in der Bevölkerung wird der Ansatz einer dezentralen Verbrennung mit geringerer Leistung verfolgt.

Die Herstellung standardisierter Düngeprodukte erfolgt mittels Säureaufschlussgranulation nach dem Pontes Pabuli-Verfahren. Hierbei werden die Phosphate durch Zugabe von Säure aufgeschlossen und können anschließend mit zusätzlichen Nährstoffkomponenten zu Düngegranulaten weiterverarbeitet werden.

Bei den Entwicklungen in DreiSATS liegt ein Hauptaugenmerk auf der prozessintegrierten Schwermetallabscheidung in der Staubfeuerung bzw. Säureaufschlussgranulierung. Dies garantiert eine hohe Produktqualität unabhängig von den Eigenschaften der eingesetzten Klärschlämme.

Das Konzept legt besonderen Wert auf die regionale und nachhaltige Verwertung der anfallenden Klärschlämme, eine Schadstoffreduzierung und die Schließung der regionalen Nährstoffkreisläufe mit einem möglichst geringen Transportaufwand. Eine zukunftssichere Klärschlammverwertungsstrategie bei gleichzeitig maximaler Entsorgungssicherheit und größtmöglicher Wirtschaftlichkeit soll gewährleistet werden.

Zur erfolgreichen Umsetzung der komplexen Projektaufgaben innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens wurde ein strukturierter Arbeitsplan erstellt, der in Abbildung 11 dargestellt ist.

### Standortspezifische Randbedingungen

Im Vergleich zu den aktuell favorisierten Ansätzen zur thermischen Klärschlammverwertung mit zentralen Wirbelschichtverbrennungsanlagen mit Kapazitäten um 25.000 t TS/a und deutlich darüber können Anlagen mit der Carbotechnik-Staubfeuerung bereits ab einer Kapazität von etwa 2.000 t TS/a wirtschaftlich betrieben werden. Die Leistungsregelung ist stufenlos über einen großen Bereich möglich. Schwankungen im Inputmaterial können ausgeglichen werden. Aus diesem Grund wurde in DreiSATS die regionale thermische Verwertung als Kernelement der Verwertungsstrategie verfolgt.

Aufgrund der kleineren Baugröße können die Staubfeuerungsanlagen zum Beispiel direkt auf dem Gelände der Kläranlagen bzw. in größeren Industriegebieten, welche bereits eine gute Verkehrsanbindung haben, errichtet werden.

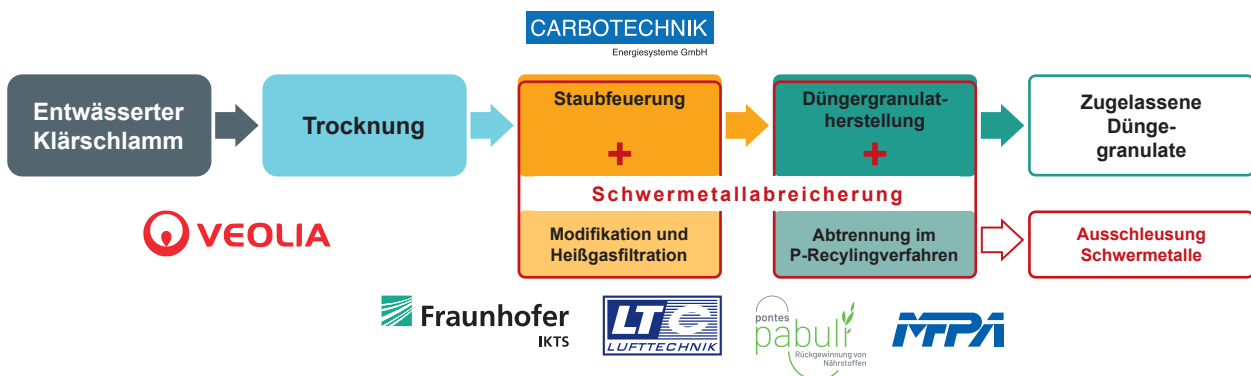


Abbildung 10: Technologiekette im Verbundprojekt DreiSATS. © DreiSATS



Abbildung 11: Schematische Übersicht der DreisATS-Projektstruktur und -Inhalte (grüne Arbeiten = abgeschlossen).

Im Rahmen des Projekts wurde für die Standortwahl ein innovatives, GIS-basiertes Softwaretool entwickelt. Dieses Tool ermöglicht es, die für ein wirtschaftliches regionales P-Recycling-Konzept entscheidenden Faktoren wie Standortbedingungen, lokales Klärschlammauftreten sowie den landwirtschaftlichen Nährstoffbedarf schnell und präzise für verschiedene Szenarien zu kombinieren. Das Softwaretool enthält detaillierte Informationen zu allen Kläranlagen in der betrachteten Region, Logistikeckpunkte, z. B. optimale Verkehrsverbindungen, Randbedingungen der Düngervermarktung (z. B. verfügbare landwirtschaftli-

che Nutzflächen, Nährstoffbedarf) sowie zur Vermarktung von Nebenprodukten, wie Wärme oder Strom.

Diese umfassende Datenbasis dient als Grundlage für die Standortauswahl, die Entwicklung des Logistikkonzepts sowie die Dimensionierung zukünftiger Klärschlamm-Verbrennungsanlagen und Phosphor-Recycling-Einrichtungen. Im Ergebnis zeigte sich, dass die zu betrachtete Region Mitteldeutschland stark ländlich geprägt ist. Aus der Analyse ergibt sich außerdem, dass der aktuelle Phosphatbedarf in der DreisATS-Modellregion zu ca.

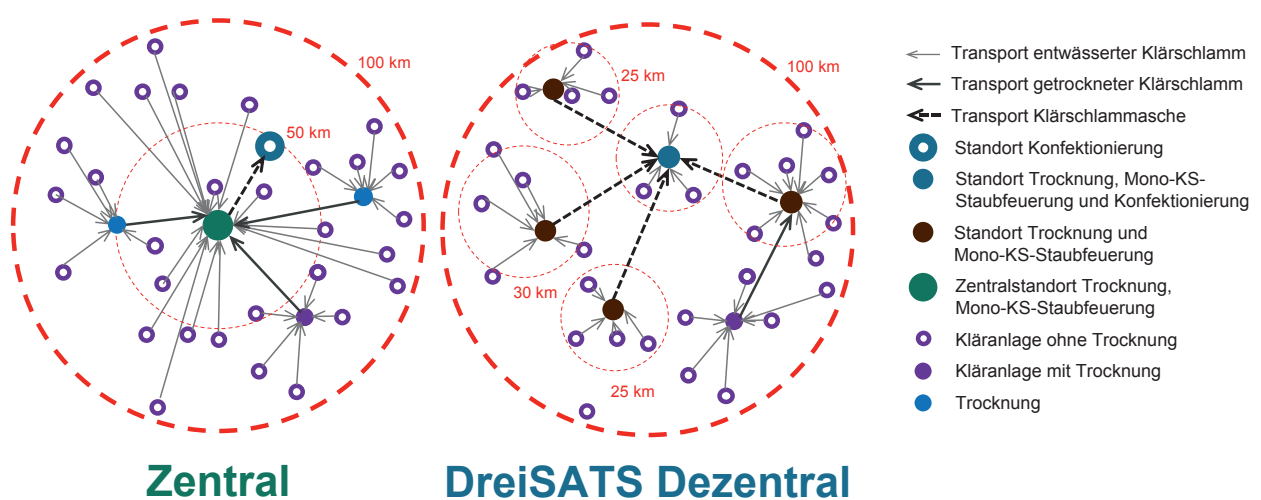
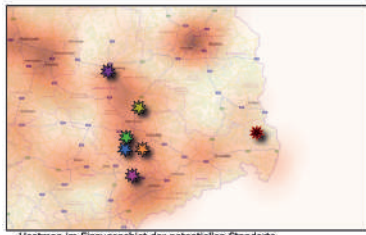


Abbildung 12: Vergleich zentraler und dezentraler Ansatz des regionalen Phosphor-Recycling. © IKTS



- potentielle Standorte P-Recycling
- Boxberg
  - Ronneburg
  - Zorbau
  - Magdeburg
  - Bitterfeld-Wolfen
  - Böhlen-Lippendorf
  - Leuna

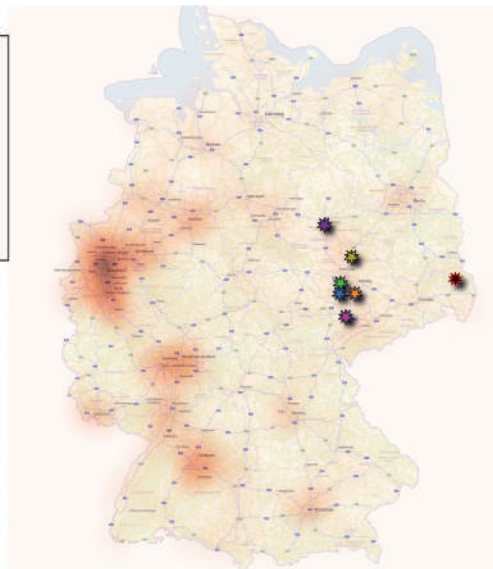


Abbildung 13: Heatmap der Kläranlagenstandorte über 50.000 EW in Deutschland. © Veolia

60% mit dem regional anfallenden Klärschlamm bzw. entsprechend aufbereiteten Recyclaten gedeckt werden könnte. Es zeigte sich, dass sowohl bei den Nährstoff- als auch bei den Schadstoffkonzentrationen im Klärschlamm kläranlagenspezifische sowie jahreszeitliche Schwankungen auftreten, welche bei der Auslegung der Anlagen zur Verbrennung und zum P-Recycling Berücksichtigung finden müssen.

Durch spätere Erweiterung mit Datensätzen auf anderen Regionen bildet es die optimale methodische Voraussetzung für die Übertragung des gewählten technologischen als auch organisatorischen Ansatzes von DreiSATS.

Neben der Datenanalyse erfolgte eine umfangreiche Stakeholderanalyse mit allen relevanten Stakeholdergruppen entlang der gesamten Prozesskette von der Klärschlammherzeugung über die Verwertung bis hin zur Nutzung der Recyclate. Hierzu wurden 8 Stakeholder Workshops durchgeführt.

Im Zuge der Projektarbeit wurde eine Heatmap erstellt, die die Kläranlagenstandorte und deren Eigenschaften in ganz Deutschland visualisiert.

Diese Karte ermöglichte einen detaillierten Vergleich von sechs potenziellen Standorten und deren Einzugsgebieten, was eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die weitere Planung lieferte.

Durch diesen datengestützten Ansatz in Kombination mit der Stakeholderanalyse gibt es eine solide Basis für die Standortwahl und -bewertung sowie zur Erarbeitung der jeweiligen Geschäftsmodelle.

Tabelle 4: Steckbrief DreiSATS-Projektdateien.



Untersuchungsstandorte  
**Magdeburg,  
 Markranstädt**



**Koordination**  
**Veolia Klärschlammverwertung  
 Deutschland GmbH**  
 Nordstraße 15  
 04420 Markranstädt  
**Matthias Hoger**  
 Tel.: +49 34205 738-19  
 matthias.hoger@veolia.com  
**Claudyn Kidszun**  
 Tel.: +49 163 73800-28  
 claudyn.kidszun@veolia.com

**Projektpartner**

- » Carbotechnik Energiesysteme GmbH
- » Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme IKTS
- » Lufttechnik Crimmitschau GmbH
- » MFPA Materialforschungs- und prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar
- » Pontes Pabuli GmbH

**Verbundprojekt-Webseite**  
[www.dreisats.de](http://www.dreisats.de)

**Laufzeit**  
 01.07.2020 – 31.12.2025



## 2.1.3 KlimaPhoNds

### Ziel des Verbundprojekts

Das Verbundprojekt KlimaPhoNds zielt auf die großtechnische Demonstration einer dezentralen und zugleich emissionsmindernden Phosphor-Rückgewinnung auf Kläranlagen unter Einhaltung des Grenzwertes von 20 gP/kg TM im entwässerten Klärschlamm. Neben dem im technischen Maßstab gewonnenen Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) werden im Pilotmaßstab durch Weiterverarbeitung von MAP auch die Produkte Phosphorsäure, Ammoniakwasser und Magnesiumchlorid gewonnen und bewertet.

### Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

Schwerpunkt des Projektes ist die Entwicklung und technische Erprobung einer Phosphor-Rückgewinnung am Standort der Kläranlage Northeim zur Einhaltung der zukünftig geltenden gesetzlichen Rückgewinnungspflicht. Entsprechend den Anforderungen des Betreibers wurden Lösungen für kläranlageninterne Betriebsumstellungen erarbeitet und kompakte, platzsparende Rückgewinnungstechniken entwickelt.

Die neue Verfahrenskombination nutzt neben dem rohstofflichen auch das energetische, emissionsmindernde Potenzial des Klärschlamm, indem eine nahezu „wärme-neutrale“ Volltrocknung erstmals eingesetzt wird. Ergebnisse aus Versuchen im Labor- und Technikumsmaßstab sind in die Planung und das Betriebskonzept der technischen Phosphor-Rückgewinnungsanlage eingeflossen.

Ein abschließender einjähriger Demonstrationsversuch im technischen Maßstab (TRL9) soll zeigen, dass ganzjährig eine gesicherte, zeitlich unabhängige Abreicherung des P-Gehalts im Klärschlamm erreicht werden kann.

Für das dabei gewonnene MAP werden zwei Verwertungswege untersucht und bewertet, einmal der Weg der direkten Verwertung als Düngemittel und einmal der Weg der Aufbereitung von MAP zu den drei genannten Produkten. Parallel hierzu erfolgen Untersuchungen und Betriebsoptimierungen zur Verbesserung der Produkt- bzw. Rohstoffqualität.

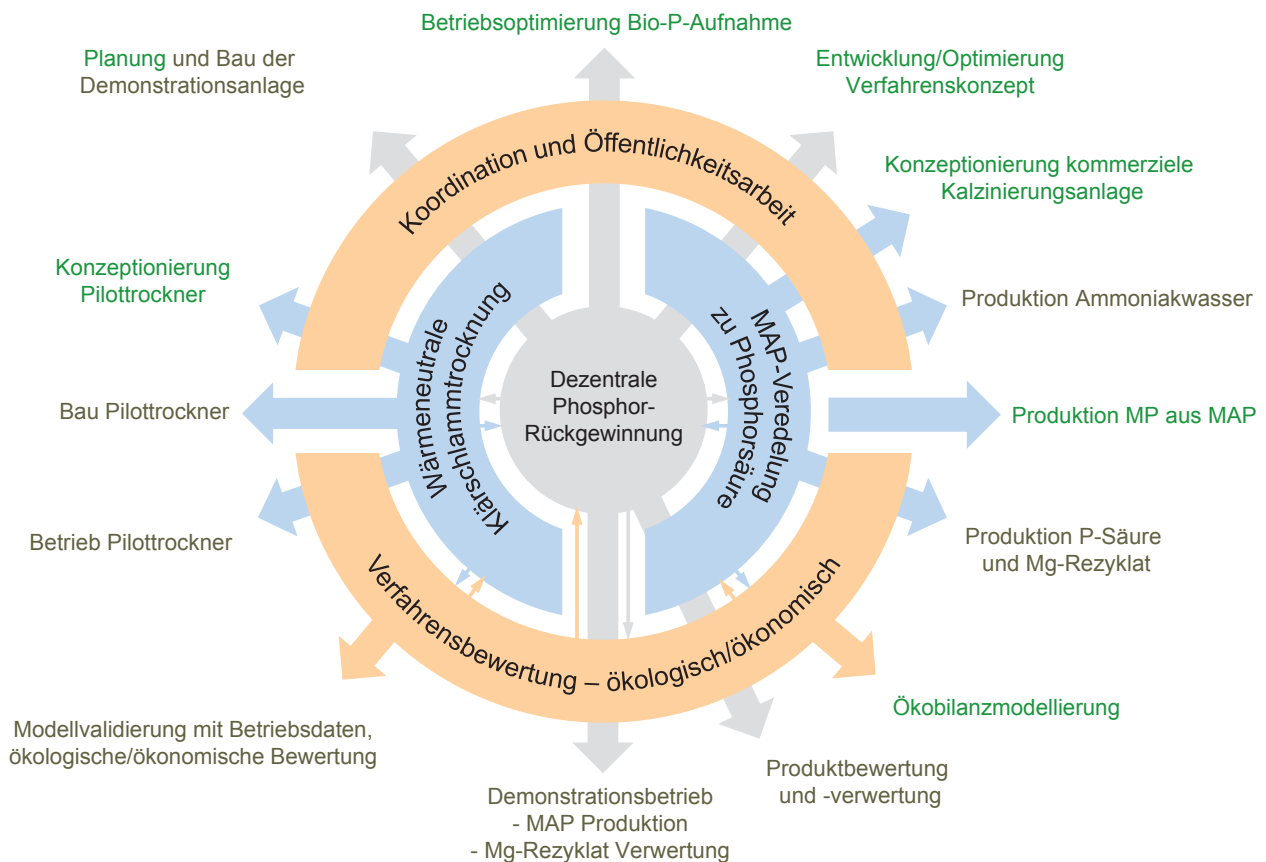


Abbildung 14: Schematische Übersicht der KlimaPhoNds-Projektstruktur und -inhalte (grüne Arbeiten = abgeschlossen).

Aus den Ergebnissen des Betriebsversuches wird eine technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung des entwickelten Verfahrens abgeleitet.

### Standortspezifische Randbedingungen

Die Region Northeim liegt im Süden Niedersachsens und ist überwiegend ländlich geprägt. Die Stadt Northeim hat etwa 30.000 Einwohner und die Umgebung ist mit einer Einwohnerdichte von 116 Einwohnern je km<sup>2</sup> eher dünn besiedelt. In der Region dominieren landwirtschaftliche Betriebe und mittelständische Unternehmen mit Schwerpunkt Nahrungsmittelproduktion, Maschinenbau und Dienstleistungen. Das Abwasser der Stadt Northeim und Umgebung wird von der städtischen Kläranlage (Eigenbetrieb) gereinigt. Der dabei entstehende Klärschlamm ist gering belastet und wird landwirtschaftlich verwertet. Mit einer Ausbaugröße von 75.000 EW unterliegt die Kläranlage zukünftig der P-Rückgewinnungspflicht. Die jährlich anfallende Klärschlammmenge ist mit rund 2.200 t vergleichsweise gering, weil die Abwasserfracht ca. 40.000 EW entspricht.

Die Kläranlage wurde mit einer teilweise biologischen Phosphorelimination und einer chemischen Nachfällung betrieben. Aufgrund des hohen Härtegrades des Trinkwassers im Einzugsgebiet (Karstgebiet) und der Schlamm-entwässerung auf Kalkbasis wurde bereits ein erheblicher Teil des Phosphats in der Vorklärung eliminiert. Die Phosphatelimination erfolgte zu 40 % mit dem Primärschlamm und zu 60 % mit dem Überschussschlamm, wobei der Überschussschlamm einen Bio-P-Anteil von ca. 60 % und einen Fällungs-P-Anteil von ca. 40 % aufwies.

Aufgrund der Ausgangssituation (kleine Kläranlage, geringe Schlammmenge, kein großer Abwasserverband, weite Transportwege, unsichere Kostensituation bei der Monoverbrennung) war der Betreiber offen für eine dezentrale Lösung zur P-Rückgewinnung aus dem Abwasser. Folgende Anforderungen wurden gestellt: Sicherer und einfacher Betrieb, zuverlässige Funktion, kein negativer Einfluss auf die Abwasserbehandlung, überschaubare Kostensituation.

Für dieses Anforderungsprofil lag eine ungünstige Verteilung der P-Bindungsformen vor, d. h. geringer Bio-P-Anteil und hoher chemisch gebundener P-Anteil. Ferner waren keine Anlagenteile oder Becken für eine P-Rückgewinnung nutzbar und wenig Platz für neue Baumaßnahmen vorhanden.

Für dieses Anforderungsprofil lag eine ungünstige Verteilung der P-Bindungsformen vor, d. h. geringer Bio-P-Anteil, hoher chemisch gebundener P-Anteil. Ferner waren keine Anlagenteile oder Becken für eine P-Rückgewinnung nutzbar und wenig Platz für neue Baumaßnahmen vorhanden.

Tabelle 5: Steckbrief KlimaPhoNds-Projektdateien.



**Untersuchungsstandort  
Northeim**

**Koordination**  
**CUTEC-Forschungszentrum der TU Clausthal**  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
**Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers**  
Tel.: +49 5323 72-6243  
michael.sievers@cutec.de

**Projektpartner**

- » TU Clausthal
- » Eigenbetrieb Abwasserbeseitigung Stadt Northeim
- » Knoke Industrie-Montagen GmbH
- » PARFORCE Engineering & Consulting GmbH
- » Lukson AG

**Assoziierte Projektpartner**

- » Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG
- » Schwenk Zement (Werk Bernburg)
- » HeidelbergCement

**Verbundprojekt-Webseite**  
[www.klimaphonds.de](http://www.klimaphonds.de)

**Laufzeit**  
01.10.2020 – 30.09.2025 (anvisiert bis 30.09.2026)

## 2.1.4 P-Net

### Ziel des Verbundprojekts

Das Forschungsprojekt P-Net hat es sich zur Aufgabe gemacht, eine nachhaltige und ganzheitliche Alternative zum P-Recycling durch die Ertüchtigung der „Struvit-Schiene“ anzubieten. Nachhaltig durch den bewussten Anspruch, ein möglichst betriebsmittelarmes und damit ressourcenschonendes Verfahren zu entwickeln, an dessen Ende ein hochwertiges P-Rezyklat für den Einsatz in der Landwirtschaft steht. Ganzheitlich, da das Projekt nicht nur die verfahrenstechnischen Aspekte auf Kläranlagen untersucht, sondern alle Akteure der Wertschöpfungskette über den Düngemittelhersteller bis zum späteren Anwender, dem Landwirt, im Projektdesign bereits mit einbezieht. Dadurch soll ein Netzwerk zur Förderung des regionalen P-Recyclings in der Region Harz und Heide aufgebaut werden. In dieser Region hat sich in den letzten 15 Jahren ein „Kristallisationspunkt“ für großtechnische Anlagen zur Struvit-Fällung auf kommunalen Kläranlagen herausgebildet. Um die bestehende Infrastruktur zu nutzen und auszubauen, hat sich das inter- und transdisziplinäre Projektkonsortium „P-Net“ formiert.

### Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

Das wissenschaftlich-technische Ziel von P-Net ist es, für die bereits etablierte Struvit-Verfahrensschiene Anpassungen und -Erweiterungen anzubieten, die insbesondere durch eine weitergehende biologische P-Remobilisie-

rung zu einer deutlichen Erhöhung der P-Recyclingquote beitragen und es damit Anlagenbetreibern ermöglichen, mit dieser Verfahrenstechnik direkt auf der Kläranlage die zukünftigen Anforderungen der Klärschlammverordnung hinsichtlich P-Recycling einzuhalten.

Gleichzeitig wird durch den integrierten Ansatz von P-Net gewährleistet, dass eine regionale Vermarktung der erzeugten Phosphor-Rezyklate möglich ist und die Ergebnisse des Vorhabens unmittelbar auf andere Standorte übertragen werden können.

### Standortspezifische Randbedingungen

Das Projekt P-Net ist in der Region Harz und Heide angesiedelt, in der bereits vor Projektbeginn eine gewisse Anzahl von Struvitfällungsanlagen existierten (vgl. Abbildung 16). Die ursprüngliche Motivation für den Bau vieler dieser Struvitanlagen war jedoch nicht das P-Recycling, sondern der Schutz von Anlagenkomponenten vor unkontrollierten Ausfällungen. Die übergeordnete Idee des P-Net-Projektes besteht darin, die Effizienz der P-Rückgewinnung über die Struvit-Schiene soweit zu steigern, dass bereits existierende sowie neue Struvit-Anlagen zukünftig die Anforderungen der AbfklärV bezüglich des P-Recyclings erfüllen können. Die Projektregion bietet daher ideale Voraussetzungen für den Aufbau eines Netzwerks zum P-Recycling über die Struvit-Schiene.

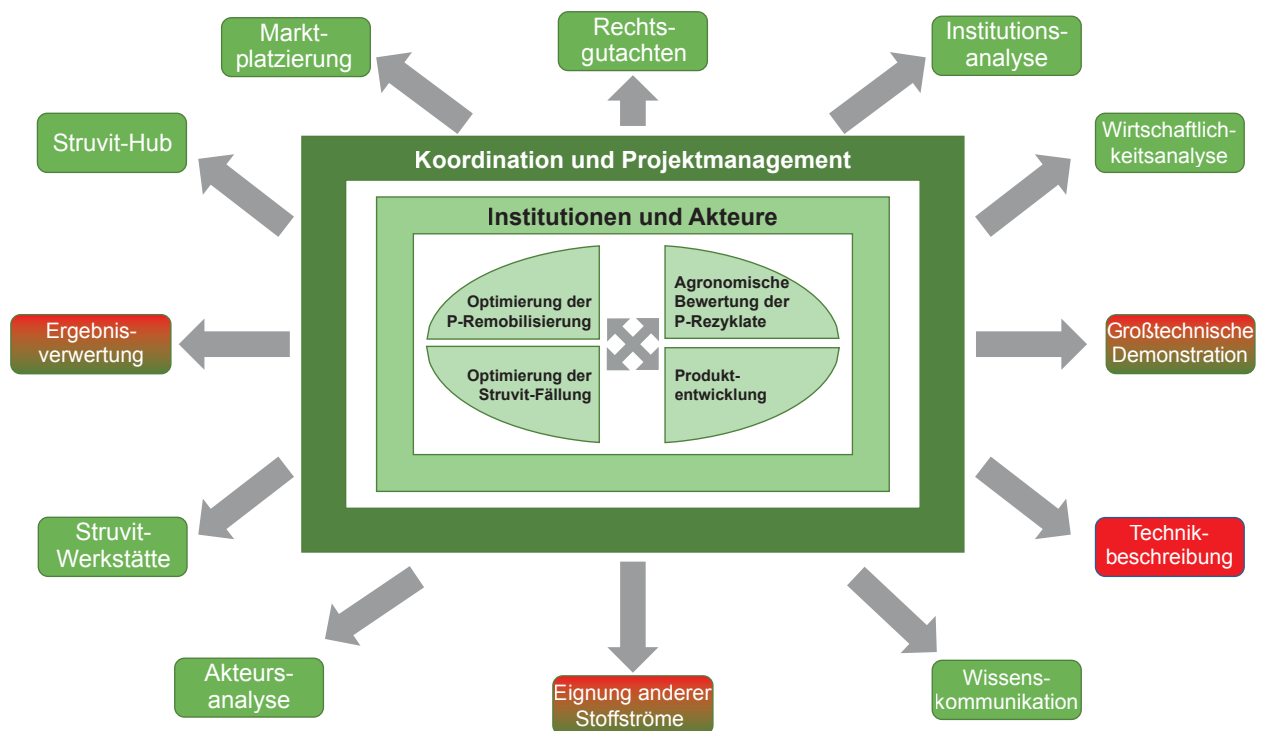


Abbildung 15: Schematische Übersicht der P-Net-Projektstruktur und -Inhalte (grüne Arbeiten = abgeschlossen).

Im Projektkonsortium von P-Net sind die kommunalen Kläranlagen Braunschweig und Gifhorn vertreten. Das Einzugsgebiet der beiden Standorte ist städtisch und maßgeblich kommunal geprägt. Dabei handelt es sich bei der Kläranlage Braunschweig um eine Anlage der Größenklasse (GK) 5 mit 350.000 EW und bei Gifhorn um eine Anlage der GK 4 mit 65.000 EW. Zudem verfügen die beiden Kläranlagen über unterschiedliche Verfahren zur P-Elimination. In Braunschweig geschieht dies hauptsächlich durch Bio-P, während die Elimination in Gifhorn hauptsächlich auf Eisenfällung basiert.

Das Peco-Konzept wurde für die Integration der P-Remobilisierungsstufe in die bestehende Anlagentechnik bei der Kläranlagen angepasst. Mit den Schlämmen dieser Anlagen wurden Optimierungsversuche im Labor- und Pilotmaßstab sowie im großtechnischen Maßstab durchgeführt. Die Erfahrungen und Erfolge dieser Untersuchungen können nachfolgend als Vorbild für die Optimierung weiterer Anlagen in der Region und darüber hinaus dienen. Die wichtigste Stellschraube zur Optimierung der P-Rückgewinnung über Struvit ist eine signifikante Erhöhung der P-Rücklösung aus dem Schlamm, gefolgt von einer effizienten Struvit-Fällung inklusive der Abtrennung des Fällproduktes.

Als regionale Besonderheit betreibt der Abwasserverband Braunschweig (AVB) ein bundesweit einzigartiges Wasserrecycling-Konzept (Braunschweiger Modell) zur Schaffung eines Wasser- und Nährstoffkreislaufs, so dass ein direkter Austausch zwischen Abwasserwirtschaft und Landwirtschaft bereits seit Jahrzehnten etabliert ist.



Abbildung 16: Übersicht der in der Region zwischen Harz und Heide vorhandenen Struvit-Anlagen (blau) und des etablierten Struvit-Hubs (rot). © ISWW

Diese Kontakte und Erfahrungen des Partners AVB zur regionalen Landwirtschaft werden genutzt, um im Rahmen des Projektes P-Net gemeinsam Lösungen für die Vermarktung von Düngemitteln in der Region zu erarbeiten. Der Partner Soepenbergl wird darüber hinaus durch den Aufbau eines regionalen Struvit-Hubs und einer entsprechend standardisierten Konfektionierung der anfallenden Struvite eine regionale Düngemittelverwertung für die Region etablieren.

Tabelle 6: Steckbrief P-Net-Projekt Daten.



**P-Net**



Untersuchungsstandort  
**Gifhorn,  
Braunschweig**

**Koordination**  
**Technische Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig**  
**Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW)**  
Pockelsstr. 2a  
38106 Braunschweig  
**Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Dockhorn**  
Tel.: +49 531 391 7937  
t.dockhorn@tu-braunschweig.de

**Projektpartner**

- » ISWW – Institut für Siedlungswasserwirtschaft
- » ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung GmbH
- » Julius-Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde (JKI)
- » Abwasserverband Braunschweig (AVB)
- » Stadtentwässerung Braunschweig GmbH (SE|BS)
- » Abwasser- und Straßenreinigungsbetrieb Stadt Gifhorn (ASG)
- » PFI-Planungsgemeinschaft GmbH & Co. KG
- » SF-Soepenbergl GmbH

**Verbundprojekt-Webseite**  
[www.p-net.tech/](http://www.p-net.tech/)

**Laufzeit**  
01.07.2020 – 31.03.2026

## 2.1.5 RePhoRM

### Ziel des Verbundprojekts

Das Verbundprojekt RePhoRM zielt im Einklang mit der hessischen Ressourcenschutzstrategie darauf ab, in einem nasschemischen Verfahren mit anschließender Sprühgranulation aus der Asche von Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen in der Metropolregion Frankfurt-RheinMain ein Düngemittelrezyklat zur Schließung des Nährstoffkreislaufs in der Landwirtschaft herzustellen. Zur Umsetzung dieser Strategie soll ein Phosphor-Recyclingverbund aus öffentlich-rechtlichen und privatwirtschaftlichen Partnern gegründet werden.

### Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

In Ballungsräumen wie der Metropolregion Frankfurt-RheinMain sind zur Sicherung der Klärschlamm Entsorgung in der Regel Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen (MKVA) nach der Wirbelschichttechnologie etabliert. Die aus der Verbrennung resultierenden Aschen weisen häufig erhöhte, nicht-düngemittelkonforme Schwermetallgehalte u. a. für Kupfer, Nickel oder Zink auf. Um diese Aschen und den darin enthaltenen Phosphor trotzdem als Rezyklate für den Einsatz in der Landwirtschaft zugänglich zu machen, wird im Projekt RePhoRM das etablierte PHOS4green-Verfahren der Glatt Ingenieurtechnik GmbH um eine vorgeschaltete Phosphorextraktion mit gleichzeitiger Schwermetallelimination erweitert. Als Standort

einer geplanten Phosphor-Recyclinganlage wurde der Industriepark Höchst in Frankfurt am Main ausgewählt, um Transportwege der Aschen zu minimieren (MKVA der Projektpartner im Umkreis von 20 km) und Synergieeffekte in der Medienversorgung (Energie, Wasser, Chemikalien) zu nutzen. Aufgrund vergaberechtlicher Herausforderungen in der Kooperation öffentlich-rechtlich und privatwirtschaftlich organisierter Partner und zur Sicherung der Investitionsentscheidung in die großtechnische Recyclinganlage wird die Gründung eines Recyclingverbunds in der Metropolregion rechtlich begleitet und bewertet.

### Standortspezifische Randbedingungen

Das Projekt RePhoRM ist im Ballungsraum der Metropolregion FrankfurtRheinMain mit ungefähr 2,4 Millionen Einwohnerinnen und Einwohner 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.

Der Fokus der zu ergreifenden Maßnahmen zum P-Recycling liegt in Hessen auf der Schließung des Phosphorkreislaufs als Bestandteil des Nährstoffkreislaufs [25]. Dieses Ziel wurde auch durch das Handlungsfeld VII in

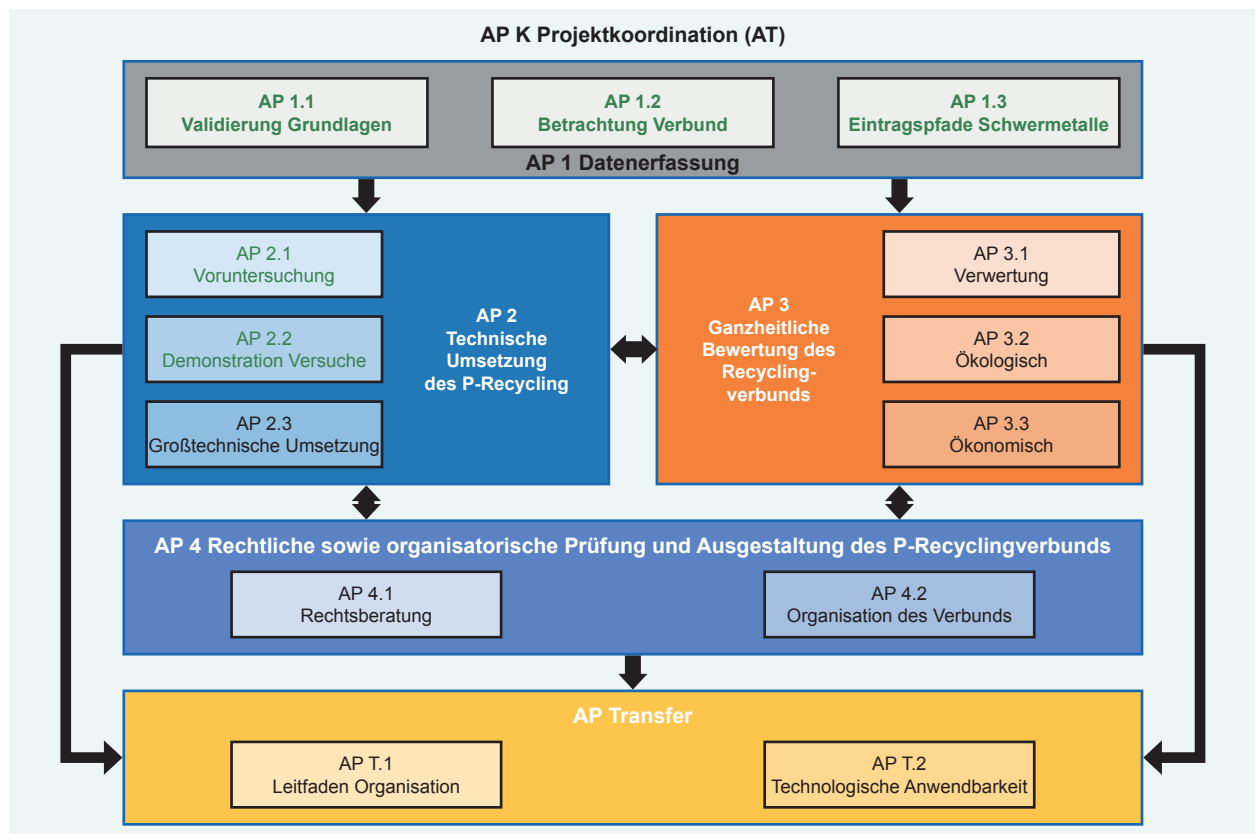
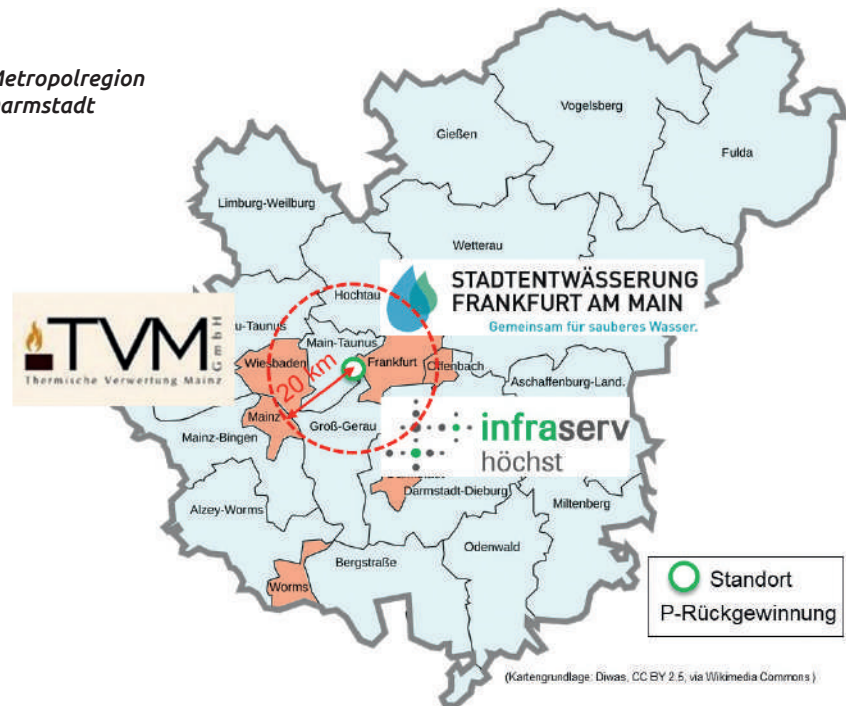


Abbildung 17: Schematische Übersicht der RePhoRM-Projektstruktur und -Inhalte (grüne Arbeiten = abgeschlossen).

Abbildung 18: Projektgebiet in der Metropolregion Frankfurt Rhein Main. © IWAR, TU Darmstadt



der hessischen Ressourcenschutzstrategie aus dem Jahr 2018 verankert. Dies bedeutet, dass primär eine Aufbereitung zu Düngemittel und der Einsatz dieser Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen für die Nahrungsmittelproduktion vorgesehen ist. 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 InfraserV 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 Klärschlammmasche. Durch anthropogene Belastungen weist die Klärschlammmasche 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 Klärschlammmasche ist zwingend vorzusehen. Da thermochemische Verfahren die Abreicherung für die kritischen Elemente nicht sicher darstellen können, wird ein nasschemischer Prozess im industriellen Umfeld eingesetzt.

Tabelle 7: Steckbrief der RePhoRM-Projektdateien.





Untersuchungsstandort  
**Frankfurt am Main – Höchst**

**Koordination**  
**Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR Fachgebiet Abwassertechnik**  
 Franziska-Braun-Straße 7  
 64287 Darmstadt  
**Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart**  
 Tel. +49 6151 16 20301  
 m.engelhart@iwar.tu-darmstadt.de

**Projektpartner**

- » TU Darmstadt, Institut IWAR, Arbeitsgruppe Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft
- » Glatt Ingenieurtechnik GmbH
- » InfraserV GmbH & Co. Höchst KG
- » Stadtentwässerung Frankfurt am Main
- » Thermische Verwertung Mainz GmbH
- » Becker Büttner Held PartGmbH

**Verbundprojekt-Webseite**  
<https://www.iwar.tu-darmstadt.de/rephorm>

**Laufzeit**  
 01.07.2020 – 30.06.2026

## 2.1.6 R-Rhenania

### Ziel des Verbundprojekts

Der Betreiber der Klärschlammverbrennungsanlage Altenstadt (Emter GmbH) integriert einen thermochemischen Prozessschritt in die vorhandene Monoverbrennung und erweitert die Anlage entsprechend, um einen Ausgangsstoff für die Düngemittelproduktion zu erzeugen und damit zur Phosphatrückgewinnung gemäß Klärschlammverordnung (AbfKlärV) beizutragen. Die Umrüstung der Anlage fand im ersten Halbjahr 2024 statt und seit Sommer 2024 steht eine Kapazität für die jährliche Produktion von 15.000 Tonnen schadstoffarmen R-Rhenania Phosphat mit hochwirksamen Phosphatverbindungen zur Verfügung. Diese Demonstrationsanlage wird durch ein wissenschaftliches Monitoring im Projekt R-Rhenania begleitet. Der Projektpartner sePura plant den produzierten Dünger vollständig regional in Bayern zu verwerten.

### Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

Die Klärschlammasche der Monoverbrennungsanlage in Altenstadt weist geringe Schwermetallgehalte auf und wird bereits als Dünger eingesetzt. Aufgrund der gerin-

gen Pflanzenverfügbarkeit entspricht diese allerdings nicht den zukünftigen Anforderungen der Düngemittelverordnung. Durch den Umbau der Anlage im Rahmen des Projekts R-Rhenania wird zukünftig ein hochwirksamer Dünger hergestellt. Versuchskampagnen zu Prozessoptimierungen wurden im Labormaßstab als auch in der Monoverbrennungsanlage Altenstadt durchgeführt. Die erzeugten Produkte wurden chemisch und mineralogisch charakterisiert und in Pflanzenversuchen getestet. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde der Umbau durchgeführt und ab dem Sommer 2024 können 15.000 Tonnen pro Jahr thermochemische Produkte mit hochwirksamen Phosphatverbindungen produziert werden.

Im Projekt R-Rhenania wird darüber hinaus ein weiterer thermochemischer Prozess mit der Zudosierung von (Erd-)Alkalien untersucht. Bei diesem Verfahren werden Klärschlammaschen in einem nachgeschalteten Drehrohrofen thermochemisch behandelt. Dieser Prozess ist unter dem Markennamen AshDec® bekannt. In der zweiten Projektphase wird dieser Prozess für verschiedene Szenarien erprobt.

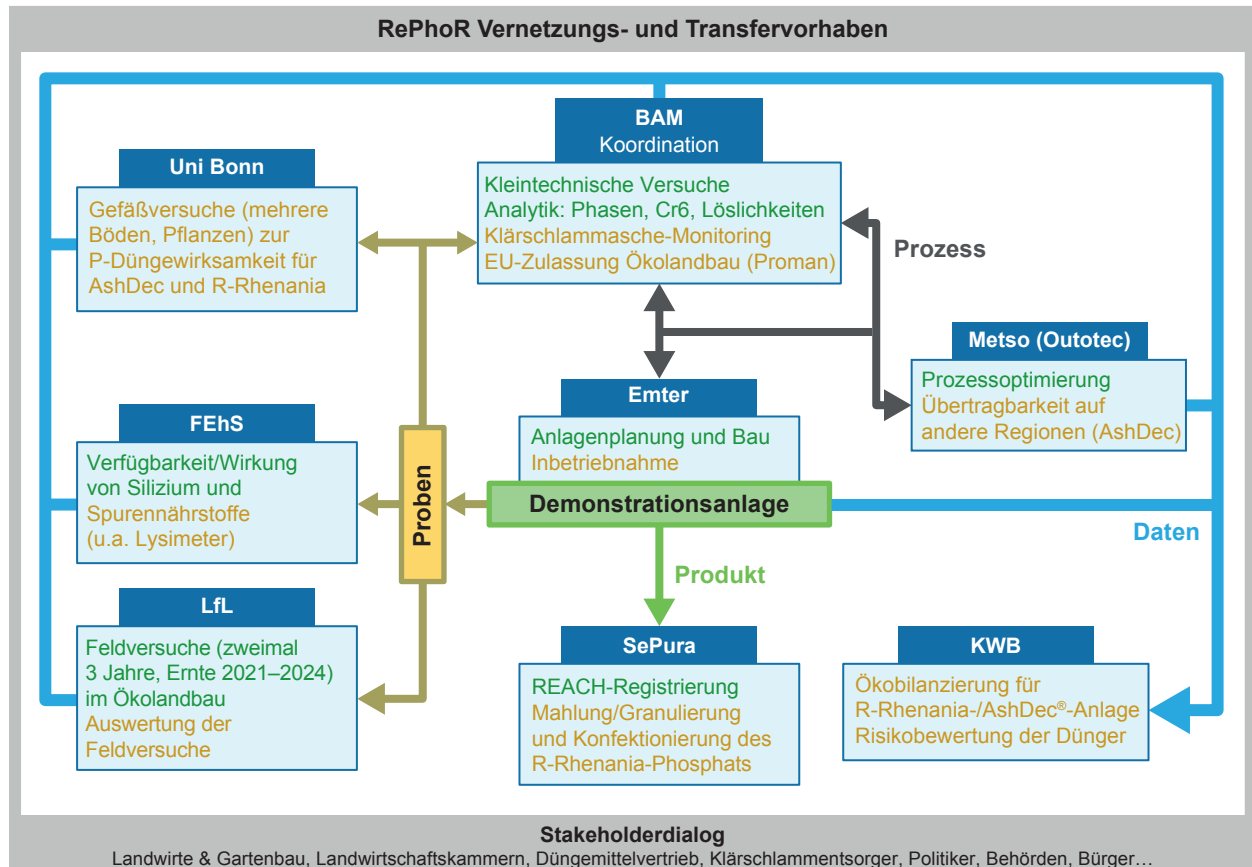


Abbildung 19: Schematische Übersicht der R-Rhenania-Projektstruktur und -Inhalte (grüne Arbeiten = abgeschlossen).

Die thermochemisch hergestellten Düngemittel aus beiden Varianten werden eingehend chemisch-mineralogisch charakterisiert und in Gefäßversuchen als auch in Feldversuchen im ökologischen Landbau auf ihre Düngewirksamkeit untersucht. Neben der Düngewirkung des Phosphats werden auch die Wirkungen der Silikate und der enthaltenen Spurennährstoffe auf Pflanzenverfügbarkeit und Pflanzengesundheit untersucht.

Um die Übertragbarkeit der AshDec®-Technologie auch für Standorte mit hohen Schwermetallbelastungen zu ermöglichen, werden im kleintechnischen Maßstab Untersuchungen inklusive Engineering und Kostenabschätzung für die großtechnische Umsetzung an hoch belasteten Klärschlammaschen durchgeführt. Ökobilanzierungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden begleitend für die verschiedenen Anwendungsfälle durchgeführt.

### Standortspezifische Randbedingungen

Seit 2009 ist die Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage der Firma Emter GmbH am Standort Altenstadt in Betrieb. Diese verbrennt jährlich ca. 40.000 t Klärschlamm-Trockensubstanz und produziert dabei rund 15.000 t phosphatreiche Aschen. Der Klärschlamm wird aus der Region angeliefert und vor Ort in einem Niedertemperaturtrockner als auch in zwei Schneckenrocknern getrocknet. Eine Kläranlage ist am Standort nicht vorhanden.

Der Standort Altenstadt ist für die Integration des thermochemischen R-Rhenania-Verfahrens besonders gut geeignet. Die Monoverbrennungsanlage Altenstadt ist eine Rostfeuerung, wodurch ein hoher Feststoff/Feststoff-Kontakt und hohe Feststoffverweilzeiten realisiert werden können. Diese Bedingungen sind in konventionellen Wirbelschichtverbrennungsanlagen nicht einstellbar, daher ist die Rostfeuerung in Altenstadt die einzige große Bestandsanlage in Deutschland, in der das R-Rhenania-Verfahren realisiert werden kann. Um das Verfahren an anderen Standorten umzusetzen, ist der Bau neuer Anlagen notwendig.

Am Standort ist die Infrastruktur für die Klärschlamm- und Additivanlieferung und die Produktabfüllung vorhanden. Die bisherige Abgasreinigung der vorhandenen Monoverbrennungsanlage kann für das R-Rhenania-Verfahren genutzt werden. Die Personalstruktur und organisatorischen Rahmenbedingungen sind für thermische Verfahren geschult. Zusätzlich liegt der Standort außerhalb des Ortsgebietes, wodurch wie bei der bisherigen Monoverbrennungsanlage keine Belastungen für Anwohner vorhanden sind.

Die Klärschlammasche aus Altenstadt weist niedrige Schadstoffgehalte auf. Sie ist daher nach den Regeln

für Düngemittel und Klärschlamm gesetzlich zulässig als Dünger verwendbar und wird bereits landwirtschaftlich genutzt. Aufgrund der vergleichbaren chemischen Zusammensetzung des neuen R-Rhenania Phosphats zur bisherigen Klärschlammasche hält es auch alle Grenzwerte ein und kann landwirtschaftlich eingesetzt werden. Die bestehenden Vertriebsstrukturen können zukünftig genutzt werden, um auch das neue R-Rhenania Phosphat zu vermarkten.

**Tabelle 8: Steckbrief R-Rhenania-Projektdateien.**



**Rhenania**

Untersuchungsstandort  
**Altenstadt**

**Koordination**  
**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)**  
**Fachbereich 4.4 Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung**  
Richard-Willstätter-Straße 11  
12489 Berlin

**Projektleitung**  
**Dr.-Ing. Christian Adam**  
Tel. +49 30 8104 5670  
christian.adam@bam.de

**Projektbearbeitung**  
**Hannes Herzel**  
Tel. +49 30 8104 5680  
hannes.herzel@bam.de

**Projektpartner**

- » Emter GmbH
- » sePura GmbH
- » Metso
- » Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
- » Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB)
- » FEhS-Institut für Baustoff-Forschung e. V.
- » Universität Bonn

**Assoziierte Partner**

- » Proman (Unterauftragnehmer)

**Verbundprojekt-Webseite**  
<https://www.bam.de/r-rhenania>

**Laufzeit**  
01.07.2020 – 30.06.2026



## 2.1.7 SATELLITE

### Ziel des Verbundprojekts

Das weitgehende Verbot der bodenbezogenen Klärschlammverwertung bedeutet besonders in landwirtschaftlich geprägten Regionen eine Umstellung der Verwertungsstrategie und geht mit hohen Investitionen in Anlagentechnik und Infrastruktur einher. Gleichzeitig ist es eine besondere Herausforderung, die saisonal weiterhin sinnvolle direkte Verwertung der Klärschlämme kleinerer lokaler Anlagen in ein regionales Gesamtkonzept zu integrieren. Ziel von SATELLITE ist daher die Bereitstellung von Werkzeugen zur angepassten und optimierten Verfahrensauswahl, nutzbar sowohl für die einzelne Anlage als auch für Verbünde mehrerer Anlagen bis hin zu großen interkommunalen Verbänden, die neben der Rückgewinnung von Phosphor auch den Stickstoff mitbetrachten. Das Projekt begleitet und unterstützt hierbei die KNRN, einen interkommunalen Verbund im südlichen Niedersachsen bei der Umstellung und Ausrichtung der Anlagentechnik und Klärschlammverwertungsstrategie.

### Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

Im Fokus von SATELLITE liegen das Abbilden und Bewerten verschiedener Einzelverfahren und ganzer Verfahrensketten im Verbund über die Unterstützung einer modellgestützten Szenarienanalyse. Als Arbeitshilfe wird zum einen eine Modulbibliothek für die verschiedenen Verfahrensausprägungen der Prozessstufen erstellt, in der verfahrensspezifische Kenndaten dokumentiert und

für eine Szenarienanalyse bereitgestellt werden. Zum anderen werden in SATELLITE Basismodelle für die Planung und Bewirtschaftung von einzelnen Anlagen und Anlagenverbänden aufgebaut und zu Anwendungstools weiterentwickelt, die eine fallspezifische Anwendung über eine ausgestaltete Eingabemaske und Definition von Modellschnittstellen unterstützt. Da die Energiebilanz besonders beim Einsatz von thermischen Verfahren (zentrale Monoklärschlammverbrennung) eine wichtige Größe bei der Effizienz der Anlagenketten darstellt, wird im Projekt auf die Erweiterung der Prozessmodelle um diese Größe z.B. durch die Einbeziehung erreichbarer Heizwerte, P-Gehalte oder Schwermetalle der Schlämme und/oder regionale Wärmeplanungen ein besonderer Schwerpunkt gelegt, ebenso wie auf die gezielte regionale Rückführung der Nährstoffe durch den Aufbau eines Bedarfs/Dargebots-Planungsmodell, das Agrardaten mit Prozessdaten der regionalen Schlamm- und Nährstoffbewirtschaftung verknüpft.

Die Ansätze sind insbesondere auf die Bewertung von Verfahren im Kontext der regionalen und anlagenspezifischen Gegebenheiten ausgerichtet. Gerade für kleine Anlagen zeigt sich, dass das Einbeziehen des vorhandenen Anlagenbestands, aber auch lokal anfallender Wirtschaftssubstrate zur Energieoptimierung der einzelnen Anlage oder des Gesamtverbunds in die Bewirtschaftung und die Anlagenkonzeptionierung erhebliche Optimierungspotenziale bietet. Potenziale der Umstellung aerob

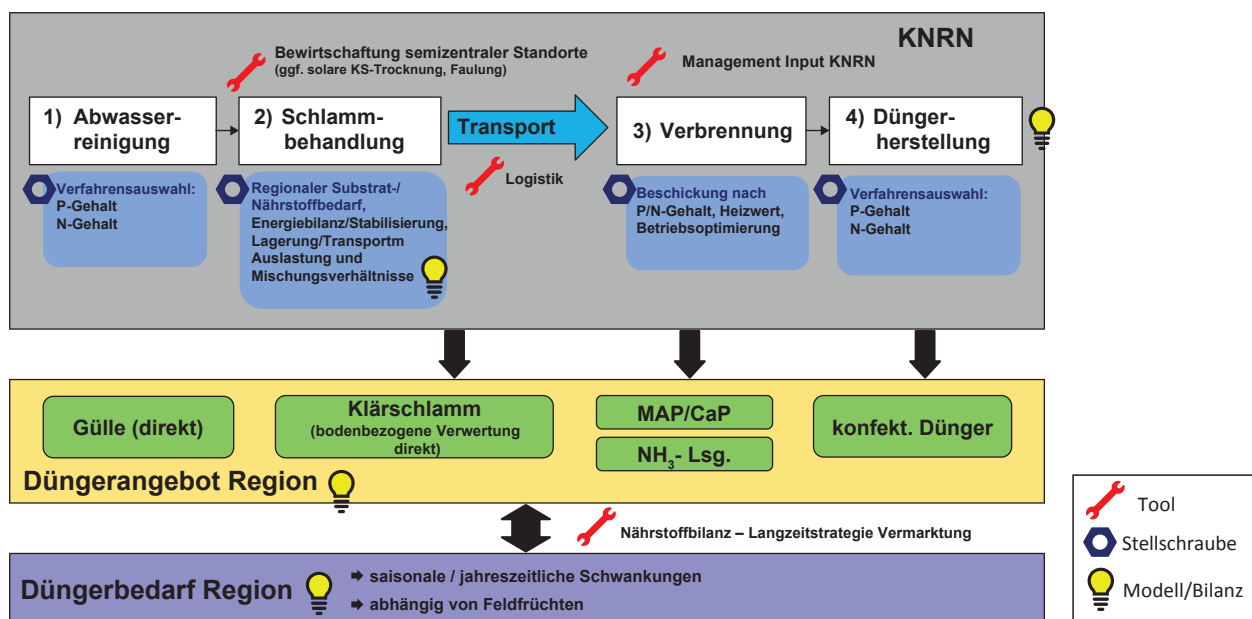


Abbildung 20: Vorgehensweise, Tools und Stellschrauben im SATELLITE-Projekt. © SATELLITE

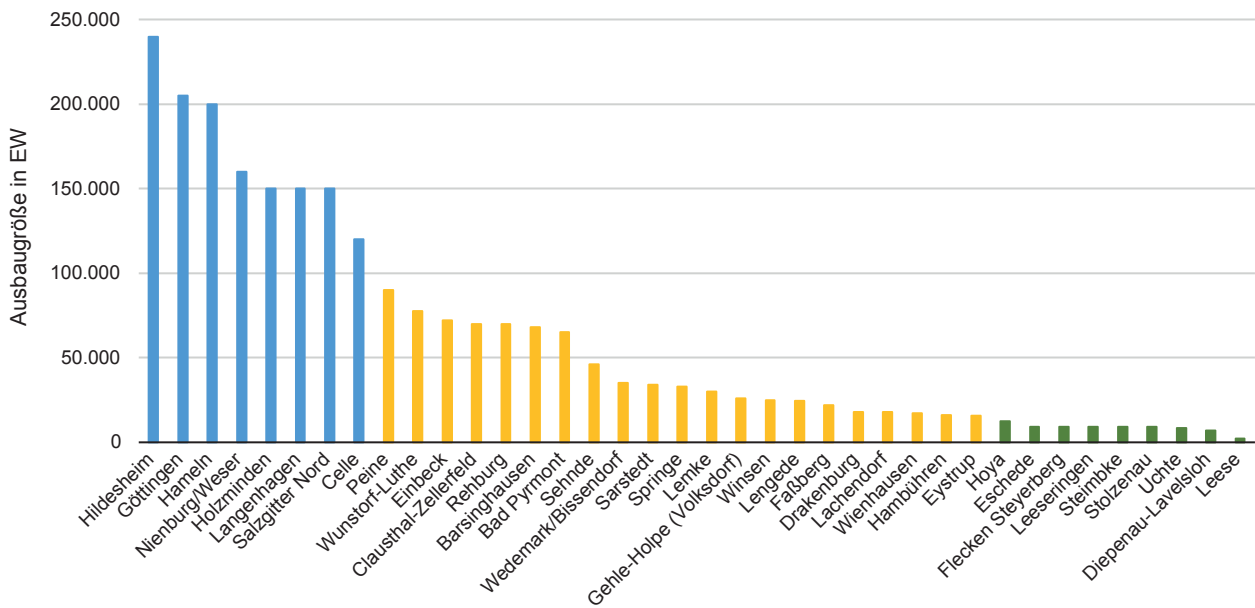


Abbildung 21: Kläranlagen des KNRN-Einzugsgebiets nach Ausbaugröße und Größenklasse (5 = blau, 4 = gelb, 3 = grün). © SATELLITE

stabilisierender Anlagen auf einen Betrieb mit sogenannter Teilstabilisierung sowie die Potenziale einer Kohlenstoffausschleusung vor der Belegung zur verbesserten Energiebilanz (Biogas vs. Belüftungsenergie) und Fragen der Implementierung einer Entwässerung/Trocknung sowie Fragen zum Einsatz der thermophilen Hochlastfaulung oder der Behandlung der Rückbelastung wurden auf verschiedenen Kläranlagen des Projektkonsortiums groß- und halbertechnisch untersucht, unterstützt durch Versuche im Labormaßstab und modellbasierte Szenarienanalysen.

### Standortspezifische Randbedingungen

Das südliche Niedersachsen ist stark landwirtschaftlich geprägt mit einer Vielzahl städtischer Oberzentren. Aus siedlungswasserwirtschaftlicher Sicht spiegelt sich diese Struktur in zahlreichen selbstverwalteten, kommunal betriebenen, kleinen und mittleren Kläranlagen wider. Hinzu kommen sieben Anlagen der Größenklasse 5 mit jeweils etwa 200.000 Einwohnerwerten Anschlussgröße. Die Verwertung des Klärschlamm erfolgt bisher vorrangig landwirtschaftlich regional. Ziel von SATELLITE ist ein Konzept vorzulegen, wie ein interkommunales Nährstoff-Recyclingzentrum (KNRN) durch leistungsstarke, im Verbund abgestimmte vorgelagerte Verfahrenstechnik wirtschaftlich und effizient betrieben werden kann, als Blaupause für andere landwirtschaftlich geprägte Regionen. Die im Unterverbund mit den größeren Anlagen interagierenden Satellitenanlagen bieten dabei eine sehr hohe Flexibilität aber auch hohen Abstimmungsbedarf der Akteure, um die Potenziale zu nutzen.

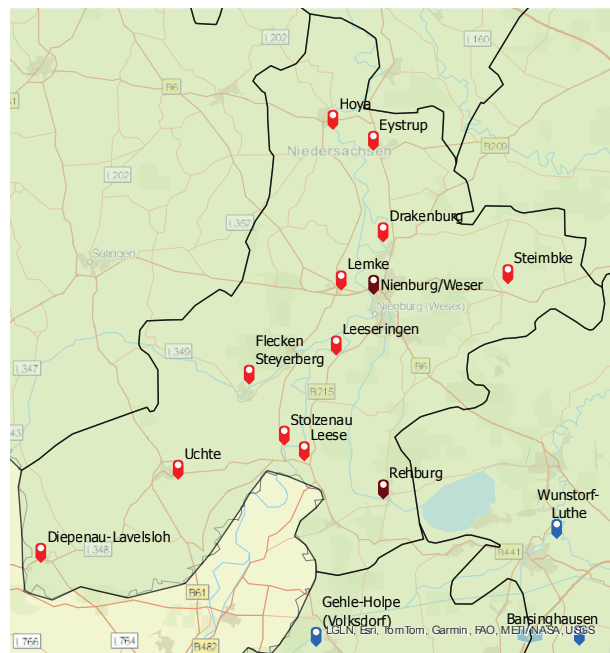


Abbildung 22: Modellregion. © SATELLITE

Im Zentrum von SATELLITE steht das Recyclingzentrum am Standort Hildesheim, wo die Klärschlamm-Monovorbrennungsanlage der KNRN entsteht (Kapazität von 33.500 t TM/a). Das Einzugsgebiet erstreckt sich über das südliche Niedersachsen und umfasst 38 einzelne Kläranlagen als feste Schlammlieferanten, die zusammen jährlich bis zu 170.000 t OS (25.000 t TM) liefern. Dabei wird etwa die Hälfte der gesamten Originalsubstanz von nur acht Kläranlagen und die Hälfte der Trockenmasse

allein von den sechs größten Kläranlagen geliefert. Von den 38 Anlagen liegen 23 unter der Grenze von 50.000 EW (vgl. Abbildung 21). Der Landkreis Nienburg mit 13 Kläranlagen, von denen nur zwei eine Ausbaugröße von > 50.000 EW haben, ist Modellregion innerhalb des SATELLITE-Verbundes für die Strategieentwicklung von Unterverbänden mit weiterhin bodenbezogener Verwertungsmöglichkeit, meist aeroben Stabilisierungsanlagen mit Nassschlammabgabe und räumlicher Verteilung.

Das Einzugsgebiet der KNRN und die Verteilung der Kläranlagen ist in Abbildung 22 dargestellt.

Eine Besonderheit der KNRN bietet der trimodale Anschluss am Standort des Hildesheimer Hafens, wodurch die Möglichkeit besteht, Klärschlämme über die Straße, Schiene und den Wasserweg anzunehmen. Somit steht eine Vielzahl von möglichen Transportwegen im Verbund den anliefernden Kläranlagen zur Verfügung und auch die gemeinsame Nutzung von Verkehrsmitteln, die für die einzelne Anlage nicht rentabel nutzbar sind, ist so eine Option.

Das SATELLITE-Projekt befindet sich nun in der Umsetzungsphase, in der erarbeitete Grundlagen erprobt, validiert und angewendet werden. Einige Inhalte sind auch schon in die Verwertungsphase eingetreten. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Modellregion mit ihren Kläranlagen, Stoff- und Nährstoffströmen bilanziell erfasst und abgebildet. Auch die erarbeiteten Konzepte zum Betrieb im Unterverbund sind bereits erprobt (bspw. Umstellung auf Teilstabilisierung, gemeinsame Nutzung einer mobilen Zentrifuge). Gearbeitet wird hier noch am Planungsmodell zur gezielten, regionalen Nährstoffrückführung. Das Logistik- und Containerkonzept befindet sich zurzeit in der Verwertungsphase, ebenso wie die innovative Stickstoff-Rückgewinnung während der Klärschlamm-trocknung. Im Bezug zur strategischen Investitionsplanung und modellgestützten Bewertung ist die Modulbibliothek des ISAH zum einfachen Vergleich bereits online verfügbar und das OptiNETZ-Tool #plan auch schon außerhalb des Projekts erprobt. Im letzten Jahr der Bearbeitung werden nun noch die großtechnischen Konzepte und Strategien sowie das OptiNETZ-Tool #live finalisiert, validiert und erprobt und weitere Verfahrensvarianten in die Modulbibliothek zur Veröffentlichung aufgenommen.

**Tabelle 9: Steckbrief SATELLITE Projektdaten.**

**Untersuchungsstandorte  
Hildesheim, Pattensen,  
Landkreis Nienburg,  
Göttingen**

**Koordination**  
**Institut für Siedlungswasserwirtschaft und  
Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover  
(ISAH)**  
Welfengarten 1  
30167 Hannover  
**Dr.-Ing. Maïke Beier**  
Tel. +49 762 2898  
beier@isah.uni-hannover.de

**Projektpartner**

- » Landwirtschaftskammer Niedersachsen
- » Göttinger Entsorgungsbetriebe
- » Stadtentwässerung Hildesheim AöR
- » Kreisverband für Wasserwirtschaft
- » Stadt Pattensen
- » BIORESTEC GmbH (bis 30.06.2025)
- » Ingenieurbüro Dr. Breitenkamp
- » SF-SoepenberG GmbH
- » Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (bis 30.06.2023)

**Assoziierte Partner**

- » KNRN

**Verbundprojekt-Webseite**  
<https://satellite-rephor.de/>

**Laufzeit**  
01.07.2020 – 31.12.2025

## 3 Verfahren

### 3.1 Übersicht und Einteilung der Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung

Die Phosphor-Rückgewinnung kann an verschiedenen Stellen im Klärprozess des Abwassers erfolgen: im Ablauf der Nachklärung (1), aus Schlammwasser (2), aus Faulschlamm (3a) und entwässertem Klärschlamm (3b) sowie aus der Klärschlammverbrennungsgasche (4), wobei sich die Komplexität der Verfahren je nach Einsatzstelle unterscheidet. Insgesamt steigt die technische Komplexität der Verfahren von der Nachklärung bis zur Verbrennungsgasche: frühe Prozess-Stufen (Abwasser, Schlammwasser) bieten zwar leichter zugänglichen Phosphor, erfassen aber nur einen geringeren Teil der Gesamt-P-Menge. Aus den nachgeordneten Stufen (Schlamm, Asche) kann dagegen nahezu die gesamte P-Fracht zurückgewonnen werden, dies erfordert jedoch in der Regel komplexere technische Verfahren und einen höheren Energie- und Chemikalieneinsatz. Auch der geltende Rechtsbereich verschiebt sich: Bis zum Zeitpunkt der Entwässerung des Klärschlammes greift das Wasserrecht, im Anschluss das Abfallrecht. Entsprechend sind unterschiedliche Vorschriften zu beachten.

Es gibt mittlerweile auch Verfahren, die aus dem Überschussschlamm vor der Faulung Phosphor remobilisieren (z. B. Peco, iPhos). Dort beträgt das P-Remobilisierungspotenzial bis zu 70–90%.

Derzeit existiert eine Vielzahl von Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung, von denen sich viele noch im Entwicklungsstadium befinden und einen Technologiereifegrad (TRL) von unter 7 aufweisen. Allerdings wird erwartet, dass sich viele Verfahren im großtechnischen Maßstab bewähren werden. In der Abbildung 23 sind die aktuell bestehenden Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung mit einem Reifegrad größer 7 und ihrem entsprechenden Einsatzort im Klärprozess dargestellt. Es werden nur Verfahren ab TRL 7 berücksichtigt, da diese den Übergang aus der experimentellen Phase in den Pilotbetrieb bereits nachgewiesen haben und somit als technisch reif und für den praktischen Einsatz für kommunale Kläranlagen als geeignet gelten.

Eine Übersicht und ausführliche Beschreibungen der verschiedenen Verfahren existieren an zahlreichen Stellen. So aktualisiert die Deutsche Phosphor-Plattform DPP e.V. stetig die Informationen zu Anzahl & Standorte der verschiedenen Technologien. Außerdem veröffentlicht die DPP Steckbriefe einzelner Technologien (Verfahrenskennblätter) mit technischen Daten und Kontaktadressen. Auch die DWA-AG KEK 1.3 „Klärschlamm Entsorgung und Phosphor-Recycling“ bereitet die Veröffentlichung eines Themenbands vor, in welchem eine aktuelle Über-

**Tabelle 10: Mögliche Einsatzorte der Phosphor-Rückgewinnung mit max. Rückgewinnungspotenzial.**

	Einsatzort	Max. Rückgewinnungspotenzial [%]	Phosphor-Konzentration [mg P/l]
1	Ablauf der Nachklärung	55	< 5 mg/l
2	Schlammwasser	50 (theoretisch), 30 (praktisch)	20–100 mg/l
3a	Faulschlamm	70	3,7 %
3b	entwässerter Klärschlamm	90	3,3 %
4	Klärschlammverbrennungsgasche	90	7,3 %

sicht über Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung und Details zu diesen enthalten sind. Ebenso enthält der Abschlussbericht des UBA-ReFoPlan Forschungsvorhabens „Evaluierung verfügbarer Kapazitäten thermischer Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphor-Rückgewinnung“ detaillierte Angaben zu existenten und geplanten Standorten, Umsetzung und technischen Einzelheiten der verschiedenen Technologien [37].

[Deutsche Phosphor-Plattform DPP e.V.](https://www.deutsche-phosphor-plattform.de)



Technological Readiness Level (TRL) – Technologischer Reifegrad	
TRL 1:	Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips
TRL 2:	Beschreibung der Anwendung einer Technologie
TRL 3:	Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie (Proof of Concept)
TRL 4:	Versuchsaufbau im Labor
TRL 5:	Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
TRL 6:	Prototyp in Einsatzumgebung
TRL 7:	Prototyp im Einsatz
TRL 8:	Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
TRL 9:	Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

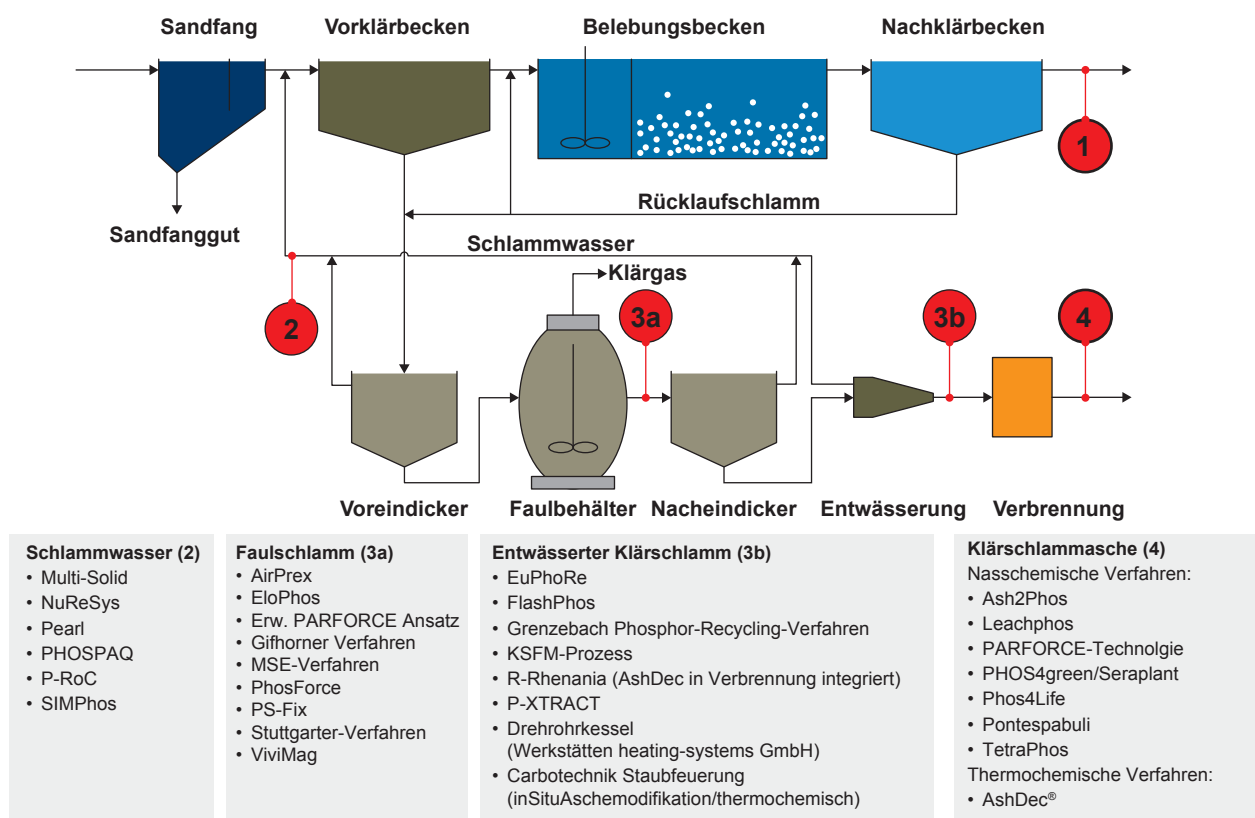


Abbildung 23: Phosphor-Rückgewinnungsverfahren mit jeweiligem Einsatzbereich [37].

## 3.2 Übersicht und Einteilung der Verfahren zur Stickstoff-Rückgewinnung

Aus der Vielzahl der möglichen Verfahren zur Stickstoff-Rückgewinnung aus Abwasser haben sich für Prozesswasser aus der anaeroben Schlammwässerung bisher nur Strippverfahren großtechnisch bewährt. Die Grundlagen und unterschiedlichen Ausführungsvarianten dieser Verfahren sind in der Fachliteratur ([27], [45]) ausführlich beschrieben und sollen hier nur kurz vorgestellt werden. Als Strippung wird die gezielte Überführung eines in einer Flüssigkeit gelösten Stoffes in eine Gasphase bezeichnet. Im Falle der Stickstoff-Rückgewinnung handelt es sich bei dem zu strippenden Stoff um Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Die Gasphase ist in diesem Kontext entweder Luft oder Wasserdampf. Das Ammoniak steht im Dissoziationsgleichgewicht mit dem gelösten und als Ion vorliegenden Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), welches sich nicht in die Gasphase überführen lässt. Die Lage des Gleichgewichts wird durch den pH-Wert und die Temperatur bestimmt. Hohe Temperaturen und hohe pH-Werte verschieben das Gleichgewicht zum leichtflüchtigen und damit strippfähigen Ammoniak. Für  $\text{pH} = 8$  beispielsweise liegen bei Raumtemperatur weniger als 10 % des Ammonium-Stickstoffs in Form von  $\text{NH}_3$  vor, für  $\text{pH} = 10$  sind es bereits fast 80 %. Eine Erhöhung der Temperatur von  $20\text{ °C}$  auf  $40\text{ °C}$  bei konstantem  $\text{pH} = 9,7$  bewirkt eine Vergrößerung des  $\text{NH}_3$ -Stickstoffanteils im  $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ -Gleichgewicht von weniger als 50 % auf über 80 % [6]. Verfahren, die auf dieser Grundlage Stickstoff aus Prozesswässern entfernen, gliedern sich in der Regel in drei Teilschritte: Vorbehandlung, Strippung und Aufbereitung des Strippgases.

Bei der Vorbehandlung wird die Temperatur und der pH-Wert meist mit Natronlauge angehoben ( $T > 55\text{ °C}$ ,  $\text{pH} > 9,5$ ). Die Strippung mit Luft oder Dampf erfolgt im Gegenstrom in Füllkörperkolonnen. Die Luftstrippung wird in der Regel bei  $60 - 70\text{ °C}$  betrieben. Die Dampfstrippung hat durch das Nutzen von Wasserdampf einen deutlich höheren Wärmebedarf, kann hierdurch aber den Einsatz von Chemikalien mindern. Die ammoniak-

beladene Abluft der Luftstrippung wird durch eine Saure Wäsche aufgereinigt, bei der der Stickstoff als Salz der verwendeten Säure als Produkt anfällt (z. B. Ammoniumsulfat bei der Verwendung von Schwefelsäure, i. d. R. 35 – 45 %ige Salzlösung). Durch die Kondensierbarkeit der Abluft der Dampfstrippung kann diese selbst als Rektifikationskolonne ausgeführt werden und Ammoniakwasser (i. d. R. 25 %) als Kopfprodukt erzeugt werden. Um den hohen Wärmebedarf der Dampfstrippung zu senken, sind Verfahrenserweiterungen wie die Brüdenverdichtung oder die Unterdruckstrippung entwickelt worden. Durch die Verdichtung des Brüdens können 10 – 20 % des Wärmebedarfs eingespart werden, allerdings erhöht sich der Strombedarf deutlich. Durch das Erzeugen von Unterdruck kann die Dampfstrippung schon bei deutlich niedrigeren Temperaturen (ca.  $65\text{ °C}$ ) erfolgen. In Tabelle 11 ist ein qualitativer Vergleich der Strippverfahren aufgeführt.

Als Alternative zur Strippung wurden in den letzten Jahren auf einigen Kläranlagen Membrankontakoren eingesetzt, bei denen der Stoffaustausch zwischen der ammoniakbeladenen Flüssigphase und einer Säure direkt über eine hydrophobe Membran erfolgt. Zur Gewährleistung der Temperaturbeständigkeit des Membranmaterials werden die Membrankontakoren eher bei niedrigeren Temperaturen betrieben als die Strippung in Füllkörperkolonnen und sind daher mit einem höheren Betriebsmittelverbrauch zur pH-Wert-Einstellung verbunden. Die MAP-Fällung lässt sich grundsätzlich auch zur Stickstoff-Rückgewinnung einsetzen. Allerdings ist aufgrund der Zusammensetzung des Prozesswassers in der Regel nicht nur Magnesium, sondern auch Phosphor (z. B. in Form von Phosphorsäure) als Reaktionspartner zuzugeben, um eine hohe Stickstoffeliminationsrate zu erreichen. Aufgrund der Kosten von Phosphorsäure hat sich die MAP-Fällung bisher nicht zur Stickstoff-Rückgewinnung durchsetzen können.

**Tabelle 11: Qualitativer Vergleich zur Stickstoff-Rückgewinnung (TRL 9).**

	Luftstrippung / Saure Wäsche	Dampfstrippung	Dampfstrippung mit Brüdenverdichtung	Dampfstrippung im Unterdruck
Investitionen	+	0	--	-
Stromverbrauch	0	+	--	-
Wärmebedarf	++	--	+	+
Chemikalienbedarf	--	++	++	++
Produktmenge	-	+	+	+

Vor dem Hintergrund, dass der Chemikalienaufwand zur pH-Wert-Verschiebung als Voraussetzung für die Stripping hoch und mit Kosten verbunden ist [22], werden immer wieder neue Verfahren untersucht, die Stickstoff direkt als Ammonium aus dem Abwasser entfernen.

Die Adsorption an Zeolithe mit anschließender Desorption wird so seit Jahrzehnten immer wieder untersucht, konnte sich aber aufgrund der erreichbaren Adsorptionsraten und der Desorptionseffektivität bisher großtechnisch für Abwasser nicht etablieren [39].

## 3.3 Beschreibungen der Verfahren der RePhoR-Projekte

### 3.3.1 AMPHORE

Die großtechnische Demonstrationsanlage im Rahmen des AMPHORE-Projekts wurde nach der nasschemischen PARFORCE-Technologie® geplant. Das PARFORCE-Verfahren für die Anwendung an Klärschlammaschen im AMPHORE-Projekt besitzt sieben wesentliche Prozessschritte (vgl. Abbildung 24). Neben der Rückgewinnung und Wiedernutzbarmachung des Phosphors stehen dabei insbesondere die Schadstoffentfrachtung und in weiteren Schritten die Generierung verwertbarer bzw. für weitere Aufbereitungsschritte nutzbare Nebenprodukte im Fokus.

Im ersten Schritt werden die in der Asche-Matrix enthaltenen Phosphate durch einen Säureaufschluss mobilisiert. Als Aufschlussäure wird Salzsäure (15 % HCl) 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 getrennt. Im ersten Ionenaustauscher (IAT 1) werden Eisenionen abgetrennt ( $\text{Fe}^{3+}$ -Kationen). Der Ionenaustauscher wird mit Salzsäure regeneriert und das Eisen in Form einer Eisenchloridlösung gewonnen. In der nach-

folgenden 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 werden. Das Konzentrat wird nachfolgend in dem Prozess mit Kalkmilch neutralisiert, wobei die Schwermetallbestandteile als schwer lösliche 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 ( $\text{Al}^{3+}$ -Kationen). Der Ionenaustauscher wird ebenfalls mit Salzsäure regeneriert und das Aluminium in Form einer Aluminiumchloridlösung gewonnen. Im siebten und letzten Schritt wird die Roh-Phosphorsäure durch Vakuumverdampfung auf eine handelsübliche Konzentration gebracht. Marktüblich sind Konzentrationen von ca. 75 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

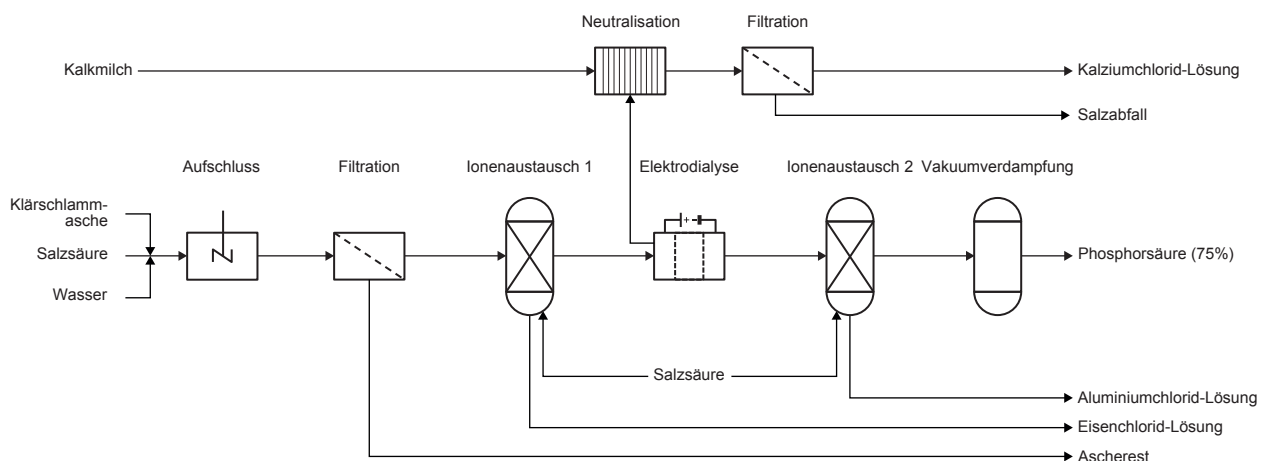


Abbildung 24: Verfahrensfließschema des AMPHORE-Verfahrens. © Ruhrverband

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 Aluminiumchloridlösung und ein Calciumchlorid-Konzentrat. Als Reststoffe des Prozesses verbleibt der silikatische Rückstand („ausgelaugte Asche“) sowie der Salzabfall („Schwermetallsenke“).

### Erfahrungen aus der technischen Umsetzung

Die großtechnische Demonstrationsanlage zum P-Recycling wurde am kombinierten Kläranlagen- und Verbrennungsanlagenstandort der Emschergenossenschaft in Bottrop realisiert. Sie ist auf einen theoretischen Durchsatz von bis zu 1.000 t Asche/a (bei kontinuierlichem Betrieb) ausgelegt. Insgesamt erstreckte sich der Zeitraum von der Verfahrenswahl bis zum Abschluss aller Funktionsprüfungen über rund 4,5 Jahre. Wesentliche Schritte dabei waren:

- » Verfahrensauswahl und Vergabe  
(20 Monate von 03/04 2020 bis 10/2021)
- » Planung und Genehmigung  
(17 Monate von 10/2021 bis 03/2023)
- » Bau und Errichtung  
(6 Monate von 06/2023 bis 11/2023)
- » Inbetriebsetzung und Funktionstests  
(12 Monate von 12/2023 bis 12/2024)

Nach Fertigstellung der Anlage erfolgten zwischen Januar 2024 und Juli 2024 die sog. Funktionstests. Bereits im Zuge der Funktionstests wurden Aschen der Klärschlammverbrennung Bottrop (Emschergenossenschaft), der SVA Buchenhofen (Wupperverband) sowie der WFA Elverlingsen GmbH (Ruhrverband) eingesetzt, die jeweils unterschiedliche Herausforderungen für den Anlagenbetrieb herbeiführten. Die wesentlichen Punkte waren Exothermie (Temperaturentwicklung im Aufschluss), Störstoffanteil und Korngrößenverteilung. Diesen Herausforderungen konnte durch technische und organisatorische Maßnahmen, die im Verlauf der In-

betriebsetzung umgesetzt wurden, begegnet werden. Die potenziellen Gefahren durch die Charakteristik der Aschen konnten so auf ein Minimum reduziert werden.

Nachfolgend wurde der sogenannte Probetrieb in drei nacheinander folgenden Leistungstests zwischen September 2024 und Dezember 2024 durchgeführt. Ziel des Probetriebs war insbesondere der Nachweis, dass die gesetzlich vorgegebene Quote von 80% Phosphor, der aus der Asche in das Produkt, d. h. die Phosphorsäure, überführt wird, erreicht werden kann. Des Weiteren sollte durch den Probetrieb nachgewiesen werden, dass der Aschedurchsatz im mittleren Bereich der Kapazität (ca. 1,5 t/d) gehalten werden kann. Die drei Leistungstests wurden jeweils über sieben Tage unter kontinuierlicher Prozessführung (24 h/d) zzgl. Vor- und Nachbereitung durchgeführt.

Im Ergebnis zeigt die Auswertung der Leistungstests, dass der Durchsatz mit bis zu 1,8 t/d in einen zufriedenstellenden Bereich gebracht werden konnte. Die Anlage konnte im automatisierten Betrieb gefahren werden und auch nach Unterbrechungen ließ sich der Prozess stabil fortführen. Dies bietet die Möglichkeit, den Anlagenbetrieb flexibel zu gestalten, wenn beispielsweise der Durchsatz gedrosselt oder die Anlage zeitweise in einen Stand-By-Betrieb versetzt werden soll. In dem Probetrieb wurden hohe Phosphor-Aufschlussgrade bzw. ein hoher Phosphor-Transfer in den Prozess durch eine gute Filtration und Wäsche des Ascherests erreicht. Begleitstoffe wie u. a. Eisen, Aluminium und Calcium wurde erfolgreich abgetrennt ohne hohe Phosphorverluste in Nebenproduktströmen oder Prozessabwässern zu verursachen. Gemäß Auswertung von Januar 2025 lag die Phosphor-Rückgewinnungsrate oberhalb der geforderten Rückgewinnungsquote von 80% Phosphor, der aus der Asche in das Phosphorprodukt überführt wurde. Am Beispiel der Verbrennungasche aus Elverlingsen wurde die Deponieklasse (DK) der Eingangasche mit der DK des erzeugten Ascherests verglichen. Die eingesetzte Asche hat die DK I und erste zertifizierte Deklarationsanalysen klassifizieren den erzeugten Ascherest ebenfalls in DK I ein, d. h. die Entsorgungssituation verschlechterte sich durch den Prozess nicht.

### 3.3.2 DreiSATS

Ziel des Projektkonsortiums DreiSATS ist die Entwicklung und Demonstration einer Prozesskette für ein dezentrales Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen. Die in DreiSATS gewählte Prozesskette weist technische und logistische Vorteile auf, die zu einem wirtschaftlichen und ökologischen Mehrwert gegenüber anderen Verfahren führen:

- » schon ab 2.000 t TS/a wirtschaftlich betreibbare Carbotechnik-Staubfeuerung mit in-Situ-Aschemodifikation und integrierter Schwermetallreduktion durch innovative Heißgasseparation
- » innovatives Pontes Pabuli-Verfahren mit Schwermetallabscheidung und Herstellung marktfähiger Düngersprodukte mit einstellbaren Zusammensetzungen



Mittels der Carbotechnik-Staubfeuerung soll erstmals eine wirtschaftliche thermische Verwertung von Klärschlämmen in wesentlich kleineren Anlagengrößen als bei der konventionellen Wirbelschichtverbrennung ermöglicht werden. Der getrocknete und gemahlene Klärschlamm wird vor Eintritt in den Brennraum gezielt mit einem Additiv versetzt. Die prozessintegrierte Schwermetallentfrachtung wirkt direkt in der Verbrennung (thermochemischer Prozess) und basiert auf dem Prinzip unterschiedlicher Flüchtigkeiten von Aschekomponenten bei hohen Temperaturen. Durch die Additivzugabe werden leichtflüchtige Schwermetallverbindungen erzeugt, die bei den hohen Temperaturen der Feststoffverbrennung gasförmig werden und eine erste Filterstufe, dem LTC-Heißgasfilter, durchdringen, welche nur die partikuläre, von Schwermetallen abgereicherte Asche abtrennt. In der nachgelagerten Abgasreinigung werden die Schwermetallverbindungen auskondensiert und entfernt. Die Aschequalität aus

der Staubfeuerung ist fein und kann den Vorgaben der Düngemittelverordnung entsprechen sowie die geforderten Phosphorlöslichkeiten deutlich überschreiten.

An der Pilotanlage Staubfeuerung mit einer Feuerungs-wärmeleistung von 1 MW am Standort Magdeburg des Projektpartners Carbotechnik erfolgten die Untersuchungen zur Verbrennung von Klärschlämmen sowie zur Schwermetallabtrennung durch Additivzugabe und Heißgasfiltration. Die für den Dauerbetrieb ausgelegte Anlage entspricht bezogen auf mechanisch entwässerten Klärschlamm einer Durchsatzleistung von rund 8.000 t/a.

Für die Verwertung der Asche stehen zwei Optionen zur Verfügung: Sie kann entweder direkt als landwirtschaftlicher Dünger eingesetzt oder in einem nachgelagerten Prozess zu hochwertigen Düngergranulat aufbereitet werden.

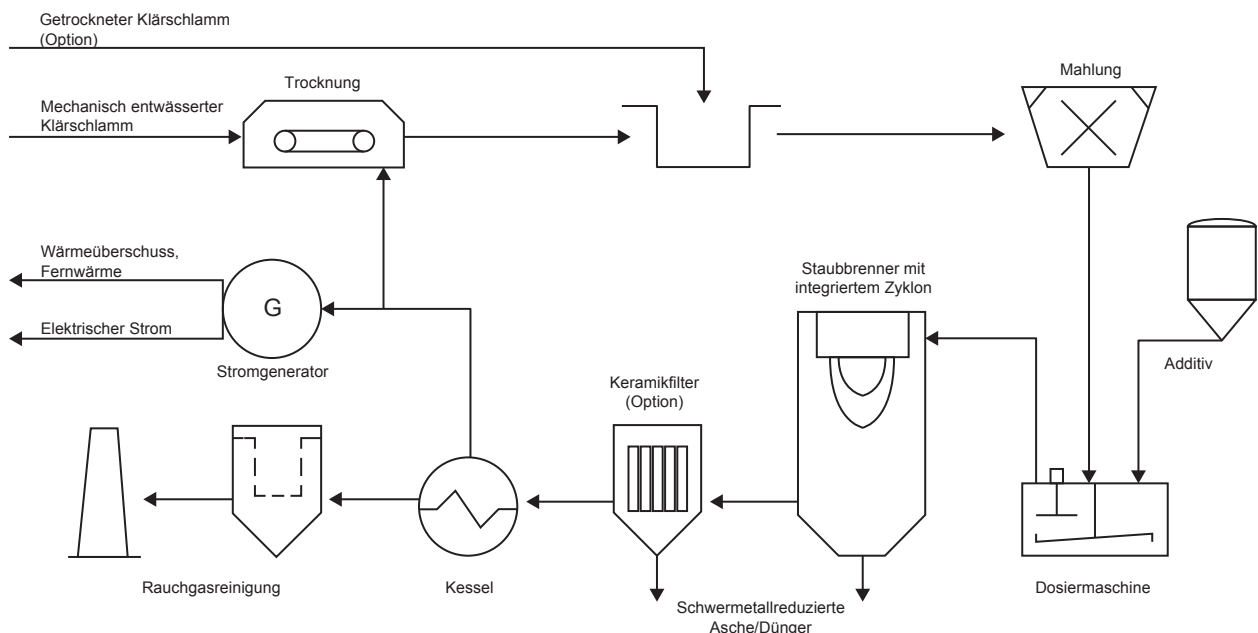


Abbildung 25: Dezentrales Konzept Trocknung und Staubfeuerung mit Heißgasfiltration. © Carbotechnik

FLEX-Verfahren mit Schwermetallabreicherung:

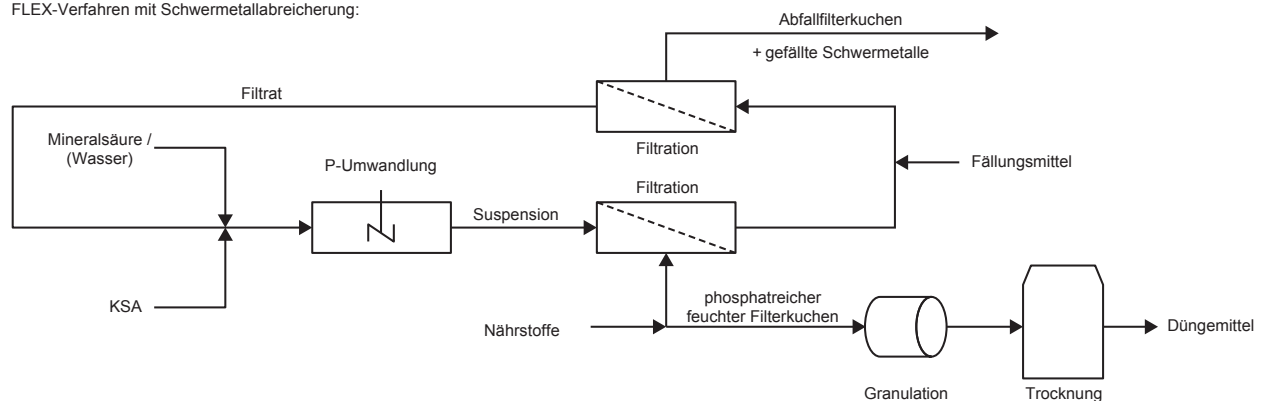


Abbildung 26: Prozessschema Pontes Pabuli-Verfahren. © Veolia

Mit der zweiten Prozessstufe erfolgt mittels Pontes Pabuli-Verfahren die Überführung des in den Aschen enthaltenen Phosphors in standardisierte Düngemittel. Auf dem Gelände der Veolia in Markranstädt wurde im März 2022 die Versuchsanlage im TRL 6 Maßstab in Betrieb genommen. Bei dem Verfahren wird zunächst eine Suspension aus Asche, Wasser und Säure hergestellt. 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 wird die Zusammensetzung des Endprodukts exakt auf den gewünschten Düngertyp abgestimmt. 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.

### Erfahrungen aus der technischen Umsetzung

Im Rahmen des Teilvorhabens zur thermischen Verwertung von Klärschlamm wurde eine Pilotanlage auf Basis der patentierten Carbotechnik-Staubfeuerung errichtet. Die Anlage erfüllt die Anforderungen der 17. BImSchV und ist für den Dauerbetrieb ausgelegt. Umfangreiche Versuchsreihen mit unterschiedlichen Klärschlämmen hatten das Ziel, feuerungstechnische Grenzen zu identifizieren, eine effiziente und emissionsarme Verbrennung sicherzustellen sowie eine schadstoffentfrachtete Asche mit hoher Phosphorlöslichkeit zu generieren.

Zur Auswahl repräsentativer Klärschlämme wurde im Vorfeld eine umfassende Matrix erstellt. Dabei diente die Korngrößenverteilung eines etablierten Brennstoffs als Referenz für den Mahlprozess. Die Versuche zeigten, dass auch eine gröbere Mahlung mit erhöhtem Grobanteil ohne signifikante Beeinträchtigung der Verbrennungsqualität möglich ist. Aufgrund schwankender Eigenschaften der Klärschlämme – abhängig von Herkunft und Jahreszeit – wurde ein flexibles Anlagen- und Regelungskonzept integriert. Dieses gewährleistet eine präzise, kontinuierliche Regelung der Brennstoff- und

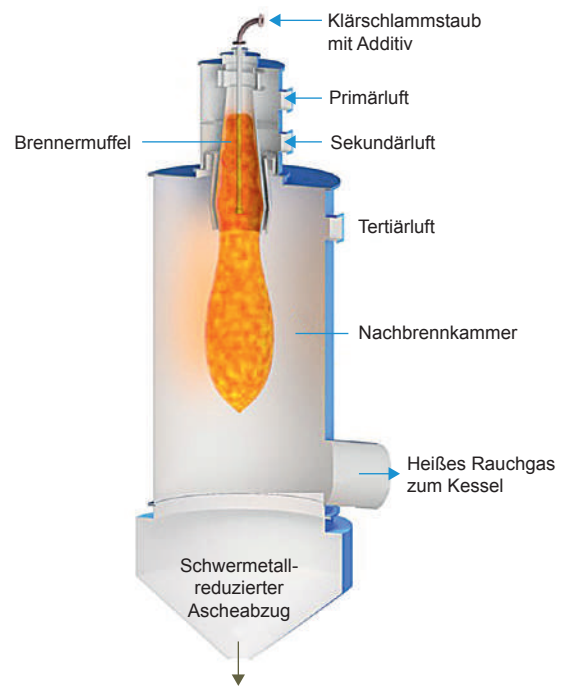


Abbildung 27: Funktionsprinzip Staubfeuerung. © Carbotechnik

Luftmengen für die gestufte Verbrennung. Dabei dient ein definierter O<sub>2</sub>-Wert im Rauchgas als Sollgröße. Änderungen der Klärschlammeneigenschaften, etwa hinsichtlich des Heizwerts, führen zu Abweichungen vom O<sub>2</sub>-Sollwert, sodass eine entsprechende Anpassung des Brennstoff-Luft-Verhältnisses erforderlich ist. Diese Korrektur kann präzise, nahezu verzögerungsfrei und mit geringem Regelaufwand über die Brennstoffmengensteuerung erfolgen. Der CO-Gehalt in der Abgasmessung erwies sich als zuverlässiger Indikator für die Verbrennungsqualität und lag konstant weit unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte. Die Temperaturführung erfolgt durch die Tertiärluft, mit der das Rauchgas auf die gemäß 17. BImSchV geforderte Mindesttemperatur von größer 850 °C geregelt wird. Während der Versuche traten keine feuerungstechnischen Einschränkungen hinsichtlich des Klärschlamminputs auf und der Brennraum blieb frei von Anbackungen. Die Carbotechnik-Staubfeuerung nutzt die thermochemischen Modifikationen zur Optimierung der Ascheeigenschaften. Die Schwermetallentfrachtung basiert auf der Flüchtigkeit der Metallverbindungen: Durch eine gezielte Temperaturerhöhung steigt der Partialdruck dieser Verbindungen, sodass ein größerer Anteil in die Dampfphase übergeht und aus der Klärschlamm-asche entfernt wird. Um diesen Effekt zu maximieren, wird die Asche unmittelbar im Feuerungsraum der Nachbrennkammer abgezogen. Ein integrierter Keramikfilter kann die Abscheideleistung zusätzlich steigern. Analysen der Aschen aus Nachbrennkammer und Keramikfilter zeigten eine signifikante Schadstoffentfrachtung sowie eine hohe Phosphorlöslichkeit. Eine im Anlagenkonzept vorgesehene Additivdosierung – bei

der das Additiv direkt mit dem Brennstoff in den Verbrennungsraum eingebracht wird optimiert Schadstoffentfrachtung und Phosphorlöslichkeit. Die erzeugten Aschen waren durchgehend feinkörnig, verklumpungsfrei und wiesen praktisch keinen Rest-Kohlenstoff auf. Die Aschequalität kann den Anforderungen der DüMV entsprechen. Neben der Möglichkeit, die Asche mit Kalk als landwirtschaftlichen Dünger auszubringen, wurde die Granulierbarkeit untersucht. Die Aschen aus der Staubfeuerung kamen bei Pflanzversuchen im standardisierten Pflanzenversuchsstand des Fraunhofer IKTS zum Einsatz. Dabei zeigte sich eine gute Düngewirkung, und es wurden insgesamt positive Ergebnisse erzielt.

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurde das Pontes Pabuli-Verfahren weiterentwickelt und optimiert. Neben dem Pontes Pabuli Standardverfahren, auch FLEX-Verfahren genannt, da die Abreicherung von Schwermetallen flexibel als Modul zugeschaltet werden kann, reihen sich das EcoPLUS- und PerfectCLEAN-Verfahren ein. Das EcoPLUS-Verfahren eignet sich für hochwertige Klärschlammaschen und kommt daher ohne Schwermetallabtrennung aus und ist durch niedrige Betriebs- und Investkosten charakterisiert. Mit dem PerfectCLEAN-Verfahren können Schwermetalle nach Bedarf größer 90% abgeschieden und die Phosphatkonzentration auf größer 40% eingestellt werden. Somit ist es möglich, mit der Technologieplattform Aschen mit verschiedenen Quali-

### 3.3.3 KlimaPhoNds

Das KlimaPhoNds-Verfahren ermöglicht die gezielte Rückgewinnung von Phosphor alleinig aus eingedicktem Überschussschlamm auf Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination ohne dabei in die Abwasserbehandlung einzugreifen.

Das Verfahren setzt unmittelbar nach der Schlammverdickung an und beginnt mit der Phosphorrücklösung, die auf einer thermisch intensivierten Schlammversäuerung (Hydrolyse) basiert. Dabei werden bis zu 70% der im Schlamm gespeicherten Phosphorfracht als Ortho-Phosphat in das Schlammwasser rückgelöst. Schwankungen in der Rücklösungsrate können durch den Einsatz von Zitronensäure ausgeglichen werden, ohne dass Schwermetalle in Lösung gehen. Diese Verfahrensweise ermöglicht die Anwendung des KlimaPhoNds-Verfahrens auch auf Kläranlagen mit nur teilweiser biologischer Phosphorelimination. Die rückgelösten Phosphate werden aus der nahezu feststofffreien Flüssigphase (Zentrat) nach Entwässerung des versäuerten ÜSS (Hydrolysat) als MAP gefällt und abgetrennt. Zur MAP-Fällung wird dem Zentrat Natronlauge und das Fällmittel Magnesiumchlorid zudosiert. Es entstehen MAP-Kristalle, die nach Errei-

täten zu verwerten und hochwertige Düngerprodukte in gleichbleibenden Qualitäten herzustellen. Im Projekt wurden Aschen aus unterschiedlichen Verbrennungstechnologien eingesetzt. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die jeweiligen Verfahrensvarianten unabhängig von der Verbrennungstechnik eingesetzt und gleichbleibende Düngerqualitäten sichergestellt werden können. Hierzu wurden umfangreiche Versuchsreihen zur Optimierung und Anpassung ashespezifischer Parameter wie Granulometrie durchgeführt.

Die Pflanzenverträglichkeit und Düngerwirkung der erzeugten Pontes Pabuli Düngeprodukte wurde vom Fraunhofer IKTS im standardisierten Pflanzversuchsstand im Labor nachgewiesen. Weitere Pflanzversuche wurden im Gewächshaus und im Freiland von der Veolia für Qualitätssicherungszwecke durchgeführt. Anhand der Ergebnisse der Pflanzversuche konnten Rückschlüsse zu den erzeugten Düngerprodukten und der verwendeten Säurespezifika und Verfahrensführung abgeleitet werden. Diese Erkenntnisse wurden im Optimierungsprozess berücksichtigt. Neben der technischen Optimierung erfolgte parallel eine erste technische Kalkulation der Gesamtanlage im Rahmen der Arbeitspakete zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Teilkonzeption. Dabei wurden Erfahrungen und Kennzahlen aus dem Realbetrieb übertragen und mögliche Szenarien für die großtechnische Umsetzung abgeleitet.

chen einer ausreichenden Größe batchweise aus dem Fällungsreaktor entnommen und durch einfache Filtration abgetrennt werden.

Das entwässerte ÜSS-Hydrolysat wird (rück)verdünnt, um die Faulung wie bisher weiter betreiben zu können. Als Verdünnungswasser wird der phosphatarme Ablauf des Fällungsreaktors genutzt, so dass der Eingriff in die Kläranlage ausschließlich auf die Überschussschlammbehandlung begrenzt ist.

Ergänzend zur Abgabe und Verwertung des MAP erfolgt eine zweistufige Veredelung des MAPs zu technischer Phosphorsäure mittels einer Kalzinierung und der PARFORCE-Technologie (Pilotmaßstab, TRL6). Nebenprodukte der Veredelung sind eine Magnesiumchlorid-Lösung und Ammoniakwasser. Die zurückgewonnene Magnesiumchlorid-Lösung wird (zeitweise) als Fällungsmittel auf der Kläranlage eingesetzt.

Eine Besonderheit von KlimaPhoNds ist die Integration einer „wärmeneutralen“ Trocknung mit überhitztem Wasserdampf. Mit der sogenannten Wirbelschichtverdamp-

fungstrocknung wird vollgetrockneter Klärschlamm erzeugt, und zugleich ein Trocknerbrüden mit ca. 160 °C zur erneuten Wärmenutzung bereitgestellt. Da der Brüden nahezu vollständig aus Wasserdampf besteht, kann durch eine Kondensation fast die gesamte Trocknungswärme zurückgewonnen werden. Diese Wärme wird am Standort in eine Wärmezentrale abgegeben und ist für die Beheizung von Faulung und Hydrolyse nutzbar.

Bisherige Ergebnisse weisen auf einen geringen Energie- und Chemikalienverbrauch und auf eine gute MAP-Qualität hin. Mit Berücksichtigung der Trocknung für eine mehrfache Wärmenutzung wird eine Reduzierung der Gesamtemissionen der Kläranlage erwartet, d.h. trotz des zusätzlichen Aufwands für die Phosphor-Rückgewinnung wird durch entsprechende Gutschriften (Verwertung von MAP und Verbrennung von getrocknetem Klärschlamm) eine Reduzierung der Gesamtemissionen erreicht.

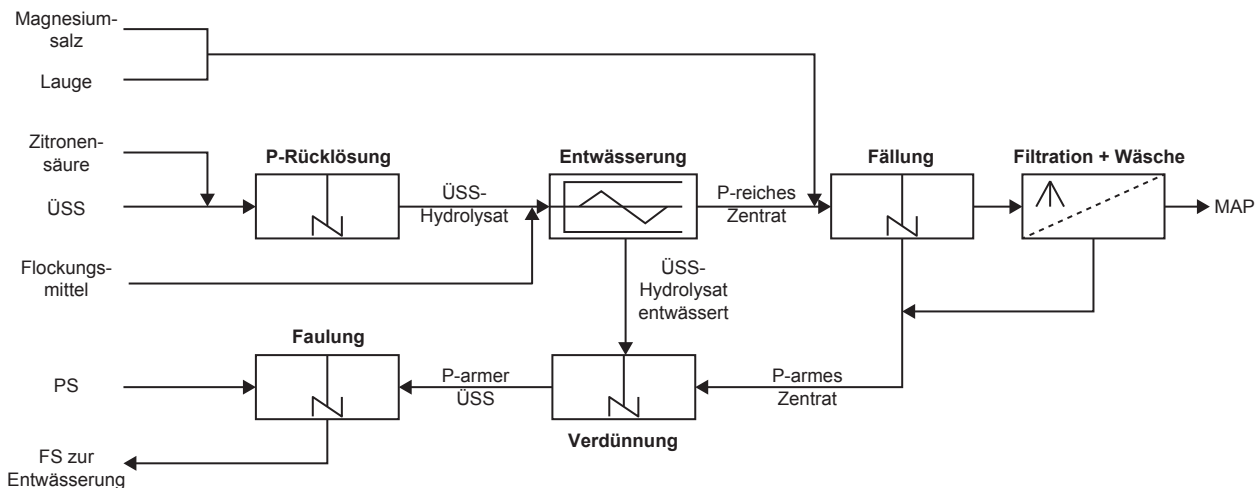


Abbildung 28: Verfahrensschema des KlimaPhoNds-Verfahrens. © KlimaPhoNds

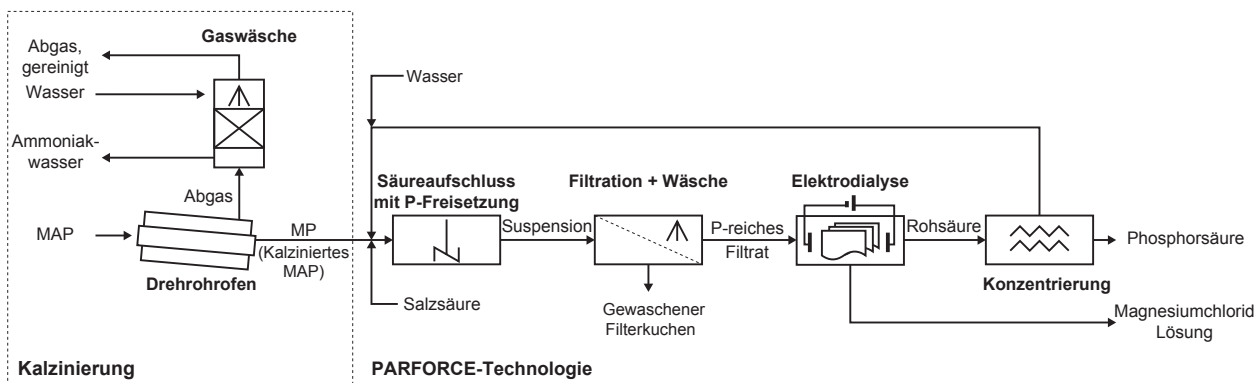


Abbildung 29: Verfahrensschema der KlimaPhoNds-MAP-Veredelung. © KlimaPhoNds

### Erfahrungen aus der technischen Umsetzung

Die Herausforderung bei der Entwicklung eines dezentralen Verfahrens zur Phosphor-Rückgewinnung auf Kläranlagen lag darin, die Einhaltung des Grenzwerts von 20 g P/kg TM zu gewährleisten und gleichzeitig eine technisch robuste, benutzerfreundliche sowie ökonomisch tragfähige Lösung zu realisieren. Das KlimaPhoNds-Verfahren erfüllt diese Anforderungen, indem es die Phosphor-Rückgewinnung gezielt auf eingedickten ÜSS beschränkt. Dadurch kann ein vergleichsweise geringer Volumenstrom behandelt werden, was sowohl

die Anlagengröße als auch die Betriebskosten reduziert. Um bei diesem Ansatz eine zuverlässige Grenzwertunterschreitung sicherzustellen, sind hohe Mindestrücklösungsraten von Phosphor aus dem ÜSS unerlässlich. Wie in der nachfolgenden Verfahrensbilanzierung (vgl. Abbildung 30) beispielhaft veranschaulicht, muss für eine Grenzwertunterschreitung in der Regel mind. 50% der im Schlamm enthaltenen Phosphorfracht rückgewonnen werden.

Die erforderliche P-Rücklösungsrate aus ÜSS sollte mindestens 60% betragen, da die rückgelösten Phosphate nicht

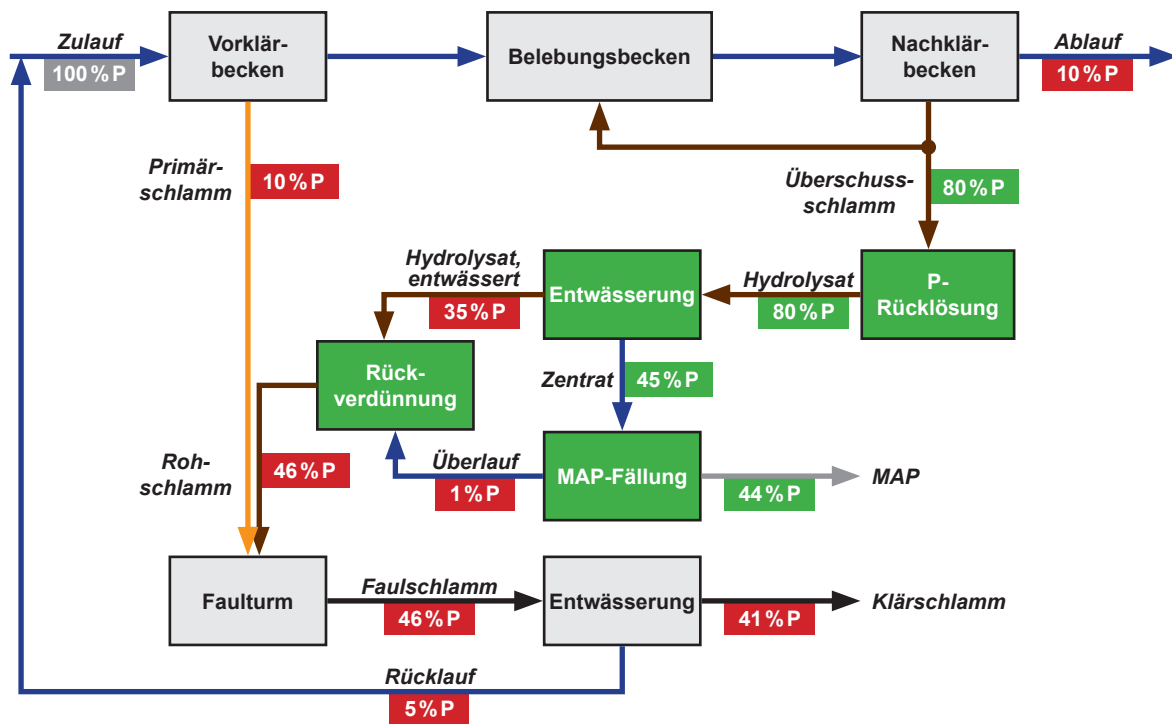


Abbildung 30: P-Bilanzierung des KlimaPhoNds-Verfahrens. © KlimaPhoNds

vollständig rückgewinnbar sind. Durch die MAP-Fällung aus nahezu feststofffreiem Zentrat lässt sich zwar ein sauberes Phosphat-Rezyklat durch einfache Filtration gewinnen. Allerdings ist die Abtrennung des Zentrats im Zuge der Entwässerung auf 75 % begrenzt, sodass rund 25 % des phosphatreichen Zentrats im Schlamm verbleiben. Da auch die MAP-Fällung unter optimalen Bedingungen (pH 8,5 – 9 und leicht überstöchiometrischer Magnesiumdosierung) eine Fällung von maximal 98 % der Phosphate ermöglicht, werden insgesamt 74 % der rückgelösten Phosphor-Fracht zurückgewonnen. Wird überdurchschnittlich viel Phosphor über den Primärschlamm aus dem Abwasser entfernt, wie es auf der Kläranlage Northeim der Fall ist, sind höhere Mindestrücklösungsrate von über 65 % erforderlich.

Auf Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination (Bio-P) ermöglicht die thermisch intensivierte Schlammversäuerung eine ausreichend hohe Phosphatrücklösung für eine Grenzwertunterschreitung. In einem Temperaturbereich von 50 – 60 °C werden innerhalb von 24 – 48 Stunden ca. 70 % des Phosphors aus dem ÜSS rückgelöst. Gleichzeitig wird ausreichend Ammonium für eine MAP-Fällung freigesetzt, so dass auf eine zusätzliche Stickstoffquelle, wie z. B. Zentrat aus der Faulschlammmentwässerung, verzichtet werden kann.

Begleitende Rücklösungsversuche mit dem ÜSS der Kläranlage Northeim zeigten, dass auch unter günstigen Bio-P-Bedingungen die erforderliche Mindestrücklösungsrate teilweise nicht erreicht werden kann. Saisonale Temperaturschwankungen sowie Betriebsstörungen bspw. infolge

von Starkregenereignissen können die Bio-P-Aufnahme und damit die Phosphorrücklösung verringern. Um auch unter schlechten Betriebsbedingungen eine ausreichende Phosphorrücklösung sicherzustellen, wird bei Bedarf Zitronensäure in die Versäuerung dosiert. Bereits geringe Mengen reichen aus, um genügend chemisch gebundene Phosphate freizusetzen und eine Grenzwertunterschreitung sicherzustellen.

Das im Prozess erzeugte MAP weist geringe organische Verunreinigungen auf (< 1 Ma-%). Elementaranalysen bestätigen, dass die Schwermetallgehalte auch bei Zitronensäurezugabe sicher unter den in der Düngemittelverordnung (DüMV) festgelegten Grenzwerten liegen, wodurch das Produkt für die Verwertung als Düngemittel-Rezyklat geeignet ist.

Ergänzend wurde eine zweistufige Veredelung des MAPs zu Phosphorsäure, Magnesiumchlorid und Ammoniakwasser mittels Kalzinierung und der PARFORCE-Technologie untersucht. In der Kalzinierungsstufe wird das MAP zunächst thermisch zu Magnesiumphosphat (MP) umgewandelt, wobei Wasser, Ammonium und organische Verunreinigungen entfernt werden, da diese zu Schwierigkeiten im nachgeschalteten PARFORCE-Prozess führen. Die Kalzinierungstemperatur und somit der Energiebedarf werden vorrangig von der org. Belastung des MAPs bestimmt. Das Northeimer MAP weist nur geringe Verunreinigungen auf, da es direkt aus dem nahezu feststofffreien Zentrat gefällt wird. Bereits Temperaturen von etwa 200 °C sind hierfür ausreichend. Gleichzeitig

kann Ammoniak aus dem Abgasstrom der Kalzinierung zurückgewonnen werden. Weiterführende Untersuchungen zur Produktqualität und den erzielbaren Rückgewinnungsquoten laufen noch.

Mittels der PARFORCE-Technologie können aus einer Tonne Magnesiumphosphat (MP) 880 Kilogramm Phosphorsäure (75%ig) sowie ca. 4 Tonnen Magnesiumchlorid-Lösung (15%ig) gewonnen werden. Letztere wird hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit als Fällungsmittel für die MAP-Fällung auf der Kläranlage getestet.

### 3.3.4 P-Net

Das am Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW) der Technischen Universität Braunschweig entwickelte Peco-Verfahren basiert auf einer anaerob-biologischen P-Rücklösung mit anschließender Struvitfällung zur P-Fixierung. Das P-Rücklöseverfahren verzichtet auf den Einsatz von mineralischen Säuren und Laugen, da das Verfahren nicht auf chemischen Extraktionsmethoden, sondern auf einer verstärkten anaerob-biologischen P-Remobilisierung basiert.

Auf kommunalen Kläranlagen ist in der Regel im Überschussschlamm (ÜS) die größte P-Senke zu erwarten. Im Gesamtsystem der Abwasserbehandlung steht das Peco-Verfahren vor der Schlammfäulung und stellt einen zusätzlichen Verfahrensschritt der Schlammbehandlung dar. Dazu wird der ÜS zusammen mit einem geeigneten Co-Substrat mit leicht verfügbarem Kohlenstoffanteil (C-Quelle) anaerob inkubiert. Der daraus resultierende Stoffstrom wird als Remobilisat bezeichnet und der fest/flüssig-Trennung zugeführt, um die  $PO_4$ -P-reiche Phase abzuscheiden und diese der Struvit-Fällung zuzuführen. Somit zielt das Verfahren darauf ab, bereits vor der Fäulung quantitativ hohe P-Frachten aus dem Klärschlamm auszuschleusen, um der nachfolgenden Klärschlammfäulung einen möglichst P-armen Schlammstrom zuzuführen. Als Ergebnis ist ein P-abgereicherter Faulschlamm zu erwarten. Darüber hinaus wird auch das P-haltige Zenstrat der Faulschlammmentwässerung der Struvit-Fällung zugeführt, um die Gesamt-P-Recyclingquote zu erhöhen.

Während der anaeroben-biologischen P-Remobilisierung werden verschiedene Mechanismen in Gang gesetzt, die in Summe relevante Anteile an organisch und mineralisch gebundenem P in Lösung bringen. Dazu gehört die Produktion organischer Säuren durch die fakultativ-anaeroben Mikroorganismen, die zu einer pH-Absenkung führt. Darüber hinaus setzen phosphatakkumulierende Bakterien durch Aufnahme leicht verfügbarer Kohlenstoffverbindungen den größten Teil ihrer biologisch gebundenen Polyphosphate als Orthophosphat frei. Der niedrige pH-

Nach der Inbetriebnahme der Anlagentechnik im September 2025 wird täglich aus etwa 30 m<sup>3</sup> Überschussschlamm Phosphor zurückgewonnen. Laut der aktuellen Abschätzung können jährlich bis zu 70 Tonnen MAP mit dem KlimaPhoNds-Verfahren produziert werden, was einer reinen Phosphorfracht von rund 9 Tonnen P entspricht. Bei einer Belastung der Kläranlage von etwa 40.000 Einwohnerwerten (EW) ergibt dies eine Rückgewinnung von 0,2 Kilogramm Phosphor pro EW und Jahr (0,55 g/E\*d). Die Veredelung des MAPs würde jährlich zu 30 Tonnen Phosphorsäure führen.

Wert und das niedrige Redoxpotenzial im Remobilisierungsreaktor werden von den eisenatmenden Bakterien bevorzugt, wodurch auch die eisenfixierten Phosphate reduziert und rückgelöst werden.

Die P-Remobilisierungsrate (PRR) ist definiert als das prozentuale Verhältnis der gelösten P-Konzentration zur gesamten P-Konzentration im Schlamm. Die Untersuchungen im Technikumsmaßstab mit dem ÜS aus der kommunalen Kläranlage der Stadt Braunschweig (Kläwerk Steinhof, KWS) haben gezeigt, dass unter Anwendung des kläranlageneigenen Primärschlammes (PS) als C-Quelle Remobilisierungsraten über 70% zu erreichen sind. Diese Ergebnisse wurden im Rahmen von zwei Upscaling-Versuchen in einem Schlamm Speicher mit 1.300 m<sup>3</sup> Gesamtvolumen bestätigt.

### Erfahrungen aus der technischen Umsetzung

Basierend auf diesen Ergebnissen startete im November 2023 der erste großtechnische kontinuierliche Betrieb der P-Remobilisierung auf dem KWS. Die vorhandene Anlagentechnik hat in Braunschweig die Realisierung einer solchen Betriebsumstellung ohne zusätzliche Baumaßnahmen ermöglicht. Zur Remobilisierung wurde ein Faulbehälter mit einem Volumen von 2.100 m<sup>3</sup> umgenutzt. Allerdings ist aufgrund der Kapazitäten der zur Verfügung stehenden Anlagenkomponente die Entwässerung des anfallenden Remobilisats nur begrenzt möglich. Zudem war die vorhandene Thermodruckhydrolyse nach der fest/flüssig-Trennung des Remobilisats und vor der Fäulung nicht zu umgehen, wodurch lediglich ein Teilstrom des Remobilisats entwässert und der Fäulung zugeführt werden konnte. Das restliche Remobilisat musste ohne Entwässerung in die Fäulung gegeben werden. Aus diesem Grund mussten die Änderungen der P-Frachten durch die Implementierung des Peco-Verfahrens für die Kläranlage Braunschweig auf Basis der gewonnenen Ergebnisse modellhaft berechnet werden (Abbildung 32).

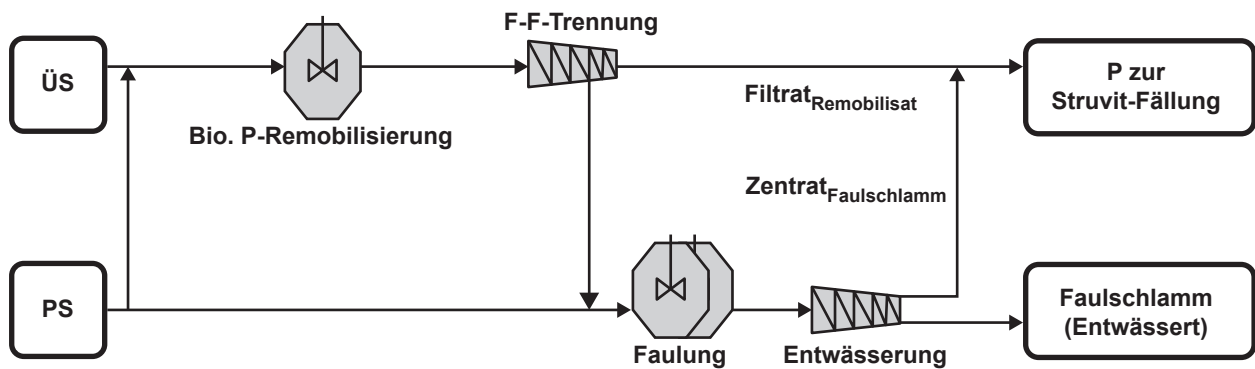


Abbildung 31: Das vereinfachte Fließschema des Peco-Verfahrens. © ISWW

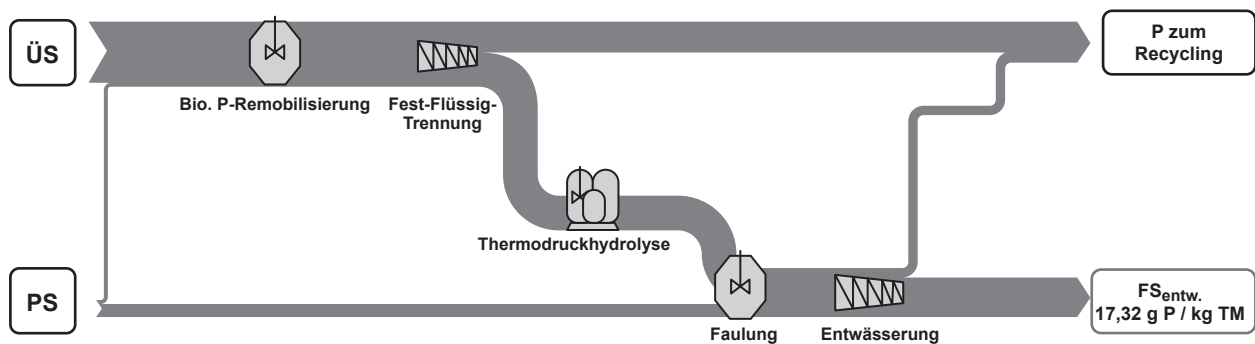


Abbildung 32: Rechnerische P-Frachten nach Implementierung der anaerob-biologischen P-Remobilisierung auf dem KWS; FSentw.: entwässerter Faulschlamm. © ISWW

Auch während der großtechnischen kontinuierlichen P-Remobilisierung wurden Rücklöseraten bis 70 % erzielt. Zudem wurde eine sehr gute Eindick- bzw. Entwässerbarkeit des Remobilisats festgestellt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse hat die modellhafte Berechnung der P-Frachten für das KWS gezeigt, dass nach der Implementierung der anaerob-biologischen P-Remobilisierung die Einhaltung eines P-Gehaltes von 20 g P / kg TM im Faulschlamm möglich ist (vgl. Abbildung 32).

Das entstehende Filtrat (FiltratREM) ist reich an gelösten Phosphaten und eignet sich hervorragend zur P-Rückgewinnung in Form von Struvit. Für die Struvitfällung wird zusätzlich eine Magnesiumquelle als Reaktionspartner sowie eine Lauge zur pH-Regulierung benötigt. Filtrat-REM ist ein schwach gepuffertes System. Daher werden trotz des niedrigen pH-Wertes nach der Remobilisierung nur geringe Mengen Lauge zur pH-Regulierung benötigt.

Zur Integration des Peco-Verfahrens in den konventionellen Betrieb einer Kläranlage werden lediglich drei zusätzliche Verfahrensstufen benötigt. Zum einen besteht der Bedarf an einem ausreichend großen Behälter zur anaerob-biologischen Remobilisierung in Kombination mit einem Aggregat für die fest/flüssig-Trennung des Remobilisats. Zum anderen benötigt das Peco-Verfahren einen P-Fällungsreaktor mit dazugehöriger Anlagenperipherie, um das PO<sub>4</sub>-P-reiche Schlamwasser in Form von Struvit zurückzugewinnen.

### 3.3.5 RePhoRM

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

Im ersten Verfahrensböck werden schwermetallbeladene Klärschlammaschen einem nasschemischen Extraktionsprozess unterzogen. In diesem Prozess erfolgt die Trennung von Schwermetallen und Phosphor durch Einsatz von Mineralsäure bei pH-Werten um pH 1 in einem diskontinuierlich betriebenen Rührreaktor und kurzen Aufenthaltszeiten. Zur Rücklösung des Phosphors aus Calciumphosphaten (z. B. Apatit, Whitlockit, Brushit) werden die KSA in einem Säure-Wasser-Gemisch suspendiert. Das Massenverhältnis Wasser/KSA wird auf max. 8 kg H<sub>2</sub>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 50–70% (Cr, Cu, Cd) bis zu 90% (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. Dieser Prozess unterstützt das Erreichen eines geforderten Rückgewinnungsziels von 80% bezogen auf die eingesetzte P-Fracht. Die Flüssigphase und das Waschwasser werden als P-reiches Filtrat vereint und dem nächsten Verfahrensböck zugeführt. Der entwässerte Feststoff verbleibt zur Entsorgung oder in Abhängigkeit des Schwermetallanteils zur weiteren Verwertung.

Im zweiten Verfahrensböck 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 Zuschlagsstoffen, wie auf Kläranlagen gewonnenen Magnesium-Ammonium-Phosphaten (MAP), Dicalciumphosphaten (DCP) oder Ammoniumsulfat, in einer weiteren, 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 38) eingestellt werden. Nach einer ausreichenden Reaktionszeit werden die primären Mineralphasen in lösliche Calcium- und Magnesiumdihydrogenphosphate überführt. Nach der Reaktion erfolgt in einem zweiten Prozessschritt durch die Entwicklung der Glatt Ingenieurtechnik GmbH die Erzeugung eines Düngegrnulats 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, Restfeuchte und 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 Abwärme werden möglichst quantitativ in den Prozess zurückgeführt.

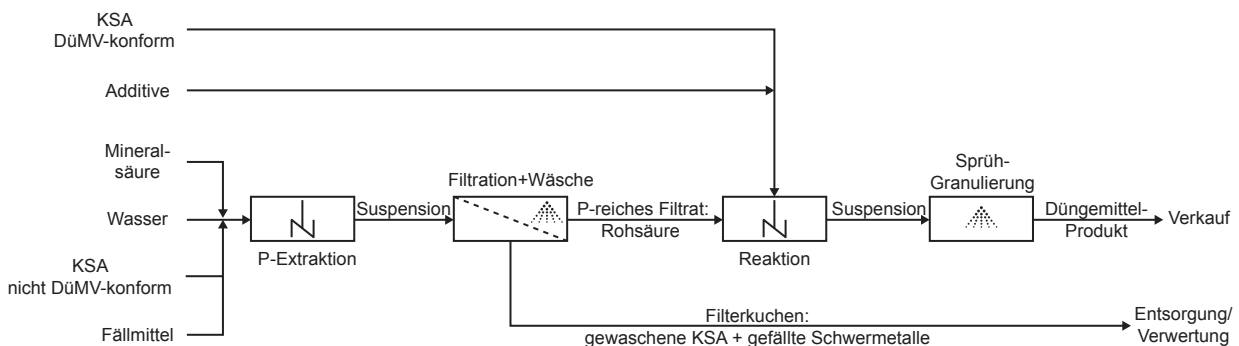


Abbildung 33: Vereinfachtes Prozessschema der P-Rückgewinnung im Projekt RePhoRM. © IWAR, TU Darmstadt



## Erfahrungen aus der technischen Umsetzung

### Zusammensetzung der Mischasche

Mit der Demonstrationsanlage auf dem Gelände des Industrieparks Höchst wurden in zwei Intensivversuchsphasen die Grundlagen zur technischen Umsetzung des erweiterten PHOS4green-Verfahrens gelegt. Die in den Versuchen eingesetzte Ausgangsasche bestand aus Ascheproben der beteiligten Projektpartner, die in wechselnden Massenanteilen gemischt wurden, um ein weites Spektrum möglicher Aschezusammensetzungen im Extraktionsprozess abdecken zu können. Der Wertebereich zur Zusammensetzung dieser Mischaschen hinsichtlich der wichtigsten Elemente ist in Tabelle 12 dargestellt.

**Tabelle 12: Zusammensetzung der Mischaschen.**

Element	Konzentrationsbereich (mg/kg)
Aluminium (Al)	49.239–87.884
Arsen (As)	21–26
Kalzium (Ca)	71.365–15.4288
Cadmium (Cd)	5–11
Chrom (Cr)	78–197
Kupfer (Cu)	704–1.188
Eisen (Fe)	31.712–91.404
Kalium (K)	5.901–7.887
Magnesium (Mg)	12.585–13.272
Natrium (Na)	2.900–5.972
Nickel (Ni)	71–131
Phosphor (P)	54.309–77.814
Blei (Pb)	95–154
Schwefel (S)	3.200–15.492
Thallium (Tl)	N/A
Zink (Zn)	2.179–3.128

### Extraktion

Der Extraktionsreaktor wurde mit variierenden Zulaufverhältnissen von Mineralsäure, Wasser und Mischasche betrieben. Wasser wurde vorgelegt, Asche suspendiert und zum Start der Reaktion mit Mineralsäure versetzt. In Fällen, in denen höhere Konzentrationen an Schwerme-

tallen in der Asche beobachtet wurden, wurden zusätzlich zwei Arten von Fällungsmitteln in unterschiedlichen Dosierungen verwendet, um die Schwermetallentfernung parallel zur P-Rücklösung zu verbessern. Diese Zulaufverhältnisse und die Dosierungsbereiche der eingesetzten Fällungsmittel (FM) sind in Tabelle 13 aufgeführt. Der Massenanteil der Säure in der Reaktionsmischung bezieht sich auf Reinsäure (100%).

Nach kurzer Reaktionszeit (< 1 h) wurde die saure Aschesuspension in die Fest-Flüssig-Trennung überführt. Optional wurde der in der Separation zurückbleibende Filterkuchen unter Verwendung von weichem Wasser gewaschen, um die Verlagerung gelöster Phosphate in das Filtrat des Extraktionsprozesses zu begünstigen. Dies stellte sich auch im Hinblick auf die gesetzlich geforderte P-Rückgewinnungsquote von 80% als durchweg positiv heraus. Die aus den Massenbilanzen der Versuche ermittelten P-Rücklösungsraten in Bezug auf die in der Ausgangsasche eingesetzte Phosphormasse sind in Tabelle 14 unter verschiedenen Behandlungsbedingungen (mit und ohne Filterkuchenwäsche) dargestellt. In der zweiten Versuchsphase konnten durch Optimierungen der Rezeptur und des Waschprozesses kontinuierlich P-Rücklöseraten weit über 80% erzielt werden.

Das erzeugte Filtrat wurde im Hinblick auf eine Einhaltung der Schwermetallgehalte gemäß Düngemittelverordnung bewertet. Tabelle 15 zeigt die analysierten Massenteile (bezogen auf Gesamttrockenmasse im Filtrat) für relevante Schwermetalle im Vergleich zu den zulässigen Grenz- bzw. Orientierungswerten gemäß DüMV.

In Versuchsphase 2 konnte durch Optimierungen insbesondere hinsichtlich der Elemente Ni und Cu eine verbesserte Elimination erreicht werden, die zu einem signifikanten Rückgang der Restkonzentrationen im Filtrat führten. Insgesamt wurden für die relevanten Schwermetalle sehr hohe Eliminationsraten erreicht, d.h. manche dieser Elemente verbleiben nahezu vollständig im Filterkuchen nach Extraktion. Darüber hinaus wurde die Verlagerung der begleitenden Elemente Aluminium und Eisen in das Filtrat reduziert. Das erzeugte, P-reiche Filtrat erfüllt hinsichtlich der enthaltenen Schwermetalle alle Anforderungen an ein Düngemittel nach DüMV. Dieses Filtrat wird im weiteren Prozess zum Aufschluss bereits düngemittelkonformer Klärschlammaschen und zur Granulierung des Düngemittelzyklats eingesetzt.

**Tabelle 13: Zulaufverhältnisse und Dosierungen der Fällungsmittel.**

Zulauf	H <sub>2</sub> O : Säure (100%) : Asche (-)	Fällungsmittel (g/kg Asche):	
		FM <sub>1</sub>	FM <sub>2</sub>
<b>Bereich</b>	3,45–4,00 : 0,48–0,51 : 1	3–9	28–83

**Tabelle 14: Erzielte P-Rücklöseraten.**

Versuchsphase	P-Rücklöseraten (%)	
	Ohne Wäsche	Mit Wäsche
1	75–92	82–97
2	–	89–98

**Tabelle 15: Schwermetallgehalte im Filtrat und DüMV.**

Element	DÜMV (mg/kg TM)	Phase 1		Phase 2	
		w (mg/kg TM)	Elimination (%)	w (mg/kg TM)	Elimination (%)
As	40	13–24	57–80	16–25	43–68
Cd	50	2–5	75–80	3–4	58–78
Cr	300	21–123	61–85	45–80	77–92
Ni	80	24–48	65–90	24–30	86–92
Hg	1	N/A	N/A	N/A	N/A
Tl	1	N/A	N/A	N/A	N/A
Pb	150	1–5	98–100	28–52	85–94
Cu	900	521–924	49–78	5–176	89–100
Zn	4000	577–950	82–89	477–918	85–94
Al	–	42.262–86.022	39–63	41.358–78.952	55–83
Fe	–	11.965–30.157	81–89	16.683–29.629	82–93

### Rückstandsanalyse

Wie in allen nasschemischen Extraktionsprozessen fallen auch im erweiterten PHOS4green-Verfahren nicht unwesentliche Mengen mineralischer Rückstände an, die verwertet oder einer weiteren Entsorgung zugeführt werden müssen. Die in den Versuchen dazu ermittelten spezifischen Rückstandsanteile werden in Tabelle 16 zusammengefasst.

Aus der Rückstandsanalyse wird deutlich, dass ein erheblicher Anteil der in der Ausgangsasche vorhandenen Fällmittelkationen (Fe, Al) im Filterkuchen verbleibt und dass bis zu eine Tonne Filterkuchentrockenmasse pro Tonne eingesetzter Klärschlammasche entstehen kann.

**Tabelle 16: Restmengen pro t rückgewonnenen Phosphor und pro t Klärschlammasche.**

Phase	SM (kg/t KSA)	SM (kg/t P)	M (kg/t KSA)	M (kg/t P)	FK (kg/t KSA)	FK (kg/t P)
1	1,23–5,55	16–118	57–219	767–4.634	266–941	3539–19.884
2	0,68–2,82	11–50	34–152	545–2.653	235–987	3761–17.219

**SM:** Gesamtmasse der gemäß der Düngemittelverordnung (DüMV) regulierten Elemente: As, Cd, Cr, Ni, Hg, Tl, Pb, Cu und Zn.

**M:** Gesamtmasse aller im Filterkuchen (Trockensubstanz) analysierten Elemente, ausgenommen Phosphor und Schwefel. Dazu zählen Al, As, Ca, Cd, Cr, Fe, K, Mg, Na, Ni, Pb, Tl und Zn.

**FK:** Trockenmasse des Filterkuchens nach dem Versuch.

### 3.3.6 R-Rhenania

Im Projekt R-Rhenania werden zwei Varianten (AshDec® und R-Rhenania-Verfahren) des thermochemischen Prozesses mit Zudosierung von (Erd-)Alkalien untersucht. Beim AshDec®-Verfahren wird Klärschlammasche in einem nachgeschalteten Drehrohrofen thermochemisch behandelt (vgl. Abbildung 34). Es werden verschiedene Szenarien erprobt. Beim R-Rhenania-Verfahren findet der thermochemische Prozess direkt in der Verbrennung von Klärschlamm statt und wird am Standort Altenstadt als Demonstrationsanlage umgesetzt (vgl. Abbildung 35). Für den Standort Altenstadt sollte im Rahmen des Projekts R-Rhenania ursprünglich die Klärschlammasche mit dem nachgeschalteten AshDec®-Verfahren aufbereitet werden, um die geforderten P-Löslichkeiten nach Klärschlammverordnung zu erfüllen. Aufgrund der im Jahr 2021 sprunghaft gestiegenen Erdgaspreise wurde an einer energieeffizienteren Variante des AshDec®-Verfahrens geforscht. Es wurde im kleintechnischen und industriellen Maßstab untersucht, ob und wie das nachgeschaltete thermochemische Verfahren direkt in die Verbrennung integriert werden kann. Basierend auf erfolgreichen Demonstrationskampagnen in der Industrieanlage konnte die Firma Emter das neue R-Rhenania-Verfahren in Ihre Monoverbrennungsanlage integrieren.

#### AshDec®-Verfahren: Thermochemischer Prozess im nachgeschalteten Drehrohrofen

Das AshDec®-Verfahren ist ein von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und Metso:Outotec (OT) patentiertes (DE 10 2014 108 199) thermochemisches Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen, bei dem der in der Asche schlecht pflanzenverfügbare Phosphor in eine gut pflanzenverfügbare Phosphorverbindung überführt wird. Gleichzeitig können Schwermetallgehalte abgesenkt werden. Ein Verfahrensfliießbild ist in Abbildung 35 dargestellt. Die Asche wird in einen Drehrohrofen eingebracht, wo sie mit einer Alkali-Komponente (z.B. Natriumcarbonat) als Reaktionspartner gemischt und bei etwa 900 °C für 20 Minuten behandelt wird. Bei diesem Kalzinierungsprozess entsteht die Phosphatverbindung Calcium - Natrium - Phosphat ( $\text{CaNaPO}_4$ ), welche auch die pflanzenverfügbare Phosphatphase des bekannten R-Rhenania Phosphats war. Einige Schwermetalle in den Aschen, wie etwa Cadmium, Arsen, Blei, Quecksilber und Thallium, können durch die Zugabe von Klärschlamm als Reduktionsmittel oder eine reduzierende Betriebsweise (unterstöchiometrischer Betrieb des Brenners) in eine verdampfbare Form überführt und über die Gasphase separiert werden. Der Prozess der Schwermetallentfernung kann durch die Wahl der Betriebsparameter beeinflusst werden.

Das AshDec®-Verfahren konnte in mehreren Versuchs- und Produktionskampagnen in einem Drehrohrofen im semi-industriellen Maßstab optimiert werden. Bei den Kampagnen wurden verschiedene Natriumadditive, Mischungsverhältnisse und Prozessparameter (u.a. Durchsatz 20–50 kg/h, Temperatur, Verweilzeit, Atmosphäre) untersucht. Vor dem Projekt R-Rhenania fand eine Kampagne im Jahr 2014 mit einer Produktion mit 2 t und 2018 mit 1,5t AshDec®-Produkt statt. Im Jahr 2020 konnten in zwei weiteren Kampagnen insgesamt 2 t AshDec®-Produkt im Rahmen von R-Rhenania hergestellt werden. Durch diese vier Kampagnen wurde das AshDec®-Verfahren untersucht und verbessert, zusätzlich konnten insgesamt über 5 t AshDec®-Produkt im Zeitraum von 2014 bis 2020 unter gezielt variierten Prozessbedingungen hergestellt werden. Mit den erzeugten AshDec®-Produkten konnte in zahlreichen Gefäß- und Feldversuchen die hohe Düngewirkung zuverlässig bestätigt werden.

Das AshDec®-Verfahren stellt ein robustes und erprobtes P-Rückgewinnungsverfahren dar und kann zur Aufbereitung von Klärschlammaschen eingesetzt werden. Eine erfolgreiche Umsetzung des AshDec®-Prozesses wird begünstigt durch ein optimiertes Wärmekonzept (z.B. Abwärmerückgewinnung/-nutzung, Übernahme heißer Asche aus der Monoverbrennung). Für die Entfernung erhöhter Schwermetallgehalte z.B. von Blei oder Kupfer können die Prozessparameter entsprechend angepasst werden.

#### R-Rhenania-Verfahren: Thermochemischer Prozess direkt in der Verbrennung

Am Standort Altenstadt ist seit 2009 eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage mit der Rostfeuerungsstechnologie in Betrieb. Aufgrund der hohen Feststoffverweilzeiten eines Feststoffbettes auf dem Rost konnte der beschriebene thermochemische AshDec®-Prozess direkt in die vorhandene Klärschlammverbrennung integriert werden.

Zunächst wurden Voruntersuchungen der Emter GmbH mit Direktodosierung des Natriumadditivs in die Verbrennung mit positiven Ergebnissen vorgenommen. Daraufhin wurde im Mai 2022 in einer 4-tägigen Versuchskampagne die Direktodosierung des Natriumadditivs in die Verbrennung mit einem Durchsatz von ca. 300 Tonnen Klärschlamm und unter kontinuierlicher Probenahme und analytischer Auswertung durchgeführt.

Basierend auf den erzielten Ergebnissen in der Versuchskampagne konnte die Klärschlammmonoverbrennung mit einer Rostfeuerung am Standort Altenstadt auf das neue Verfahren umgerüstet werden (vgl. Abbil-

dung 35). Diese thermochemische Behandlung mit Alkaliadditiv direkt in der Monoverbrennungsanlage wird, analog zum Projektakronym, als R-Rhenania-Verfahren bezeichnet. Durch eine Zudosierung vor der Trocknung wird Natriumkarbonat am Standort Altenstadt in den Klärschlamm eingemischt. Diese Klärschlamm-Natriumkarbonat-Mischung wird anschließend in zwei Schneckenrocknern getrocknet. Mit einem ungefähren TS-Gehalt von 75 % wird die getrocknete Mischung auf zwei Linien der Rostfeuerung bei bis zu 900 °C thermochemisch behandelt.

Die Schwermetalle wie As, Cd, Hg, Pb und Tl können durch die Einstellung der Verbrennungsluftführung (lokal reduzierende Bedingungen) und die Feststoffverweilzeit verdampft und in der Abluftreinigung abgetrennt werden. Dies ist bei Schwermetallen mit hohem Siedepunkt wie beispielsweise Chrom oder Nickel nicht möglich. Da die Schwermetallgehalte der am Standort Altenstadt verarbeiteten Klärschlämme jedoch bereits unterhalb der Grenzwerte nach Düngemittelverordnung liegen, erfüllen die Ausgangsstoffe (Klärschlamm bzw. deren Asche) die Voraussetzungen für eine Düngerproduktion.

Das erzeugte R-Rhenania Produkt ist chemisch und mineralogisch identisch mit dem im nachgeschalteten Drehrohrofen erzeugten AshDec®-Produkt. Die im Rahmen von R-Rhenania durchgeführten Gefäßversuche bestätigten, dass die Düngewirkung des R-Rhenania Phosphats vergleichbar zu dem AshDec®-Produkt ist. Das thermochemische R-Rhenania Phosphat erfüllt die Voraussetzungen zur Verwendung als Düngemittel sowohl nach deutschem als auch europäischem Recht. Die weiteren Schritte für die Konfektionierung (Mahlung und Granulation) für ein marktfähiges Düngemittel wurden im Projekt erprobt. Eine Umsetzung der großtechnischen Konfektionierung des R-Rhenania Phosphats wird nach der Projektlaufzeit umgesetzt.

Das R-Rhenania-Verfahren ist ein robustes und energieautarkes Verfahren für die Verwertung von Klärschlämmen zur Herstellung von hochwirksamen Phosphatdüngern. Das Verfahren kann für jeden Klärschlamm angewandt werden, deren Aschen die Schwermetallgrenzwerte der Düngemittelverordnung einhalten. Die Schwermetalle As, Cd, Hg, Pb oder Tl können mit dem Verfahren entfernt werden, sodass bei höheren Gehalten im Klärschlamm dennoch die entsprechenden Grenzwerte unterschritten werden können. Das R-Rhenania-Verfahren kann nicht nur in der Rostfeuerung, sondern auch mit verschiedenen thermischen Aggregaten wie Drehrohrofen und Paddelofen umgesetzt werden, in denen die für den Prozess benötigten Temperaturen und Verweilzeiten erreicht werden.

## Erfahrungen aus der technischen Umsetzung

Aufgrund der jahrelangen Entwicklung des AshDec®-Verfahrens und der vertieften Prozessoptimierung für den Standort Altenstadt im Projekt R-Rhenania konnten viele grundlegende Prozessparameter wie Additivauswahl, -menge, Temperaturen, Reaktionszeit und Atmosphäre für das neue R-Rhenania-Verfahren abgeschätzt werden. Diese Annahmen konnten im Labormaßstab bestätigt werden. Für die großtechnische Umsetzung des R-Rhenania-Verfahrens waren Pilotversuche in der Rostfeuerung Altenstadt notwendig. Im Januar 2022 fand eine erste Kampagne statt, bei der die prinzipielle Verfahrensdurchführung bestätigt werden konnte. Das erste produzierte R-Rhenania Produkt hatte eine P-Löslichkeit in neutraler Ammoniumcitrat-Lösung von über 90 %. Dies bestätigte die Möglichkeit der Integration des thermochemischen Prozesses in die Klärschlammverbrennung.

Basierend auf dieser Erkenntnis fand im Mai 2022 eine zweite Kampagne statt, bei der die Betriebsparameter aus der ersten Kampagne übernommen wurden. In dieser Kampagne sollte die optimale Additiv-Dosierung bestimmt werden, damit Löslichkeiten zwischen 80–100% eingestellt werden können. Die Kampagne fand auf einer Verbrennungslinie statt und dauerte 100h bei einem maximalen Durchsatz von umgerechnet 3 t/h Klärschlamm (100 % Trockensubstanz, TS). Die Produktmenge betrug etwa 1 t/h. Insgesamt wurden somit in dieser Kampagne ca. 300 t/h Klärschlamm TS und 100 t/h Produkt durchgesetzt. Alle vier Stunden wurden die Ausgangsmischung und das Produkt für die Bestimmung der P-Löslichkeit sowie für die Bilanzierung der Schwermetallentfernung beprobt.

Bei der Kampagne wurde die Natriumcarbonat-Dosierung in den ersten 20 Stunden sukzessiv erhöht und nach 50 Stunden wieder schrittweise reduziert. Es konnte gezeigt werden, dass die P-Löslichkeit der Produkte von der Dosierung des Natrium-Additivs abhängt. Am Standort Altenstadt beträgt ab einer Konzentration von über 8 Gew.-% Na im Produkt die relative P-Löslichkeit mindestens 80%. Eine vollständige Löslichkeit korreliert mit einem Na-Gehalt von 10,5 Gew.-% Na im Produkt. Dies bestätigte die Erfahrungen bzgl. dem Zusammenhang zwischen Natrium-Additiv-Dosierung und P-Löslichkeit aus dem AshDec®-Verfahren. Produktproben mit verschiedenen P-Löslichkeiten aus dieser Kampagne wurden bei der Universität Bonn in Gefäßversuchen untersucht. Diese zeigten einen Zusammenhang zwischen der P-Löslichkeit und der Düngewirksamkeit, wobei die Wirksamkeit der Produkte mit zunehmender Löslichkeit anstieg. Die Düngewirkung der hochlöslichen Produkte war sowohl vergleichbar zu einem AshDec®-Produkt als auch zu einem konventionellen, wasserlöslichen P-Düngemittel.

Basierend auf den positiven Ergebnissen aus den zwei Versuchskampagnen entschied sich die Firma Emter die bestehende Anlage umzurüsten. Um das thermochemische Verfahren zu integrieren, wurde die Anlage mit einer Dosieranlage für das Natrium-Additiv im Jahr 2024 erweitert, eine Silo-Anlage für das Additiv und eine Hal-

le für die Lagerung des Düngeproduktes im Jahr 2025 errichtet. Die Anlage kann 15.000 Tonnen pro Jahr des P-Düngers produzieren. Erste Chargen des neuen R-Rhenania Phosphates nach dem Umbau wurden für weitere Gefäß- und Feldversuche im Jahr 2024 verwendet.

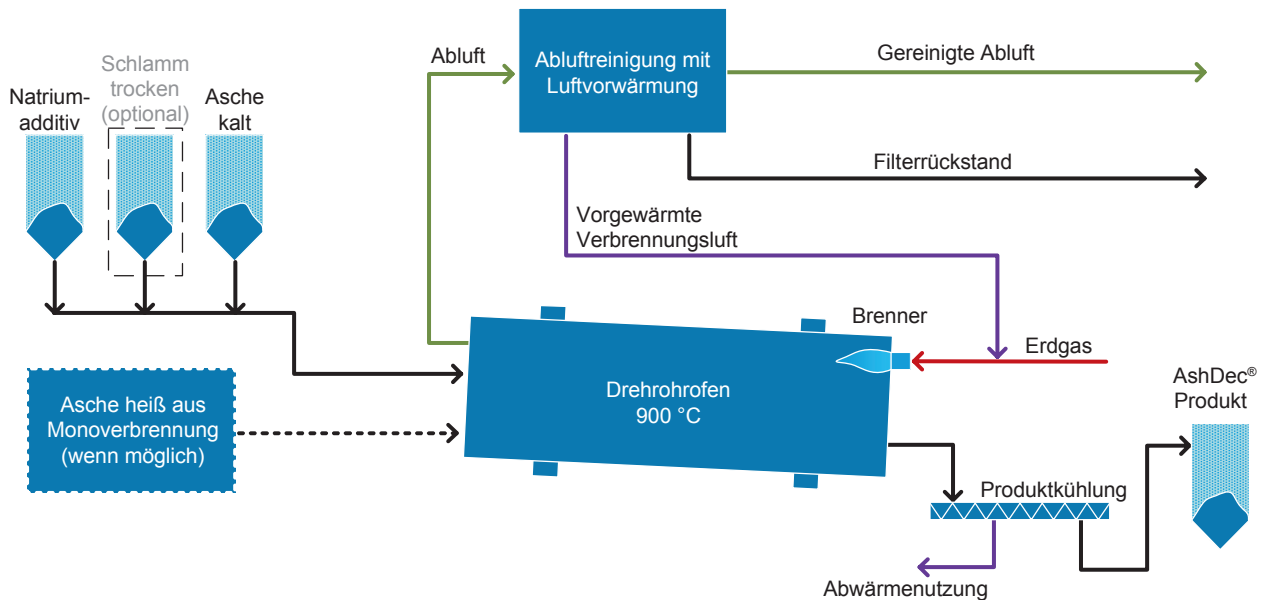


Abbildung 34: AshDec-Verfahren (vereinfachtes Fließschema). © R-Rhenania

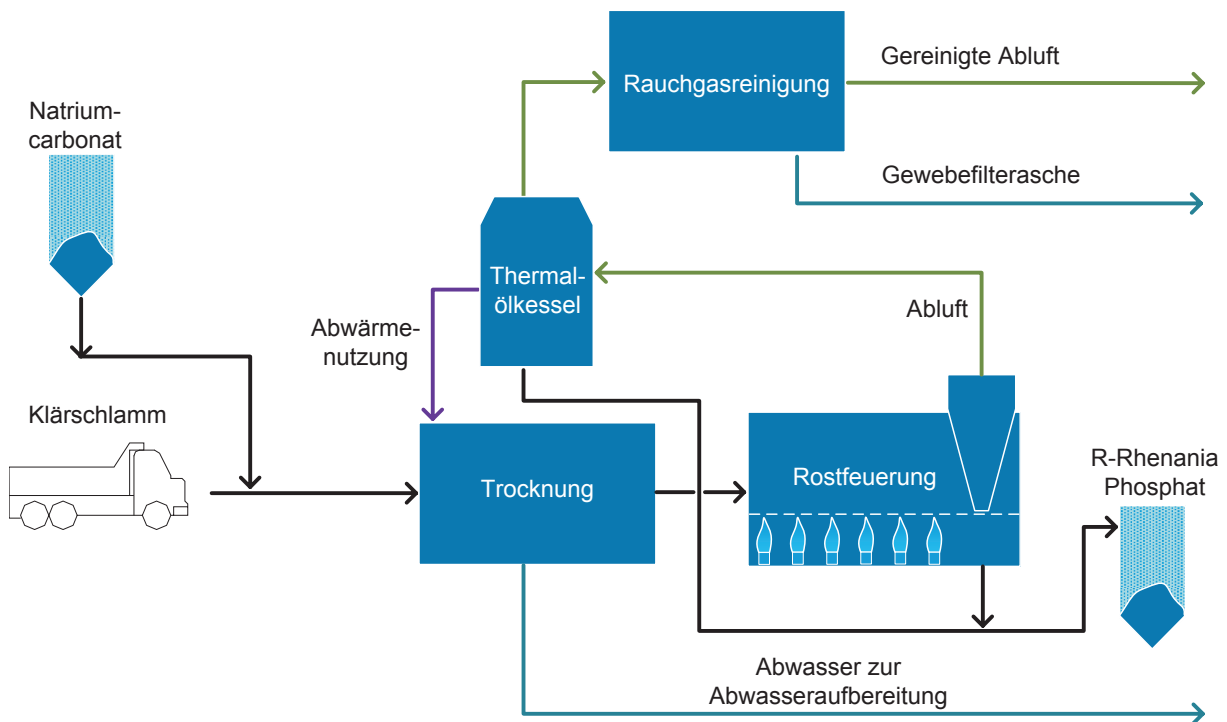


Abbildung 35: R-Rhenania Verfahren am Standort Altenstadt (vereinfachtes Fließschema). © R-Rhenania

### 3.3.7 SATELLITE

Im Rahmen des Forschungsprojekts SATELLITE wurde ein Verfahren zur Stickstoff-Rückgewinnung aus den bei der Klärschlamm-trocknung anfallenden Brüden entwickelt und erprobt, bei dem der Stickstoff im Ergebnis als hochkonzentrierte Ammoniaklösung zur Verfügung steht. Das Verfahren ist angelehnt an die fraktionierte Eindampfung, welche bereits im Forschungsprojekt KompaGG-N (FKZ 02WQ1516A-D) erfolgreich für landwirtschaftliche Substrate wie Gärreste und Gülle erprobt wurde. Das Prinzip basiert auf dem im Vergleich zu Wasser erhöhten Sättigungsdampfdruck von Ammoniak, sodass zu Beginn der thermischen Einwirkung bereits ein Großteil der Stickstofffracht in den Brüden überführt wird. Gegen Ende der Behandlung ist die Stickstofffracht im Brüden geringer. In SATELLITE wurde dieses Prinzip im halbtechnischen Maßstab mit Hilfe eines Schnecken-trockners untersucht. Zwischen Schlammein- und -austrag wurden insgesamt drei Brüdenabzüge mit Kondensatoren installiert, die aufgrund der linearen Betriebsweise und des sich hierdurch einstellenden Temperaturgradienten im Trockner verschiedene Temperaturbereiche ansprechen. Die Stickstoffkonzentrationen der erzeugten Kondensate nehmen damit in Richtung des Schlammaustrags stetig ab. In der stickstoffreichsten Fraktion – am ersten Brüdenabzug – wurden bis zu 40 g/l  $\text{NH}_4\text{-N}$  erreicht, die mittels Rektifikation auf bis zu 150 g/l aufkonzentriert werden konnten.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass bei einer Trocknung von ca. 25 % auf ca. 35 % TR in etwa 60 % des Ammoniumstickstoffs über den sequenziellen Abzug der Brüden zurückgewonnen werden kann. Im Rahmen des Upscalings wurde auf dieser Basis ein Konzept ausgearbeitet, welches die Stickstoffentfrachtung und -aufkonzentrierung als vorgeschaltete Stufe vor der eigentlichen Trocknung vorsieht, was den Vorteil einer einfachen Integration in bereits bestehende Systeme hat. Der entwässerte Klärschlamm wird dafür zunächst einer Teiltrocknung bei niedrigerem Temperaturniveau zugeführt und erst bei einem TR von 32 % an die Volltrocknung übergeben. Im Zuge der Teiltrocknung wird über die Kondensation der Brüden ein Strom mit einem hohen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt erzeugt (angestrebt 10 g/l), der in einer nachgeschalteten Rektifikation auf 25 % N aufkonzentriert werden kann. Das produzierte Ammoniakwasser kann für Betriebszwecke genutzt (z.B. Rauchgasreinigung nach der Klärschlammverbrennung) sowie in der Düngemittelproduktion oder chemischen Industrie vermarktet werden. Der Ablauf aus der Rektifikation (Kolonnensumpf) kann gemeinsam mit den bei der Volltrocknung entstandenen und durch die vorherige Teiltrocknung deutlich im Stickstoff reduzierten Brüden-kondensaten biologisch behandelt werden.

## 4 Produkte und Märkte

### 4.1 Arten und Qualitäten der Rezyklate



Rezyklate aus Sprühgranulation. © Glatt Ingenieurtechnik GmbH

Im Rahmen von RePhoR wurden drei Gruppen von Phosphor-Rezyklaten betrachtet und mit verschiedenen Verfahren zur Aufbereitung (weiter-)entwickelt. Hierunter fallen: die Herstellung von Phosphorsäure ( $H_3PO_4$ ), Fällungsprodukte wie Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP = Struvit) und Phosphor-Rezyklate nach thermischer Behandlung (Aschen und daraus abgeleitete Produkte). Auch Calciumphosphat (Dicalciumphosphat = DCP) könnte als Fällungsprodukt durch Kalkzugabe zum Kläranlagenablauf gewonnen werden. Für die Anlagentechnik auf Kläranlagen wäre das i. d. R. jedoch nur mit zusätzlichem Aufwand verbunden. Da die Einleiterrichtwerte weniger leicht erreicht werden könnten, wurde dieses Produkt im Rahmen des Vorhabens nicht näher betrachtet. Des Weiteren wurden auch stickstoffhaltige Rezyklate betrachtet. Nachstehend werden die drei Rezyklatgruppen und die N-Rezyklate weiter vorgestellt.

#### Phosphorsäure (AMPHORE, KlimaPhoNds)

Im Rahmen der Projekte AMPHORE und KlimaPhoNds wird  $H_3PO_4$  als Rezyklat gewonnen.  $H_3PO_4$  wird auf dem Markt in unterschiedlichen Reinheiten angeboten. Für die Düngemittelproduktion reicht ein „Fertilizer grade“ aus, während für technische Anwendungen ein „Technical grade“ notwendig ist (s. u.). Es laufen Versuche, die Produktqualität in AMPHORE durch unterschiedlichen Aufwand in der Verfahrenstechnik konstant einzustellen.

Die Phosphorsäure aus dem KlimaPhoNds-Projekt entsteht aus einer Veredlung des MAP. Mit dem PARFORCE-Verfahren wird hier 75%ige  $H_3PO_4$  produziert, sowie die Nebenprodukte Ammoniakwasser und Magnesiumchlorid ( $MgCl_2$ )-Lösung.  $H_3PO_4$  aus MAP ist schadstoffarm und erfüllt die Grenzwerte der DÜMV sowie der EU-Düngerprodukteverordnung. Die 10–15%ige  $MgCl_2$ -Lösung eignet

sich ideal für die Düngemittelproduktion und ist als rezykliertes Fällmittel für die MAP-Gewinnung vorgesehen.

Die Qualität der Phosphorsäure wird durch analytische Verfahren überprüft. Dazu gehören die maßanalytische Bestimmung des Säuregehalts, die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) zur Phosphorbestimmung sowie die Elementanalyse mittels ICP-OES und ICP-MS, mit denen potenzielle Spurenelemente und Schwermetalle identifiziert werden.

### **Asche-basierte Düngemittel (DreiSATS, RePhoRM, R-Rhenania)**

Mehrere Projekte untersuchen die Nutzung von Klärschlammaschen als Phosphorquelle für die Landwirtschaft. Die Aufbereitung unterliegt unterschiedlichen Prozessschritten in den Verbundprojekten, wodurch auch die Rezyklate jeweils verschiedene Produkteigenschaften aufweisen.

Im Verbundprojekt DreiSATS wurde eine Prozesskette von thermischer Klärschlammverwertung mittels der Carbotechnik-Staubfeuerung und des nachgeschalteten Ascheaufbereitungsverfahrens Pontes Pabuli zu Düngergrenulaten untersucht.

Im integrierten Prozess der in-situ-Aschemodifikation während der thermischen Verwertung von Klärschlamm durch die Carbotechnik-Staubfeuerung werden Schadstoffe aus der Asche entfernt und gleichzeitig die Phosphorlöslichkeit erhöht. Diese Kombination aus Schadstoffentfrachtung, gesteigerter Phosphorlöslichkeit und der feinen Struktur der Asche kann die Anforderungen eines Phosphatdüngers gemäß Düngemittelverordnung (DüMV) erfüllen.

Die Asche kann mit Streugeräten ausgebracht werden. Die hohe Düngequalität der modifizierten Aschen konnte in Pflanzversuchen nachgewiesen werden.

Durch das nachgelagerte Ascheaufbereitungsverfahren Pontes Pabuli wird die Phosphorverfügbarkeit und somit die Düngewirkung nochmals deutlich erhöht, während Schwermetalle abgeschieden und die Produktqualität gesteigert werden. Zudem ermöglicht die gezielte Nährstoffdosierung eine flexible Anpassung der Nährstoffzusammensetzung, sodass hochwertige Phosphatdünger mit konstantem P-Gehalt sowie Mehrnährstoffdünger mit N, K, S und Mg hergestellt werden können. Auch die Einbringung von Spurenelementen ist möglich, um den spezifischen Bedürfnissen verschiedener Kulturpflanzen gerecht zu werden. Das Pontes Pabuli-Verfahren leistet darüber hinaus einen wichtigen Beitrag zur Schadstoffabtrennung. Insbesondere kritische Schwermetalle wie Cd und U können gezielt und wirtschaftlich sinnvoll ab-

gereichert werden, was die Umweltverträglichkeit der Düngemittel erhöht. Gleichzeitig kann die Phosphatlöslichkeit präzise durch eine Umwandlungsreaktion mit Säure gesteuert werden, wobei Art und Konzentration der Säure sowie die Prozessführung flexibel angepasst werden können.

Das Projekt R-Rhenania untersucht zwei Verfahrensvarianten zur thermochemischen Behandlung von Klärschlammen und deren Aschen: das AshDec®-Verfahren im nachgeschalteten Drehrohrofen für die Behandlung von Klärschlammaschen und das R-Rhenania-Verfahren, welches direkt Klärschlamm thermochemisch behandelt. Die entstehenden Produkte, AshDec®-Produkt und R-Rhenania Phosphat gehören zur Kategorie der modifizierten Aschen. Sie sind haptisch vergleichbar mit herkömmlichen Klärschlammaschen, lassen sich ähnlich mahlen oder granulieren und weisen aufgrund einer veränderten Mineralphasenzusammensetzung eine höhere Phosphatverfügbarkeit auf. Die chemische Zusammensetzung der Produkte ist in beiden Verfahrensvarianten vergleichbar. Die Herkunft des Klärschlammes hat einen größeren Einfluss auf die Zusammensetzung als der Aufbereitungsprozess selbst. Besonders der Anteil an P und Si bestimmt die notwendige Additivdosierung für einen hochwirksamen Dünger. Auch die Schwermetallgehalte variieren je nach Ausgangsmaterial, wobei die Anteile von As, Cd, Hg, Pb und Tl durch die Prozessführung reduziert werden können. Die Gehalte von Ni und Cu bleiben auf einem vergleichbaren Niveau wie in der unbehandelten Klärschlammasche. Die am Standort Altenstadt verwendeten Klärschlämme sind schadstoffarm und die dort anfallenden Verbrennungsaschen sind bereits als Dünger zugelassen. Das in Altenstadt produzierte R-Rhenania Produkt überschreitet daher die Grenzwerte für Schadstoffe der DüMV sowie die EU-Grenzwerte ebenfalls nicht. Die Wasserlöslichkeit von R-Rhenania Phosphat ist mit 1–2 % vom Gesamt-Phosphorgehalt gering. Das Kriterium der Wasserlöslichkeit stellt u. E. keinen geeigneten Indikator für die Feststellung der Pflanzenverfügbarkeit dar [13].

Gleichzeitig ist die Löslichkeit in Neutralammoniumcitrat (EU 2003/2003 bzw. DIN EN 15957) und Zitronensäure (EU 2003/2003 bzw. DIN EN 15920) hoch. Die hohen Löslichkeiten werden bedingt durch die Bildung von Calciumalkaliphosphaten wie  $\text{CaNaPO}_4$  und können durch die gezielte Zugabe von Alkali-Additiven auf 80 bis 100 % eingestellt werden.

Die Qualität der Ascheprodukte wird durch chemische Analysen überprüft, die Schwermetallgehalte und die P-Verfügbarkeit bestimmen. Ergänzend dazu wurden zahlreiche Gefäßversuche durchgeführt, die eine hohe Düngewirkung belegen (→ Kapitel 4.5).



Asche-basierte Düngemittel sind stabil, abriebfest und können mit herkömmlichen Streutechniken ausgebracht werden, was eine nahtlose Integration in bestehende landwirtschaftliche Betriebsabläufe ermöglicht. Die Lagerung erfolgt als Sackware, in Big-Packs oder Silos und sollte trocken und geschützt vor Witterungseinflüssen erfolgen, um die Streufähigkeit zu erhalten.

### Struvitdünger (P-Net, KlimaPhoNds)

In den Projekten P-Net und KlimaPhoNds wird Struvit ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , MAP) produziert. Das Endprodukt von P-Net liegt in zwei Granulatvarianten vor: Mikrogranulat (0,6–1,4 mm) und reguläres Granulat (1,4–4 mm). MAP weist eine P-Konzentration von 21–26,5% (gerechnet als  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) auf. Die einzelnen Chargen der MAP wurden auf ihre P-Löslichkeit sowie Nähr- und Schadstoffgehalte nach deutscher DüMV und VO (EU) 2019/1009 (FPR) untersucht und erfüllten die rechtlichen Anforderungen. Je nach produziertem Düngemittel betragen die Löslichkeiten  $< 1,5\% \text{ P-H}_2\text{O}$ ,  $> 98\% \text{ P-NAC}$ . Die Schwermetallgehalte lagen alle deutlich unter den von DüMV und EU(VO) 2019/1009 definierten Grenzwerten. Darüber hinaus wurde die Belastung von verschiedenen Chargen mit den Antibiotikagruppen Sulfonamide, Fluorchinolone und Tetracycline untersucht. Die Gehalte in den untersuchten MAP aus kommunalen Kläranlagen waren sehr viel geringer als die von Klärschlamm. Ebenfalls untersuchte MAP aus Abwässern der Lebensmittelindustrie waren so gut wie frei von Antibiotika. Die Pflanzenverfügbarkeit von P aus dem Rezyklat war in Gefäßversuchen vergleichbar mit der von TSP. Die gute Pflanzenverfügbarkeit des Granulats wurde darüber hinaus in Mesokosmen-Versuchen bestätigt. Die Qualitätsprüfung der Produkte erfolgt durch externe akkreditierte Labore. Zusätzlich wurden projektintern Untersuchungen mit einer hohen Analysedichte durchgeführt, um die Konsistenz der Struvitqualität sicherzustellen.

MAP ist als Granulat gut handhabbar, sollte jedoch trocken gelagert werden, um seine Rieselfähigkeit zu erhalten. Die empfohlene Applikationsmethode ist die Unterfußausbringung, ggf. mit Zusatz eines Ammoniumdüngers, um die gleiche Wirkung auf das Wurzelwachstum zu erreichen wie von DAP.

Das im KlimaPhoNds-Projekt produzierte MAP zeichnet sich durch einen sehr niedrigen Gehalt an organischen Verunreinigungen ( $<< 1\%$ ) aus, auch, weil es aus nahezu feststofffreiem Zentratwasser gewonnen wird. Laut Elementaranalysen werden die Schadstoffgrenzwerte der Düngemittelverordnung (DüMV) und EU-Düngeproduktverordnung sicher unterschritten, weshalb dieses Rezyklat als Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt werden könnte.

Zur Qualitätsprüfung werden folgende Analysen eingesetzt:

- » Bestimmung des pH-Werts
- » Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) zur Bestimmung der Hauptelemente
- » Bestimmung des Ammoniumstickstoffgehalts  $\text{NH}_4\text{N}$ : UV/VIS-Spektroskopie mittels Küvettentest
- » Bestimmung der Reinheit durch Elementanalytik mittels ICP-OES bzw. ICP-MS (Spurenstoffe und Schwermetalle): P, Fe, Al, Ca, Mg, Cl, Schwermetalle falls enthalten (u. a. As, Cd, Cr, Pb, Zn).

MAP liegt in kristalliner Form vor und ist nicht brennbar, zwar gering wasserlöslich ( $< 0,2 \text{ g/L}$ ) aber gut pflanzenverfügbar, was eine einfache Ausbringung ermöglicht. MAP ist nach CLP-Verordnung nicht als Gefahrstoff eingestuft und unterliegt auch keinen Transportvorschriften für Gefahrgüter. Die Lagerung sollte kühl und trocken in dicht verschlossenen Behältnissen erfolgen, um eine Verklumpung zu vermeiden. Es eignen sich bruchssichere Kunststoffbehälter (z. B. IBC), Metallbehälter sind nicht geeignet.

### Stickstoffhaltige Flüssigdünger (SATELLITE)

In SATELLITE werden primär flüssige Stickstoff-Rezyklate erzeugt. Die Stickstoff-Rückgewinnung über einen gezielten Brüdenabzug und eine angepasste Betriebsweise der Klärschlamm-trocknung erzeugt ein stark ammoniumhaltiges Kondensat (bis zu  $40 \text{ g/l NH}_4\text{N}$ ), das beispielsweise direkt in der Rauchgasreinigung der Verbrennung eingesetzt oder mittels Rektifikation auf 25% N aufkonzentriert und vermarktet werden kann. Zudem wird in einem flexiblen Verfahren aus konventionellen Brüdenkondensaten ein flüssiges Stickstoffdüngemittel hergestellt. Durch die Zugabe von Harnstoff kann der Stickstoffgehalt des Düngemittels bei Bedarf gezielt angehoben werden. Zusätzlich kann durch die Zugabe von Phosphorsäure ein auf den jeweiligen Bedarf abgestimmter NP-Dünger hergestellt werden.

## 4.2 Co-Produkte und Reststoffe

Die im Rahmen der Phosphor-Rückgewinnung entstehenden Co-Produkte und Reststoffe variieren je nach Verfahren und eingesetzten Chemikalien. Während einige Projekte in einer nahezu vollständig geschlossenen Kreislaufführung keine nennenswerten Co-Produkte erzeugen, fallen in anderen verschiedene Stoffströme an, die entweder weiterverwertet oder entsorgt werden müssen. Die wesentlichen Kategorien dieser Co-Produkte lassen sich nach der bestehenden Einteilung der DWA AG KEK 1.1 wie folgt clustern:

- » Mineralische Restmatrix
- » Fe/Al-Chloride
- » Metallkonzentrate
- » Gips
- » Filterasche
- » Abluft
- » Abwasser
- » Sonstiges.

Für diese Co-Produkte können alternative Nutzungsmöglichkeiten geprüft werden, beispielsweise in der Baustoffindustrie oder als Fällmittel in Kläranlagen. In einigen Fällen bestehen jedoch noch rechtliche oder wirtschaftliche Herausforderungen, die einer weiteren Evaluierung bedürfen. Im Folgenden sind die wichtigsten Co-Produkte aus den RePhoR-Verfahren nach Angabe der Verbundprojekte aufgeführt.

### Mineralische Restmatrix

Im AMPHORE-Projekt macht der inerte Laugungsrückstand durch den Aufschluss der Klärschlamm-Asche mit der eingesetzten Salzsäure trockenmassebezogen etwa 60% der eingesetzten Klärschlamm-Asche aus. Da er feucht anfällt, entspricht seine Masse etwa der der eingesetzten Asche oder liegt leicht darunter, abhängig vom Entwässerungsergebnis. Der erzielbare Trockenrückstand (TR) liegt zwischen 65 und 70%. Die Entsorgungsmöglichkeiten entsprechen denen für Klärschlamm-Asche (KSA), insbesondere Deponierung oder Verwendung als Bergversatzmaterial. Vorteilhaft ist, dass eluierbare Schwermetalle bereits herausgelöst sind, was die Einstufung der Deponieklasse (DK) gemäß Deponieverordnung (DepV) (2009) [9] möglicherweise eher verbessert. Langfristig wird die Wiederverwendung der silikatischen Rückstände angestrebt.

Im KlimaPhoNds-Projekt fällt ein silikatischer, sandhaltiger Rückstand als Co-Produkt der MAP-Veredelung an. Bezogen auf die Verarbeitung von ca. 2.000 kg MAP sind dies ca. 27 kg feuchter Rückstand. Durch einen optionalen Waschschriff mit Wasser verbleibt ein chloridarmer Sand ( $\text{SiO}_2$ ) mit einer Reinheit zwischen 97 bis 99%. Die

Reinheitsprüfung nach der Trocknung wird mit Röntgenfluoreszenzanalyse durchgeführt. Nach Prüfung besteht grundsätzlich eine Verwertungsoption in der Baustoffindustrie, z. B. in der Zementherstellung.

### Fe/Al-Chloride

Im AMPHORE-Projekt entstehen Metallsalzlösungen aus der Regeneration der Ionenaustauscher mit Salzsäure. Diese Lösungen enthalten Aluminium- und Eisenchloride ( $\text{AlCl}_3/\text{FeCl}_3$ ) und können grundsätzlich zur chemischen Phosphatfällung in Kläranlagen wiederverwendet werden. Allerdings ist der Gehalt an Wirksubstanz geringer als bei marktüblichen Fällmitteln, was Anpassungen in der Dosiertechnik und Zwischenlagerung erfordert. Zumindest für eine über den Bedarf am Standort der Phosphor-Rückgewinnungsanlage hinausgehende Menge bietet sich daher eine Aufkonzentrierung an. Das DWA-A 202 (2011) [18] gibt Richtwerte für eisen- und aluminiumhaltige Fällungs- und Flockungsmittel in Milligramm Schadstoff pro Mol Wirksubstanz vor. Die Einhaltung dieser Richtwerte wird im Rahmen des Projektes untersucht.

### Filterasche

Im R-Rhenania-Projekt werden flüchtige Schwermetalle in der Abgasreinigungsanlage abgetrennt. Die entstehende Filterasche muss entsprechend behandelt und entsorgt werden. Bei dem R-Rhenania-Verfahren am Standort Altenstadt wird die Entschwefelung durch Eindüsen eines calciumhydroxidhaltigen Adsorbens erzielt. Der hierbei anfallende Reststoff aus der Gewebefilterabscheidung wird im Bergversatz verwendet.

Im DreiSATS-Projekt werden bei der thermischen Klärschlammverwertung mittels Carbotechnik-Staubfeuerung Schadstoffe aus dem Rauchgas in einer nachgeschalteten Abgasreinigungsanlage entfernt. Abhängig von der Beschaffenheit des eingesetzten Klärschlammes kann beispielsweise eine Entschwefelung notwendig sein. Die im Filter zurückgehaltenen Rückstände werden anschließend entsorgt.

### Abwasser

Im SATELLITE-Projekt fällt bei der Nutzung einer Rektifikation zur Rückgewinnung von Stickstoff ein flüssiger Rückstand, der sogenannte Sumpf, an. Dieser müsste einer bspw. biologischen Behandlung zugeführt werden.

### Sonstiges

Im DreiSATS-Projekt entstehen Schwermetallrückstände. Beim Pontes Pabuli-Verfahren werden die Schwermetalle in einem separaten Reststoffstrom abgetrennt. Im

Vergleich zu anderen Verfahren ist diese Menge jedoch gering. Der Rückstand enthält aufkonzentrierte Schwermetalle, die potenziell als Rohstoff für die Metallrückgewinnung genutzt werden können.

Im AMPHORE-Projekt entsteht durch die Neutralisation des Konzentrates aus der Elektrodialyse mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und anschließender Fest-Flüssig-Trennung beim PARFORCE-Verfahren ein Calciumchlorid-Konzentrat ( $\text{CaCl}_2$ ). Dies kann auf beliebige Konzentrationen eingedampft werden. Bisher wurden drei Optionen für den Verbleib bzw. die Weiterverarbeitung des Konzentrats diskutiert:

#### 1. Abschlagen/ Einleiten der Salzlösung

Eine (direkte oder indirekte) Einleitung großer Mengen calciumchloridhaltiger Abwässer in den Vorfluter ist aufgrund der Gewässergrenzwerte als unwahrscheinlich zu bewerten und nur an besonderen Standorten möglich.

#### 2. Aufbereitung und Gewinnung von Streusalz

Die Verwendung als Streumittel ist denkbar, die entsprechende DIN-Norm (DIN EN 16811-2, 2016) [14] wird voraussichtlich eingehalten. Zu beachten ist der erhebliche Energieaufwand zur Herstellung eines wasserfreien Produkts.

#### 3. Rückgewinnung von Salzsäure

Alternativ kann die Neutralisation des Konzentrates aus der Elektrodialyse mit  $\text{NaOH}$  erfolgen. In zusätzlichen Verfahrensschritten kann eine verdünnte Salzsäure für den Aufschluss zurückgewonnen werden.

## 4.3 Abnahmemärkte und deren Anforderungen

Die erfolgreiche Markteinführung von Phosphor-Rezyklaten erfordert eine detaillierte Analyse der potenziellen Absatzmärkte, der notwendigen Produktqualitäten und -mengen sowie der regulatorischen Rahmenbedingungen. Die Projekte innerhalb der Fördermaßnahme RePhoR haben unterschiedliche Strategien zur Markterschließung entwickelt und sich mit den Herausforderungen hinsichtlich Zertifizierung, Vermarktung und wirtschaftlicher Tragfähigkeit auseinandergesetzt.

### Abnahmemärkte und Produkthanforderungen

Phosphor-Rezyklate sind in erster Linie über die Landwirtschaft als größtem Abnehmer für Phosphate (> 85%) zu verwerthen. Viele der entwickelten Produkte, darunter Struvit, Asche-basierte Düngemittel oder Phosphate, sollen als landwirtschaftliche Düngemittel eingesetzt werden. Dazu müssen sie den geltenden Regelungen der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) und/oder der europäischen Düngeprodukteverordnung entsprechen.

Die deutsche Düngemittelverordnung legt hierzu Grenzwerte für Schadstoffe wie Schwermetalle und organische Verbindungen fest, um Belastungen für Böden und Gewässer zu minimieren. Zudem müssen Phosphor-Rezyklate hygienische Anforderungen erfüllen, insbesondere hinsichtlich der Freiheit von Krankheitserregern. Neben diesen Umwelt- und Gesundheitsaspekten spielen auch produktspezifische Anforderungen eine Rolle: Die Nährstoffgehalte müssen genau deklariert werden, und die Produkte müssen in einer für die Pflanzen verfügbaren Form vorliegen. Eine ordnungsgemäße Kennzeichnung mit Angaben zu Inhaltsstoffen, Anwendungsempfehlun-

gen und Lagerbedingungen ist ebenfalls vorgeschrieben. Die Anforderungen der europäischen Düngemittelproduktverordnung betreffen unter anderem die Produktzusammensetzung, die Nährstoffgehalte sowie Grenzwerte für Schadstoffe. Zudem müssen die Produkte in spezifische Produktfunktionskategorien (PFC) und Komponentenmaterialkategorien (CMC) eingruppiert werden. Für Phosphor-Rezyklate sind insbesondere die PFC 1(C)(I)(a) für feste anorganische Makronährstoff-Düngemittel und die CMC 13 für recycelte Nährstoffquellen relevant.

Ein Beispiel für ein etabliertes landwirtschaftliches Verwertungsprodukt ist MAP, das sich insbesondere für den Einsatz bei Hackfrüchten wie Mais eignet. In der ökologischen Landwirtschaft stellt es eine konkurrenzlose Alternative zu konventionellen Phosphordüngern dar, während es in der konventionellen Landwirtschaft mit DAP (Diammoniumphosphat) konkurrieren muss. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von MAP in der Ökolandwirtschaft sind bereits gegeben. Allerdings wird erwartet, dass aufgrund ihrer geringeren Nährstoffdichte etwas niedrigere Marktpreise erzielt werden als beispielsweise für Triple-Superphosphat.

Ein weiteres Produkt, das für den Agrarsektor von Interesse ist, ist Phosphorsäure. In Deutschland werden im Jahr ca. 70.000–90.000 t Phosphorsäure ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) pro Jahr verbraucht [46]. Je nach Marktpreis für Phosphorsäure ergeben sich die Erlöspotenziale für das P-Rezyklat.

Grundsätzlich werden bei Phosphorsäure unterschiedliche Reinheitsgrade angeboten.

- » Fertilizer Grade oder Merchant Grade Acid (MGA): 53,5 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – entspricht etwa 75 % H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, wird zur Herstellung von Düngemitteln, Tierfutter und für bestimmte industrielle Zwecke verwendet. Begleitstoffe sind bis zu einem bestimmten Anteil erlaubt.
- » Technical Grade: 53,5 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - entspricht etwa 75 % H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, wird in technischen Anwendungen mit höheren Anforderungen an den Reinheitsgrad benötigt.
- » Food Grade oder Purified Phosphoric Acid (PPA): 75 % H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, i. d. R. für technische Anwendungen und in der Lebensmittelindustrie.

Darüber hinaus haben die Abnehmer eigene Produktspezifikationen, in denen neben der Konzentration auch Grenzwerte für Verunreinigungen festgelegt sind.

Je nach geplante Standort einer großtechnischen Anlage können sich Synergien in Bezug auf die Vermarktung der Metallsalzlösungen ergeben. In Industrieparks gibt es von ansässigen Fällmittelherstellern Interesse an diesem Stoffstrom, um ihn in ihrem Prozess zu verarbeiten. Erfahrung mit der Aufbereitung verschiedener Stoffströme, wie der Aufkonzentrierung und der Schwermetallanreicherung, sind dort zum Teil vorhanden.

Die landwirtschaftliche Nutzung von Rezyklaten stellt wohl den wichtigsten Faktor für deren Vermarktung dar. Besonders in Regionen mit intensiver Landwirtschaft ist eine regionale Vermarktung von MAP und Flüssigdünger sinnvoll. In anderen Fällen kann die Weiterverarbeitung von H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> über bestehende Handelslinien erfolgen.

Auch Asche-basierte Produkte spielen eine wichtige Rolle im Marktsegment der phosphathaltigen Düngemittel. In der Region Mitteldeutschland stehen derzeit bereits 35.000 Tonnen Asche pro Jahr für das Phosphor-Recycling zur Verfügung, wobei weitere Monoverbrennungsanlagen in Planung sind. Die modifizierte Asche aus der Staubfeuerung kann bereits die Vorgaben der Düngemittelverordnung erfüllen und somit direkt als Phosphatdünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Alternativ kann sie zur Herstellung hochqualitativer Düngemittel in weiterführende Veredelungsprozesse eingebunden werden.

### Zertifizierung und rechtliche Rahmenbedingungen

Die Markteinführung von Phosphor-Rezyklaten erfordert in vielen Fällen eine Zertifizierung nach nationalem oder europäischem Recht. Während einige Produkte bereits die gesetzlichen Anforderungen der deutschen Düngemittelverordnung erfüllen, streben mehrere Projekte eine Zertifizierung nach der europäischen Düngemittelverordnung an. In der europäischen Düngemittel-

verordnung (EU) 2019/1009 können die Dünger in Produktfunktionskategorien (PFC) und Komponentenmaterialkategorien (CMC) eingruppiert werden. Die REACH-Registrierung stellt dabei einen wesentlichen Schritt dar, um Rezyklate als marktfähige Produkte anzubieten.

Das Beispiel des R-Rhenania-Phosphats zeigt, dass eine erfolgreiche Zertifizierung den Marktzugang erheblich erleichtert. Durch die Einordnung in die entsprechenden Produkt- und Materialkategorien der EU-Düngemittelverordnung erhält das Produkt das CE-Zeichen und kann europaweit vertrieben werden. Die zusätzliche Zulassung für die ökologische Landwirtschaft würde die Marktmöglichkeiten weiter verbessern.

### Vertriebskanäle und Vermarktungsstrategien

Für eine erfolgreiche Markteinführung von Phosphor-Rezyklaten ist der Zugang zu etablierten Vertriebskanälen entscheidend. In der Landwirtschaft erfolgt der Vertrieb von Düngemitteln häufig über große Agrarhandelsgesellschaften wie BayWa AG, Agravis Raiffeisen AG oder RWZ. Langfristige Abnahmeverträge mit diesen Akteuren sind erforderlich, um eine stabile Nachfrage zu gewährleisten. Insbesondere für Produkte, die in großtechnischen Mengen produziert werden, muss sichergestellt werden, dass eine sichere Distribution über die jeweilige Region hinaus gewährleistet ist.

In einigen Projekten werden auch alternative Vertriebskonzepte geprüft. So könnte die Abgabe von Rezyklaten über Landhändler erfolgen, wodurch bestehende Strukturen der Klärschlammverwertung genutzt würden. In ländlichen Regionen wird zudem geprüft, ob größere landwirtschaftliche Betriebe oder Betriebsgemeinschaften die Düngemittel direkt abnehmen und über eigene Logistikstrukturen verteilen können. Eine direkte Abgabe auf Kläranlagen ist aktuell eher unwahrscheinlich, da hierfür die Kläranlagen für die Abgabe als Düngemittel die Produkte nach DüMV kennzeichnen müssten und hier die entsprechenden Mindestgehalte und die vorgegebenen Toleranzen (Anlage zur DüMV) einhalten. Je kleiner die Anlage, desto unwahrscheinlicher ist aus wirtschaftlichen und organisatorischen Gründen die Machbarkeit. Trotzdem sollte insbesondere in Bundesländern, in denen bisher die bodenbezogene Verwertung der Klärschlämme im Vordergrund standen, die vorhandene Verteilungs- und Abnahmeinfrastruktur im direkten Kontakt mit den Landwirten und Kläranlagenbetreibern mit in das zukünftige Abgabekonzept eingebunden werden.

Für den Markterfolg von Phosphor-Rezyklaten ist auch eine wettbewerbsfähige Preisgestaltung essenziell, was sich angesichts einer aktuell hohen Volatilität und in Zeiten der sogenannten Polykrise schwieriger gestaltet. Erste Erfahrungen zeigen, dass die Produktionskosten von

Rezyklaten häufig nicht vollständig durch die Verkaufserlöse gedeckt werden können. Die Differenz müsste durch eine Gebührenfinanzierung oder durch regulatorische Anreize überbrückt werden.

Ein spezifisches Beispiel für eine wirtschaftlich tragfähige Lösung ist das DreiSATS-Projekt, das ein Modell entwickelt hat, bei dem der Erlös sowohl aus dem Verkauf des Düngeprodukts als auch aus der Annahme von Klärschlammaschen generiert wird. Die langfristige Wirtschaftlichkeit ist jedoch abhängig von der Akzeptanz der Produkte am Markt und der zukünftigen Entwicklung der Düngemittelpreise.

Nachfolgend sind die Produkte aus den einzelnen Verbundprojekten mit ihren geplanten Verwertungspfaden noch einmal einzeln aufgeführt.

### AMPHORE

Im Einzugsbereich fallen ab 2029 zwischen 100.000 t bis 120.000 t KSA pro Jahr an, aus denen mit dem PARFORCE®-Prozess Phosphorsäure gewonnen werden kann. Bei der nasschemischen Aufbereitung der KSA fallen weitere Nebenprodukte wie beispielsweise Metallsalzlösungen an. Je nach Standort einer großtechnischen Anlage können sich Synergien durch die Vermarktung dieser Nebenprodukte ergeben, z. B. durch Interesse von ansässigen Unternehmen wie Fällmittelhersteller. Zur Nutzung dieser Metallsalzlösungen in ihren Prozessen müssten zuvor z. T. Aufbereitungsschritte erfolgen.

### DreiSATS

Die modifizierte Asche aus der Staubfeuerung kann bereits die Vorgaben der Düngeverordnung (DüMV) erfüllen und somit direkt als Phosphatdünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Überregionale Netzwerke mit deren Absatzmöglichkeiten können genutzt werden, um die Verwertung effizient und schlank zu gestalten. Im aktuellen Projektstand ist konservativ ein erlösneutraler Ansatz vorgesehen.

Für eine weiterführende Verarbeitung oder Herstellung hochqualitativer, spezifischer Dünger kann die Asche nachgeschalteten Veredelungsprozessen zugeführt werden, wie beispielsweise dem Pontes Pabuli-Verfahren von DreiSATS. Damit werden die Einsatzmöglichkeiten der Asche erweitert und eröffnen zusätzliche Potenziale für die Nutzung der Asche. Die Düngeprodukte sind prädestiniert für die stark landwirtschaftlich geprägte mitteldeutsche Region. Perspektivisch soll das P-Recycling auf weitere Regionen übertragen werden und auch überregionale Märkte bedienen. Im Rahmen des Projektes entstand daher eine Kooperation mit der SKW Piesertitz als Düngemittelproduzent. Gemeinsam werden in der Region zwei Produktlinien mit NPS und NPK Dün-

gern geplant. Hierzu ist ein Upscaling der Versuchsanlage am Standort Leuna von TRL6 auf TRL8 vorgesehen, mit einem jährlichen Durchsatz von 4.000 t/a Asche. Der Durchsatz wird modular erweiterbar sein und ist aktuell bis auf eine Ausbaugröße von 20.000 t/a Asche vorgesehen. Weitere Standorte der Region werden zur Etablierung einer P-Rückgewinnungsanlage geprüft.

Aufgrund der vorhandenen Monoverbrennungsanlagen in der Region, stehen bereits heute 35.000 t/a Asche zum P-Recycling zur Verfügung. Weitere Anlagen zur Monoverbrennung im mitteldeutschen Chemiepark befinden sich derzeit in der Planungs- oder in der Bauphase. Somit ergibt sich ein großes Potenzial zur Verarbeitung von überregionalen Aschen in der Region Mitteldeutschland. Es wird die Möglichkeit evaluiert, eine eigene Monoverbrennungsanlage zu errichten. Die Zulassung wird angestrebt gemäß der deutschen DüMV und der Zertifizierung nach der europäischen Düngeprodukteverordnung.

Der Aufwand für das P-Recycling soll sich aus dem Erlös des Düngers und des Ascheannahmepreises finanzieren. Zunächst werden Abschläge auf der Erlösseite aufgrund der Neuartigkeit der Produkte kalkuliert. Nach dem erfolgreichen Markteintritt werden die Abschläge entfallen und der primäre Nährstoffwert anvisiert. Das entsprechende Marketing sowie die Markteintrittsstrategie erfolgt gemeinsam mit SKW.

### KlimaPhoNds

Die hohe Qualität des MAPs aus KlimaPhoNds spricht für eine Direktverwertung als Düngemittel. Da die Region Northeim landwirtschaftlich geprägt ist, würde sich eine regionale Vermarktung des Rezyklats anbieten. Alternativ kann MAP für die Weiterverarbeitung an Düngemittelhersteller abgegeben werden.

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> aus der MAP-Veredelung kann über den Chemikalienhandel in den Markt eingeführt werden, nachdem sie gemäß der REACH-Verordnung (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006) von der europäischen Chemikalienagentur (ECHA) geprüft und registriert wurde. Ein Sicherheitsdatenblatt ist ebenfalls erforderlich.

### P-Net

P-Net zielt auf die Landwirtschaft als Abnahmemarkt. MAP eignet sich in Form von Granulat insbesondere für den Einsatz bei Hackfrüchten. Engstes Konkurrenzprodukt in der konventionellen Landwirtschaft ist DAP, in der ökologischen Landwirtschaft ist es konkurrenzlos. Die notwendigen gesetzlichen und institutionellen Regelungen für den Einsatz in der Ökolandwirtschaft sind geschaffen.

Für Granulate auf Basis von MAP werden geringere Preise erwartet als für TSP. Bisher produzierte P-Net nur sehr kleine Mengen an MAP. Für das potenziell im Raum Harz und Heide anfallende MAP auf Kläranlagen besteht ein ausreichend großer Absatzmarkt.

#### RePhoRM

Aufgrund der in RePhoRM projektierten Rezyklat-Produktionsmenge, die großtechnisch mehrere 10.000 t/a betragen soll, muss eine sichere Verteilung über den Ballungsraum der Metropolregion hinaus gewährleistet werden (z. B. nach Süd- und Nordhessen, Westerwald, Hunsrück, Naheland). Im Rahmen von RePhoRM erfolgt die Herstellung und Abgabe von Düngemittelproben an potenzielle Nutzer, um Überzeugungsarbeit zum Einsatz von Rezyklaten zu leisten.

#### R-Rhenania

Im Rahmen des Projektes R-Rhenania erfolgte die REACH-Registrierung Mitte 2025, welche eine Voraussetzung ist, um das Produkt nach deutschen und europäischen Vorgaben auf den Markt zu bringen. Das R-Rhenania Phosphat erfüllt die aktuellen Produktkriterien wie Schadstoffgrenzwerte der DüMV als auch voraussichtliche zukünftige Anforderungen an die Pflanzenverfügbarkeit in der aktuellen Überarbeitung des BMEL. Daher kann das Produkt in Deutschland in den Verkehr gebracht werden.

Das R-Rhenania Phosphat wird der PFC 1(C)(I)(a) „Festes anorganisches Makronährstoff-Düngemittel“ und CMC 13 zugeordnet. Durch die REACH-Registrierung und die Einordnung in die PFC- und CMC-Kategorien wird das Produkt das CE-Zeichen erhalten und kann nach dem Düngemittel-Zertifizierungsprozess europaweit in den Markt gebracht werden.

Eine starke Motivation für die Erlangung des CE-Zeichens nach EU Düngeprodukteverordnung ist die Zulassung für die biologische Landwirtschaft. Das Dossier zur Zulassung des R-Rhenania Düngers zur organischen Landwirtschaft in der EU ist eingereicht. Die EGTOP Expertengruppe hat eine Empfehlung unter anderem für das R-Rhenania Phosphat (als „calcined phosphate“) ausgesprochen. Wenn dies in die Positivliste der DG Agri aufgenommen wird, ist der Einsatz der Phosphate R-Rhenania und Ash-Dec® in der ökologischen Landwirtschaft möglich.

#### SATELLITE

Die Abnahme der Rezyklate findet in SATELLITE über die Landwirtschaft statt, um im Sinne der Kreislaufwirtschaft dem Gesamtsystem keine Nährstoffe zu entziehen. Es sollen daher regional leicht verfügbare Düngemittel mit geringem logistischem Aufwand erzeugt werden. Hierzu wurde im Betrieb einer Versuchsanlage ein System zur Herstellung von N- und P-haltigen Flüssigdüngern mit gezielt einstellbarem Nährstoffverhältnis entwickelt.

## 4.4 Markteintrittsbarrieren und Chancen von Rezyklaten

Die Einführung von Phosphor-Rezyklaten in den Markt ist noch mit zahlreichen Herausforderungen verbunden. Dennoch bieten sich vielversprechende Chancen durch etablierte Verwertungspfade wie auch eine steigende Nachfrage nach nachhaltigen Düngemitteln.

Ein wesentliches Hemmnis ergibt sich aus Unsicherheiten in Bezug auf regulatorische Anforderungen. Die deutsche Düngemittelverordnung (DüMV) wird derzeit überarbeitet und soll in der ersten Jahreshälfte 2025 veröffentlicht werden (Stand Februar 2025). Mehr zu der DüMV und weiteren rechtlichen Rahmenbedingungen sind in Kapitel 5 aufgeführt). Diese Novellierung wird voraussichtlich auch die Anforderungen an Klärschlammaschen aus der Monoverbrennung betreffen. Da jedoch derzeit keine klaren Einblicke in die künftigen gesetzlichen Rahmenbedingungen vorliegen, ist eine gezielte Entwicklung von Anlagentechnik und Verfahrensprozessen erschwert. Unternehmen und Forschungseinrichtungen müssen daher mit Unsicherheiten hinsichtlich der künftigen Produkthanforderungen arbeiten, was Investitionen in neue Technologien auch aus Sicht der Betreiber risikobehaftet macht und eine gewisse Trägheit bei öffentlichen Ausschreibungen zur Folge hat.

Neben der unklaren Rechtslage hinsichtlich der Anforderungen an die Phosphor-Rezyklate selbst, stellt auch die Einstufung bestimmter Co-Produkte eine Herausforderung dar. Während einige Produkte nach europäischem Recht als zurückgewonnene, hochreine Materialien eingestuft werden könnten, werden sie nach deutschem Recht oft noch als Abfall betrachtet. Besonders problematisch ist dies bei Brüdenkondensaten, die als flüssige Nebenprodukte während der Verarbeitung anfallen. Während ihr Einsatz als Düngemittel auf europäischer Ebene möglich erscheint, ist ihre rechtliche Einstufung in Deutschland bislang nicht eindeutig geregelt. In der Praxis bedeutet dies, dass für jedes Produkt eine individuelle Prüfung erforderlich ist, um die Zulässigkeit nach deutschem und europäischem Recht sicherzustellen (vgl. Kapitel Recht).

Ein weiteres Hindernis für den Markteintritt ist die noch geringe Akzeptanz neuartiger Produkte auf der Abnehmerseite. Viele landwirtschaftliche Betriebe stehen Phosphor-Rezyklaten skeptisch gegenüber, insbesondere, wenn ihre Wirksamkeit nicht hinreichend in langen Studien belegt ist. Die Unsicherheit hinsichtlich der lang-

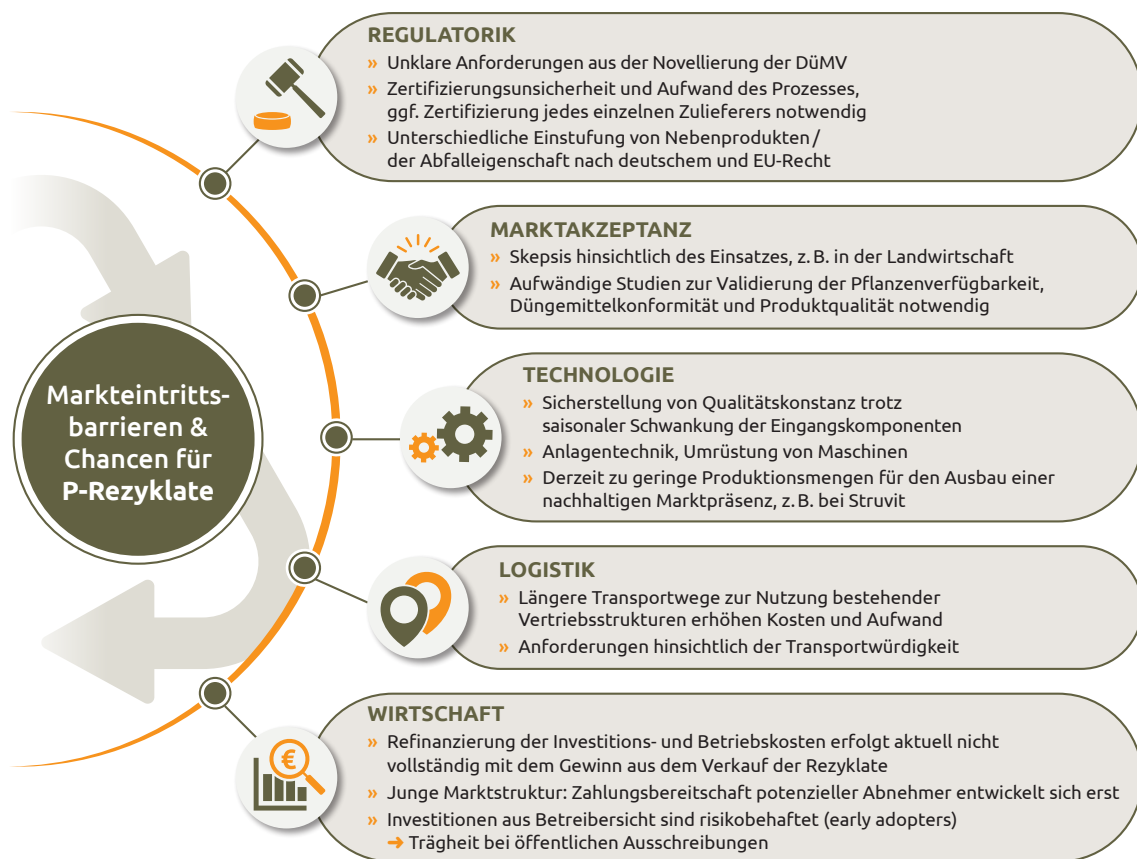


Abbildung 36: Markteintrittsbarrieren & Chancen für Rezyklate.

fristigen Effekte auf Bodenqualität und Pflanzenwachstum führt dazu, dass Landwirte oftmals auf konventionelle Düngemittel zurückgreifen. Diese Skepsis wird zusätzlich durch regulatorische Hürden verstärkt, da einige Produkte erst eine umfassende rechtliche Zulassung erhalten müssen, bevor sie breit vermarktet werden können. Die Regularien für die Zulassungen sind mitunter komplex und erfordern nicht nur ein tiefes Einarbeiten in die Materie, sondern stellen sich auch als potenziell wirtschaftliche Konsequenzen dar, wenn z. B. jede Kläranlage für die Zulieferung von Klärschlamm einzeln zertifiziert werden muss, was mit erheblichem Arbeits- und Zeitaufwand verbunden ist.

Neben den rechtlichen und marktseitigen Herausforderungen spielen auch technologische und wirtschaftliche Faktoren eine entscheidende Rolle. Eine der größten Schwierigkeiten besteht darin, eine gleichbleibende Produktqualität sicherzustellen. Da die Zusammensetzung von Klärschlammaschen saisonalen Schwankungen unterliegt, müssen Rückgewinnungsverfahren so ausgelegt sein, dass sie trotz dieser Variationen eine konstante Qualität der Rezyklate gewährleisten mit den in der DüMV festgelegten Toleranzen. Besonders bei der Herstellung von Düngemitteln ist dies essenziell, um eine verlässliche Nährstoffzusammensetzung sicherzustellen und Verunreinigungen zu vermeiden.

Darüber hinaus gestaltet sich der Markteintritt wirtschaftlich anspruchsvoll. Die Produktion vieler Phosphor-Rezyklate erfolgt bislang in zu geringen Mengen, um eine eigenständige Vermarktung als Düngemittel rentabel zu machen. Gerade bei MAP zeigt sich, dass die Produktionskapazitäten derzeit nicht ausreichen, um eine nachhaltige Marktpräsenz aufzubauen. In solchen Fällen kann es sinnvoller sein, die Produkte an etablierte Düngemittelhersteller abzugeben, anstatt eine eigenständige Vertriebsstruktur aufzubauen. Auch die Preisgestaltung fällt entsprechend herausfordernd aus. Damit sich die Investitions- und Betriebskosten einer Rückgewinnungsanlage refinanzieren lassen, müssen die Rezyklate zu wettbewerbsfähigen Preisen verkauft werden. Aufgrund der noch jungen Marktstruktur kann dies jedoch schwierig sein, da sich die Zahlungsbereitschaft potenzieller Abnehmer erst entwickeln muss. Auch logistische Aspekte (Transportkosten) beeinflussen den Markteintritt von recyceltem P wie auch dessen Nebenprodukte.

Verschiedene RePhoR-Projekte haben dazu unterschiedliche Strategien entwickelt. Die rechtliche Anerkennung der Phosphor-Rezyklate ist Voraussetzung für ihre Vermarktung. Für einige RePhoR-Produkte wurden bereits REACH-Registrierungen erreicht oder befinden sich in Vorbereitung. Zudem laufen Bestrebungen, Phosphor-Rezyklate auf europäischer Ebene in die Positivliste der

DG Agri (Directorate-General for Agriculture and Rural Development, Generaldirektion der Europäischen Kommission) als „calcined phosphate“ aufzunehmen und sie mit dem CE-Zeichen für den Einsatz als Düngemittel zu kennzeichnen und ggf. in der Ökolandwirtschaft zu verwenden.

Weiter entscheidend ist der Ausbau der Produktionskapazitäten. Da die Wirtschaftlichkeit vieler Rückgewinnungsverfahren stark von der produzierten Menge abhängt, wird derzeit daran gearbeitet, z.B. die MAP-Produktion auf Kläranlagen auszuweiten. Pflanzenversuche und deren Veröffentlichung sollen das Vertrauen in und die Akzeptanz von Phosphor-Rezyklaten steigern (vgl. Kapitel 4.5.). Eine verstärkte Kommunikation der Ergebnisse wird dazu beitragen, Vorbehalte abzubauen und Marktchancen zu verbessern.

Trotz der bestehenden Herausforderungen ergeben sich vielversprechende Marktchancen für Phosphor-Rezyklate. Für Phosphorsäure existiert bereits ein etablierter Markt, insbesondere in der Düngemittelindustrie. Auch für andere Produkte bestehen bereits gut ausgebaute Verwertungswege. Viele Phosphor-Rezyklate könnten direkt eingesetzt oder in nachgeschalteten Aufbereitungsanlagen genutzt werden. Dabei hilft auch die regionale Rückführung, eine stärkere Bindung zur Kundschaft zu erreichen. Eine konsequente auch von der Bundesregierung unterstützte Bewerbung von Rezyklaten als innovative Produkte, die eine nachhaltige und umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Düngemitteln sind, wird die Markteinführung neuer Phosphor-Rezyklate erleichtern. Schließlich bietet die umfangreiche wissenschaftliche Begleitung der Projekte eine gute Grundlage für eine faktenbasierte Kommunikation.

## 4.5 Versuche zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor

Viele Phosphor-Rezyklate, die als Düngemittel in Frage kommen, sind nur eingeschränkt pflanzenverfügbar. Die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor beschreibt den Anteil eines Düngemittels, der den Pflanzen tatsächlich zur Nährstoffaufnahme zur Verfügung steht. Diese Verfügbarkeit wird maßgeblich von der chemischen und mine-

ralogischen Zusammensetzung des Düngers sowie von Boden- und Pflanzenfaktoren bestimmt. Besonders im Kontext von Recyclingphosphaten ist die Pflanzenverfügbarkeit ein zentrales Kriterium zur Bewertung der agronomischen Eignung dieser Düngemittel. Phosphate aus thermischen Prozessen ähneln in ihrer Struktur teilweise

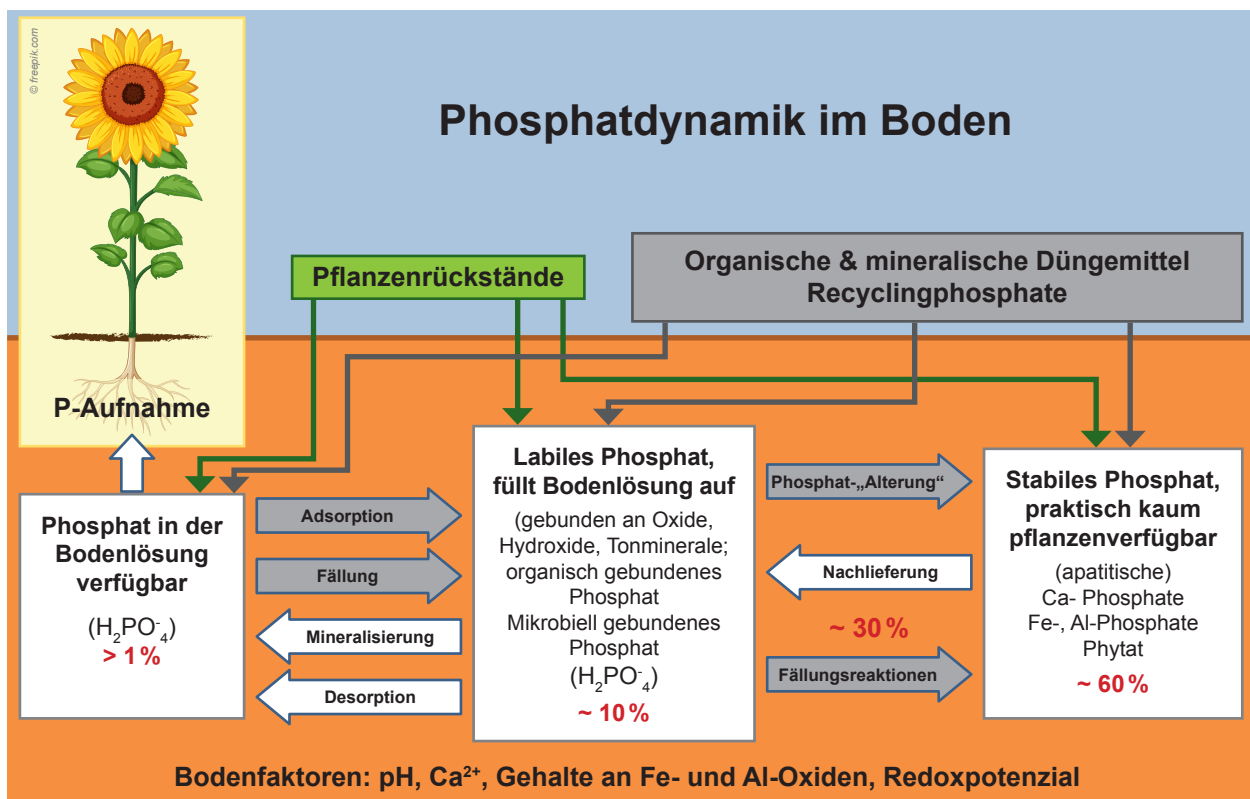
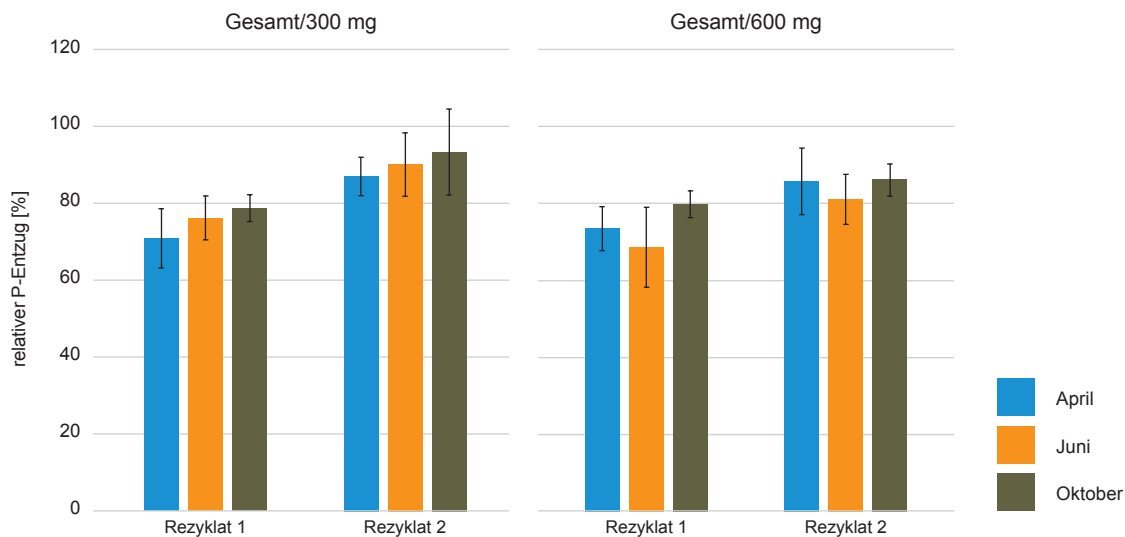


Abbildung 37: Übersicht über die Verteilung von Phosphatfraktionen im Boden und die Flüsse zwischen den Fraktionen. © Eigene Darstellung nach Goldbach





**Abbildung 38: Vergleich der P-Entzüge zweier Rezyklate in zwei Aufwandmengen zu Weidelgras während drei verschiedener Jahreszeiten relativ zu TSP (=100).**

magnetischen Mineralien, die als „harterdige“ Rohphosphate ohne Aufschlussverfahren kaum pflanzenverfügbar sind. Daher besteht eine große Herausforderung darin, die Pflanzenverfügbarkeit solcher Rezyklate gezielt zu steigern und gleichzeitig kosteneffizient zu arbeiten. Für die Produzenten und auch Abnehmer der Rezyklate ist diese Anforderung für den Umsatz einer Großtechnik jedoch hochgradig relevant.

Aufgrund der natürlichen Vielfalt von Böden, den Pflanzeigenschaften und den unterschiedlichen Aufbereitungsprozessen der Rezyklate variiert die Verfügbarkeit von Phosphor erheblich, sodass standardisierte Methoden zur vergleichenden Bewertung erforderlich sind (vgl. Abbildung 37). Pflanzenversuche sollten zwischen verschiedenen Durchführenden sowohl hinsichtlich der Versuchssubstrate oder -böden wie auch der Arten und Sorten der Versuchspflanzen möglichst vereinheitlicht werden und über mehrere Jahre hinweg gut reproduzierbar sein.

Im Rahmen der RePhoR-Fördermaßnahme und des wissenschaftlichen Begleitvorhabens TransPhoR bearbeitet die HGoTECH GmbH in erster Linie Fragen der Pflanzenverfügbarkeit bei der Anwendung von Recyclingphosphaten in Landwirtschaft und Gartenbau und aller damit zusammenhängenden Aspekte. Das eigenentwickelte Prüfsubstrat und der Ansatz zur Prüfung der Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat wurde von 2022 bis zum April 2023 in einer Versuchsserie mit 3 Produkten plus 2 Standards: Triplesuperphosphat (TSP) als wasserlöslicher Kontrollstandard und die Freisetzung von P aus dem Prüfsubstrat als *Nullkontrolle* durchgeführt.

Zudem wurde untersucht, ob die Ergebnisse auch von den jahreszeitlichen Randbedingungen beeinflusst wer-

den. Als Versuchspflanzen dienten Welsches Weidelgras (*L. perenne*), das in 4 Schnitten getestet wurde, dazu Mais als „worst case“ (Abbildung 40) und Raps (Abbildung 41) als „best case“ bezüglich des Aneignungsvermögens geringer löslicher Phosphate. Dargestellt ist dabei der P-Entzug als Produkt von Biomasse und P-Gehalt. Zwar waren die absoluten Werte des Prüfverfahrens jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen, aber die Reihung der Verfügbarkeitswerte relativ zu den Standards war stets gleich (vgl. Abbildung 38). Es wurde zudem festgestellt, dass die Aufwandmenge nicht überhöht sein sollte: 300 mg P/Gefäß liefern eine präzisere Differenzierung. Das weniger komplexe Verfahren unter Verwendung von Weidelgras kann damit unabhängig von der Jahreszeit eingesetzt werden und liefert stets die gleiche Bewertung der Verfügbarkeit (Abbildung 39), auch im Vergleich von zwei Jahren.

Das erweiterte Verfahren mit Mais (Abbildung 40) und Raps (Abbildung 41) sollte auf die Zeiträume beschränkt werden, in welchen beide Kulturpflanzen gute Entwicklungsbedingungen vorfinden. Das besonders hohe Aneignungsvermögen von Raps zeigte sich darin, dass die Rezyklate RP2 und RP3 mit einer höheren Pflanzenverfügbarkeit stets von TSP nicht signifikant verschiedene P-Entzüge aufwiesen, während ein externes Produkt RP1 unabhängig von den Wachstumsbedingungen jeweils ca. nur 50% des Standards erreichte (Abbildung 41) und bei Mais von der Nullkontrolle nicht verschieden war (Abbildung 40).

Unter optimalen Wachstumsbedingungen (Frühjahrs- und Sommersatz) waren die P-Entzüge der besser verfügbaren Rezyklate für Raps i.d.R. nicht signifikant geringer als die mit TSP-Düngung (Abbildung 41).

Unter lichtschwachen Bedingungen war der Unterschied zwischen TSP und dem Rezyklat mit besserer Verfügbarkeit bei Mais deutlich größer als in den beiden Sätzen mit höherer photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR, Abbildung 40). Dies liegt an der geringeren Wurzelwachstumsrate und geringerer Bildung von Wurzelexudaten wegen Energiemangels. Für Mais als lichtbedürftige C4 Pflanze ist daher der Zeitpunkt für die Durchführung von Versuchen zur P-Verfügbarkeit kritisch (Abbildung 40). In beiden Versuchsjahren (2022 und 2023) wurden die gleichen Ergebnisse erzielt.

Unter Beachtung der oben genannten Rahmenbedingungen ist die HGoTECH Methode standardisierbar und eignet sich für die Bewertung der Düngewirkung von Phosphor-Rezyklaten. Derzeit laufen noch Untersuchungen, ob ein Substrat mit einem niedrigeren pH-Wert zu einer grundsätzlich anderen Einschätzung der P-Verfügbarkeit führen könnte. Dies scheint aber nach den bisherigen Zwischenergebnissen nicht der Fall zu sein.

Darüber hinaus fanden auch innerhalb der Verbundprojekte Untersuchungen statt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

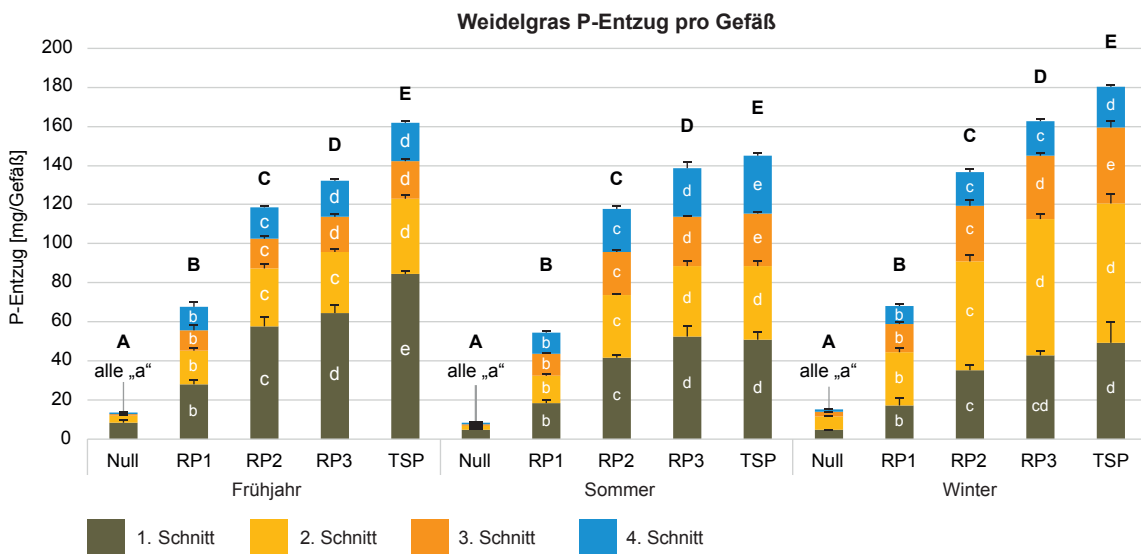


Abbildung 39: Vergleich der P-Entzüge durch Weidelgras aus drei Phosphor-Rezyklaten (RP 1–3) zu 3 verschiedenen Jahreszeiten im Vergleich zur Nullkontrolle und zu TSP; Säulen mit unterschiedlichen Großbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede ( $p < 5\%$ ) zwischen den Gesamtentzügen, unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $p < 5\%$ ) für die einzelnen Schnitte. Anm.: RP2 und RP3 entsprechen Rezyklat 1 und 2 aus Abbildung 33.

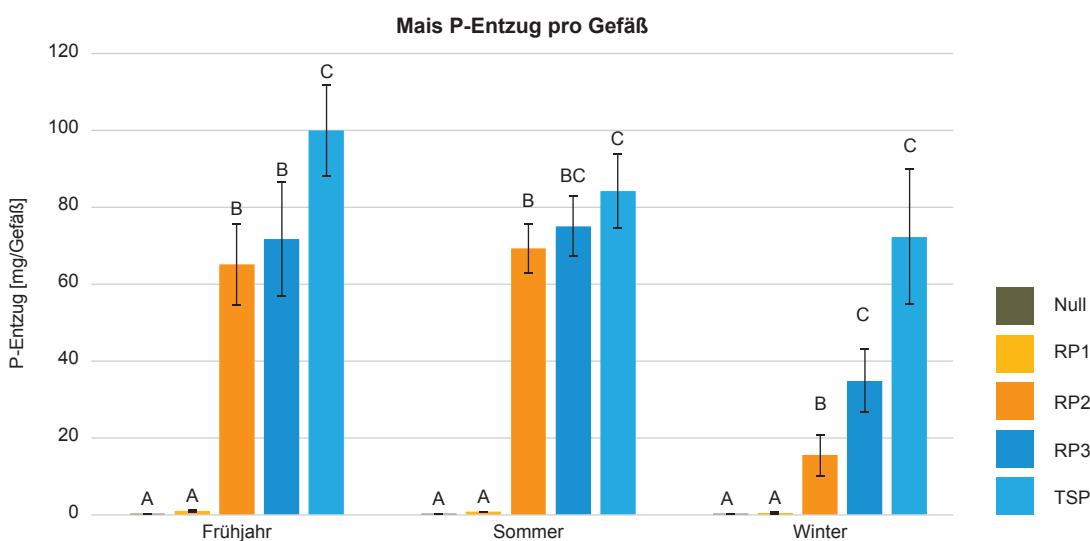
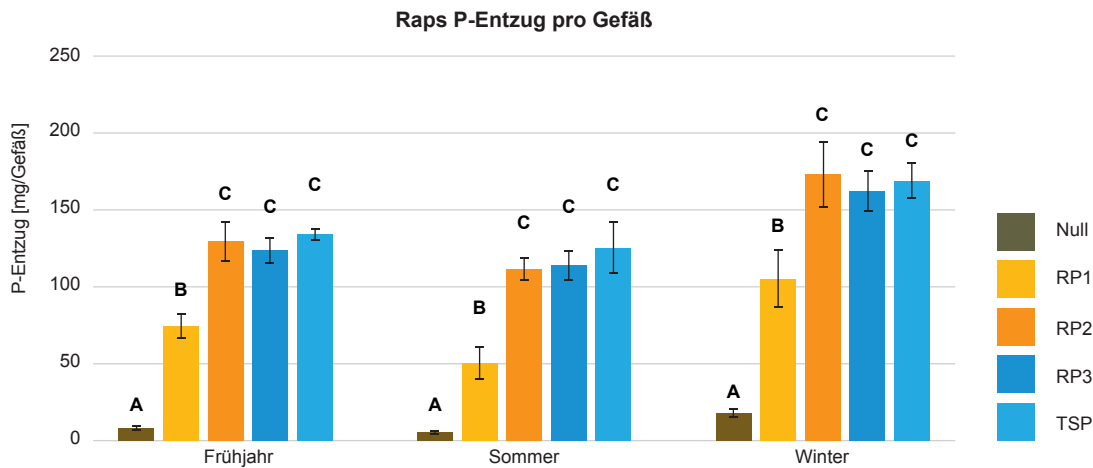


Abbildung 40: Vergleich der P-Entzüge durch Mais aus drei Phosphor-Rezyklaten (RP 1–3) zu 3 verschiedenen Jahreszeiten im Vergleich zur Nullkontrolle und zu TSP; Säulen mit unterschiedlichen Großbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede ( $p < 5\%$ ) zwischen den Gesamtentzügen.



**Abbildung 41:** Vergleich der P-Entzüge durch Raps aus drei Phosphor-Rezyklaten (RP 1 – 3) zu 3 verschiedenen Jahreszeiten im Vergleich zur Nullkontrolle und zu TSP; Säulen mit unterschiedlichen Großbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede ( $p < 5\%$ ) zwischen den Gesamtentzügen.

### RePhoRM

Als Versuchspflanzen wurden Weidelgras (*Lolium perenne*) und/oder Luzerne (*Medicago sativa*) unter Verwendung des HGoTECH Standardsubstrats eingesetzt, das selbst praktisch kein verfügbares Phosphat enthält. Die Ergebnisse zeigten eine gute Pflanzenverfügbarkeit auf, die methodischen Schwankungen waren im Testsubstrat geringer als auf Versuchsgliedern mit Boden.

### DreiSATS

Aufgrund der Heterogenität des Ausgangsmaterials Klärschlamm sowie der im Rahmen von DreiSATS explorierten Verfahren entstand eine Vielzahl an potenziell als Düngemittel einsetzbarer Klärschlammqualitäten. Entsprechend wurde daran gearbeitet, eine Methodik für die Bewertung im Rahmen von pflanzenbasierten Bioassays zu entwickeln, die ein breites Screening in Bezug auf Phytotoxizität sowie Nährstoffverfügbarkeit und im Weiteren die Düngewirksamkeit in größeren Stichprobenzahlen und unter variierenden Umweltbedingungen zulässt. Es wurden selektierende und vergleichende Pflanzenversuche in standardisierten Versuchsständen in den Laboren des Fraunhofer IKTS und im Gewächshaus sowie in kleinskaligen Freilandversuchen bei der VKD durchgeführt. Grundlagen für eine hohe Reproduzierbarkeit und Aussagefähigkeit der Versuche bilden die Adaption von internationalen Standards des pflanzenbaulichen Versuchswesens (Schwerpunkt IKTS) sowie der Aufbau und die Inbetriebnahme entsprechender Anlagen (Schwerpunkt VKD) [15].

### P-Net

Die Düngewirkung von MAP (STR) wurde in Gefäß- und On-Farm-Versuchen sowie in einem Mesokosmenversuch

(1000 L Container im Freiland) durch das JKI untersucht. Dieser ermöglicht es, P-Düngeeffekte unter kontrollierten, reproduzierbaren Bedingungen zu isolieren, die „feldähnlichere“ Verhältnisse abbilden als der herkömmliche Gefäßversuch. Bei On-Farm-Versuchen werden P-Düngeeffekte v.a. durch den P-Versorgungszustand und andere Bodeneigenschaften überlagert (s. Abbildung 37). Die mit dem P-armen JKI-Substrat befüllten Container bieten ausreichend Wurzelraum, um Versuchskulturen bis zur Ertragsreife anzubauen. Die Wirkung des konfektionierten (granulierten) STR wurde und wird in einer Fruchtfolge aus Weidelgras (2023/24), Mais (2024), Roggen (2024/25) und Kartoffeln (2025) mit der von DAP, weicherdigem Rohphosphat (wRP) und einer Nullkontrolle (P0) verglichen. STR und DAP führten ab dem 3. Weidelgrasschnitt zu signifikant höheren P-Aufnahmen als wRP und P0; STR und DAP unterschieden sich dabei nicht signifikant. Im Mais führte eine Düngung mit DAP zwar zu einem leichten Entwicklungsvorsprung gegenüber STR, wRP und P0, zur Ernte waren jedoch keine signifikanten Unterschiede im Ertrag zwischen DAP und STR feststellbar. DAP und STR erzielten signifikant höhere Erträge als wRP und P0.

### R-Rhenania

Im Projekt R-Rhenania wurde die Düngewirkung des AshDec® und R-Rhenania Produkten untersucht. Mit den AshDec®-Produkten fanden breit angelegte Gefäßversuche unter Verwendung verschiedener Düngestufen, verschiedener Pflanzenarten (u.a. Sommerweizen, Mais und Ackerbohne) und Böden, statt. Die Wirkung wurde dabei im Vergleich zu Triple Superphosphat (TSP), Rohphosphat (RP), unbehandelte Klärschlammasche (KSA), Struvit sowie Kontrollen ohne P Düngung ermittelt. Die Untersuchungen bestätigen, dass die thermochemischen

Behandlungsverfahren die Düngewirkung der KSA verbessern. Die Düngewirkung des AshDec®-Produkts war, unabhängig von den Pflanzenarten und Böden, hoch und häufig vergleichbar zu TSP und Struvit. Die Gefäßversuche zeigen zudem, dass die Wirksamkeit von Produkten aus den beiden Herstellungsverfahren, AshDec® und R-Rhenania, vergleichbar ist.

Das AshDec®-Produkt wurde in zwei dreijährigen Feldversuchsdurchgängen (1. Durchgang 2021–2023; 2. Durchgang 2022–2024) unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus auf drei bayerischen Standorten mit geringen P-Versorgungsstand evaluiert. Zur Einschätzung der Düngewirkung wurde neben einer Nullparzelle Struvit als weiterer P-Recyclingdünger und Triplesuperphosphat als bekannt hochwirksamer Dünger integriert. Die Düngung erfolgte jeweils zu Versuchsbeginn vor der Fruchtfolge Mais, Winterroggen, Klee gras. Die Düngewirkung des AshDec®-Produkts war in der ersten Frucht Mais vergleichbar zu Struvit, aber etwas geringer als TSP.

## Abschließende Bemerkung zu Pflanzenversuchen

In einem zusätzlichen Versuch von HGoTECH zusammen mit dem JKI konnte festgestellt werden, dass für standardisierbare vergleichende Versuche mit gut differenzierenden Ergebnissen die Substratkomponenten gleich sein sollten, da sich diese je nach Hersteller und Herkunft sehr stark unterscheiden. Das betrifft die Konzentrationen an pflanzenverfügbarem P. Auch bei gleicher Bezeichnung und Einstufung haben wir für u.a. Tonminerale und Rindensubstrate sehr verschiedene Werte festgestellt. Somit sollten standardisierte Substrate aus stets den gleichen Herkünften und von den gleichen Herstellern bezogen werden. Zudem sind regelmäßige eigene Qualitätssicherungen durch wiederholte Pflanzenversuche mit stets den gleichen Sorten durchzuführen und mit stets den gleichen Standards zu vergleichen. Dies ist insbesondere zu beachten, wenn auf andere Produkte zurückgegriffen werden müsste.

## 4.6 Regionale Bedarfsplanung aus Sicht der Landwirtschaft

Als große Nährstoffabnehmerin spielt die Landwirtschaft bei der Betrachtung der Phosphor-Rückgewinnung – und auch bei der Betrachtung der Stickstoffverfügbarkeit sowie der Stickstoff-Rückgewinnung – eine wichtige Rolle.

In den meisten Regionen Deutschlands besteht ein deutlicher Düngebedarf an Stickstoff und Phosphor. In Niedersachsen beispielsweise besteht selbst unter Berücksichtigung des Nährstoffanfalls aus der Tierhaltung, der Biogasproduktion, den eingesetzten Mineraldüngern und allen weiteren zur Verfügung stehenden Nährstoffquellen (inkl. Klärschlamm) ein ungedeckter Stickstoffbedarf von 50.461 t N und Phosphorbedarf von 20.364 t P [33]. Landwirtschaftlich verwertet werden in Niedersachsen mit Stand 2023 ca. 27% der Klärschlämme. Dies entspricht einer Nährstofffracht von 2.030 t N (anrechenbar) und 850 t P, die bei einer flächendeckend thermischen Verwertung substituiert werden müssen [34]. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die potenziell entzogene Menge des Phosphors nicht vollkommen der reell zur Pflanzenernährung verfügbaren Menge P entspricht, da durch den Einsatz unterschiedlicher Fällmittel auf den Kläranlagen unterschiedliche Phosphatverbindungen vorliegen, die wiederum unterschiedlich pflanzenverfügbar sind.

Die Beurteilung der Versorgungs- und ggf. Überschuss-situation vor Ort ist stark saisonal geprägt und ist auch auf regionaler Ebene stark variabel. Während beispielsweise in Westniedersachsen bilanzielle Nährstoffüberschüsse bestehen und eine thermische Verwertung der

vor Ort anfallenden Klärschlämme zu einer bilanziellen Entlastung führt, besteht besonders im Osten und Süden Niedersachsens weiterhin ein Nährstoffbedarf. Deshalb sind hier besonders leicht verfügbare Dünger, wie lokale Klärschlämme, gefragt. Vor diesem Hintergrund ist eine gezielte, kleinräumig detaillierte Betrachtung des Nährstoffbedarfs und -anfalls besonders wichtig. Dies wird im Projekt SATELLITE mit der Erarbeitung eines regionalen Planungsmodells zur gezielten Nährstoffrückführung adressiert (beschrieben im Abschlussbericht SATELLITE).

Die Abhängigkeit der Landwirtschaft von der Nährstoffzufuhr muss für die Bewertung von Rückführungsstrategien zumindest konzeptionell über die reine Betrachtung der Nährstoffmengen hinausgehen und auch globale Einflüsse würdigen. Derzeit wird besonders bei der Phosphordüngung auf Mineraldünger zurückgegriffen, deren praktische Verfügbarkeit nicht zuletzt von geopolitischen Systemen abhängt. So zeigte sich im Jahr 2021 mit dem Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine, welche starke Auswirkung der Wegfall einzelner Bezugsquellen auf die Nährstoffverfügbarkeit in Deutschland haben kann. Zudem zeigte sich insgesamt durch die stark steigenden Energiepreise die Abhängigkeit des Markts für Mineraldünger von Energie- und Rohstoffverfügbarkeit. So verdreifachte sich in kurzer Zeit der Preis für mineralische Stickstoffdünger, der Preis für Phosphate verdoppelte sich und beide Preise blieben auf hohem Niveau [31, 32, 35]. Zwar adressiert die deutsche Phosphorstrategie mit der Rückgewinnungspflicht aus Klärschlämmen genau

diesen Aspekt, allerdings erhöhte sich die Nachfrage nach Wirtschaftsdüngern und Klärschlämmen in diesem Zeitraum in der Praxis merklich. Dies zeigt einmal mehr, wie bedeutend die Verfügbarkeit von regionalen und von übergeordneten Verhältnissen unabhängigen Nährstoffträgern (direkte Ausbringung oder zeitlich entkoppelt durch Aufbereitung/Lagerung) für eine gesicherte landwirtschaftliche Produktion ist.

Die Umstellung der Klärschlammverwertung hin zur Verbrennung, mit einer drohenden Übergangsphase der Aschedeponierung und ohne Gewissheit, dass die entstehenden Phosphorprodukte auch als Phosphordünger Einsatz finden, ist also für die Landwirtschaft nährstoffbilanziell als negativ zu bewerten. Zudem wird in der heu-

tigen Betrachtung und Rückgewinnungsstrategie häufig der Stickstoff als essenzieller Pflanzennährstoff nicht ausreichend beachtet. Positiv zu bewerten ist allerdings das Unterbinden der Freisetzung von im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffen auf die Nutzflächen, die mit der thermischen Verwertung einhergeht. Aufgrund der Unübersichtlichkeit möglicher Schadstoffe und der damit einhergehenden Nachweisproblematik ist dies auch für Klärschlämme relevant, die den Anforderungen nach DüMV und AbfKlärV entsprechen. Der Nährstoffbedarf in der Landwirtschaft und die Bewertung von Strategien zu dessen Deckung muss somit neben der Berücksichtigung von möglichen Nebenbestandteilen auch die tatsächliche Verfügbarkeit sowohl von Klärschlamm als auch dessen Alternativprodukten betrachten.

## 4.7 Sozialakzeptanz von Sekundärdüngern

Im Rahmen des Projektes RePhoR stellt sich auch die Frage nach der Vermarktbarkeit und in diesem Zusammenhang nach der Akzeptanz eines Sekundärphosphorproduktes aus Klärschlamm/-asche. Vor diesem Hintergrund wurde 2021 eine Umfrage durchgeführt, die dieser Frage nachging.

Vorbereitend für die Umfrage wurden Interviews mit Expertinnen und Experten geführt, so mit Vertreterinnen und Vertretern aus dem Ökolandbau, der Deutschen Phosphor Plattform, dem Wasserverband Eifel-Rur, einem Laborleiter einer Kläranlage, einem Händler von Phosphordünger, dem Bauernverband sowie dem LANUV. Die Interviews dienten als Grundlage für die Erarbeitung eines Fragebogens, der im Nachgang an Beteiligte aus dem Bereich des Phosphor-Recyclings resp. potenzielle Anwender des Sekundärdüngers im Online-Format versendet wurde.

Erkenntnisse aus den Interviews, die auch in die Fragebögen eingeflossen sind, betrafen die Akzeptanz der Sekundärdünger aus Klärschlamm resp. Klärschlammasche auch in Verbindung mit den Kosten für dieses Sekundärprodukt. Es wurde darauf hingewiesen, dass z. B. Struvit im biologischen Landbau akzeptiert würde, wobei auch der regionale Charakter dieses Produktes aus der „benachbarten“ Kläranlage positiv bewertet würde. Die Zahlungsbereitschaft in diesem Zusammenhang wurde als hoch eingeschätzt. Andere werteten den Preis für den Sekundärdünger hingegen als maßgeblich und gingen davon aus, dass sich das Produkt, solange es teurer wäre als Primärdünger, nicht am Markt durchsetzen würde.

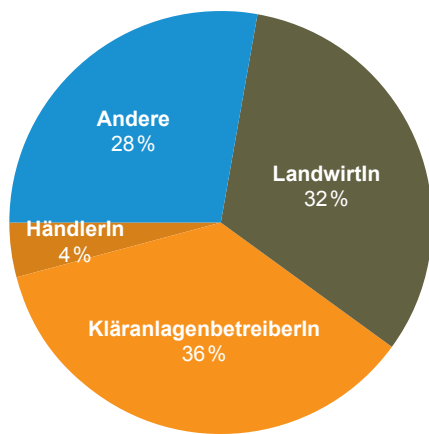
Ein weiterer Aspekt bei der Akzeptanz von Sekundärdüngern wäre der Einsatz von Säuren im Recyclingprozess, der insbesondere im Biolandbau kritisch gesehen würde, wo-

bei andere eher die Unbedenklichkeit sowie die Wirksamkeit des Produktes hervorhoben. Hier wurden beispielsweise die Prüfung auf Keim- und Spurenstofffreiheit und den Schwermetallgehalt erwähnt sowie der Hinweis gegeben, dass die Pflanzenverfügbarkeit gegeben sein muss. Darüber hinaus wurde angemerkt, dass der Markt individuell angepasste Dünger-Spezifikationen anfragt, die ggf. nicht der Zusammenstellung der im Rahmen des Projektes RePhoR betrachteten Sekundärdünger entspricht.

Weitere Aspekte, die in den Interviews angesprochen wurden, sind die praktische Umsetzung der Vorgaben aus der Gesetzgebung. So wurde darauf hingewiesen, dass für die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche eine Monoverbrennung der Klärschlämme erfolgen muss, die Verbrennungskapazitäten aber ggf. (regional) nicht gegeben sind. Die Standortfrage für den Neubau von Monoverbrennungsanlagen erweist sich dabei als herausfordernd. Es wurde zudem auf die Betrachtung der Transportentfernungen hingewiesen, die standortspezifisch deutlich schwanken können und ggf. zu einer Steigerung der Umweltlasten sowie der Kosten für das Produkt führen können.

Die zuvor erwähnten Aspekte wurden aufgegriffen, in einen Fragebogen überführt und mit freundlicher Unterstützung des Lenkungskreises des Projektes RePhoR an relevante Verteilerlisten versandt. Die insgesamt 184 Rückmeldungen verteilten sich auf ca. 36 % Kläranlagenbetreiber, ca. 32 % Landwirtschaft und 4 % Händlern (Andere: 28 %).

Einen wesentlichen Hinderungsgrund im Einsatz von Sekundärdünger aus Klärschlamm sahen insbesondere die Ökolandwirte darin, dass sie (zum Zeitpunkt der Umfra-



**Abbildung 42: Teilnehmende an der Umfrage zur Sozialakzeptanz von Phosphor-Recycling aus Klärschlamm resp. Klärschlamm-asche.**

ge) diesen Dünger nicht einsetzen durften (mittlerweile durch die Durchführungsverordnung (EU) 2023/121 geändert). Hier gilt es, das Wissen um die in 2023 veränderte gesetzliche Situation zu verbreiten.

Ein weiterer Aspekt, der das Potenzial für Sekundärphosphor andeutet, liegt in der Regionalität. So antworteten ca. 43 % der Betroffenen, dass sie der Aspekt der Regionalität überzeugen würde, auf Sekundärdünger zurückzugreifen.

Sehr deutlich ist der Unterschied bei der Frage nach der Akzeptanz von preislichen Abweichungen von Recyclingdünger gegenüber Primärdünger. Während mit ca. 75 % der konventionellen Landwirte keine Preisunterschiede akzeptieren würden, würden ca. 39 % der zertifizierten Biolandwirte einen Preisaufschlag von 10 % und ca. 12 % einen Preisaufschlag von 20 % akzeptieren.

Noch wichtiger als den Preis schätzen die Befragten die Qualität des Produktes ein. So gaben ca. 40 % der Befragten an, dass diese (neben Kosten, Akzeptanz bei Kundin-

nen und Kunden und rechtlichen Aspekten) am höchsten einzuschätzen sei. Dieser Aspekt wurde in einer offenen Frage bestätigt, die nach Maßnahmen fragte, die ergriffen werden müssten, damit ein Einsatz von Recyclingdünger aus Klärschlamm in Frage käme. Hier wurde häufig der qualitative Aspekt erwähnt (Auszug der Antworten), wie z.B. „Schwankungen reduzieren und Optimierung der Pflanzenverfügbarkeit“, „Kontaminationen/ unerwünschte Rückstände müssten weitestgehend ausgeschlossen sein“, „Gewährleistung durch den Hersteller/Händler bezüglich Qualität des Düngers“, „Stabiles Endprodukt, das mit der vorhandenen Technik im Betrieb exakt ausgebracht werden kann“ oder „Dünger müssen unbedenklich bezüglich Schadstoffen sein (zertifizierte Kontrolle)“.

Die Einführung neuer Produkte insbesondere in dem Bereich der Verwertung von Abfällen wirft die Frage der Akzeptanz auf. Im Rahmen der hier vorgestellten Fragebogenaktion wurde diesbezüglich ein Meinungsbild unter Kläranlagenbetreibern, Landwirten, Händler etc. eingeholt. Die Frage der Akzeptanz geht jedoch über diesen Personenkreis hinaus. Ein wichtiger Aspekt liegt z.B. auch in der Akzeptanz der Bevölkerung und hier insbesondere der unmittelbar betroffenen Anwohner. Das können z. B. Personengruppen aus dem Umfeld von Kläranlagen sein, die einen erhöhten LKW-Verkehr und damit verbunden höhere Lärmemissionen befürchten. Andererseits können auch Personen in Betracht kommen, die im Umfeld von landwirtschaftlichen Flächen wohnen, auf denen der Sekundärdünger ausgebracht wird (Abfalldiskussion). Diese Bevölkerungsgruppen wurden im Rahmen dieser Sozialakzeptanzstudie nicht adressiert, sollten jedoch bei der Einführung von Sekundärdüngern über entsprechende Informationen einbezogen werden, um die allgemeine Akzeptanz bereits im Vorfeld der Umsetzung der verpflichtenden Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm/-asche zu steigern.



**Abbildung 43: Akzeptanzrelevante Aspekte nach ihrer Wichtigkeit.**

## 5 Recht

Die Umsetzung des Phosphor-Recyclings in Deutschland steht vor vielfältigen rechtlichen Herausforderungen, die sowohl den Umwelt-, Abfall- und Wasserrechtsbereich als auch das Vergaberecht und organisatorische sowie wirtschaftliche Regulierungen betreffen.

Wie dargestellt, verläuft die Planung von Phosphor-Rückgewinnungsanlagen aktuell schleppend. Die Gründe darin sind vielfältig und abgesehen von Fragen der großtechnischen Skalierung auch in offenen Herausforderungen in der Rechtslage zu finden. Einige Fragen wurden in RePhoR explizit behandelt und werden in den folgenden Unterkapiteln kurz dargestellt. Darüber hinaus wird ein kurzer Überblick über die dringlichsten Herausforderungen gegeben.

Die Frage, wer Phosphor-Recycling-Anlagen baut und betreibt, ist ebenso wichtig wie komplex. Kommunen stehen vor der Entscheidung, das Recycling eigenständig, gemeinsam mit anderen oder durch Dritte durchführen zu lassen. Offene Fragen bestehen noch hinsichtlich der optimalen Organisationsform. So ist z.B. zu klären, wie Klärschlammherzeuger ihre Entsorgungspflicht ggf. auf Dritte übertragen können: § 22 KrWG lässt die Übertragung an einen Dritten zu, entbindet die Kommune aber nicht von ihrer Verantwortlichkeit, falls der Dritte die Pflichten nicht erfüllt. In RePhoR wurden verschiedene Optionen untersucht und sind in Kapitel 5.1 aufgeführt.

An dieser Stelle sind auch Fragen des Vergaberechts zu beachten, bei denen noch einige Unsicherheiten herrschen, z.B. hinsichtlich Haftung und Kontrolle. Dabei sind kommunale Kläranlagenbetreiber, die neue Anlagen bauen oder Dienstleistungen einkaufen, als öffentliche Auftraggeber grundsätzlich an das Vergaberecht gebunden, sofern nicht spezielle Ausnahmetatbestände erfüllt sind. In der Praxis wird daher jede geplante Kooperation darauf geprüft werden müssen, ob eine Ausschreibungspflicht besteht. Das betrifft zum einen die Ausschreibung von Planungs- und Bauleistungen für eigene Rückgewinnungsanlagen, zum anderen die Vergabe von Entsorgungsdienstleistungen (z.B. die Übertragung des Klärschlammes an Dritte zur Monoverbrennung und Rückgewinnung).

Sind die Grundvoraussetzungen geschaffen, erfordert der Bau neuer Verbrennungs- und Rückgewinnungsanlagen umfangreiche Genehmigungen (BImSchG-Genehmigung, Baugenehmigung, wasserrechtliche Erlaubnisse für Nebenanlagen etc.). Diese Verfahren können mehrere Jahre in Anspruch nehmen, zumal oft Umweltverträglichkeitsprüfungen und Öffentlichkeitsbeteiligungen durchzuführen sind. Die technische Komplexität und die strengen

Emissionsvorgaben (z. B. müssen Thermoprozesse die 17. BImSchV für Abfallverbrennung einhalten) sind hohe Hürden, die oft externes Know-how erfordern, sowohl bei den Antragstellern als auch bei den zuständigen Behörden.

Obwohl die gesetzlichen Vorgaben bundesweit einheitlich gelten, gibt es in der praktischen Umsetzung auch auf Länderebene Unterschiede und Besonderheiten. Die Bundesländer unterscheiden sich beispielsweise in ihrem Klärschlamm aufkommen und der bisher verfolgten Entsorgungsstrategie (landwirtschaftliche Verwertung vs. Verbrennung). Entsprechend variieren die Herangehensweisen, dazu kommen individuelle Auslegungen der geltenden Rechtsprechung. Eine Thematik ist z.B. die gebührenrechtliche Behandlung, da die Kommunalabgabengesetze (KAG) Ländersache sind und aus den Bundesländern unterschiedliche Signale gekommen sind [40]. So haben Hessen und Baden-Württemberg bereits die Gebührenfähigkeit explizit bestätigt. Insgesamt bemühen sich die Bundesländer um Abstimmung – z.B. über die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) und Wasser (LAWA) – doch bleibt die Ausgangslage heterogen.

Hinsichtlich dieser Fragestellung, wie die erheblichen Kosten für Bau und Betrieb von Phosphor-Recycling-Anlagen finanziert werden können und ob sie über kommunale Abwassergebühren umlagefähig sind, bestehen daher Unklarheiten. Die Erlöse eines Rezyklats sind unsicher und der Markt ist noch in Entwicklung, sodass hier keineswegs Erträge gesichert sind. Speziell betrifft dies auch die Fragestellung, ob die entstehenden Kosten für Frühstarter, die bereits vor der gesetzlichen Frist mit der Umsetzung beginnen, umgelegt werden können. Ein durch das Umweltbundesamt 2023 beauftragtes Rechtsgutachten von Turgut Pencereci soll diesbezüglich Aufklärung geben und erscheint voraussichtlich 2025.

Auch im Abfallrecht gibt es noch offene Fragen. Die zentrale Herausforderung beim Ende der Abfalleigenschaft von Phosphor-Rezyklaten besteht darin, den exakten Übergang vom Abfall- in den Produktstatus eindeutig zu definieren. Dieser Übergang erfordert, dass sämtliche technisch-chemischen und gesundheitlichen Kriterien – etwa im Rahmen der EU-Düngemittelverordnung und der EU-REACH-Registrierung – vollständig erfüllt sind. Überschneidungen und Unklarheiten zwischen den allgemeinen abfallrechtlichen Vorschriften und den spezifischen Produktschutzregelungen führen zu Unsicherheiten, die den rechtssicheren Marktzugang recycelter Phosphor-Rezyklate behindern. Hierzu wurde im Rahmen von RePhoR ein Rechtsgutachten beauftragt Kapitel → 5.2.

Schätzungen der DWA zufolge werden die zur gesetzlichen Pflichterfüllung benötigten Rückgewinnungstechnologien nicht 2029 in ausreichender Kapazität vorhanden sein. Daher muss ein noch nicht genau festgelegter Anteil der Klärschlammasche deponiert werden, und zwar so, dass er später wieder abgerufen werden kann – mit Abrufzeiten, die bis 2060 reichen können. Diese Vorgehensweise ist jedoch an zahlreiche offene rechtliche, technische und wirtschaftliche Fragen geknüpft. Klar ist, dass die Deponierung mit erheblichen Kosten verbunden wäre, abhängig von den Anforderungen an die Verwahrung wird mit bis zu 200 EUR/t gerechnet [24].

Wenn das Rezyklat marktfähig sein soll, muss es entsprechende Anforderungen aus dem gültigen Rechtsbereich erfüllen. Ein zentrales Problem dafür ist, dass das EU- und das nationale Recht in vielen Bereichen nicht harmonisiert sind. So unterscheiden sich im Bereich des Düngemittelrechts die EU-Düngeprodukte-Verordnung und die deutsche Düngemittelverordnung. Mehr dazu → Kapitel 5.3.

Zusammenfassend sind die bestehenden Unklarheiten und somit auch Hemmnisse der Umsetzung vielfältig, jedoch nicht unüberwindbar. Die gesetzlichen Ziele sind gesetzt und nun gilt es, diese Rahmenbedingungen in der Praxis auszufüllen. Die kommenden Jahre bis 2029 werden entscheidend sein, um bürokratische und praktische Hürden abzubauen. Gelingen Koordination und Wissenstransfer, kann Deutschland die rechtlichen Vorgaben fristgerecht umsetzen und beim Phosphor-Recycling eine Vorreiterrolle behaupten – scheitert dies, drohen nach Ablauf der Fristen Entsorgungsengpässe oder kostspielige Interimslösungen. Entsprechend groß ist der Druck auf alle Beteiligten, die rechtlichen Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass der Bau und Betrieb von Phosphor-Recycling-Anlagen nicht nur Pflicht ist, sondern auch erfolgreich realisiert wird.

## 5.1 Organisationsmodelle und Zusammenschlüsse verschiedener Betreiber

Die Pflicht zur P-Rückgewinnung ergibt sich aus der am 03.10.2017 in Kraft getretenen Abfallklärschlammverordnung. Sie richtet sich an Klärschlammherzeuger nach § 2 Abs. 11 AbfKV [1] („Betreiber von Abwasserbehandlungsanlagen“). Der Klärschlamm ist entweder direkt oder nach Verbrennung als Klärschlammasche einer P-Rückgewinnung zuzuführen.

Die abfallrechtliche Pflicht der Klärschlammherzeuger zur P-Rückgewinnung bleibt dann bestehen, wenn sie sich – wie es regelmäßig der Fall ist – schon bei der Klärschlammverbrennung Dritten bedienen bzw. sich zu einer gemeinsamen Klärschlammverbrennung mit Dritten zusammengeschlossen haben [41]. Ein solcher Zusammenschluss ist häufig, da für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage ein Klärschlammvolumen von mindestens 30.000 Tonnen Trockenmasse pro Jahr angenommen wird.

Die Auslegung einer Verbrennungsanlage ist sorgfältig zu ermitteln, Überkapazitäten könnten gebührenrechtlich kritisch sein. Auch die Einhaltung der Anforderungen

aus dem Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (vgl. § 18 GWB Marktbeherrschung) ist zu beachten<sup>1</sup>.

Die Pflicht zur P-Rückgewinnung kann – ähnlich wie die Pflicht zur Klärschlammverbrennung – grundsätzlich Dritten übertragen werden. Der Klärschlammherzeuger ist in diesen Fällen zur sorgfältigen Auswahl und Überwachung des/der Dritten bzw. deren Leistungserbringung verpflichtet [41].

Wenn der Klärschlammherzeuger, der sich mit Dritten zur Klärschlammverbrennung zusammengeschlossen hat, die P-Rückgewinnung im Anschluss an die Verbrennung eigenständig organisieren möchte, ist eine entsprechende eindeutige (vertragliche) Regelung zwischen Erzeuger und Verbrenner erforderlich<sup>2</sup>. Eventuell sind (ältere) Vereinbarungen zwischen den Parteien anzupassen. Die Pflicht zur P-Rückgewinnung kann übertragen werden – oder die Pflicht zur Rückgabe der Klärschlammasche kann vereinbart werden. Die Thematik der Vermischung von Aschen ist zu berücksichtigen.

1 Zu dieser Fragestellung ist ein gesondertes Gutachten erstellt worden, das mit dem AMPHORE-Abschlussbericht veröffentlicht wird.

2 Derzeit sind z. B. in der PhosRec GmbH, die als Gesellschaft Projektbeteiligte am Projekt AMPHORE ist, die Wasserverbände als Klärschlammherzeuger Gesellschafter. Diese haben der PhosRec die Aufgabe der Phosphorrückgewinnung übertragen. Die beteiligten Wasserverbände sind jedoch ebenfalls bereits in unterschiedlichen Organisationen mit Dritten zur Klärschlammverbrennung zusammengeschlossen. Die Klärschlammverbrenner haben wie oben ausgeführt ebenfalls die abfallrechtliche Pflicht zur Phosphor-Rückgewinnung. Hier muss die im Text beschriebene Klärung der Zuständigkeit herbeigeführt werden.



Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (Kommunen) sind also entweder als Erzeuger von Klärschlamm, als Betreiber von Anlagen zur kommunalen Klärschlammverbrennung, die ausschließlich Klärschlämme aus eigenen Abwasserbehandlungsanlagen verbrennen, oder als Beteiligte an einer Klärschlammverbrennungsanlage, in der Entsorgungsträger nach einem Zusammenschluss gemeinsam Klärschlämme verbrennen, verpflichtet, Phosphor zurückzugewinnen.

Kläranlagenbetreiber stehen in Bezug auf die P-Rückgewinnung genauso wie bei der Frage der Klärschlamm Entsorgung vor der Entscheidung, wie sie diese Aufgaben organisieren wollen.

Sie haben grundsätzlich folgende vier Möglichkeiten<sup>3</sup>:

### **1. Zusammenschluss oder Zusammenarbeit mit anderen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern zum Bau und Betrieb einer gemeinsamen Phosphor-Recycling-Anlage ohne Beteiligung eines privaten Dritten in öffentlich-rechtlicher oder privater Rechtsform**

Die Organisationsmöglichkeiten, ergeben sich aus den jeweiligen Gemeindeordnungen bzw. den länderspezifischen Gesetzen über kommunale Gemeinschaftsarbeit. Eine häufig gewählte öffentlich-rechtliche Rechtsform der interkommunalen Zusammenarbeit ist die Gründung eines Zweckverbandes.

- » Der Zusammenschluss von Kommunen in einem Zweckverband ist als Organisationsentscheidung vergaberechtsfrei möglich. Für Gründung und Ausgestaltung sind Vorgaben aus dem Kommunalrecht zu beachten. So können beispielsweise in NRW nur Gebietskörperschaften Mitglied eines Zweckverbandes sein. Die am AMPHORE Projekt beteiligten Klärschlammherzeuger sind Wasserverbände aus NRW, als solche keine Gebietskörperschaften und nach dem einschlägigen Gesetz über kommunale Gemeinschaftsarbeit nicht berechtigt, einen Zweckverband zu bilden<sup>4</sup>.
- » Ebenfalls nur für Kommunen, nicht für die sondergesetzlichen Wasserverbände in NRW, kommt die Gründung einer interkommunalen Anstalt öffentlichen Rechts in Betracht.

» Privatrechtlich sind Zusammenschlüsse ggf. ausschreibungsfrei möglich, zu beachten sind insbes. die Voraussetzungen der § 108 Abs. 4 GWB und § 108 Abs. 6 GWB [30]. Pflichtige können die gemeinsame Pflichtenübernahme entweder in einem Vertrag bzw. in einer Kooperationsvereinbarung regeln oder sich in einer privatrechtlichen Gesellschaft zusammenschließen. In der Praxis bekannt ist insbesondere die GmbH, die auch als gemeinnützige GmbH errichtet werden kann, da der gemeinnützige Zweck nach § 52 Abs. 2 Nr. 8 AO (Förderung des Naturschutzes und der Landschaftspflege i. S. d. BNatSchG u. d. Naturschutzgesetze der Länder, des Umweltschutzes, einschließlich des Klimaschutzes, ...) durch das Vorhaben der Rückgewinnung von Phosphor verwirklicht werden kann. Ebenfalls käme im grenzüberschreitenden Bereich die Bildung einer EWIV (europäische Wirtschafts- und Interessenvereinigung) in Betracht. Hier ist die rechtliche Ausgestaltung den Parteien überlassen.

### **2. Zusammenschluss oder Zusammenarbeit mit Dritten zum Bau und Betrieb einer gemeinsamen Phosphor-Recycling-Anlage mit Beteiligung eines privaten Dritten, sog. öffentlich-private Partnerschaft**

Da es derzeit (noch) keine lizenzfreien technischen Verfahren zur P-Rückgewinnung gibt, können Entsorgungspflichtige den Bau und Betrieb einer Anlage durch Dritte (Patent- oder Lizenzinhaber) in Betracht ziehen oder diese als Gesellschafter in eine gemeinsame Gesellschaft einbeziehen.

In beiden Fällen handelt es sich grundsätzlich um ausschreibungspflichtige Tatbestände.

### **3. Beauftragung eines (privaten) Dritten mit der P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche**

Hierbei handelt es sich grundsätzlich um einen ausschreibungspflichtigen Vorgang. Da hier nicht der Abruf von Dienstleistungen im Vordergrund steht, wird davon ausgegangen, dass abweichend von § 21 VgV Ausschreibungen für Zeiträume größer vier Jahren zulässig sind.

3 Instruktive Darstellungen zu Möglichkeiten und Empfehlungen

- Die Umsetzung der Anforderungen der Klärschlammverordnung zur Phosphorrückgewinnung in Nordrhein- Westfalen, Schlussbericht, Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein- Westfalen, November 2020,
- Klärschlamm Entsorgung und Phosphorrückgewinnung im Land Brandenburg, Hrsg.: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg, 2023
- Mitgliederinformation des Verbands kommunaler Unternehmen (VKU) Rechtliche Rahmenbedingungen der künftigen Klärschlammverwertung für die Aufgabenträger der kommunalen Abwasserbeseitigung, Rechtsanwalt Dr. Martin Düwel Fachanwalt für Verwaltungsrecht, Berlin 2017

4 § 4 Abs. 1 des Gesetzes über kommunale Gemeinschaftsarbeit nennt nur Gemeinden und Gemeindeverbände, die sich zu Zweckverbänden zusammenschließen können.

#### 4. Selbstständiger Bau und Betrieb einer Anlage zur P-Rückgewinnung ausschließlich für „eigene“ Klärschlammasche

Denkbar wäre, eine Anlage zur P-Rückgewinnung eigenständig zu betreiben, beispielsweise im Rahmen eines Regie- oder Eigenbetriebes.

##### Fazit

Die Wahl der Organisationsform setzt voraus, dass technische Verfahren zur P-Rückgewinnung lizenz- oder patentfrei zur Verfügung stehen oder die Beteiligung von Technologieinhabern möglich ist.

Die für Auswahl und Gründung einer Organisationsform nebst Bau und Betrieb einer Anlage (inkl. Vergabe, Ge-

nehmigung) benötigte Zeit wird auf mehrere Jahre geschätzt. Verschiedene Patentinhaber der technischen P-Rückgewinnungsverfahren haben derzeit unterschiedliche Vorstellungen, wie ihre Beteiligung zu gestalten ist, bzw. unter welchen Voraussetzungen sie bereit sind, Lizenzen zu erteilen.

Vermutet wird, dass bei einer Ausschreibung im Jahre 2025 eine Inbetriebnahme 2030/31 erfolgen könnte. Damit würden zum 01.01.2029 P-Rückgewinnungskapazitäten fehlen. Die Zwischenlagerung von Klärschlammaschen wäre denkbar. Diesbezügliche praktische (Deponiekapazität) und rechtliche Fragestellungen (z.B. Vermischung der Aschen) werden noch diskutiert. Eine Beschleunigung der spezifischen Genehmigungsverfahren wäre wünschenswert.

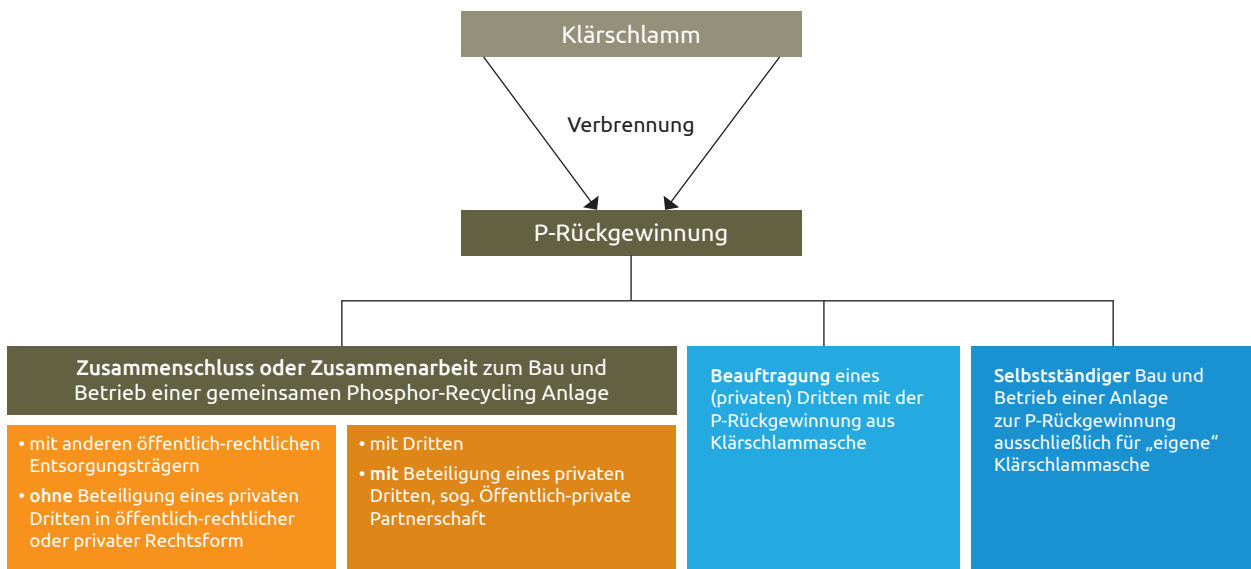


Abbildung 44: Möglichkeiten von Organisationsmodellen und Betreiber-Zusammenschlüssen bzw. Zusammenarbeit.

## 5.2 Abfallrecht

Ein zentrales Problem besteht darin, einen rechtlich einheitlichen Rahmen zu schaffen, der den Übergang von der Abfalleigenschaft zur Produkteigenschaft von Phosphor-Rezyklaten regelt. Damit soll gewährleistet werden, dass recycelter Phosphor erst dann als marktfähiges Produkt gilt, wenn er alle relevanten technischen und gesundheitlichen Anforderungen erfüllt. Zunächst muss dabei genau definiert werden, wann ein Stoff, der im Zuge der Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen gewonnen wurde, nicht länger als Abfall gilt, sondern in den Produktstatus übergeht. Dieser Übergang ist entscheidend, weil er festlegt, ab wann das Material rechtlich als marktfähiges Produkt – beispielsweise als Dünger – eingesetzt werden darf, ohne weiterhin den

strengen Auflagen des Abfallrechts zu unterliegen. Aufgrund der zahlreichen technischen, regulatorischen und anwendungsbezogenen Faktoren, die teilweise nicht vereinheitlicht sind, ist diese genaue Festlegung oftmals nicht klar. Diese Unklarheiten wiederum behindern einerseits den Marktzugang für recycelte Phosphorprodukte und führen andererseits zu Unsicherheiten bei Investitions- und Betriebskonzepten – was letztlich die flächendeckende Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft verzögert.

Um diese Situation weiter zu beleuchten, wurde innerhalb von RePhoR ein Rechtsgutachten durch das Vernetzungsvorhaben TransPhoR beauftragt und von der Kanz-

lei Kopp-Assenmacher Rechtsanwälte bearbeitet. Ziel war es, die bestehenden europäischen und nationalen Rechtsvorschriften systematisch zu analysieren, Lücken und Überschneidungen zwischen Abfall-, Stoff- und Produktschutzrecht zu identifizieren und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Die Analyse stützt sich auf eine umfassende Auswertung relevanter Rechtsgrundlagen:

- » Europäisch: EU-Abfallrahmenrichtlinie, EU-Düngemittelverordnung (EU-DüngProdV) sowie strategische Vorgaben im Rahmen des EU Green Deal und des EU Clean Industrial Deal.
- » National: Das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) sowie weiterführende nationale Strategien.

Anhand dieser Rechtsgrundlagen wurde geprüft, unter welchen Voraussetzungen Phosphor-Rezyklate – insbesondere für den Einsatz als Dünger in der Landwirtschaft – ihre Abfalleigenschaft verlieren. Hierzu wurden spezifische Kriterien wie Schadstoffgrenzwerte, technische Anforderungen, Registrierungspflichten (z.B. nach EU-REACH) und Kennzeichnungsvorschriften herangezogen. Für industrielle Anwendungen wurden zusätzlich die noch offenen Regelungsfelder untersucht.

Im Rahmen der Analyse wurde deutlich, dass insbesondere im landwirtschaftlichen Anwendungsbereich bereits ein relativ klar definierter rechtlicher Rahmen existiert, der den Übergang von der Abfalleigenschaft zum Produktstatus regelt. So können Phosphor-Rezyklate als marktfähige Düngemittel gelten, sobald sie sämtliche Anforderungen der EU-Düngemittelverordnung erfüllen – darunter strikte Schadstoffgrenzwerte, festgelegte technische Standards und eine verbindliche EU-Konformitätserklärung. Diese Kriterien gewährleisten, dass der rückgewonnene Phosphor in seiner Qualität und Reinheit zumindest vergleichbar mit konventionellen Primärrohstoffen ist und somit bedenkenlos in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann. Insbesondere die Registrierungspflichten gemäß EU-REACH spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie sicherstellen, dass alle eingesetzten Stoffe hinsichtlich ihrer chemischen Stabilität und Unbedenklichkeit geprüft und dokumentiert werden.

## 5.3 Düngemittelrecht

Die derzeitige Rechtslage im Düngemittelbereich ist geprägt von einer Doppelstruktur aus EU- und deutschem Recht. Hersteller und Inverkehrbringer haben dabei die Wahl, welcher Rechtsrahmen für ihr Produkt zur Anwen-

Für den industriellen Einsatz hingegen zeigt sich ein deutlich komplexeres Bild. Hier bestehen noch erhebliche Unsicherheiten, da der rechtliche Rahmen – im Gegensatz zum Düngemittelbereich – weniger konkret ausgestaltet ist. Die vorhandenen europäischen und nationalen Vorschriften greifen hier nur teilweise, sodass einzelne technische Details, wie die exakte chemische Zusammensetzung und die spezifischen Anforderungen an die Verarbeitungsprodukte, nicht abschließend geklärt sind. Dies führt zu einer Situation, in der einzelne Phosphor-Rezyklate erst durch Einzelfallprüfungen den Übergang in den Produktstatus erlangen können. Aufgrund dieser Unklarheiten werden weiterer Forschungsbedarf sowie eine Anpassung der gesetzlichen Regelungen gesehen. Es bedarf einer konsistenten und einheitlichen Auslegung, die sowohl den Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet als auch den Marktzugang für recycelte Phosphorprodukte erleichtert.

Aus den Ergebnissen leiten sich auch konkrete Empfehlungen ab: Zum einen sollte die bestehende EU-DüngProdV als Best-Practice-Beispiel für die rechtliche Transformation von Abfällen in marktfähige Produkte weiterentwickelt und gegebenenfalls auf andere Anwendungsfelder übertragen werden. Zum anderen ist es wichtig, in enger Abstimmung zwischen Wissenschaft, Politik und Praxis zusätzliche gesetzgeberische Maßnahmen zu erarbeiten, die insbesondere den industriellen Sektor stärker berücksichtigen. Eine einheitliche, fachübergreifende Regelung könnte dabei helfen, die verschiedenen technischen und rechtlichen Anforderungen transparent zu machen und die damit verbundenen Unsicherheiten für Betreiber zu reduzieren. Letztlich ist das Ziel, durch eine klare rechtliche Definition des Übergangs vom Abfall- in den Produktstatus den Kreislauf von Phosphor nachhaltig zu schließen und somit einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Sicherstellung der Nahrungsmittelproduktion zu leisten.

Das komplette Gutachten steht auf der RePhoR-Seite zum [Download](#) zur Verfügung.



zung kommt – sie können sich also bewusst entscheiden, ob sie den Vorgaben der EU-Düngemittelverordnung oder den nationalen Anforderungen der deutschen DüMV folgen möchten. Diese Wahlmöglichkeit bietet

eine gewisse Flexibilität, da je nach Zielmarkt und Produktzusammensetzung unterschiedliche Anforderungen und Prüfverfahren in den Fokus rücken. Unternehmen können somit den Weg wählen, der für sie – unter Berücksichtigung von Kosten, administrativem Aufwand und Produktspezifika – am besten geeignet ist, solange sie die jeweils geltenden Mindeststandards in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Umweltverträglichkeit einhalten.

### Politik und gesetzlicher Rahmen auf EU-Ebene

Mit der Düngeprodukteverordnung (EU) 2019/1009 [42], die seit 16. Juli 2022 in Kraft ist, ist es gelungen, die Vermarktung von Düngeprodukten, die zurück gewonnene Nährstoffe enthalten, zu vereinfachen. Die Verordnung ist das erste Gesetz, das den Begriff „Abfallende“ europaweit regelt – Produkte, die der Düngeprodukteverordnung entsprechen, sind europaweit als Produkte anzuerkennen und unterliegen nicht mehr dem Abfallregime. Fünf Dokumente (Haupttext und vier Annexe) definieren die Anforderungen, unter denen anorganische und organische Dünger, Bodenverbesserungsmittel und Biostimulatoren aus fossilen und erneuerbaren Rohstoffen mit dem CE-Zeichen versehen und damit EU-weit auf den Markt gebracht werden können. Die Hauptanforderungen sind die Übereinstimmung mit den Produktfunktionskategorien (PFC) und den Komponentenmaterialkategorien (CMC). Während die PFC die Eigenschaften vorgibt, die ein Produkt beispielsweise in Bezug auf den Nährstoff- und Schadstoffgehalt oder die Löslichkeit aufweisen muss, regeln die CMC zulässige Ausgangsstoffe und deren Behandlung. Für die Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm relevant sind insbesondere die CMCs 12–14:

- » CMC 12: Betrifft gefällte Phosphatsalze, etwa Struvit, mit einem Mindestgehalt von 16 %  $P_2O_5$ .
- » CMC 13: Regelt Materialien, die durch thermische Oxidation (Verbrennung) gewonnen werden, beispielsweise Aschen, die unter definierten Bedingungen hergestellt werden müssen.
- » CMC 14: Umfasst Produkte, die durch Pyrolyse oder Vergasung aus organischen Ausgangsstoffen (jedoch nicht aus Klärschlamm) erzeugt werden.

Seit 16. Juli 2022 können CE-gekennzeichnete Düngeprodukte wie organische Düngemittel, organisch-anorganische und mineralische Düngemittel, Kultursubstrate oder Biostimulanzien in der gesamten EU vermarktet werden, sofern sie die Anforderungen der neuen Gesetzgebung erfüllen. Das Konformitätsbewertungsverfahren ist von den Herstellern zu befolgen, unabhängig davon, ob sie in einem EU-Land oder in einem Drittland ansässig sind, wenn ihre Produkte in der EU auf dem Markt gebracht werden. Die Verordnung sieht vier mögliche Ver-

fahren zur Bewertung der Konformität eines EU-Düngemittels vor. Für drei von ihnen ist die Beteiligung einer benannten Zertifizierungsstelle erforderlich.

Der Düngemittel-Zertifizierungsprozess, um Recyclingprodukte mit dem CE-Zeichen europaweit in den Markt bringen zu dürfen besteht aus den Schritten:

- » REACH-Registrierung: Einige Stoffe, wie Struvit und Ammoniumsulfatlösung, sind bereits registriert.
- » Bestätigung der „Gleichheit“: Für Recyclingprodukte ist eine erneute Registrierung nicht erforderlich, wenn nachgewiesen wird, dass sie in ihrer Zusammensetzung chemisch gleich mit bereits registrierten Produkten sind.
- » Konformitätsbewertung (Modul D1): Diese wird von einer benannten Zertifizierungsstelle durchgeführt, wobei hier in Einzelfällen praktische Herausforderungen, insbesondere bei den kleineren Mengen an einzelnen Kläranlagen, auftreten können.
- » Konformitätserklärung: Nach erfolgreichem Audit dürfen die Produkte unter dem CE-Zeichen in den Markt eingebracht werden.

Bei bisherigen REACH-Registrierungen konnten Recyclingprodukte vorhandene Registrierungen der chemischen Stoffe nutzen. Die Nutzung einer bereits nach REACH registrierten Substanz (z. B. Struvit) ist grundsätzlich kostengünstiger als eine neue Registrierung, weil die Kosten in der Regel geteilt werden. Die Kosten hängen jedoch von der Größe des Unternehmens und dem Volumen des Stoffes ab, das jährlich hergestellt oder importiert wird. Für kleine Unternehmen (KMU) und Kleinstunternehmen sind die Gebühren geringer als für Großunternehmen.

Der Gesamtaufwand für die Konformitätsbewertung kann bei geringen Produktionsmengen im Verhältnis zum erwartbaren Mehrertrag hoch oder auch zu hoch sein. Für weitere Details zur rechtssicheren Inverkehrbringung von Struvit Düngern siehe auch Douhaire et al. (2024) [16].

Eine starke Motivation für die Erlangung des CE-Zeichens für ein nach EU Düngeprodukteverordnung zugelassenes Produkt ist die Zulassung einzelner Recyclingdünger für die biologische Landwirtschaft. Zurzeit trifft das auf Struvit aus Schlammwasser zu. Die EGTOP Expertengruppe hat Empfehlungen auch für Rhenania Phosphat (als „calcined phosphate“) und recycelte Calciumphosphate ausgesprochen, doch sind beide Produkte noch nicht in die Positivliste der DG Agri (Änderungsverordnung 2023/121 vom 17. Januar 2023 zur Änderung von 1165/2021) aufgenommen worden [20].

## Politik und gesetzlicher Rahmen in Deutschland

Das Inverkehrbringen von Düngemittel ist in Deutschland im Düngegesetz geregelt. Die Vorgaben für Düngemittel sind in der Düngemittelverordnung (DüMV) geregelt. Die aktuelle, derzeit gültige Verordnung wurde am 05.12.2012 erlassen und gliedert sich in elf Paragraphen sowie zwei Anhänge. Dabei wird zunächst der allgemeine Rahmen abgesteckt:

- » Definitionen und Geltungsbereich: Begriffe werden klar definiert und es wird festgelegt, für welche Produkte – von klassischen Düngemitteln über Bodenhilfsstoffe bis hin zu Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln – die Regelungen gelten.
- » Anforderungen und Zulassungen: Neben den allgemeinen Anforderungen werden Mindestgehalte an Nährstoffen, spezifische Zusammensetzungen sowie physikalische Eigenschaften (wie die Löslichkeit) detailliert beschrieben.
- » Toleranzen und Verwaltungsstrafen: Es gibt Vorgaben zu erlaubten Abweichungen sowie Regelungen zu Ordnungswidrigkeiten.

Im ersten Anhang werden die einzelnen Düngemitteltypen unterschieden. Hier finden sich Vorgaben zu:

- » Mindestnährstoffgehalten und Zusammensetzung
- » Vorgaben zu den Nährstoffformen (z. B. lösliche versus gebundene Anteile)
- » Herstellungsverfahren und zugelassene Ausgangsstoffe.

Dies ist insbesondere relevant, wenn recycelte Phosphorprodukte (Phosphor-Rezyklate) in Düngemitteln eingesetzt werden sollen. Der Hersteller muss zunächst prüfen, ob sein Produkt einem bereits definierten Typ entspricht oder ob – etwa durch Beimischung anderer Komponenten – eine Einordnung möglich ist. Ein Beispiel hierfür ist das recycelte Struvit, das je nach Zusammensetzung entweder als mineralischer NP-Dünger oder als ein mineralischer Ein-Nährstoff-Phosphatdünger eingeordnet werden kann.

Der zweite Anhang ergänzt Anhang 1 um konkrete Grenzwerte für unerwünschte Stoffe sowie weitere Details zur Deklaration und zum Herstellungsprozess. Hier werden auch spezifische Anforderungen an die physikalischen Eigenschaften, wie etwa die Partikelgröße und Wasserlöslichkeit, definiert. Diese Werte dienen vor allem dem Arbeitsschutz und der Sicherstellung einer hohen Pflanzennährstoffverfügbarkeit.

Besonders bei Phosphor-Rezyklaten aus Prozessen wie der Phosphatfällung oder der Verbrennung (z. B. aus Klärschlamm) müssen diese Grenzwerte genau eingehalten werden, um sicherzustellen, dass keine bedenklichen Stoffe, wie Schwermetalle, in das Endprodukt gelangen.

Für recycelte Phosphorprodukte ergeben sich mehrere Herausforderungen:

- » Einordnung und Typisierung: Da die DüMV feste Typenlisten enthält, müssen Hersteller prüfen, ob ihr Produkt bereits in eine bestehende Kategorie passt oder ob sie einen Antrag auf Aufnahme eines neuen Typs stellen müssen. Ein Beispiel hierfür sind Karbonisate, die bislang noch nicht in die Typenliste aufgenommen wurden.
- » Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen: Die gesetzlichen Vorgaben verlangen neben Mindestnährstoffgehalten auch die Einhaltung bestimmter physikalischer Eigenschaften. So erfüllt beispielsweise Struvit in der Regel nicht die standardmäßig geforderte Wasserlöslichkeit von 2,5 %  $P_2O_5$  – obwohl Studien die gute Pflanzenverfügbarkeit dieses Stoffes belegen. Daher greifen hier oft Ausnahmeregelungen, die von den einzelnen Bundesländern im Rahmen des länderspezifischen Vollzugs angewendet werden.
- » Verfahren und administrative Lasten: Der gesamte Zulassungsprozess umfasst mehrere Schritte – von der Prüfung der Eignung des Produkts bis hin zur detaillierten Konformitätsbewertung. Dabei sind die Anforderungen an den Hersteller häufig mit erheblichen Kosten und administrativem Aufwand verbunden. Insbesondere bei geringeren Mengen aus einzelnen Kläranlagen können die Prüfverfahren (z. B. bei der Messung der Partikelgrößenverteilung oder der Bestimmung von unerwünschten Stoffen) zu einer überproportionalen Belastung führen.

## 5.4 Genehmigungsrecht

### Standortauswahl

Die Standortauswahl ist abhängig von der Verfahrensart, mit der Phosphor zurückgewonnen werden soll. Bei einer Verfahrensart mit hohem Wasserverbrauch kann eine Kläranlage als Standort gut geeignet sein. Für nasschemische Verfahren kann der Standort in einem Chemie-Park, in dem erforderliche Säuren (z. B. Salzsäure oder Schwefelsäure, etc.) hergestellt werden oder vorhanden sind, geeignet sein, da Säuretransporte vermieden werden. Ideal ist auch, wenn die Produkte im Chemie-Park benötigt werden. Auch die Einbindung in einen Energieverbund an einem industriell geprägten Standort kann ein Entscheidungskriterium sein, um resilienter gegen Versorgungsengpässe oder schwankende Primärenergiepreise aufgestellt zu sein. Der jeweilige Platzbedarf für die Anlage inklusive erforderlicher Zwischenlagerkapazitäten, vorhandene Infrastruktur, Erreichbarkeit und die Medienz- und -abgänge (z. B. Energie, Wärme), sollten berücksichtigt werden.

Sollte ein Neubau einer Anlage ohne Anbindung an einen vorhandenen Standort in Betracht kommen, sind die jeweiligen planungsrechtlichen Voraussetzungen und die Transportwege sorgfältig zu prüfen. Restriktionen bei Durchfahrten (Wasserschutzgebiete, ähnlich einschränkende Gebietsausweisungen) sind zu beachten.

### Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen

Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm-aschen sind genehmigungsbedürftige Anlagen nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [5].

Sie bedürfen einer Genehmigung nach § 4 BImSchG i. V. m. der Vierten Verordnung zur Durchführung des BImSchG (4. BImSchV).

Die Einordnung der Anlage nach der Liste der 4. BImSchV erfolgt dabei nach dem Schwerpunkt des Anlagenzwecks.

Eine derartige Anlage kann als „Anlage zur Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen“ nach Nr. 8 der 4. BImSchV und hier der Nr. 8.8. als „Anlage zur chemischen Behandlung, insbesondere zur chemischen Emulsionsspaltung; Fällung, Flockung, Kalzinierung, Neutralisation oder Oxidation“ eingestuft werden<sup>5</sup>.

Ist das Verfahrensziel z. B. die P-Rückgewinnung zur Herstellung von Mineraldünger, kann eine Einordnung in die Gruppe 4.1.17. „Anlagen zur Herstellung von Stoffen oder Stoffgruppen durch chemische, biochemische oder biologische Umwandlung in industriellem Umfang zur Herstellung von phosphor-, stickstoff oder kaliumhaltigen Düngemitteln“ erfolgen<sup>6</sup>.



Abbildung 45: Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen.

5 So auch die Einordnung der Phosphorrückgewinnungsanlage der Hamburger Phosphorrecyclinggesellschaft, durch die Genehmigungsbehörde Hansestadt Hamburg, Genehmigungsbescheid vom 05.03.2021, Seite 3

6 So die Einordnung im UVP Bericht der Seraplant GmbH vorgelegt im Rahmen des Antrags auf Genehmigung und Betrieb einer Phosphor-Rückgewinnungsanlage zur Herstellung von Granulat unter Verwendung von Klärschlamm-aschen als Einsatzstoff, S. 4

Da Klärschlammaschen von kommunalen Betreibern zum Teil aktuell als „gefährlicher Abfall“ (in AVV 19 01 13\* [2] (Abfälle aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen, Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält) eingestuft sind, ist eine großtechnische Anlage mit einem Durchsatz von 10 t oder mehr am Tag in einem Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG mit Öffentlichkeitsbeteiligung zu genehmigen und die Vorgaben aus der Industrie-Emissionsrichtlinie (IE – Richtlinie [43]) wären zu beachten. Die Anlage wäre hier unter Nr. 5.1. im Anhang I der IE- Richtlinie einzuordnen. Ist die IE anwendbar und sollte die Gefahr bestehen, dass der gefährliche Stoff Boden oder Grundwasser verschmutzen könnte, muss der Antragsteller zusätzlich einen Bericht über den Ausgangszustand vorlegen.

Der Antrag auf Genehmigung ist schriftlich oder elektronisch zu stellen. Es sind alle erforderlichen Unterlagen, so unter anderem die Bauvorlagedokumentation, das Eignungsfeststellungsgutachten für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, ein Fließschema für die behördliche Genehmigung, Verfahrensbeschreibung und andere Engineering-Dokumente (Maschinenaufstellungen, Sicherheitsgutachten nach Störfallverordnung) etc. zur Prüfung beizufügen. Die Behörde kann eine Ergänzung innerhalb einer angemessenen Frist verlangen, sofern sie die Unterlagen nicht für hinreichend aussagekräftig erachtet. Für das Vorhaben ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen.

## 6 Planung und Bewertung der regionalen Phosphor-Rückgewinnung

Ökobilanzen sind geeignet, die Umweltwirkungen eines Produktes (hier: Sekundärdünger/Phosphorsäure) über den gesamten Lebenszyklus systematisch zu erfassen. Die entsprechende Norm (ISO 14040/14044) schreibt dafür vor, dass der Untersuchungsrahmen z. B. bezüglich der Funktion des Produktsystems, der Systemgrenzen oder auch der betrachteten Wirkungskategorien (z. B. Treibhauspotenzial, Eutrophierung, Versauerung, Öko-/Humantoxizität etc.), aber auch hinsichtlich getroffener Annahmen und Einschränkungen genau definiert wird. Entsprechend schreibt die Norm bei vergleichenden Ökobilanzen vor, dass die Annahmen und die inhaltliche Zielstellung jeder Studie einander entsprechen (ISO 14040). Vor diesem Hintergrund stellt es einen Unterschied dar, ob verfahrensspezifische Ökobilanzen mit konkreten standortspezifischen Rahmenbedingungen, oder vergleichende Ökobilanzen mit aufeinander angepassten Vorgaben erstellt werden.

In Kapitel 6.1 werden die erforderlichen Annahmen beschrieben, die eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Ökobilanzen gewährleisten. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die Vorgaben zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit teilweise Annahmen erfordern, die von den standortspezifischen Rahmenbedingungen abweichen können. Insofern wird die verfahrensspezifische Aussagekraft geschmälert, gleichzeitig werden aber auch generelle Vergleichskriterien aufgezeigt, die einen wichtigen Bestandteil in der Bewertung der Verfahren eröffnen.

### 6.1 Ökobilanzierung der Rückgewinnungsverfahren

Für einen Vergleich der potenziellen Umweltauswirkungen der unterschiedlichen technologischen Ansätze der Teilprojekte von RePhoR (vgl. Kapitel 2) eignet sich das Instrument der Ökobilanz nach ISO 14040/14044. Diese ist geeignet, Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten aufzuzeigen und damit Entscheidungsträgern wichtige Informationen in der strategischen Planung bereitzustellen. Grundsätzlich können Ökobilanzstudien auch zum Zwecke des Produktvergleiches erstellt werden, wobei die ISO 14040 in diesem Fall besondere Vorgaben formuliert. So schreibt diese für vergleichende Studien die Festlegung von Anforderungen vor, die gewährleisten, dass getroffene Annahmen gleichermaßen in zu vergleichenden Ökobilanzen zur Anwendung kommen (ISO 14040).

Ein Entscheidungsprozess kann diese Erkenntnisse im Anschluss an die Berücksichtigung verfahrensspezifischer Rahmenbedingungen, die eine Technik möglicherweise bereits im Voraus ausschließen, aufgreifen und zu einer weiteren Eingrenzung potenziell geeigneter Verfahren beitragen. Für eine weitere Bewertung der Eignung einer speziellen P-Rückgewinnungstechnologie kann dann auf die spezifischen Informationen auch in Form von Ökobilanzen zurückgegriffen werden.

In Kapitel 6.2 wird die weiterreichende Entscheidungsunterstützung behandelt, denn zur Verfahrensauswahl für einen konkreten Standort/Anwendungsfall ist eine Betrachtung der Verfahrensalternativen im jeweiligen regionalen Gesamtsystem (Kläranlage, Region, Netzwerk) erforderlich. Hierzu wird an dieser Stelle die modellgestützte Szenarienanalyse vorgestellt, in der ein auf den jeweiligen Anwendungsfall (Szenario) zugeschnittener Verfahrenvergleich unter Berücksichtigung der vorliegenden standort- und verfahrensspezifischen Bedingungen erfolgt. Die Szenarienanalyse liefert spezifische, standortbezogene Ergebnisse für die Unterstützung konkreter Investitionsentscheidungen (und später Bewirtschaftung) und kann somit im Anschluss an eine auf den Ergebnissen der vergleichenden Ökobilanzierung erfolgte Vorauswahl von Verfahrensalternativen ansetzen.

Im Rahmen der Fördermaßnahme RePhoR bestand die Schwierigkeit der Festlegung von Annahmen insbesondere in der hohen Variabilität der Verfahrensansätze sowie in der Variabilität der zur Behandlung anstehenden Klärschlämme. Insofern galt es, einerseits durch klare Vorgaben eine Vergleichsbasis zu finden, die für alle Teilprojekte anwendbar war, ohne andererseits Verfahrensspezifika durch fixierte Vorgaben nicht ausreichend zu berücksichtigen.

Aufgrund der Bedeutung der Vorgaben zur Erstellung einer Ökobilanz wurde in enger Abstimmung mit allen Verbundprojekten, in denen ein Phosphor-Rückgewinnungsverfahren erprobt wird, ein Katalog entwickelt, der eine Vergleichbarkeit der darauf basierenden Ökobilan-



zen sicherstellen wird, gleichermaßen aber auch Raum für die technikspezifischen Besonderheiten der Verbundprojekte eröffnet. Ein Grundprinzip für die Vergleichbarkeit stellt der Austausch von projektspezifischen Annahmen über einen für alle Verbundprojekte zugängigen RePhoR-Server dar. Alle in der Ökobilanz getroffenen Annahmen eines Verbundprojekts sind auf diesem Server nachvollziehbar zu dokumentieren. Sollten keine Einwände anderer Verbundprojekte gegen die Annahmen erhoben werden, gilt die getroffene Annahme als von allen Verbundprojekten akzeptiert. Sollte ein Einwand von einem anderen Verbundprojekt vorgebracht werden, soll die getroffene Annahme von allen Verbundprojekten diskutiert und einvernehmlich überarbeitet werden. Sollte keine einvernehmliche Lösung in einem angemessenen Zeitraum gefunden werden, kann das Verbundprojekt weiterhin die ursprüngliche Annahme verwenden, muss jedoch die Einwände dokumentieren.

Als Auswertungsmethode für die Wirkungsabschätzung wurde die Methode Recipe [17] unter Verwendung der ecoinvent-Datenbank ausgewählt. Die Verwendung aktuellerer Daten, wie beispielsweise Daten des IPCC zur Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“, erfordert das zuvor beschriebene abgestimmte Vorgehen über den RePhoR-Server. Bezüglich der Datenqualität wird angenommen, dass die Verfahren im Wesentlichen auf primäre Daten hoher Qualität zurückgreifen können und diesbezügliche Vergleichbarkeit gegeben ist.

Die so erstellten Ökobilanzen werden einen wichtigen Beitrag zur Auswahl eines geeigneten Verfahrensansatzes leisten. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Ökobilanzen ergänzend jeweils vor dem Hintergrund der vielfältigen regionalen Rahmenbedingungen zu bewerten sind und insofern kein alleiniges Beurteilungsinstrument für die konkrete Verfahrensentscheidung darstellen können.

Die grundlegende Größe bei einer Ökobilanz stellt die funktionelle Einheit dar, die dazu dient, einen Bezug für alle Input- und Outputflüsse zu schaffen. Obwohl im Rahmen des Projektes RePhoR die Rückgewinnung von Sekundärphosphor aus Klärschlamm/-asche im Fokus steht, wurde als funktionelle Einheit die gesetzeskonforme Entsorgung des Klärschlammes einer Kläranlage mit einer Kapazität von 1 Mio. Einwohnerwerten (EW) mit einer festgelegten Klärschlamm- resp. Klärschlammasschequalität (Referenz) gewählt.

Der Sekundärphosphor stellt mit der Festlegung der funktionellen Einheit auf eine Klärschlammmenge lediglich ein Nebenprodukt dar und wird im Rahmen der Ökobilanz mit einer Gutschrift versehen (s.u.), die der Umweltwirkung der eingesparten primären Phosphormenge entspricht.

Eine Herausforderung stellt die eventuell erforderliche Skalierung dar, sofern die zu bilanzierende Anlage nicht der Kapazität von 1 Mio. Einwohnerwerten entspricht. In diesem Fall sind wissenschaftlich begründet alle relevanten In- und Outputströme auf eine entsprechende Kläranlagengröße von 1 Mio. EW zu skalieren und die verbundprojektspezifischen Verbräuche (Hilfsstoffe) pro Maßeinheit Klärschlamm bzw. -asche auf den Referenzklärschlamm resp. die Referenzklärschlammassche umzurechnen. Eine entsprechende Skalierung des verbundprojektspezifischen Energieverbrauchs erscheint dagegen nicht zielführend bei den i. d. R. in den Verbundprojekten im Pilotmaßstab betriebenen Anlagen. Der voraussichtliche Energieverbrauch des verbundprojektspezifischen Verfahrens in einer Referenzanlage soll daher von den jeweiligen Anlagenbauern geschätzt werden. Es ist grundsätzlich anzustreben, diese und weitere verwendete Daten auf Plausibilität zu prüfen und den anderen Verbundprojekten über den RePhoR-Server zugänglich zu machen. Ggf. können Spannweiten angegeben werden, um die Preisgabe sensibler Verfahrensdaten zu vermeiden. Einwände der anderen Verbundprojekte sind zu berücksichtigen, um eine einvernehmliche Datengrundlage über alle Verbundprojekte zu fixieren.

Die unterschiedlichen Verfahrensansätze setzen sich aus verschiedenen Prozessschritten oder auch Prozessmodulen zusammen. Die Ersteller einer Ökobilanz müssen vorab die Prozessmodule festlegen, die in das jeweilige System einzubeziehen sind und somit die Systemgrenze fixieren.

Die vereinfachte Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Klärschlammes [Annahme: Vermeidung der Ausbringung des Klärschlammes auf landwirtschaftlichen Flächen] setzt sich aus Behandlungsschritten auf der Kläranlage, einer Verbrennungseinheit, einer optionalen Aschebehandlung sowie der Deponierung inklusive aller eingeschlossenen Transporte zusammen. Der Klärschlamm stellt bei diesem Ansatz den Stoff dar, der dem untersuchten System von außen als „Elementarfluss“ zugeführt wird und somit den Anfang des Systems markiert, während auf der anderen Seite die Deponierung den letzten Prozess des Systems darstellt. Innerhalb des Systems besteht ein Unterscheidungskriterium insbesondere darin, ob der Klärschlamm bereits auf der Kläranlage den nach der Klärschlammverordnung fixierten Grenzwert von unter 20 g Phosphor je Kilogramm Trockenmasse einhält und somit einer größeren Bandbreite von Verbrennungsoptionen zugeführt werden kann. Ist dieses nicht gegeben, muss der Klärschlamm einer Mono-Klärschlammverbrennungsanlage zugeführt und im Anschluss der Phosphor aus der Asche entsprechend den gesetzlichen Vorgaben einer Rezyklierung zugeführt werden.

Die Systemgrenzen in den Verbundprojekten umfassen alle Prozessschritte, die unmittelbar mit dem Recyclingprozess zusammenhängen sowie direkt vor- bzw. nachgelagerte Prozesse, wie z.B. die Verbrennung des Klärschlammes oder die Deponierung der Asche.

Wie zuvor erwähnt wird der gewonnene Sekundärphosphor über eine Gutschrift entsprechend der Aufwendungen für primären Phosphor berücksichtigt. Eine Gutschrift weiterer Inhaltsstoffe im Sekundärphosphor ist nicht vorgesehen. Es steht den Verbundprojekten frei, den Vorteil weiterer düngerelevanter Elemente in verbundprojektspezifischen Ökobilanzen, die nicht zum Vergleich gedacht sind, auszuweisen.

Dieser Ansatz erfordert die Festlegung eines vergleichbaren Qualitätsniveaus. Zur Sicherstellung dieser Annahme werden projektbegleitend Pflanzenversuche durchgeführt, die zum Ziel haben, die Pflanzenverfügbarkeit als ein Qualitätsmerkmal der unterschiedlichen Sekundärprodukte zu ermitteln. Auf dieser Basis des real pflanzenverfügbaren Anteils wird die entsprechende eingesparte Menge an Primärphosphor gutgeschrieben.

Neben der Pflanzenverfügbarkeit stellt auch die Qualität des Sekundärproduktes, beispielsweise hinsichtlich der Schwermetallgehalte, einen bewertungsrelevanten Aspekt dar. Eine bessere Qualität im Sinne geringerer Schwermetallgehalte würde zu einer verbesserten Ökobilanz insbesondere in den Wirkungskategorien „Humantoxizität“ und „Ökotoxizität“ führen, durch die der Aspekt der Ausbringung des Sekundärdüngers in der Landwirtschaft bewertet werden kann. Es ist jedoch zu bedenken, dass der Schwermetallgehalt wesentlich durch die Qualität des Klärschlammes bestimmt wird. Diese Variabilität soll über die Vorgabe der theoretischen Behandlung eines Referenzklärschlammes und eine entsprechende Skalierung der projektspezifischen Verfahrenstechnik auf diesen Parameter ausgeglichen werden. Diese Annahme unterstellt einerseits die Möglichkeit der funktionalen Skalierung (mit entsprechenden Unsicherheiten) und andererseits, dass die jeweilige Verfahrenstechnik geeignet ist, jede Klärschlammqualität durch Umstellung der Prozessführung derart zu behandeln, dass ein der Düngeverordnung entsprechendes Düngeprodukt gewonnen werden kann. Schadstoffe, die nicht von der Verordnung abgedeckt sind, werden wie zuvor erwähnt ebenfalls über die Wirkungskategorien „Humantoxizität“ und „Ökotoxizität“ bewertet. Eine darüber hinaus gehende Behandlung zur weiteren Abreicherung von Schwermetallen über die gesetzlich vorgeschriebenen Werte hinaus wird im Rahmen der vergleichenden Ökobilanzen nicht betrachtet. Den Verbundprojekten steht es frei, die verfahrensspezifischen Möglichkeiten weiterer qualitätsverbessernder Maßnahmen zu dokumentieren und den jeweiligen zu-

sätzlichen Aufwand in einer gesonderten Ökobilanz zu beziffern.

Eine Sonderrolle nehmen an dieser Stelle die Verbundprojekte ein, die als Output Phosphorsäure gewinnen. Dieses Produkt ist in dieser Form nicht unmittelbar mit Primärphosphor vergleichbar, so dass der Ansatz über eine entsprechende Gutschrift nicht greift. Für einen Vergleich mit weiteren Sekundärdüngern müsste die Phosphorsäure beispielsweise zu Diammoniumphosphat (DAP) weiterverarbeitet werden, was im Rahmen der Verbundprojekte nicht vorgesehen ist. Um dennoch diese Vergleichsbasis zu schaffen, wird angenommen, dass die Phosphorsäure mit einer Gutschrift für DAP versehen werden kann, da der theoretische Aufwand der Weiterverarbeitung von Phosphorsäure zu DAP durch die Gutschrift gleichermaßen wieder ausgeglichen würde. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Phosphorsäure über eine Gutschrift für primäre Phosphorsäure zu verrechnen. Es existieren folglich mehrere denkbare Ansätze zur Bewertung der Phosphorsäure, die jeweils verbundprojektübergreifend unter Verwendung des RePhoR-Servers einer Abstimmung bedürfen. Die betroffenen Verbundprojekte können an dieser Stelle weitere Verwertungsoptionen für die Phosphorsäure über die Produktion von Dünger hinaus dokumentieren, die ggf. einen marktrelevanten Vorteil darstellen können. Eine ökobilanziell veränderte Gutschrift für den Einsatz der Phosphorsäure im technischen Bereich kann als Zusatzoption ausgewiesen werden.

Das Prinzip der Gutschrift gilt gleichermaßen für alle materiellen und energetischen Ströme, die die Systemgrenze der betrachteten Verfahrenstechniken verlassen und einer späteren Verwertung zugeführt werden können. Dies können neben dem im Fokus des Projektes stehenden Sekundärphosphors beispielsweise auch Fällmittel oder Ammoniakwasser sein, die entsprechend des Aufwandes zur Produktion des gleichen Primärproduktes mit einer Gutschrift versehen würden. Diese Gutschriften sind gesondert auszuweisen, können jedoch in einem zusätzlichen Bewertungsschritt mit den Aufwendungen der Phosphor-Rückgewinnung zu einem Nettowert verrechnet und dargestellt werden.

Es ist davon auszugehen, dass diese Gutschriften einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanzen haben werden. Insofern gilt auch für den Ansatz der Gutschriften das Prinzip des projektübergreifenden Austausches über den RePhoR-Server. An dieser Stelle sei explizit der Prozessschritt der Klärschlammverbrennung genannt, der über Gutschriften zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltleistung insbesondere bezüglich der Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“ bei entsprechender Nutzung der Abwärme beitragen kann.

In den Verbundprojekten wird der Aspekt der Klärschlammverbrennung sehr unterschiedlich betrachtet. Bei einer Phosphor-Rückgewinnung auf der Kläranlage unter Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben steht es dem Kläranlagenbetreiber beispielsweise offen, den Klärschlamm einer Verwertung z.B. in einem Zementwerk zuzuführen. Dort ersetzt der Klärschlamm ggf. Braunkohle, was zu einem hohen Einsparpotenzial führen würde, da die zugrunde liegende Bewertungsgröße für das Treibhauspotenzial der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Braunkohle wäre. Würde der Klärschlamm einer Klärschlammverbrennungsanlage zugeführt, entspräche eine potenzielle Gutschrift der gewonnenen (Annahme: und genutzten) Abwärme. Die daraus resultierende Gutschrift orientiert sich im Wesentlichen an der Annahme, welche Wärmeproduktion durch die Abwärmenutzung aus der Klärschlammverbrennung ersetzt wird. Um einen vergleichbaren Ansatz der Verbrennung über alle Verbundprojekte zu gewährleisten, sind, neben der zuvor erwähnten Abstimmung über den RePhoR-Server, die Effekte aus Gutschriften gesondert darzustellen und soweit möglich nicht mit den Umweltwirkungen der erforderlichen Prozessschritte (Umweltbelastungen) zu verrechnen. Im Falle der verfahreninternen Nutzung der Abwärme oder einer Erweiterung der Systemgrenzen kann von dieser Vorgabe abgewichen werden, wobei der jeweilige Ansatz der Abwärmenutzung zu dokumentieren ist. Den Verbundprojekten steht es frei, den ggf. strategischen Vorteil der freien Verwertung des Klärschlammes bei Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben auf der Kläranlage herauszustellen, da dieser Aspekt bei einem späteren Auswahlprozess unter Berücksichtigung spezifischer regionaler Rahmenbedingungen entscheidend sein kann.

Durch die Gutschrift für den Sekundärphosphor wird auch der Effekt der Recyclingquote abgebildet, da mit einer höheren Recyclingquote die Masse und damit die Gutschrift für Sekundärphosphor steigt. Gleichmaßen steigt aber auch der materielle und energetische Aufwand, der für den Recyclingprozess betrieben werden muss. Im Idealfall würde der Mehraufwand durch die gesteigerte Gutschrift ausgeglichen bzw. überkompensiert werden, so dass sich eine höhere Recyclingquote positiv auf das Ergebnis der Ökobilanzierung auswirkt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass der Mehraufwand durch eine erhöhte Recyclingquote zu einer Verschlechterung einiger Wirkungskategorien der Ökobilanz beispielsweise hinsichtlich der Wirkungskategorie „Treibhauspo-

tenzial“ führen wird. In diesem Fall stünde der positive Effekt einer hohen Recyclingquote (entsprechend der politischen Zielsetzung der „Circular Economy“), abgebildet durch die Wirkungskategorie „Ressourcenverbrauch“, einer höheren Treibhausgasbelastung (trotz der politischen Zielsetzung der Reduzierung von Treibhausgasemissionen), abgebildet durch die Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“, entgegen. Ein abschließender Vergleich beider Wirkungskategorien ist ohne subjektive Werteorientierung nicht möglich. Insofern ist an dieser Stelle der Entscheidungsträger resp. die Politik gefragt, ggf. gegenläufige Umweltaspekte, dargestellt durch verschiedene Wirkungskategorien, zu priorisieren, um zu einer abschließenden Bewertung und Auswahl der optimalen Verfahrensvariante zu gelangen.

Das zuvor beschriebene Verfahren zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der verbundprojektspezifischen Ökobilanzen erfordert den Ansatz von Referenzen, die i. d. R. von den realen Bedingungen an den Standorten abweichen. Insofern stellt das Ergebnis der Vergleichsstudie lediglich einen Baustein in dem komplexen Prozess der Entscheidungsfindung bezüglich der Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm/-asche dar. Weitere Entscheidungsparameter werden durch die konkreten standortspezifischen Rahmenbedingungen beeinflusst, die im Rahmen der Vergleichsstudie ggf. nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Hier kann die günstige Erreichbarkeit von weiteren Behandlungsanlagen (z.B. Verbrennungsanlagen), die Verfügbarkeit von Abwärme und weiterer Hilfs- und Betriebsstoffe in Industrieparks etc. zu einer wesentlichen Verbesserung der Umweltleistung eines Recyclingkonzeptes beitragen. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass die Ökobilanz zwar ein wichtiges Entscheidungsinstrument darstellen kann, jedoch stets im Zusammenhang mit den konkreten standortspezifischen Rahmenbedingungen gesehen und bewertet werden muss. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Besonderheiten der verbundprojektspezifischen Verfahren, die ggf. bereits in der Vergleichsstudie angedeutet, jedoch nicht ökobilanziell berücksichtigt wurden, in den Entscheidungsprozess einzubeziehen (vgl. Kapitel 5.3).

## 6.2 Szenarienanalyse der regionalen Phosphor-Rückgewinnung

In Kapitel 6.1 wurde beschrieben, wie die ökobilanzielle Bewertung der einzelnen Verfahren durchgeführt wird. Da es sich hierbei um eine vergleichende Ökobilanzierung mit aufeinander angepassten Vorgaben handelt, wird nachfolgend das Vorgehen für eine auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittene Verfahrensauswahl, Bewertung unterschiedlicher Verfahrensalternativen oder Konzepten für ein Nährstoffrecycling in einen Gesamtkontext vorgestellt. Dabei sollte sowohl die „Inputseite“ (**Klärschlamm**: Optimierte KS-Bewirtschaftung im Verbund, → Kapitel 3.3) als auch die „Outputseite“ (**Nährstoffe**: Regionale Nährstoffbedarfsplanung und -rückführung in die Region → Kapitel 4.6) unter Berücksichtigung lokaler Rahmenbedingungen in die Bewertung einbezogen werden.

Die Klärschlammqualität wie P-Gehalt, Heizwert, Schwermetallgehalt etc. beeinflusst u. a. direkt den Aufwand für eine P-Rückgewinnung sowie die erzielbare Rückgewinnungsquote. Somit können sich Anpassungen bei der Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung in den vorgelagerten Prozessen (Abwasserreinigung, Schlammbehandlung auf der KA) positiv auf die Gesamtbewertung auswirken. Verfahrensalternativen müssen daher in Abhängigkeit der vorangehenden oder nachfolgenden Stufen bewertet werden. Auch die Verfahrensauswahl einzelner Behandlungstufen sollte generell aufgrund der vielfältigen Verflechtungen und Abhängigkeiten der Prozesse (z. B. des gesamten Schlammpfades bis hinein in die „Schlammproduktion“) nicht mehr ohne Berücksichtigung

der gesamten Verfahrenskette erfolgen. Bereits einzelne Verfahrensschritte wie die Entwässerung oder Stabilisierungsgrad können wesentliche Auswirkungen auf die Stoff- und Energiebilanz einer ganzen Prozesskette haben. Bei einer Ökobilanzierung (→ Kapitel 6.1) bleiben standort- bzw. anwendungsfallsspezifische Rahmenbedingungen weitgehend unberücksichtigt, die aber einen wesentlichen Einfluss auf die Verfahrensbewertung und letztlich die Auswahl durch die entscheidenden Personen haben. Auch für die Identifikation von Synergien oder angepassten Betriebseinstellungen ist es wichtig, die Situation vor Ort mit einzubeziehen.

Neben der Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung stehen Kläranlagenbetreiber zudem vor einer Reihe weiterer Herausforderungen, die aktuell eine Neubewertung der bestehenden Konzepte und Prozesse erfordern (z. B. bestmögliche Energieeffizienz und Minimierung des CO<sub>2</sub>-Footprints durch Novellierung der Europäischen Kommunalabwasser-Richtlinie 91/271/EWG, Energieeffizienzgesetz), aber auch die Spurenstoffelimination und die Forderung nach Water-Reuse bestimmen strategische Überlegungen. Entscheidungs- und Auswahlprozesse sind zudem nicht mehr allein auf das Kriterium der Wirtschaftlichkeit beschränkt. Umweltauswirkungen werden mit einbezogen ebenso wie Resilienz und betrieblicher Aufwand. Und das alles mit einem weiten Blick in zukünftige (regionale) Entwicklungen – der Planungs- und Umsetzungshorizont für Infrastrukturmaßnahmen liegt in der Regel bei 30 bis 40 Jahren.

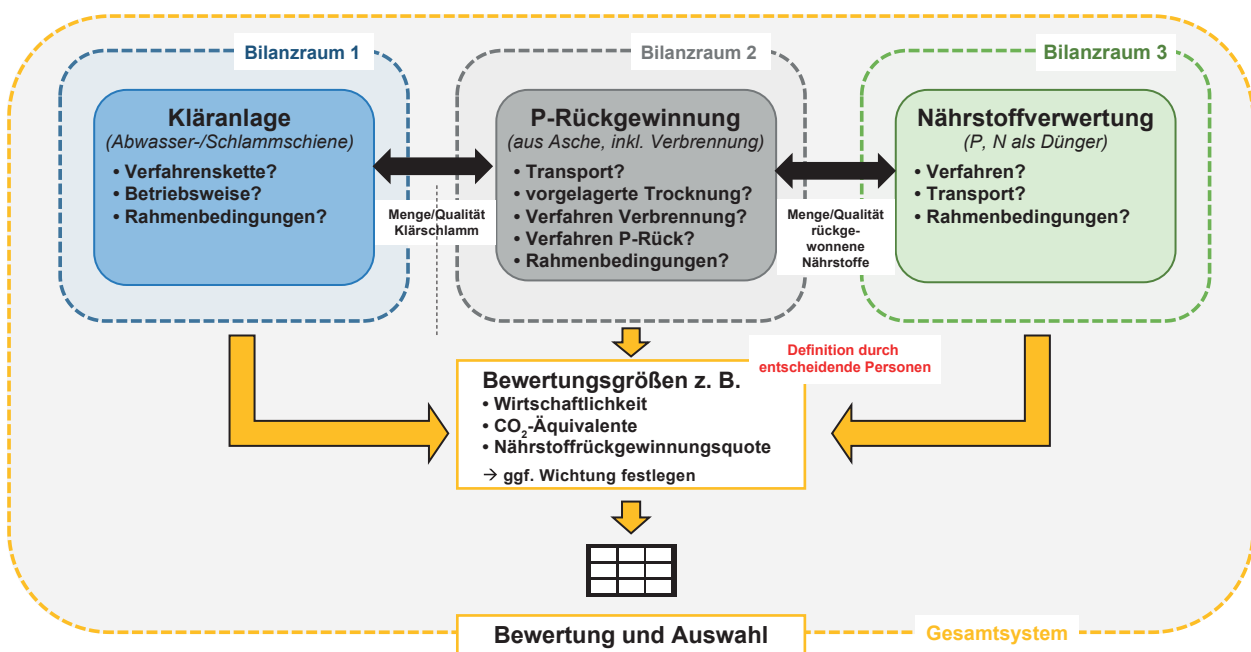


Abbildung 46: Bewertung im Gesamtsystem. © SATELLITE

Die Herausforderung besteht darin, Konzepte, Prozesse und Investitionen vor dem Hintergrund mehrerer unterschiedlicher Zielsetzungen unter Berücksichtigung komplexer werdender Rahmenbedingungen als Gesamtsystem zu bewerten, geeignete Optionen auszuwählen und möglichst strategisch zu planen. Eine systematische Herangehensweise ist für eine transparente Verfahrensauswahl entscheidend. Erforderlich sind dazu Methoden und Werkzeuge, die Anlagenbetreibende, Kommunen, Betriebe (in Entscheidungsposition) bei den anstehenden Konzept- bzw. Investitionsentscheidungen im Sinne einer soliden Aufstellung für die Zukunft unterstützen [3].

Im Rahmen der RePhoR-Maßnahme wurden hierzu:

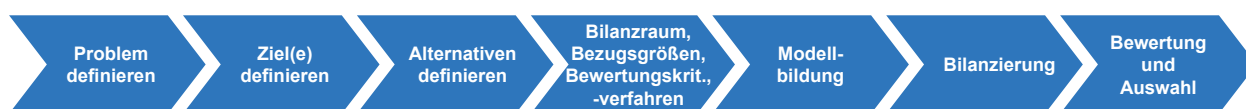
- » spezifische Rahmenbedingungen für einzelne Verfahren erarbeitet und zusammengestellt.
- » regionale Modelle zur Planung und Bewirtschaftung erarbeitet und umgesetzt (AMPHORE, SATELLITE).
- » konkrete Analysen und Verfahrensbewertungen für Einzelanlagen durchgeführt (SATELLITE: Hildesheim, Göttingen, KlimaPhoNds: Clausthal-Zellerfeld).

## 6.2.1 Vorgehen zur Ermittlung von strategischen Bewertungsgrößen für das Gesamtsystem

Im Ergebnis gilt es aufzuzeigen, welche Verfahrensoptionen unter welchen Bedingungen welche Vor- und Nachteile bieten und sich damit für unterschiedliche Rahmenbedingungen eignen. Dazu sollte ein auf den jeweiligen Anwendungsfall (Szenario) zugeschnittener Verfahrenvergleich unter Berücksichtigung der vorliegenden standort- und verfahrensspezifischen Bedingungen erfolgen. Eine gute Möglichkeit hierfür bietet ein modellgestützter Ansatz, der in verschiedenen Projekten der RePhoR-Maßnahme auch genutzt wurde.

Im Projekt SATELLITE, in dem ein besonderer Fokus auf genau dieser Fragestellung der Bewertung und Verfahrensauswahl im Gesamtsystem liegt, wurde z.B. eine modellgestützte Bewertungsmethodik gewählt, mit der verschiedene Konzepte mittels Szenarienanalyse gegenübergestellt und bewertet werden können. Basis für die Bewertung ist die Durchführung einer modellgestützten Bilanzierung unterschiedlicher ausgewählter Verfahrensalternativen, mit deren Hilfe für die Bewertung relevante Informationen (z.B. Stoff- und Energieströme, Kosten, CO<sub>2</sub>-Äquivalente usw.) ermittelt werden. Diese werden dann für die Ableitung von strategischen Bewertungs-

größen zur Verfahrensauswahl für das gewählte Gesamtsystem genutzt. Vom ISAH wurde eine solche Methodik im Rahmen der Verfahrensbewertung und -auswahl für die exportorientierte Wasserwirtschaft (Expoval [49]/Expoplan [48]) für die Verfahrenskette Abwasserreinigung erprobt und ausformuliert sowie im Kontext des Re-Use-Gedankens für Industrieparks (BMFTR-Projekte WaReIP [4], OptiKERN [44]) für Komponenten der Wasseraufbereitung und Brauchwasserkaskaden genutzt. Die Anwendungsmöglichkeiten sind somit vielfältig und durch den modularen Ansatz auch sehr flexibel. Die Nutzung einer solchen modellgestützten Bilanzierung und Bewertung (Szenarienanalyse) ermöglicht außerdem eine schnelle Anpassung an geänderte Rahmenbedingungen, neue Technologien und Verfahrensalternativen. Sie ist auch im Betrieb nutzbar durch direkte Kopplung mit vorhandener Mess- und Datenbankinfrastruktur bzw. live-Datenaustausch. Die hier genannte Methodik wurde ebenfalls von der DWA aufgegriffen und wird explizit für Verfahren der Schlammbehandlung innerhalb der DWA-Arbeitsgruppe KEK 7.7 genutzt für die Etablierung einer ressourcenorientierten Verfahrensauswahl [19].



**Abbildung 47: Grundsätzliche Schritte modellgestützte Bewertung/ressourcenorientierte Verfahrensauswahl (Quelle: Breitenkamp/DWA KEK 7.7).**

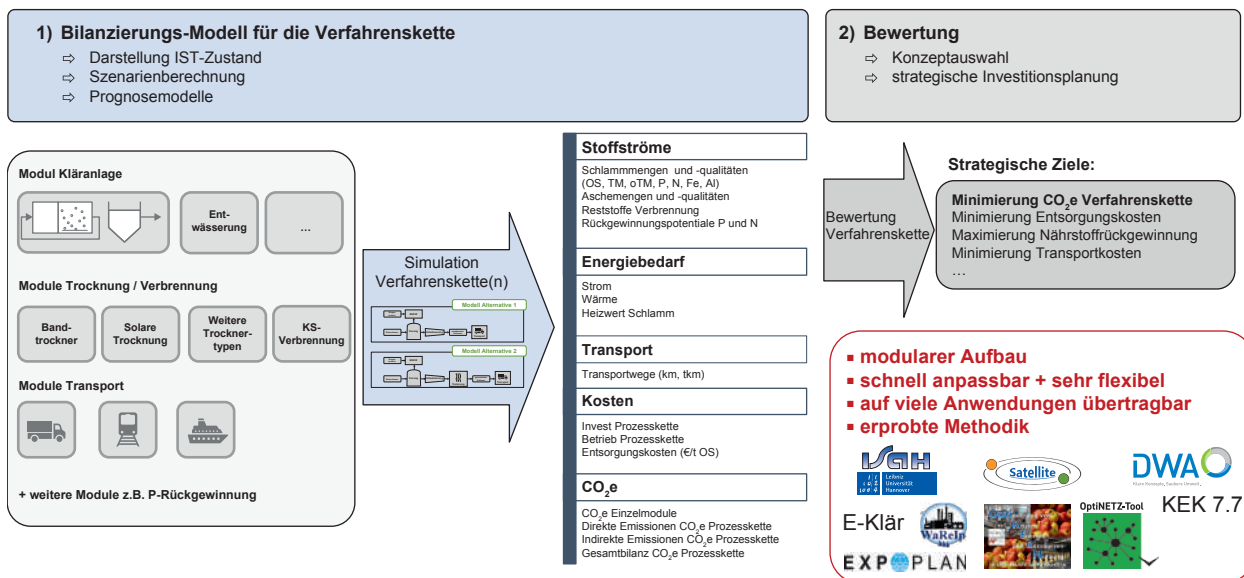


Abbildung 48: Darstellung modellgestützte Szenarienanalyse. © SATELLITE

Die Vergleichbarkeit von Verfahrensalternativen hängt insbesondere von der Wahl des Bilanzraums und den gesetzten Annahmen wie z.B. der Anrechnung von Gutschriften bei der CO<sub>2</sub>e-Bilanzierung ab. Es ist unbedingt darauf zu achten, dass Bilanzgrenzen und Annahmen so getroffen werden, dass keine der ausgewählten Verfahrensalternativen bei bestimmten Bewertungskriterien bereits einen systemimmanenten Vor- oder Nachteil erhält. Durch die modellgestützte Abbildung und Bewertung in einem Gesamtsystem mit quasi „normierten“ Rahmenbedingungen erreicht man eine gute Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Verfahrensalternativen auch bei Unsicherheiten aufgrund von z.B. erforderlichen Annahmen. Eine Betrachtung von Sensitivitäten in Anbetracht der Volatilität von Rahmendaten und -bedingungen (z.B. Energiepreise, Ansätze für CO<sub>2</sub>e-Transferfaktoren usw.) sollte unbedingt erfolgen und ist mit einem solchen Ansatz auch gut umsetzbar. Durch die Nutzung eines definierten systematischen Vorgehens bei Bewertung und Verfahrensauswahl wird nicht nur ein hoher Grad an Transparenz und Objektivität, sondern auch eine Qualitätssicherung der erzielten Ergebnisse erreicht.

Entscheidend ist die Definition und Ermittlung von strategischen Bewertungsgrößen für die Verfahrensbewertung und -auswahl. Die Definition muss durch die entscheidenden Personen erfolgen, Bilanzraum und Bilanzierungsgrößen müssen dann entsprechend gewählt werden. Aus Bilanzierungsergebnissen können dann die strategischen Bewertungsgrößen bzw. -kennzahlen abgeleitet werden (s. Abbildung 48). Für die Phosphor-Rückgewinnung als strategische Bewertungsgrößen sind neben der Wirtschaftlichkeit insbesondere relevant:

Die Menge und Art des im Klärschlamm fixierten Phosphors, sowie die Möglichkeiten einer vorgeschalteten P-Ausschleusung als kristallines MAP und die damit einhergehende direkte Rückgewinnung bzw. Rückführung.

- » Die Klärschlammbehandlung auf der Kläranlage und damit einhergehend die Beeinflussung der Energiebilanz der Kläranlage selbst und der Monoklärschlammverbrennungsanlage durch Veränderung des Heizwerts des Schlammes.
- » Der Einfluss der Logistik auf die CO<sub>2</sub>e-Bilanz im Hinblick auf Standortauswahl von Verbrennungs- und Rückgewinnungsanlagen ist besonders interessant (Transportwege für Inputströme wie Klärschlamm, Klärschlammmasche und Outputströme sowie z.B. für Einsatzstoffe wie Säuren usw. oder zur Weiterverarbeitung/Rückführung von Nährstoffen).

Da hier mehrere Bewertungsgrößen relevant sind, kann noch eine Wichtung der unterschiedlichen Bewertungsgrößen erfolgen. Diese Wichtung ist wiederum durch die entscheidenden Personen festzulegen. Aus den (gewichteten) Bewertungsgrößen und -kennzahlen kann im Anschluss z.B. eine Bewertungsmatrix abgeleitet werden, über die ein Ranking der betrachteten Alternativen erfolgt. Insbesondere unter Berücksichtigung der Eingangsdatenqualität und vorhandener Rückkopplungen der Bewertungsschritte untereinander sollten die erzielten Ergebnisse abschließend noch einmal kritisch geprüft werden. Gegebenenfalls ist beispielsweise eine Anpassung der Fragestellung, der Bewertungsziele, des Bilanzraums o.ä. erforderlich. Auf Basis der erzielten Bewertungsergebnisse kann dann eine Verfahrensauswahl getroffen werden.

## 6.2.2 Werkzeuge und Modelle zur Szenarienanalyse aus der RePhoR-Maßnahme

Im Rahmen der RePhoR-Maßnahme wurden verschiedene Werkzeuge und Modelle entwickelt, die für eine Szenarienanalyse mit modellgestützter Verfahrens-/Konzeptbewertung der wesentlichen Fragen genutzt werden können. Alle Werkzeuge und Modelle können später auch für eine Bewirtschaftung eingesetzt werden.

Wesentliche Punkte sind:

- 1) Beschreibung und Charakterisierung der **Verfahren**. Dazu gehören z. B. Verfahrensmodule sowie eine Open-Source-Modulbibliothek
- 2) Bilanzierung und Bewertung im **Gesamtsystem** für die verschiedenen Systeme Einzelanlage, Region/Unterverbund und Netzwerk insgesamt mit Fokus auf a) Standortfragen oder b) Auswahl der Verfahrenskette. Hierzu gehören z. B. einzelne Kläranlagenmodelle, regionale Energie- und Stoffstrommodelle sowie das OptiNETZ-Tool.
- 3) Betrachtung der **Abnehmerseite**: Insbesondere im Fokus hier die Landwirtschaft mit einer modellgestützten, regionalen Bedarfsplanung.

### Verfahren: Modulbeschreibung, Module und Modulbibliothek

Zur Erstellung von Massen-, Energie-, CO<sub>2</sub>e- und Kostenbilanzen wurde am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover ein modularer Ansatz entwickelt. Dieser erlaubt die Abbildung beliebiger Prozessketten der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung.

Zur Beschreibung der Umsatz-, Transformations- und Aufteilungsprozesse einzelner Verfahrensstufen werden beispielsweise labortechnisch ermittelte Umsatzraten, Wirkungsgrade aus der Literatur oder einfache biologische/physikalische Prozessgleichungen verwendet. Zusammen mit einer allgemeinen Verfahrensbeschreibung bilden diese Informationen eine Modulbeschreibung. Zur Berechnung der Massenbilanzen einer Verfahrensstufe werden diese Informationen in ein Verfahrensmodule eingebettet und Umsatz-, Transformations- und Aufteilungsprozesse anhand spezifischer Auslegungsgrößen der betrachteten Stufe (z. B. Beckengrößen, Betriebstemperaturen) ermittelt. Diese Parameter können üblicherweise aus den vorhandenen Bauwerks- und Betriebsdaten abgeleitet werden. Im Rahmen von Variantenstudien können auch Erweiterungen der bestehenden Anlagentechnik mithilfe eines Bemessungsalgorithmus für den spezifischen Anwendungsfall ausgelegt werden.

Aufbauend auf den Massenbilanzen der Verfahrensstufe werden anschließend der elektrische und thermische Energiebedarf, die direkt (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, fossiles CO<sub>2</sub>) und indirekt freigesetzten CO<sub>2</sub>e-Emissionen sowie die Betriebskosten (Energiekosten, Personalkosten, Betriebsmittelkosten...) und, im Falle einer Variantenstudie, auch eventuelle Investitionskosten berechnet.

Eine Sammlung aller Module wird im Rahmen von SATELLITE als Modulbibliothek veröffentlicht.

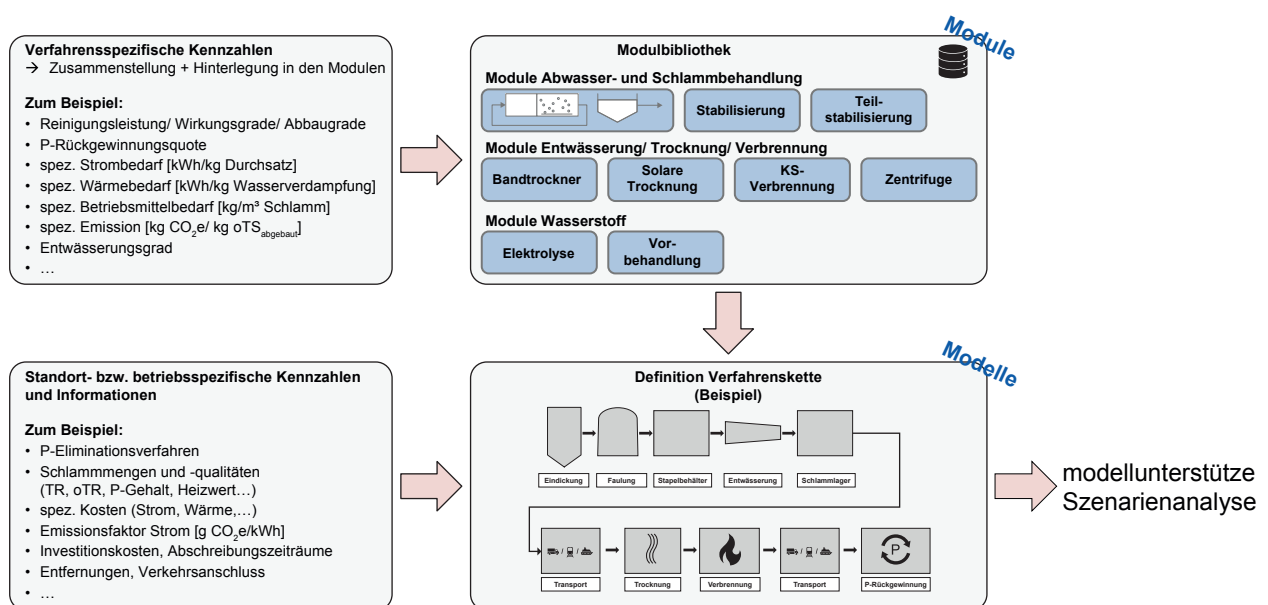


Abbildung 49: Modulbibliothek für modellgestützte Szenarienanalyse. © SATELLITE

## **Gesamtsystem Einzelanlage: Energie- und Stoffstrommodelle**

Die zuvor beschriebenen Modulbeschreibungen und daraus erstellten Verfahrensmodule können zur Abbildung lokaler Prozessketten oder dem Gesamtsystem Kläranlage miteinander verschaltet werden. Damit werden die Änderungen in Behandlungsprozessen, die durch den Anwender vorgenommen werden und in veränderten Bilanzen der einzelnen Verfahrensstufe resultieren, direkt an die vor- und nachgelagerten Stufen weitergegeben. Somit können Massen-, Energie- und Treibhausgasbilanzen über die gesamte Verfahrenskette und an die lokalen Spezifikationen angepasst erstellt werden. Dadurch ist eine Ermittlung von transparenten Bewertungskennzahlen über die gesamte Verfahrenskette möglich.

Diese Modelle, bestehend aus den diversen miteinander verschalteten Modulen, können durch Anwender/Nutzer selbst (bspw. in Excel) oder durch Nutzung einer Stand-Alone-MATLAB-App (frei zugänglich ohne Lizenz) erstellt werden.

## **Gesamtsystem: Regionale Energie- und Stoffstrommodelle**

Im Projekt SATELLITE wurde außerdem ein regionales Energie- und Stoffstrommodell bzw. eine Methodik zur Erstellung solcher Bilanzen, zur Ermittlung von Energiepotenzialen und der Planung von Anlagenentscheidungen für einen Teilverbund (Modellregion Nienburg) entwickelt. Die dabei zu beantwortenden Fragestellungen umfassen maßgeblich die Entscheidungsunterstützung bei gemeinsamen Investitionsentscheidungen.

Dafür werden die relevanten/beteiligten Kläranlagen des betrachteten Einzugsgebiets/Unterverbunds mit ihren Bilanzgrößen implementiert. Maßgeblich handelt es sich dabei um Informationen zu Feststoff- und Organikgehalt, Heizwert und Nährstoffmengen (Phosphor und Stickstoff). Darüber hinaus werden regional verfügbare Stoff- und Abwärmeströme aus Gewerbe und Industrie eingebunden, um die Nutzung als Co-Substrat zur Biogasproduktion (Bsp. Faulung) oder zur Trocknung von Klärschlämmen betrachten zu können.

Zur Ergebniserzeugung einer regionalen Bilanzmodellierung müssen mögliche Standorte durch den Unterverbund vorgegeben werden. Dabei spielen standortspezifische Einflussfaktoren, wie die vorhandene Infrastruktur, ein Betriebskonzept oder die Verfügbarkeit von weiteren Behandlungsanlagen für Teilströme eine zentrale Rolle. Sollten weitere Behandlungsanlagen in der Nähe vorhanden sein, so können diese über die zuvor beschriebene Methodik der „modularen Energie- und Stoffstrommodellierung“ verknüpft werden.

Im Projekt AMPHORE wurde ein Stoffstrommodell für den Verbund erstellt, das z. B. zur Analyse, Bewertung und Auswahl von Vorzugsszenarien genutzt wurde, die in der Umsetzungsphase vertieft untersucht wurden. Außerdem wurde darauf aufbauend ein Klärschlamm- und Klärschlammaschen-Management erarbeitet, das zum Ziel hat, eine ganzheitliche Strategie zur Umsetzung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) für den Projektverbund zu ermöglichen.

## **Gesamtsystem: OptiNETZ-Tool**

Das OptiNETZ-Tool wurde als Werkzeug zur Unterstützung der smarten Planung und Bewirtschaftung von Klärschlammnetzwerken u. a. im Hinblick auf Investitionsentscheidungen, optimierte Trocknungs- und Entwässerungskonzepte, Nährstoffrückgewinnungspotenziale (P, N) und Logistik im Rahmen des RePhoR-Projektes SATELLITE durch das Ingenieurbüro Dr. Breitenkamp in Kooperation mit dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover (ISAH) und dem Fraunhofer IML entwickelt. Es folgt der in Kapitel 6.1 beschriebenen Methodik. Es wird in zwei Teilen umgesetzt: a) als OptiNETZ-Tool#plan für eine optimierte Planung und Konzeptauswahl im Verbund und b) als OptiNETZ-Tool#live für eine optimierte Bewirtschaftung im Betrieb.

Die hier eingesetzten Module sind in der Open-Source-Modulbibliothek integriert. Das Vorgehen zur Entwicklung und Implementierung des Tools wird im Abschlussbericht detailliert beschrieben und veröffentlicht. Das Tool selbst steht nicht frei oder zum Verkauf zur Verfügung, da stets eine Anpassung auf den jeweiligen Anwendungsfall bzw. Verbund erforderlich ist. Es werden aber verschiedene Anwendungsbeispiele (Modellregion Nienburg, KNRN) im Abschlussbericht detailliert dargestellt und veröffentlicht.

## **Abnehmer (Landwirtschaft): modellgestützte, regionale Nährstoffbedarfsplanung**

Im Rahmen des Projektes SATELLITE wurde ein regionales Planungsmodell für den Nährstoffbedarf am Beispiel der Modellregion Nienburg entwickelt (→ Kapitel 4.6).



## 6.3 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsfrage beim Phosphor-Recycling ist ein zentrales, jedoch stark von Unsicherheiten geprägtes Thema. Zahlreiche Akteure beschäftigen sich mit der Frage, welche Investitions- und Betriebskosten sowie Erlöse realistisch anzusetzen sind – dabei existieren bislang kaum belastbare Zahlen.

Auch aktuell unterliegen die Preise der Klärschlamm-entsorgung starken regionalen Schwankungen, was vor allem auf die unterschiedlichen Entsorgungswege

zurückzuführen ist. Erschwert werden Prognosen und Abschätzungen durch die Tatsache, dass beispielsweise der Zeitpunkt des Ausfalls von Mitverbrennungsanlagen oder das Inbetriebnehmen von Monoverbrennungsanlagen erheblichen Einfluss haben können. Unverbindliche Kostenschätzungen für 2029, die vor allem auf der thermischen Vorbehandlung des Klärschlammes sowie auf der anschließenden Phosphor-Rückgewinnung aus der entstehenden Asche basieren, [29] ergaben:

**Tabelle 17: Kostenabschätzung für 2029 für die thermische Vorbehandlung und P-Rückgewinnung je Mg Klärschlamm Originalsubstanz (Kostenschätzung der Autoren für maschinell entwässerten Klärschlamm ab Kläranlage) [29].**

	Preiskomponenten für die thermische Vorbehandlung in einer Monoverbrennungsanlage und P-Rückgewinnung aus der Asche (€/Mg OS Klärschlamm)
Erwartete Kosten 2029 für thermische Vorbehandlung ab Kläranlage inkl. Transport	100–140
Abzüglich eingesparter Kosten der heutigen Ascheentsorgung inkl. Transport	–10
Zuzüglich Kosten der Ascheaufbereitung und P-Rückgewinnung (Extraktionsverfahren) inkl. Transport und Entsorgung P-abgereicherte Asche	35–40
Summe: Erwartete Kosten 2029 ab Kläranlage inkl. P-Rückgewinnung	125–170
Falls notwendig bei nicht ausreichenden Kapazitäten zur P-Rückgewinnung: Zwischenlagerung von Klärschlammaschen für eine spätere Aufbereitung	20–50
Gegebenenfalls Mehrkosten für Transport und erhöhten Aufwand bei der Ascheaufbereitung	0–10
Summe: Erwartete Kosten ab 2029 ab Kläranlage inkl. P-Rückgewinnung und gegebenenfalls notwendige Aschezwischenlagerung	145–230

Die Mehrkosten führen nach den vorstehenden Annahmen zu einem Aufschlag von rund 2 bis 5 € pro Einwohner und Jahr bzw. 0,04 bis 0,12 €/m<sup>3</sup> Abwasser. Durch eine potenzielle Zwischenlagerung im Fall von fehlenden Kapazitäten zur Ascheaufbereitung können diese Kosten deutlich steigen. [24]

Im Rahmen von RePhoR wurde ein Leitfaden zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung entwickelt, der systematisch Ansätze und Parameter für die Bewertung der wirtschaftlichen Machbarkeit von Phosphor-Rückgewinnungsanlagen zusammenfasst. Der Leitfaden verfolgt das Ziel, eine einheitliche und nachvollziehbare Methode zur

Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung zu etablieren. Hierbei sollen unterschiedliche Konzepte des Phosphor-Recyclings – unabhängig von der verwendeten Technologie – vergleichbar gemacht werden. Zur Erreichung dieses Ziels werden alle direkt messbaren Zahlungsströme, wie Investitions- und Betriebskosten, systematisch erfasst und standardisiert bewertet. Dies kann z.B. auf Basis der KVR-Leitlinien geschehen. Mithilfe der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lassen sich Aussagen über den finanziellen Nutzen von Investitionen als auch Ertragsaussichten des erforderlichen Kapitaleinsatzes innerhalb eines gewählten Betrachtungszeitraums treffen.

Zentrale Annahmen umfassen die Festlegung von Analysezeiträumen, Nutzungsdauern und einem verbindlichen Kalkulationszinssatz, der als Vergleichsmaßstab dient. Zusätzlich werden Preisänderungen anhand von Inflationsraten abgeschätzt, sodass auch zukünftige Entwicklungen in die Betrachtung einfließen. Die Methodik basiert primär auf dynamischen Verfahren wie der Kapitalwert- und der Annuitätenmethode, um den Zeitwert des Geldes zu berücksichtigen und langfristige Investitionsentscheidungen fundiert bewerten zu können.

Wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Anlage zur Phosphor-Rückgewinnung durchgeführt, sind mehrere Schritte und Überlegungen notwendig:

#### 1.) Festlegung des Untersuchungsrahmens:

Zunächst werden alle relevanten In- und Outflows identifiziert. Dies umfasst die Erfassung von Investitionskosten (z. B. für Bau und technische Anlagen, basierend auf der DIN 276) sowie laufende Betriebskosten (wie Energie, Personal, Betriebsmittel, Instandhaltung, Transport und Entsorgung). Nicht unmittelbar dem Verfahren zuordenbare Aufwendungen werden explizit ausgeschlossen.

#### 2.) Definition der Bewertungsgrundlagen:

Es erfolgt eine klare Unterteilung in monetäre Zielgrößen, etwa Gesamtkosten (als Kapitalwert), Jahreskosten (als Annuität) und spezifische Kostenkennzahlen (z. B. in EUR pro Tonne Phosphor). Diese Kennzahlen dienen als Basis, um die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der Investition objektiv zu bewerten.

#### 3.) Festlegung der Rahmenparameter:

Essenziell ist die Definition von zeitlichen Rahmenbedingungen wie dem Betrachtungszeitraum, den Nutzungsdauern der Anlagen und dem Bezugszeitpunkt für die Zahlungsströme. Darüber hinaus werden Ersatzinvestitionen (etwa zur Fortführung des Betriebs nach Ablauf der Nutzungsdauer) sowie der Kalkulationszinssatz – der den Zeitwert des Geldes berücksichtigt – festgelegt. Preisänderungsraten werden üblicherweise anhand der Inflationsrate abgeschätzt.

#### 4.) Durchführung der Wirtschaftlichkeitsberechnung:

Zur Bewertung der Investitionsaussichten kommen dynamische Methoden zum Einsatz:

- » Kapitalwertmethode: Alle zukünftigen Ein- und Auszahlungen werden auf den heutigen Zeitpunkt abgezinst. Ein positiver Kapitalwert signalisiert, dass die Investition mehr Erträge als Kosten generiert.
- » Annuitätenmethode: Die unregelmäßigen Zahlungsströme werden in gleichmäßige periodische Werte umgerechnet, was den Vergleich unterschiedlicher Zahlungsprofile erleichtert.

#### 5.) Szenario- und Sensitivitätsanalyse:

Um die Robustheit der Ergebnisse zu überprüfen, werden kritische Einflussfaktoren – beispielsweise Schwankungen bei den Investitionskosten, Preisänderungen oder variierende Zinsniveaus – systematisch variiert. Dabei werden verschiedene Szenarien (neutral, Best-Case und Worst-Case) betrachtet, um die Auswirkungen von Unsicherheiten und Marktentwicklungen auf die Wirtschaftlichkeit zu quantifizieren. Es sei an dieser Stelle auf das vorangestellte Kapitel 6.2 verwiesen.

Dieses methodische Vorgehen bietet Betreibern, politischen Entscheidungsträgern und Kommunen eine nachvollziehbare und vergleichbare Grundlage, um die ökonomische Attraktivität unterschiedlicher Phosphor-Rückgewinnungsverfahren zu bewerten und damit fundierte Investitionsentscheidungen zu treffen. Der Leitfaden wird auf der RePhoR-Homepage zur Verfügung gestellt.

## 7 Kernaussagen

Phosphor-Recycling ist ab 2029 im Rahmen der AbfKlärV gesetzlich vorgeschrieben. Innerhalb der BMFTR-Fördermaßnahme RePhoR werden seit 2020 innovative regionale Lösungen zum P-Recycling und zur Klärschlammverwertung unter Beachtung der veränderten rechtlichen Rahmenbedingungen entwickelt und umgesetzt. Die wichtigsten Ergebnisse der Projekte und des Begleitvorhabens sind im Folgenden als Kernaussagen knapp zusammengefasst.

### Allgemeine Aussagen

- 1.) Die gesetzeskonforme Phosphor-Rückgewinnung nach AbfKlärV aus Klärschlamm oder Klärschlammasche ist möglich.
- 2.) Es stehen grundsätzlich (großtechnisch) erprobte und funktionierende Verfahren zur Verfügung. Damit wird die Entsorgungssicherheit für Klärschlämme durch die gleichzeitige Einhaltung der P-Rückgewinnungspflicht nicht eingeschränkt.
- 3.) Je nach regionalen Rahmenbedingungen sind große zentrale Phosphor-Rückgewinnungsanlagen oder dezentrale Lösungen sinnvoll.
- 4.) Phosphor-Recycling erlaubt die Schließung des (regionalen) P-Kreislaufs, trägt direkt zur Unabhängigkeit der deutschen Landwirtschaft bei der Düngerversorgung bei und mindert die Rohstoffabhängigkeit bei industrieller Nutzung von Phosphor.
- 5.) Viele Phosphor-Rezyklate zeigen eine gute bis sehr gute Düngewirkung bei Einhaltung aller rechtlichen Vorgaben.

### Regulatorischer Rahmen

- 6.) Die gesetzliche Rückgewinnungspflicht (AbfKlärV) zum Jahr 2029/2032 erfordert eine schnelle Prüfung und Festlegung möglicher Strukturen und Vorgehensweisen durch die Betreiber (z. B. Aufbau eigener Recyclingkapazitäten, Verbundlösungen, Teilnahme am Ausschreibungsmarkt, Prüfung von Zwischenlagerung).
- 7.) Bei den Genehmigungsbehörden sind die personellen Kapazitäten sicherzustellen, um Genehmigungsanträge zeitnah zu bearbeiten.

- 8.) Die rechtliche Situation ist hochkomplex, u. a. durch die verschiedenen Rechtsbereiche, das Ineinandergreifen von EU- und nationalem Recht und unterschiedliche Handhabung in den Bundesländern. Diese Komplexität setzt die Betreiber vor erhebliche Herausforderungen. Daher bedarf es Vereinheitlichung, Bürokratieabbau und Anwendungshilfen.
- 9.) Es bedarf einer Weiterentwicklung und Vereinheitlichung des nationalen Düngerechts zu Einsatzmöglichkeiten von Phosphor-Rezyklaten als Abfall oder Produkt (Abfallende-Verordnung) (Harmonisierung zwischen Düngemittelrecht und Abfallrecht).
- 10.) Die Düngemittelverordnung sollte zur Förderung des Einsatzes von Phosphor-Rezyklaten als Düngemittel angepasst werden, insbesondere im Hinblick auf die Kriterien der Wasserlöslichkeit und die Definition der Ausgangsstoffe (Klärschlammmasche).
- 11.) Es sollten Maßnahmen zur Sicherung des Rezyklateinsatzes (z. B. Rezyklatquoten) in geeigneten Industriezweigen getroffen werden.
- 12.) Die Umlage der Investitions- und Betriebskosten, die im Bereich der Abwasser- und Schlammbehandlung entstehen, ist eine zentrale Voraussetzung für eine zügige Umsetzung.

### Investitionssicherheit

- 13.) Für Rückgewinnungsanlagen ergibt sich ein hohes Investitionsrisiko durch die hohe Preisvolatilität des Recyclingmarkts und fehlende langfristige Ausschreibungen zur Verwertung von Klärschlämmen mit Phosphor-Rückgewinnung.
- 14.) Es braucht auch schon vor dem 01.01.2029 eine gezielte Investitionsförderung zur Unterstützung der großtechnischen Implementierung neuer Technologien bei verschiedenen Rahmenbedingungen.
- 15.) Die Absicherung von Investitionsentscheidungen sollte maßgeblich über langfristige Vertragsvereinbarungen z. B. in Recyclinggesellschaften unter Berücksichtigung des Vergaberechts erfolgen.

## Verfahren zur P-Rückgewinnung

- 16.) Schadstoffgehalte (im Klärschlamm bzw. der Klärschlammasche) determinieren maßgeblich den Aufwand der Phosphor-Rückgewinnung. Es sollte betrachtet werden, ob vorgelagerte Prozesse (technisch und organisatorisch) möglich sind, um diese Gehalte zu senken. Für geringer schadstoffbelastete Klärschlämme können ggf. weniger aufwendige Rückgewinnungsverfahren vorgesehen werden.

### P-Rückgewinnung aus Klärschlamm

- 17.) Die biologische P-Remobilisierung und anschließende Fällung kann eine Alternative zum P-Recycling aus der KS-Asche darstellen und die gesetzlichen Vorgaben der Klärschlammverordnung erfüllen.
- 18.) Die Beschränkung der P-Rückgewinnung auf Überschussschlamm ermöglicht eine kompakte, platzsparende und ressourceneffiziente Anlagentechnik.
- 19.) Die Verwertung der P-Fällprodukte (z. B. Struvit) ist gesichert und für den abgereicherten Klärschlamm wird eine Mitverbrennung möglich, sofern der Phosphorgehalt im abgereicherten Klärschlamm bei  $< 2\%$  liegt.

### Nasschemische P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche

- 20.) Nasschemische Aufbereitungsverfahren eignen sich insbesondere für mit Schwermetallen hochbelastete Klärschlämme.
- 21.) Nasschemische Verfahren haben einen hohen Betriebsmittelbedarf, insbesondere beim Einsatz der Aufschlussäuren. Daher sollte eine Sensibilisierung der Wirtschaft angestrebt werden, Kapazitäten zur Säureproduktion entsprechend des steigenden Bedarfs aufzubauen.
- 22.) Es ist vorteilhaft, ein nasschemisches Phosphor-Recycling aus Klärschlammasche im Rahmen einer Gemeinschaftsanlage in einem industriellen Umfeld durchzuführen, da hier die entsprechende Infrastruktur vorhanden ist.
- 23.) Mit dem PARFORCE-Verfahren kann Phosphorsäure aus Klärschlammaschen zurückgewonnen werden, deren Schwermetallgehalte die Grenzwerte der Düngemittelverordnung nicht einhalten. Durch eine Kombination von Ionenaustauschern und Elektrodialyse werden ungewünschte Begleitstoffe von der (Roh-)Phosphorsäure abgetrennt. Phosphorsäure ist ein marktfähiges Produkt, welches in dem Prozess nach der Verdampfung in marktüblichen Konzentrationen vorliegt.

- 24.) Mit dem Pontes Pabuli-Verfahren werden aus phosphathaltigen Aschen hochwertige, standardisierte Düngergranulate mit hoher Phosphorlöslichkeit hergestellt. Gleichzeitig ermöglicht die gezielte Zugabe unterschiedlicher Nährstoffe eine konstante Produktqualität und flexible Anpassung der Nährstoffzusammensetzung, wodurch sowohl Dünger mit einem konstanten  $P_2O_5$ -Gehalt als auch Mehrnährstoffdünger (mit Stickstoff, Kalium, Schwefel und Magnesium) wirtschaftlich produziert werden können.

- 25.) Mit dem in RePhoRM erweiterten Phos4Green-Prozess wird die Kombination aus Herstellung einer Rohphosphorsäure (saurer Extrakt des ersten Prozessschritts) mit der direkten Erzeugung eines Düngemittels in anschließender Sprühgranulation verknüpft und damit ein P-reiches, streufähiges Rezyklat unter Einhaltung der Grenzwerte der DüMV produziert.

### Thermochemische P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche

- 26.) Das R-Rhenania-Verfahren, bei dem ein thermochemischer Aufschluss in die Klärschlammverbrennung integriert wird, erzeugt aus schwermetallarmen Klärschlämmen hochwirksame und schadstoffarme Recyclingdünger und ermöglicht über einen nachgeschalteten thermochemischen Prozess auch bei höher belasteten Schlämmen vergleichbare Düngerqualitäten. Das Verfahren wurde bereits erfolgreich großtechnisch demonstriert und wird derzeit für den industriellen Dauerbetrieb vorbereitet.
- 27.) Die im Verbundprojekt DreiSATS betrachtete Staubfeuerung mit einer in-situ-Aschemodifikation nutzt den thermochemischen Aufschluss im Zuge der thermischen Klärschlammverbrennung. Dabei entsteht ein hochwertiger, schadstoffreduzierter Recyclingdünger mit vergleichbaren Düngereigenschaften. Die bestehende Pilotanlage ermöglicht eine individuelle Untersuchung der Klärschlämme in Bezug auf ihre Aschequalitäten.

### Verfahrensauswahl und -bewertung

- 28.) Der technologische Reifegrad einiger Verfahren ist noch nicht hoch genug, sodass eine großtechnische Umsetzung mit Risiken behaftet ist. Deshalb sollten weiterhin begleitende Forschungsvorhaben durchgeführt werden, vorzugsweise in Kooperation mit Verfahrensanbietern.

- 29.) Eine verlässliche Bewertung verschiedener Verfahren und/oder Strategien ist nur unter Berücksichtigung von regionalen Rahmenbedingungen und über die gesamte Prozesskette (Abwasserreinigung bis Rezyklatnutzung) möglich. Hierbei ist auch die Integration weiterer Planungs- und Bewertungsgrundlagen, z.B. Transport und Wärmeplanung, vonnöten.
- 30.) Vor langfristigen Planungen sollten auch zukünftige Entwicklungen in Erfahrung gebracht und einbezogen werden, um potenzielle Synergien und Einflussfaktoren vor den entscheidenden Investitionen und Bautätigkeiten zu berücksichtigen.
- 31.) Die vergleichende Ökobilanzierung nach ISO 14040/14044 liefert strategisch relevante Informationen, um die Umweltauswirkungen verschiedener Phosphor-Rückgewinnungsverfahren zu bewerten und somit eine der Entscheidungsgrundlagen zur Verfahrensauswahl zu bieten. Dafür wurde in RePhoR eine standardisierte Bewertungsmethodik mit einheitlichen Systemgrenzen und Bedingungen entwickelt.
- 37.) Co-Produkte und Reststoffe aus der Phosphor-Rückgewinnung variieren stark – sie umfassen mineralischen Rückstände, Fe/Al-Chloride und Metallkonzentrate bis hin zu Gips, Filterasche, Abluft und Abwasser – und bieten grundsätzlich alternative Nutzungsmöglichkeiten (z. B. in der Baustoffindustrie oder als Fällmittel), wobei jedoch teilweise noch rechtliche, technische und wirtschaftliche Herausforderungen bestehen.
- 38.) Die Sozialakzeptanz von Phosphor-Rezyklaten in der Landwirtschaft ist abhängig von den Faktoren Qualität, Kosten, Akzeptanz beim Endabnehmer und der Erfüllung gesetzlicher Rahmenbedingungen. Eine stabile Qualität mit für den Anwendungsfall optimierten Eigenschaften wird als entscheidend für die Marktakzeptanz eingeschätzt.
- 39.) Die Akzeptanzfrage erstreckt sich über den direkten Markt hinaus und umfasst auch die betroffene Bevölkerung, beispielsweise in Bezug auf hygienische Bedenken, potenzielle Auswirkungen wie erhöhten LKW-Verkehr und Lärmemissionen.

### Rezyklate und Co-Produkte

- 32.) Für alle in RePhoR produzierten und untersuchten Rezyklate existieren potenzielle Abnahmemärkte. Die Märkte sind jedoch mit unterschiedlichen Herausforderungen verbunden und müssen durch Kommunikation und Beratung erschlossen werden.
- 33.) Für die Verwendung von Phosphor-Rezyklaten im landwirtschaftlichen und industriellen Bereich bestehen noch große rechtliche Herausforderungen (siehe regulatorischer Rahmen), z. B. zum Ende der Abfalleigenschaft, Zertifizierung.
- 34.) Die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphaten, also der Anteil, den Pflanzen tatsächlich zur Nährstoffaufnahme nutzen können, ist ein zentrales Kriterium für die Bewertung der agronomischen Eignung von Recyclingphosphaten.
- 35.) Die unmittelbare Pflanzenverfügbarkeit von Rezyklaten variiert zwischen verschiedenen Aufbereitungsverfahren, ist jedoch im günstigen Fall so groß wie bei voll wasserlöslichen Düngemitteln wie TSP und erreicht vergleichbare Wachstumsraten.
- 36.) Aufgrund der unvermeidbaren natürlichen Unterschiede zwischen Böden, Pflanzenarten und Aufbereitungsprozessen sowie der Klimabedingungen ist eine standardisierte Testmethode für Pflanzenversuche unerlässlich, um die Phosphorverfügbarkeit vergleichen zu können. Es steht eine durch das Begleitvorhaben TransPhoR validierte Testmethode zur Verfügung, die jahreszeitenunabhängig und bodenunabhängig ist.
- 40.) In der Öffentlichkeit liegt häufig noch kein Bewusstsein für die Thematik vor. Es sollte daher mehr adressatenspezifische Informationen und Aufklärung hinsichtlich Phosphor-Recycling geben.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] AbfKlärV (2017): Klärschlammverordnung – Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost vom 27. September 2017 (BGBl. I Nr. 65 vom 02.10.2017 S. 3465), zuletzt geändert durch Artikel 137 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328).
- [2] AVV – Abfallverzeichnis-Verordnung (2001): Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 30. Juni 2020 (BGBl. I S. 1533).
- [3] Beier, M.; Manig, N.; Mikeska, M. (2017): E-Klär – Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende. Forschungsprojekt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISAH), Leibniz Universität Hannover.
- [4] Beier, M.; Pohl, D.; Yogendran, A. (2019): WaRelp – Water-Reuse in Industrieparks. Forschungsprojekt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISAH), Leibniz Universität Hannover.
- [5] BImSchG – Bundes-Immissionsschutzgesetz (2013): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225, 340).
- [6] Boehler, M.A., Heisele, A., Seyfried, A. et al. (2015): (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> recovery from liquid side streams. Environmental Science and Pollution Research 22. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3392-8>.
- [7] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2022): Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung. 3. Bericht an die Umweltministerkonferenz. Online verfügbar unter: [https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlaufBericht2022\\_10.pdf](https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlaufBericht2022_10.pdf) (letzter Zugriff am 05.05.2025).
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): (2024): Gemeinsame Erklärung zum Ausbau der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm. Online verfügbar unter: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Bodenschutz/phosphor\\_rueckgewinnung\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/phosphor_rueckgewinnung_bf.pdf) (Zugriff: 26.03.2025).
- [9] DepV (2009): Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225).
- [10] DERA – Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014): DERA-Rohstoffliste 2014. DERA Rohstoffinformationen 24. Online verfügbar unter: [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-24.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-24.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [11] Deutsche Phosphor Plattform (2023): DPP-Stellungnahme zum Phosphaterzvorkommen in Norwegen. Online verfügbar unter: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/dpp-stellungnahme-zum-phosphaterzvorkommen-in-norwegen/> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [12] Deutsche Phosphor Plattform (DPP) e. V. (2022): Berichtspflicht 2023: Stand der Konzepte zur Phosphorrückgewinnung in Deutschland – Ergebnisse einer Kläranlagen-Umfrage der Deutschen Phosphor-Plattform DPP e. V., Abschlussbericht. Online verfügbar unter: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2023/02/DPP-Klaeranlagenumfrage-09.11.2022.pdf> (letzter Zugriff am 26.03.2025).
- [13] Deutsche Phosphor Plattform (DPP) e. V. (2023): Stellungnahme der Deutschen Phosphor-Plattform DPP e. V. zur Düngemittelverordnung. Online verfügbar unter: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/dpp-stellungnahme-zur-duemv-02-2024/> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [14] DIN EN 16811-2 (2016): Winterdienstausrüstung – Enteisungsmittel – Teil 2: Calcium- und Magnesiumchlorid – Anforderungen und Prüfverfahren. Deutsche Fassung EN 16811-2:2016.
- [15] Domurath, N., Lincke, M. (2022): Development and Validation of Standardised Evaluation Method for the Effect of Phosphorus Recyclates on Plant Growth. Vortrag, 18th International Scientific Days, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Károly Róbert Campus, Gyöngyös, Ungarn.

- [16] Douhaire et al. (2024): Herstellung und Inverkehrbringung von Struvitdünger rechtssicher gestalten. Diskussion aktueller rechtlicher Fragen. ISOE-Materialien Soziale Ökologie, 75. Frankfurt am Main: ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung. Online verfügbar unter: <https://isoe-publikationen.de/fileadmin/redaktion/ISOE-Reihen/msoe/msoe-75-isoe-2024.pdf> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [17] Dutch National Institute for Public Health and the Environment: LCIA: the ReCiPe model. Online verfügbar unter: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [18] DWA-A 202 (2011): Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser. Arbeitsblatt der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, ISBN 978-3-941897-87-8
- [19] DWA-Arbeitsgruppe KEK 7.7 (2024): Bewertung von Verfahrenskomponenten und Prozessketten im Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz. Erster Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK 7.7 „Energie und Ressourceneffizienz der Klärschlammverwertung einschließlich Phosphorrückgewinnung“. In Korrespondenz Abwasser Abfall 02/2024. <https://doi.org/10.3242/kae2024.02.003>.
- [20] Expert Group for Technical Advice on Organic Production (2016): Final Report on Organic Fertilizers And Soil Conditioners. In: [https://agriculture.ec.europa.eu/farming/organic-farming/co-operation-and-expert-advice/egtop-reports\\_en](https://agriculture.ec.europa.eu/farming/organic-farming/co-operation-and-expert-advice/egtop-reports_en) (letzter Zugriff: 12.09.2024).
- [21] Fertilizers Europe (2020): Verbrauch von Düngemitteln in der Landwirtschaft in Deutschland nach Nährstoffarten in den Jahren 1990 bis 2019 (in 1.000 Tonnen Pflanzennährstoff) [Graph]. In Statista. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161842/umfrage/verbrauch-ausgewaehlter-duenger-in-der-landwirtschaft-in-deutschland/> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [22] Grömping, M.; Schäpers, D. (Hrsg.) (2024): Stickstoffrückbelastung: Stand der Technik 2024 – Deammonifikation von Prozesswasser – Chemisch-physikalische Verfahren zur Wertstoffgewinnung – Deammonifikation für kommunales Abwasser. Erweiterter Tagungsband zur 11. Aachener Tagung, Leipzig, 27./28.02.2024. Aachen, Verlagshaus Mainz. ISBN 978-3-95886-523-5.
- [23] GWB (2013): Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. Juni 2013 (BGBl. I S. 1750, 3245), zuletzt geändert durch Artikel 25 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 236).
- [24] Haemig, H. (2004): Lagerung von Klärschlammaschen – eine teure Notlösung? In: Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P. und Kopp-Asenmacher, S. (Hrsg.) Verwertung von Klärschlamm 7: Neuruppin, TK Verlag. ISBN 978-3-911006-83-5.
- [25] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) (2018): Ressourcenschutzstrategie Hessen. Online verfügbar unter: [https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2021-09/ressourcenschutzstrategie\\_hessen\\_nicht\\_barrierefrei.pdf](https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2021-09/ressourcenschutzstrategie_hessen_nicht_barrierefrei.pdf) (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [26] IndexMundi: Tripelsuperphosphat – monatlicher Preis (Euro pro Tonne). Online verfügbar unter: <https://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [27] Kollbach, J.-St.; Grömping, M. (Hrsg.) (1996): Stickstoffrückbelastung: Stand der Technik 1996/97 – Zukünftige Entwicklungen. Neuruppin: TK Verlag. ISBN 3-924511-85-3.
- [28] Könemann, R. (2024): Wie sieht die DWA die Entwicklung der Phosphorrückgewinnung in Deutschland? Vortrag, 10. Kongress Phosphor – Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft (P-RÜCK), 18./19.11.2024, Stuttgart.
- [29] Könemann, R., Lehrmann, F.; Hochgürtel, D.-I. (2024): Aktuelle Preise der Klärschlamm Entsorgung und Rahmenbedingungen für eine Abschätzung künftiger Kosten. In Korrespondenz Abwasser Abfall 10/2024. <https://doi.org/10.3242/kae2024.10.002>.
- [30] Kulartz; Kus; Portz; Prieß (2018): vgl. Portz in Kulartz/Kus/Portz/Prieß, Kommentar zum GWB-Vergaberecht, 4. Aufl. 2016, § 108 GWB Rz. 220; Ziekow/Völlink, Vergaberecht, Kommentar, 3. Aufl. 2018, § 108 GWB Rz. 75 f.
- [31] Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg.) (2022): Richtwert-Deckungsbeiträge 2021 der Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Oldenburg.
- [32] Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg.) (2023): Richtwert-Deckungsbeiträge 2022 der Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Oldenburg.

- [33] Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg.) (2024a): Nährstoffbericht für Niedersachsen 2022/2023. Online verfügbar unter: <https://www.duengebehoerde-niedersachsen.de/services/download.cfm?file=41389> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [34] Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg.) (2024b): Klärschlammbericht Niedersachsen 2023 gemäß Artikel 17 der EG-Richtlinien 86/278/EWG über Klärschlammverwertung in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/209114> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [35] Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg.) (2024c): Richtwert-Deckungsbeiträge 2023 der Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Oldenburg.
- [36] Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen: Agrarmarkt NRW. Verfügbar unter: <https://www.agrarmarkt-nrw.de/duengermarkt.shtm> (letzter Zugriff: 21.03.2025).
- [37] Montag, D.; Allwicher, I.; Le, H.; Schnell, M.; Stark, K.; Peters, E.; Quicker, P. (2025): Evaluierung verfügbarer Kapazitäten thermischer Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphorrückgewinnung. Umweltbundesamt, Texte|56/2025. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/56\\_2025\\_texte.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/56_2025_texte.pdf) (letzter Zugriff am 05.05.2025).
- [38] Montag, D.; Ueberschaer, S. (2023): Phosphorrückgewinnung: Verfahrensentwicklung und Kapazitäten. Vortrag, DWA KlärschlammTage 2023, 23. – 25.05.2023, Würzburg.
- [39] Muscarella, S.M.; Badalucco, L.; Cano, B.; Laudicina, V.A.; Mannina, G. (2021): Ammonium adsorption, desorption and recovery by acid and alkaline treated zeolite. Bio-resource Technology 341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125812>.
- [40] Pencereci, T. (2004): Rechtlicher Rahmen für die Gebührenfähigkeit der P-Rückgewinnung. In: Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P. und Kopp-Asenmacher, S. (Hrsg.) Verwertung von Klärschlamm 7: Neuruppin, TK Verlag. ISBN 978-3-911006-83-5.
- [41] Reese (2022): Kommentar zu § 7 KrWG. In: Jarass/Petersen (Hrsg.): Kreislaufwirtschaftsgesetz § 7 Rn 25- 27, 2. Auflage, München.
- [42] Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (Text with EEA relevance), of 5 June 2019, Europäische Union. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj> (letzter Zugriff: 05.05.2025).
- [43] RICHTLINIE (EU) 2024/1785 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24. April 2024 zur Änderung der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) und der Richtlinie 1999/31/EG des Rates über Abfalldeponien
- [44] Rosenwinkel, K.-H.; Beier, M.; Breitenkamp, S. (2016): OptiKERN – Optimierung von Kosten, Energie- und Ressourcen-Nutzung in der Fruchtsaftindustrie. Forschungsprojekt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISAH), Leibniz Universität Hannover.
- [45] Sattler, K. (2001): Thermische Trennverfahren: Grundlagen, Auslegung, Apparate. Wiley VCH Verlag GmbH. ISBN:9783527302437.
- [46] Schmalz, D., T. Löchter (2020): Phosphor-Rezyklate in der Industrie [unveröffentlichter Vortrag vom 03.11.2020]. Balve: Chemische Fabrik Wocklum Gebr. Hertin GmbH & Co. KG.
- [47] U.S. Geological Survey (2024): Mineral commodity summaries 2024: U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.
- [48] Weichgrebe, D.; Kabisch, N.-K. (2019): EXPOPLAN – Entwicklung und Umsetzung eines Planungswerkzeugs zur Anwendung von EXPOVAL-Ergebnissen bei der Anlagenplanung und -design im Ausland. Forschungsprojekt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISAH), Leibniz Universität Hannover.
- [49] Weichgrebe, D.; Nelting, K. (2016): EXPOVAL „Anakoma 2.0“ – Evaluierung und Verifizierung der Ergebnisse von AnaKoma (Anaerobe Kommunale Abwassereinigung). Forschungsprojekt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISAH), Leibniz Universität Hannover.
- [50] World Bank (2024): Worldwide Governance Indicators. Online verfügbar unter: <https://www.worldbank.org/en/publication/worldwide-governance-indicators> (letzter Zugriff 05.05.2025).







## **9 Kontaktdaten**

# Kontakt Daten der Verbundpartner

## TransPhoR

**Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.**

Ölmühle 4  
52074 Aachen

**Univ.-Prof. Dr.-Ing.**

**Johannes Pinnekamp**

pinnekamp@fiw.rwth-aachen.de

**Sophia Schüller, M.Sc.**

schueller@fiw.rwth-aachen.de

**HGoTECH GmbH**

Karlrobert-Kreiten-Straße 13  
53115 Bonn

**Prof. Dr. Heiner Goldbach**

goldbach@hgotech.de

**Dipl.-Ing. Christian Heck**

heck@hgotech.de

**INAB der RWTH Aachen University Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen**

Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52074 Aachen

**Univ.-Prof. Dr. Ing. Marzia Traverso**

marzia.traverso@inab.rwth-aachen.de

**Dr.-Ing. Roland Meyer**

roland.meyer@inab.rwth-aachen.de

**TUTTAHS & MEYER**

**Ingenieurgesellschaft für**

**Wasser-, Abwasser- und**

**Energiewirtschaft mbH**

Bismarckstrasse 2-8  
52066 Aachen

**Prof. Dr.-Ing. Markus Schröder**

m.schroeder@tum-ingenieure.de

## AMPHORE

**Ruhrverband**

Kronprinzenstraße 37  
45128 Essen

**Hanna Evers, M.Sc.**

hev@ruhrverband.de

**Emschergenossenschaft/**

**Lippeverband**

Kronprinzenstraße 24  
45128 Essen

**Dirk Bogaczyk**

bogaczyk.dirk@eglv.de

**Wupperverband**

Untere Lichtenplatzer Str. 100  
42289 Wuppertal

**Catrin Bornemann**

bor@wupperverband.de

**Linksniederrheinische**

**Entwässerungs-Genossenschaft**

Friedrich-Heinrich-Allee 64  
47475 Kamp-Lintfort

**Helle Dorothee Wischer**

wischer.h@lineg.de

**Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen University (ISA)**

Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52074 Aachen

**Dr.-Ing. David Montag**

montag@isa.rwth-aachen.de

**Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)**

Breslauer Straße 48  
76139 Karlsruhe

**Dr.-Ing. Jutta Niederste-Hollenberg**

jnh@isi.fraunhofer.de

**Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH (ifeu)**

Wilckensstr. 3  
69120 Heidelberg

**Horst Fehrenbach**

horst.fehrenbach@ifeu.de

**Joachim Reinhardt**

joachim.reinhardt@ifeu.de

**PhosRec Phosphor-Recycling GmbH**

In der Welheimer Mark 190  
46238 Bottrop

**Dr.-Ing. Yvonne Schneider**

ysc@ruhrverband.de

**Prof. Dr.-Ing. Torsten Frehmann**

frehmann.torsten@eglv.de

**Dr.-Ing. Dennis Blöhse**

bloehse.dennis@eglv.de

**Emscher Wassertechnik GmbH**

Brunnenstraße 37  
45128 Essen

**Dr.-Ing. Tim Fuhrmann**

fuhrmann@ewlw.de

**WiW – Wupperverbandsgesellschaft**

**für integrale Wasserwirtschaft mbH**

Untere Lichtenplatzer Str. 100  
42289 Wuppertal

**Dr.-Ing. Gerd Kolisch**

kol@wupperverband.de

**ASSOZIIERTE PARTNER**

**BETREM GmbH**

Sturmshof 20  
46238 Bottrop

**Dagmar Dörtelmann**

**Compo Expert GmbH**

Krögerweg 10  
48155 Münster

**André Leise**

**INNOVATHERM Gesellschaft zur innovativen Nutzung von Brennstoffen mbH**

Frydagstraße 47  
44536 Lünen

**Falko Lehrmann**

**WFA Elverlingsen GmbH**

Auf der Mark 1  
58791 Werdohl

**Dierk von Felde**

**Chemische Fabrik Wocklum |**

**Gebr. Hertin GmbH & Co. KG**

Glärbach 2  
58802 Balve

**Thorsten Löchter**

**SF-SoepenberG GmbH**

Emil-Fischer-Straße 14  
46569 Hünxe

**Martin Teloo**

**Yara GmbH & Co. KG**

Hanninghof 35  
48249 Dülmen

**Dr. Marina Ettl**

**WKW Aktiengesellschaft**

Siebeneicker Straße 235  
42553 Velbert

**Volker Stange**

## DreiSATS

**Veolia Klärschlammverwertung  
Deutschland GmbH**  
Nordstraße 15  
04420 Markranstädt  
**Matthias Hoger**  
matthias.hoger@veolia.com  
**Claudyn Kidszun**  
claudyn.kidszun@veolia.com

**Fraunhofer-Institut für Keramische  
Technologien und Systeme IKTS**  
Winterbergstraße 28  
01277 Dresden  
**Marc Lincke**  
marc.lincke@ikts.fraunhofer.de  
**Carbotechnik Energiesysteme GmbH**  
Lauterbachstraße 12  
82538 Geretsried  
**Peter Schöfmann**  
schoefmann@carbotechnik.de

**Pontes Pabuli GmbH**  
Harkortstraße 8  
04107 Leipzig  
**Dr. Lars Leidolph**  
l.leidolph@pontes-pabuli.de

**LTC – Lufttechnik Crimmitschau GmbH**  
Gewerbering 24  
08451 Crimmitschau  
**Holger Ullmann**  
holger.ullmann@ltc-crimmitschau.com

**Materialforschungs- und -prüf-  
anstalt an der Bauhaus-Universität  
Weimar (MFPA Weimar)**  
Coudraystraße 9  
99423 Weimar  
**Timon Echt**  
timon.echt@mfpa.de

## KlimaPhoNds

**Clausthaler Umwelttechnik  
Forschungszentrum  
CUTEC – Abteilung Abwasser-  
verfahrenstechnik**  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
**Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers**  
michael.sievers@cutec.de

**CUTEC – Abteilung Thermische  
Prozesstechnik**  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
**Dr.-Ing. Stefan Vodegel**  
stefan.vodegel@cutec.de

**CUTEC – Abteilung Ressourcen-  
technik und -systeme**  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
**Dipl.-Umweltwiss. Jan Schlecht**  
jan.schlecht@cutec.de

**PARFORCE Engineering &  
Consulting GmbH**  
Am St.-Niclas-Schacht 13  
09599 Freiberg  
**Dr. Peter Fröhlich**  
peter.froehlich@parforce-  
technologie.de

**LUKSON AG**  
Geyener Str. 1  
50259 Pulheim  
**Dipl.-Ing. Franz Hormes**  
f.hormes@lukson.de

**KNOKE Industrie-Montagen GmbH**  
Gesellensteig 48  
38229 Salzgitter  
**Adam Bardosi**  
bardosi@knoke-salzgitter.de  
**Kevin Piel**  
piel@knoke-salzgitter.de

**Eigenbetrieb Abwasserbeseitigung  
der Stadt Northeim**  
Scharnhorstplatz 1  
37154 Northeim  
**Dipl.-Ing. Olaf Hagenow**  
ohagenow@northeim.de

## ASSOZIIERTE PARTNER

**BMA – Braunschweigische  
Maschinenbauanstalt AG**  
Am Alten Bahnhof 5  
38122 Braunschweig  
**Dr. Andreas Lehnberger**  
andreas.lehnberger@bma-de.com

**Schwenk Zement KG**  
Hindenburgring 15  
89077 Ulm  
**Dr. Hendrik Möller**  
moeller.hendrik@schwenk.de  
**HeidelbergCement**  
Berliner Straße 6  
69120 Heidelberg  
**Dirk Kastner**  
dirk.kastner@heidelbergcement.com

# Kontakt Daten der Verbundpartner

## P-Net

**Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW), Technische Universität Braunschweig**

Pockelsstraße 2a  
38106 Braunschweig  
**Prof. Dr.-Ing. Thomas Dockhorn**  
t.dockhorn@tu-braunschweig.de

**Abwasserverband Braunschweig (AVB)**

Celler Straße 22  
38176 Wendeburg  
**Dr.-Ing. Franziska Gromadecki**  
franziska.gromadecki@  
abwasserverband-bs.de

**Abwasser- und Straßenreinigungsbetrieb Stadt Gifhorn (ASG)**

Winkeler Straße 4  
38518 Gifhorn

**Dipl.-Ing. Hans-Oskar Baron**  
baron@asg-gifhorn.de

**ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung**

Hamburger Allee 45  
60486 Frankfurt am Main  
**Dr.-Ing. Martina Winker**  
winker@isoe.de

**Julius-Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI)**

Erwin-Baur-Straße 27  
06484 Quedlinburg  
**Dr. Elke Bloem**  
elke.bloem@julius-kuehn.de  
**Dr. Sylvia Kratz**  
sylvia.kratz@julius-kuehn.de

**PFI-Planungsgemeinschaft**

Karl-Imhoff-Weg 4  
30165 Hannover  
**Dipl.-Ing. Oliver Hermanussen**  
hermanussen@pfi.de

**SF-SoepenberGmbH**

Emil-Fischer-Straße 14  
46569 Hünxe  
**Dr. Joachim Clemens**  
j.clemens@soepenberG.com

**Stadtentwässerung Braunschweig GmbH (SE|BS)**

Postfach 45 10  
38035 Braunschweig  
Taubenstraße 7  
38106 Braunschweig  
**Dipl.-Ing. Jens-Christoph Siemers**  
christoph.siemers@se-bs.de

## RePhoRM

**Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Fachgebiet Abwassertechnik**

Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
**Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart**  
m.engelhart@iwar.tu-darmstadt.de  
**Ibrahim Sharifov**

**Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Arbeitsgruppe Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft**

Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
**Dr. sc. Vanessa Zeller**  
v.zeller@iwar.tu-darmstadt.de  
**Chunyu Miao**

**Becker Büttner Held Rechtsanwälte Wirtschaftsprüfer Steuerberater PartGmbH**

Magazinstraße 15–16  
10179 Berlin  
**Beate Kramer**  
beate.kramer@bbh-online.de  
**Dr. Anna Alexandra Seuser**

**Infraserv GmbH & Co. Höchst KG**

Industriepark Höchst  
65926 Frankfurt am Main  
**Björn Krix**  
bjoern.krix@Infraserv.com  
**Thorsten Appel**

**Glatt Ingenieurtechnik GmbH**

Nordstraße 12  
99427 Weimar  
**Dr. Johannes Buchheim**  
johannes.buchheim@glatt.com  
**Dr. Michael Jacob**

**TVM Thermische Verwertung Mainz GmbH**

Industriestraße 70  
55120 Mainz  
**Michael Krauss**  
michael.krauss@tvm.mainz.de  
**Carsten Krollmann**

**Stadt Frankfurt am Main – Stadtentwässerung Frankfurt am Main**

Goldsteinstraße 160  
60528 Frankfurt am Main  
**Dr. Susanne Schmid**  
susanne.schmid@stadt-frankfurt.de  
**Dr. Rolf Götz**

## R-Rhenania

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

Unter den Eichen 87  
12200 Berlin  
**Christian Adam**  
christian.adam@bam.de

**Outotec GmbH & Co. KG**

In den Schwarzwiesen 13  
61440 Oberursel  
**Tanja Schaaf**  
tanja.schaaf@mogroup.com

**Emter GmbH**

Alpenstraße 50  
86972 Altenstadt  
**Johann Emter**  
info@emter-gmbh.de

**sePura GmbH**

Raiffeisenstraße 1  
97209 Veitshöchheim  
**Dieter Leimkötter**  
dieter.leimkoetter@sepura.de

**Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB)**

Cicerostraße 24  
10709 Berlin  
**Fabian Kraus**  
fabian.kraus@kompetenz-wasser.de

**Universität Bonn**

Karlrobert-Kreiten-Str. 13  
53115 Bonn  
**Jürgen Burkhardt**  
j.burkhardt@uni-bonn.de

**FEHS-Institut für**

**Baustoff-Forschung e. V.**

Bliersheimer Straße 62  
47229 Duisburg  
**Hans-Peter König**  
hp.koenig@fehs.de

**Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)**

Vöttinger Straße 38  
85354 Freising  
**Peer Urbatzka**  
peer.urbatzka@lfl.bayern.de

## SATELLITE

### **Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover (ISAH)**

Welfengarten 1  
30163 Hannover  
**Dr.-Ing. Maike Beier**  
beier@isah.uni-hannover.de

### **Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML)**

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2 – 4  
44227 Dortmund  
**Frederic Veit**  
frederic.veil@iml.fraunhofer.de

### **Landwirtschaftskammer Niedersachsen**

Vor dem Zoll 2  
31582 Nienburg  
**Hauke Ahnemann**  
hauke.ahnemann@  
lwk-niedersachsen.de

### **Kommunale Nährstoffrückgewinnung Niedersachsen GmbH (KNRN)**

Kanalstr. 50  
31137 Hildesheim  
**Dr.-Ing. Jens Manthey**  
j.manthey@knrn.de

### **Göttinger Entsorgungsbetriebe (GEB)**

Rudolf-Wissel-Str. 5  
37079 Göttingen  
**Carsten Keunecke**  
c.keunecke@goettingen.de

### **Stadtentwässerung Hildesheim Kommunale AöR (SEHI)**

Kanalstraße 50  
31377 Hildesheim  
**Dr.-Ing. Erwin Voß**  
Erwin.Voss@sehi-hildesheim.de

### **Kreisverband für Wasserwirtschaft Nienburg**

Am Wall 2  
31582 Nienburg  
**Axel Brause**  
brause@kvwasser-nienburg.de

### **Stadt Pattensen – Kläranlage**

Rathausplatz 1  
30982 Pattensen  
**Jörg Hinrichsen**  
hinrichsen@pattensen.de

### **Ingenieurbüro Dr. Breitenkamp**

Hansastr. 45  
32257 Bünde  
**Dr.-Ing. Sabrina Breitenkamp**  
breitenkamp@ressourcen-  
effizienz.pro

### **BIORESTEC GmbH**

Karlsruher Str. 20a  
30880 Laatzen  
**Dr.-Ing. Dipl.-Biol. Paul Stopp**  
info@biorestec.de

### **SF SoepenberG GmbH**

Emil-Fischer-Str. 14  
46569 Hünxe  
**Dr. Joachim Clemens**  
j.clemens@soepenberG.com

### **Schlammverbund Nienburg (Modellregion)**

### **Kreisverband für Wasserwirtschaft Nienburg**

Am Wall 2  
31582 Nienburg  
**Axel Brause, KVWW**  
brause@kvwasser-nienburg.de  
**Mirco Matthey, Flecken Steyerberg**  
mirco.matthey@steyerberg.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

### Fotonachweise (wenn nicht am Bild vermerkt)

Titel: Kläranlage © Ruhrverband, Blühende Landschaft  
© Christian Schwier/adobestock.com, Industriepark  
© 360degreeAerial/shutterstock.com, S. 97 © Fritz the  
Cat/pixabay.com, S. 98 © Rainer/pixabay.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 beim BMFTR

Bundesministerium für Forschung, Technologie und  
Raumfahrt (BMFTR)

#### Thomas Bartelt

Referat 726 – Ressourcen, Kreislaufwirtschaft;  
Geoforschung | 53170 Bonn

#### AnsprechpartnerIn 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 2025

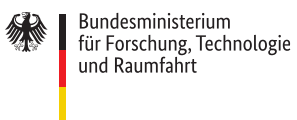








Gefördert durch:



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