

TEXTE

56/2025

## Abschlussbericht

# Evaluierung verfügbarer Kapazitäten thermischer Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphorrückgewinnung

### von:

Dr.-Ing. David Montag, M. Sc. Isabell Allwicher, M.Sc. Hiep Le

Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA)

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen

Dr.-Ing. Matthias Schnell, M. Sc. Kirsten Stark, M. Sc. Erik Peters, Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft (TEER)

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen

### Herausgeber:

Umweltbundesamt



TEXTE 56/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für  
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und  
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 34 306 0  
FB001356

Abschlussbericht

## **Evaluierung verfügbarer Kapazitäten thermischer Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphorrückgewinnung**

von

Dr.-Ing. David Montag, M. Sc. Isabell Allwicher,  
M.Sc. Hiep Le  
Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA)  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Aachen

Dr.-Ing. Matthias Schnell, M. Sc. Kirsten Stark, M. Sc. Erik  
Peters, Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker  
Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und  
Emissionsminderung in der Entsorgungs- und  
Recyclingwirtschaft (TEER)  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Aachen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### Durchführung der Studie:

Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen  
Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52072 Aachen

Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung  
in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft der RWTH Aachen (TEER)  
Wüllnerstraße 2  
52062 Aachen

### Abschlussdatum:

April 2023

### Redaktion:

Fachgebiet III 2.4 Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer  
Patric Heidecke

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.



### **Kurzbeschreibung: Evaluierung verfügbarer Kapazitäten thermischer Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphorrückgewinnung**

Die vorliegende Studie beleuchtet die Neuerungen der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und Düngemittelverordnung (DüMV) sowie deren Auswirkungen auf die zukünftige Behandlung kommunaler Klärschlämme. Die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm wird ab dem Jahr 2029 gesetzlich vorgeschrieben. Gleichzeitig wird die bodenbezogene Verwertung eingeschränkt, um damit verbundene negative Umweltauswirkungen zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund präsentiert die Studie den aktuellen Stand der thermischen Klärschlammbehandlung sowie der Phosphorrückgewinnung und gibt eine Prognose zur künftigen Kapazitätsentwicklung.

Die thermische Klärschlammbehandlung ist bereits heute der wichtigste Entsorgungspfad für kommunale Klärschlämme. Mit ca. 22 % wird zudem ein wesentlicher Anteil des anfallenden Klärschlammes in der Landwirtschaft und im Landschaftsbau genutzt. Aufgrund der gesetzlichen Änderungen ist zu erwarten, dass die Bedeutung der Klärschlammverbrennung weiter zunimmt. Die Technologien zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammverbrennungssaschen befinden sich hingegen noch in der Entwicklung und stehen großtechnisch aktuell nicht zur Verfügung.

In der Studie werden mehrere Szenarien für die thermische Klärschlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung vorgestellt. Diese Szenarien werden hinsichtlich verschiedener Kriterien miteinander verglichen. Mittels Nutzwertanalyse werden die Klärschlammverbrennung mit anschließender Aschebehandlung zu Düngezwecken oder Phosphorrückgewinnung als beste Optionen bewertet.

Die Studie benennt die offenen Herausforderungen bis zur Einführung der Phosphorrückgewinnungspflicht. Diese bestehen insbesondere in der Schaffung ausreichender Behandlungskapazitäten und der Marktetablierung der Phosphorrezyklate. Klärschlammherzeugern wird empfohlen frühzeitig die Möglichkeiten zur Phosphorrückgewinnung zu evaluieren, um die Entwicklung der erforderlichen Verfahren weiter vorantreiben.

### **Abstract: Evaluation of Available Capacities for Thermal Sewage Sludge Treatment and Phosphorus Recovery**

This study is on the innovations in the Sewage Sludge Ordinance (AbfKlärV) and Fertilizer Ordinance (DüMV), as well as their effects on the future treatment of municipal sewage sludge. Phosphorus recovery from sewage sludge will be legally required starting in 2029. Simultaneously, agricultural utilization will be restricted to avoid associated negative environmental impacts. In this context, the study presents the current state of thermal sewage sludge treatment as well as phosphorus recovery and provides a forecast for future capacity development.

Thermal sewage sludge treatment is already the most important disposal pathway for municipal sewage sludge today. Furthermore, approximately 22 % of the generated sewage sludge is utilized in agriculture and landscaping. Due to legal changes, it is expected that the significance of sewage sludge incineration will be increasing. Technologies for phosphorus recovery from sewage sludge and sewage sludge ashes are still under development and are not currently available on an industrial scale.

The study presents several scenarios for thermal sewage sludge treatment and phosphorus recovery. These scenarios are compared based on various criteria. Through a utility analysis, sewage sludge incineration followed by ash treatment for fertilization purposes or phosphorus recovery are evaluated as the best options.

The study identifies the open challenges until the introduction of the phosphorus recovery obligation. These challenges primarily involve establishing sufficient treatment capacities and market adoption of phosphorus recycled products. Sewage sludge producers are recommended to evaluate the possibilities for phosphorus recovery early on to further advance the development of necessary processes.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis .....	16
Abkürzungsverzeichnis.....	20
Zusammenfassung.....	22
1 Hintergrund zur Phosphorrückgewinnung in Deutschland .....	35
2 Stand der Technik.....	37
2.1 Thermische Klärschlammbehandlung.....	37
2.1.1 Übersicht.....	37
2.1.2 Klärschlammverbrennung.....	38
2.1.2.1 Stationäre Wirbelschicht .....	38
2.1.2.2 Drehrohr .....	44
2.1.2.3 Etagenofen.....	48
2.1.2.4 Etagenwirbler.....	50
2.1.2.5 Rostfeuerung .....	53
2.1.2.6 Weitere Verbrennungsverfahren .....	55
2.1.3 Mitverbrennung.....	62
2.1.3.1 Kohlekraftwerke .....	62
2.1.3.2 Müllverbrennung .....	63
2.1.3.3 Zementwerke.....	63
2.1.4 Sonstige thermische Behandlungsverfahren .....	63
2.1.4.1 Pyrolyse.....	63
2.1.4.2 Vergasung .....	71
2.1.4.3 HTC-Verfahren .....	75
2.2 Phosphorrückgewinnung .....	75
2.2.1 Einsatzstellen .....	75
2.2.2 Verfahrenstechnischer Überblick .....	77
2.2.3 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser .....	79
2.2.3.1 Multi-Solid-Verfahren .....	79
2.2.3.2 NuReSys-Verfahren.....	79
2.2.3.3 Pearl-Verfahren .....	80
2.2.3.4 PHOSPAQ-Verfahren.....	80
2.2.3.5 P-RoC-Verfahren .....	81
2.2.3.6 SIMPhos-Verfahren.....	81

2.2.4	Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Rohschlamm und Faulschlamm .....	82
2.2.4.1	AirPrex-Verfahren .....	83
2.2.4.2	EloPhos-Verfahren .....	83
2.2.4.3	Erweiterter PARFORCE-Ansatz .....	84
2.2.4.4	Gifhorn-Verfahren .....	85
2.2.4.5	MSE-Verfahren .....	86
2.2.4.6	PhosForce-Verfahren .....	86
2.2.4.7	PS-fix-Verfahren .....	87
2.2.4.8	Stuttgarter-Verfahren .....	88
2.2.4.9	ViviMag-Verfahren .....	88
2.2.5	Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm .....	88
2.2.5.1	EuPhoRe-Verfahren .....	89
2.2.5.2	FlashPhos-Verfahren .....	90
2.2.5.3	Grenzebach-Phosphor-Recycling-Verfahren .....	90
2.2.5.4	KSMF-Prozess (Kubota Surface Melting Furnace) .....	91
2.2.5.5	Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec „Variante B“) .....	92
2.2.5.6	P-XTRACT-Verfahren .....	92
2.2.5.7	Drehrohrkessel-Verfahren (Werkstätten heating-systems GmbH) .....	93
2.2.6	Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungssasche .....	93
2.2.6.1	Ash2Phos-Verfahren .....	94
2.2.6.2	AshDec-Verfahren .....	95
2.2.6.3	Leachphos-Verfahren .....	95
2.2.6.4	PARFORCE-Technologie .....	96
2.2.6.5	PHOS4Green/Seraplast-Verfahren .....	97
2.2.6.6	Phos4Life-Verfahren .....	98
2.2.6.7	pontes pabuli-Verfahren .....	98
2.2.6.8	TetraPhos-Verfahren .....	99
2.2.7	Zusammenfassung Verfahrensüberblick .....	100
2.3	Optimierungspotentiale der Phosphorrückgewinnungsverfahren .....	119
3	Bestandsanalyse .....	120
3.1	Abwasserbehandlungsanlagen .....	120
3.1.1	Vorgehensweise Datenerhebung und -verarbeitung .....	120
3.1.1.1	Datenabfrage-/Weiterleitung bestehender Erhebungen .....	121
3.1.1.2	Studienauswertung .....	121

3.1.1.3	Umfrage .....	122
3.1.2	Datenauswertung .....	122
3.1.2.1	Allgemeine Vorgehensweise.....	122
3.1.2.2	Datenverfügbarkeit auf Bundeslandebene.....	122
3.1.2.3	Phosphor-Elimination .....	125
3.1.2.4	Schlammstabilisierung.....	126
3.1.2.5	Entwässerungs- und Trocknungsverfahren .....	127
3.1.2.6	Klärschlammverwertung.....	129
3.1.2.7	Präferierte und bereits umgesetzte Phosphorrückgewinnungsverfahren .....	131
3.2	Thermische Klärschlammbehandlungsanlagen .....	133
3.2.1	Klärschlammverbrennungsanlagen .....	135
3.2.2	Sonstige thermische Behandlungsverfahren .....	139
3.2.3	Mitverbrennung.....	142
3.2.3.1	Kohlekraftwerke .....	142
3.2.3.2	Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerke .....	143
3.2.3.3	Zementwerke.....	144
3.2.3.4	Gesamtkapazitäten der Klärschlammmitverbrennung .....	145
3.2.4	Identifizierung bereits vorhandener Phosphorrückgewinnungsstrategien bei Anlagenbetreibern.....	146
3.3	Großtechnische Phosphorrückgewinnung in Deutschland.....	146
3.3.1	Übersicht.....	146
3.3.2	Ausgangssituation der Abwasserbehandlung in Deutschland.....	149
3.3.3	Vorhandene und prognostizierbare Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung .....	150
4	Entwicklungsprognose .....	153
4.1	Thermische Behandlungsanlagen .....	153
4.1.1	Zubau .....	153
4.1.2	Bedarf an Kapazitäten bis 2029 bzw. 2032.....	162
4.2	Phosphorrückgewinnungsanlagen.....	163
5	Rezyklate: Produkte der Phosphorrückgewinnung.....	166
5.1	Rechtliche Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung.....	166
5.2	Rechtliche Vorgaben für Rezyklate .....	166
5.3	Rezyklat Produktgruppen.....	169
5.3.1	Struvit.....	170
5.3.2	Calciumphosphate .....	172



5.3.3	Eisen(II)Phosphat (Vivianit).....	173
5.3.4	P-haltiges Calcium-Silikat-Hydrate.....	174
5.3.5	Phosphorsäure .....	175
5.3.6	P-haltiges Ascheprodukt aus nasschemischen Verfahren .....	176
5.3.7	P-haltiges Ascheprodukt aus thermischen Verfahren .....	177
5.3.8	P-haltige Schlacke .....	178
5.3.9	Weißer Phosphor .....	179
5.4	Charakterisierung der Rezyklate .....	180
5.4.1	Chemische Zusammensetzung der Rezyklate.....	180
5.4.2	Physikalische Eigenschaften.....	180
5.4.3	Schadstoffe .....	181
5.4.4	Pflanzenverfügbarkeit.....	183
5.4.5	Rechtliche Bewertung.....	185
5.4.6	Verwertungsrouten.....	185
5.4.7	Weitere Kriterien .....	188
5.5	Anforderungen der Düngemittelproduzenten an die Rezyklate der Phosphorrückgewinnung .....	188
6	Nebenprodukte und Reststoffe der Phosphorrückgewinnung .....	190
6.1	Nebenprodukte der Phosphorrückgewinnung .....	190
6.2	Reststoffe der Phosphorrückgewinnung .....	191
7	Technologiebewertung und Entsorgungsoptionen.....	192
7.1	Vergleich und Bewertung möglicher Entsorgungsoptionen .....	192
7.1.1	Szenario A: Mitverbrennung im Zementwerk .....	193
7.1.2	Szenario B: Klärschlammverbrennung mit Phosphorextraktion aus der Klärschlammverbrennungsasche .....	193
7.1.3	Szenario C: Klärschlammverbrennung mit vollständiger Ascheverwertung .....	194
7.1.4	Szenario D: Klärschlammverbrennung mit vollständiger Ascheverwertung und vorgesalteter Phosphorrückgewinnung.....	194
7.1.5	Szenario E: Pyrolyse .....	195
7.1.6	Szenario F: HTC .....	195
7.2	Methodik.....	196
7.2.1	Massenbilanzierung.....	196
7.2.2	Energiebilanzierung .....	198
7.2.3	Kumulierter Energieaufwand (KEA) .....	200
7.2.4	CO <sub>2</sub> -Bilanzierung .....	200

7.2.5	Behandlungskosten.....	200
7.3	Massen-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen .....	201
7.3.1	Szenario A .....	202
7.3.2	Szenario B.....	203
7.3.3	Szenario C.....	205
7.3.4	Szenario D .....	206
7.3.5	Szenario E.....	207
7.3.6	Szenario F .....	210
7.3.7	Gegenüberstellung der Bilanzen.....	212
7.4	Wirtschaftlichkeitsabschätzung der untersuchten Szenarien .....	219
8	Hindernisse, Schwierigkeiten und Ausblick bei der Umsetzung der AbfKlärV .....	222
8.1	Hemmnisse, Schwierigkeiten und Möglichkeiten.....	222
8.2	Multikriterielle Nutzwertanalyse Entsorgungswege.....	224
8.2.1	Bewertungskriterien .....	224
8.2.2	Nutzwertberechnung.....	227
9	Entscheidungshilfe zur Verfahrensauswahl zur Phosphorrückgewinnung .....	231
9.1	Phosphorrückgewinnung im Ablauf der Nachklärung .....	231
9.2	Phosphorrückgewinnung aus Schlammwasser.....	231
9.3	Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm.....	232
9.4	Phosphorrückgewinnung aus entwässertem Klärschlamm.....	233
9.5	Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche .....	234
9.6	Bewertung und Verfahrensauswahl aus Sicht des Kläranlagenbetreibers .....	235
9.7	Prüfschema zur Entscheidung für ein Phosphorrückgewinnungsverfahren.....	235
10	Quellenverzeichnis .....	239
A	Anhang zu Kapitel 3.1.....	248
A.1	Angaben zu den Stammdaten.....	248
A.2	Angaben zur Abwasserbehandlung .....	248
A.3	Angaben zum Klärschlammmanfall und der Klärschlammbehandlung .....	251
A.4	Angaben zur Phosphorrückgewinnung .....	252
B	Anhang zu Kapitel 3.1.2.....	256
C	Anhang zu Kapitel 3.3.....	258
C.1	Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser .....	258
C.1.1	Multi-Solid.....	258
C.1.2	NuReSys .....	260

C.2	Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Faulschlamm .....	263
C.2.1	Airprex: Berlin .....	263
C.2.2	AirPrex: Mönchengladbach-Neuwerk.....	265
C.2.3	Erweiterter PARFORCE-Ansatz.....	268
C.2.4	MSE-Verfahren.....	271
C.2.5	PS-fix .....	274
C.3	Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm.....	277
C.3.1	EuPhoRe .....	277
C.3.2	Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec Variante B) .....	279
C.3.3	Drehrohrkessel (Werkstätten heating-systems GmbH.....	282
C.4	Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsasche .....	284
C.4.1	Ash2Phos.....	284
C.4.2	PHOS4Green .....	287
C.4.3	TetraPhos .....	289
D	Anhang zu Kapitel 7 .....	292
D.1	Sensitivitätsanalysen.....	292
D.1.1	Kumulierter Energieaufwand (KEA) .....	292
D.1.2	CO <sub>2</sub> -Bilanzen .....	295
D.1.3	Behandlungskosten.....	299

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung einer stationären Wirbelschicht (Ausführungsbeispiel).....	39
Abbildung 2:	Schematische Darstellung einer exemplarischen Abgasreinigung einer Klärschlammverbrennung .....	40
Abbildung 3:	Einsatzstellen zur Phosphorrückgewinnung.....	76
Abbildung 4:	Phosphorrückgewinnungsverfahren mit jeweiligem Einsatzort und rechtlichem Geltungsbereich .....	78
Abbildung 5:	Multi-Solid-Verfahren.....	79
Abbildung 6:	NuReSys-Verfahren .....	80
Abbildung 7:	Pearl-Verfahren .....	80
Abbildung 8:	PHOSPAQ-Verfahren .....	81
Abbildung 9:	P-Roc-Verfahren .....	81
Abbildung 10:	SIMPhos-Verfahren .....	82
Abbildung 11:	AirPrex Verfahren .....	83
Abbildung 12:	EloPhos-Verfahren (Beispiel auf der KA Lingen).....	84
Abbildung 13:	Erweiterter PARFORCE-Ansatz .....	85
Abbildung 14:	Gifhorn-Verfahren .....	86
Abbildung 15:	MSE-Verfahren .....	86
Abbildung 16:	PhosForce Verfahren .....	87
Abbildung 17:	PS-fix Verfahren.....	87
Abbildung 18:	Stuttgarter-Verfahren.....	88
Abbildung 19:	ViviMag-Verfahren .....	88
Abbildung 20:	EuPhoRe-Verfahren .....	90
Abbildung 21:	FlashPhos-Verfahren .....	90
Abbildung 22:	Grenzebach-Phosphor-Recycling-Verfahren .....	91
Abbildung 23:	KSMF-Prozess .....	91
Abbildung 24:	Na-Dosierung in die Verbrennung.....	92
Abbildung 25:	P-XTRACT-Verfahren.....	93
Abbildung 26:	Drehrohrkessel-Verfahren (Werkstätten heating-systems GmbH).....	93
Abbildung 27:	Ash2Phos-Verfahren.....	95
Abbildung 28:	AshDec-Verfahren .....	95
Abbildung 29:	Leachphos-Verfahren .....	96
Abbildung 30:	PARFORCE-Technologie .....	96
Abbildung 31:	PARFORCE-Technologie: Weiterverarbeitung der Salzlösung aus der Elektrodialyse.....	97
Abbildung 32:	PHOS4Green-Verfahren .....	97
Abbildung 33:	Phos4Life-Verfahren.....	98
Abbildung 34:	pontes pabuli-Verfahren .....	99
Abbildung 35:	TetraPhos-Verfahren .....	99
Abbildung 36:	Vorgehensweise zur Datenermittlung und -analyse .....	121

Abbildung 37:	Datenverfügbarkeit (Prozentangabe) auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5 bezogen auf die rückgemeldeten/auswertbaren Kläranlagen .....	124
Abbildung 38:	Phosphor-Elimination auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5.....	125
Abbildung 39:	Fällmittel zur Phosphor-Elimination auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5.....	126
Abbildung 40:	Verfahren zur Schlammstabilisierung auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5.....	127
Abbildung 41:	Entwässerungsverfahren auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5.....	128
Abbildung 42:	Trocknungsverfahren auf Bundeslandebene der Kläranlagen aller Größenklassen .....	129
Abbildung 43:	Klärschlamm Entsorgungswege auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5.....	130
Abbildung 44:	Bundeslandübergreifende Zwischenlagerungskapazitäten von 26 Kläranlagen der Größenklasse 4b und 5 in Deutschland...	131
Abbildung 45:	In Deutschland im Bezugsjahr 2020 thermisch behandelte Klärschlamm mengen .....	135
Abbildung 46:	Entwicklung der thermisch behandelten Klärschlamm mengen in Klärschlammverbrennungsanlagen von 2016-2020 .....	138
Abbildung 47:	Bestand Klärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland, Stand 12/2022 .....	139
Abbildung 48:	Bestand Klärschlammbehandlungsanlagen (sonstige thermische Behandlungsverfahren) in Deutschland, Stand 12/2022 .....	141
Abbildung 49:	Entwicklung der in Kohlekraftwerken eingesetzten Klärschlamm mengen von 2016-2020 .....	143
Abbildung 50:	Entwicklung der in Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken eingesetzten Klärschlamm mengen von 2016-2020 .....	144
Abbildung 51:	Entwicklung der in Zementwerken eingesetzten Klärschlamm mengen von 2016-2020 .....	145
Abbildung 52:	Im Jahr 2020 in der Mitverbrennung eingesetzte Klärschlamm mengen .....	146
Abbildung 53:	Verteilung der Anzahl der Kläranlagen, der genehmigten Gesamtausbaugröße und der Jahresabwassermenge auf die verschiedenen Größenklassen .....	149
Abbildung 54:	Erwartete Kapazitäten der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsasche bis 2029.....	152
Abbildung 55:	Übersicht in Vorbereitung, Planung oder Bau befindlicher Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland, Stand 12/2022 .....	157



Abbildung 56:	Bestand und möglicher Zubau von Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland, Stand 12/2022 .....158
Abbildung 57:	Bestand und möglicher Zubau von Anlagen zur Phosphorrückgewinnung in Deutschland, Stand 12/2022 .....164
Abbildung 58:	Prognose Kapazitätsvergleich zur Phosphorrückgewinnung ausgehend von 1,5 Mio. t <sub>TM</sub> /a Klärschlamm .....165
Abbildung 59:	Schadstoffgehalte der Rezyklate einiger Verfahren und Grenzwerte gemäß DÜMV .....182
Abbildung 60:	P-Löslichkeit der Rezyklate einiger Phosphorrückgewinnungsverfahren .....184
Abbildung 61:	Übersicht möglicher Behandlungspfade für Klärschlamm mit Phosphorrückgewinnung .....193
Abbildung 62:	Behandlungspfad Szenario A .....193
Abbildung 63:	Behandlungspfad Szenario B .....194
Abbildung 64:	Behandlungspfad Szenario C .....194
Abbildung 65:	Behandlungspfad Szenario D .....195
Abbildung 66:	Behandlungspfad Szenario E .....195
Abbildung 67:	Behandlungspfad Szenario F .....196
Abbildung 68:	Massen-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen für Szenario A .....202
Abbildung 69:	Massen-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen für Szenario B .....204
Abbildung 70:	Massen-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen für Szenario C .....205
Abbildung 71:	Massen-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen für Szenario D .....207
Abbildung 72:	Massen-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen für Szenario E .....209
Abbildung 73:	Massen-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen für Szenario F .....211
Abbildung 74:	Wärmebilanzen der Szenarien A bis F .....213
Abbildung 75:	Strombilanzen der Szenarien A bis F .....214
Abbildung 76:	Transportbezogene Energiebilanzen der Szenarien A bis F ...215
Abbildung 77:	KEA der Szenarien A bis F .....216
Abbildung 78:	KEA in Abhängigkeit von der eingesetzten Trocknungswärme .....217
Abbildung 79:	CO <sub>2</sub> -Bilanzen der Szenarien A bis F .....218
Abbildung 80:	Einfluss der externen Energiebereitstellung (Strom, Wärme, Transport) auf die CO <sub>2</sub> -Emissionen .....219
Abbildung 81:	Wirtschaftlichkeitsabschätzung der betrachteten Szenarien 220
Abbildung 82:	Behandlungskosten (einschließlich Erlöse) der Szenarien A bis F in Abhängigkeit von den Erlösen der Phosphorprodukte .....221
Abbildung 83:	Grafische Darstellung der Bewertung der Entsorgungsoptionen .....227
Abbildung 84:	Ergebnis der Nutzwertanalyse .....229
Abbildung 85:	Prüfschema für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. Klärschlammverbrennungsasche .....238
Abbildung 86:	Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario A .....292
Abbildung 87:	Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario B .....293

Abbildung 88:	Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario C .....	293
Abbildung 89:	Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario D .....	294
Abbildung 90:	Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario E .....	294
Abbildung 91:	Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario F.....	295
Abbildung 92:	Sensitivitätsanalyse der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Szenario A .....	296
Abbildung 93:	Sensitivitätsanalyse der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Szenario B .....	296
Abbildung 94:	Sensitivitätsanalyse der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Szenario C .....	297
Abbildung 95:	Sensitivitätsanalyse der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Szenario D .....	297
Abbildung 96:	Sensitivitätsanalyse der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Szenario E .....	298
Abbildung 97:	Sensitivitätsanalyse der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Szenario F.....	298
Abbildung 98:	Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario A..	299
Abbildung 99:	Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario B..	300
Abbildung 100:	Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario C..	300
Abbildung 101:	Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario D..	301
Abbildung 102:	Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario E ..	301
Abbildung 103:	Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario F ..	302

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland.....	37
Tabelle 2:	Steckbrief Stationäre Wirbelschicht .....	43
Tabelle 3:	Steckbrief Drehrohr .....	47
Tabelle 4:	Steckbrief Etagenofen .....	49
Tabelle 5:	Steckbrief Etagenwirbler .....	52
Tabelle 6:	Steckbrief Rostfeuerung.....	54
Tabelle 7:	Steckbrief Staubfeuerung.....	56
Tabelle 8:	Steckbrief Paddelofen (Vorschubofen) .....	59
Tabelle 9:	Steckbrief Klärschlammreformer .....	61
Tabelle 10:	Steckbrief PYREG-Verfahren.....	65
Tabelle 11:	Steckbrief TCR-Verfahren .....	68
Tabelle 12:	Steckbrief T:Cracker, PyroDry-Verfahren .....	70
Tabelle 13:	Steckbrief SynGas-Verfahren.....	73
Tabelle 14:	Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser .....	79
Tabelle 15:	Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Rohschlamm bzw. Überschussschlamm und Faulschlamm .....	82
Tabelle 16:	Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm .....	89
Tabelle 17:	Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsasche.....	94
Tabelle 18:	Stammdaten zu den Phosphorrückgewinnungsverfahren.....	101

Tabelle 19:	Verfahrensspezifische Angaben der Phosphorrückgewinnungsverfahren .....	107
Tabelle 20:	Rezyklat, Nebenprodukt und Reststoffe der Phosphorrückgewinnungsverfahren .....	113
Tabelle 21:	Datenbereitstellung für die jeweiligen Bundesländer.....	121
Tabelle 22:	Verfügbarkeiten der Daten zu den Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklassen 4b und 5 anhand Literaturdaten von Destatis, 2022a und eigenen Daten .....	123
Tabelle 23:	Anvisierte und umgesetzte Phosphorrückgewinnungsverfahren in Deutschland.....	132
Tabelle 24:	Anlagen zur Klärschlammverbrennung in Deutschland .....	135
Tabelle 25:	Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung mittels sonstiger thermischer Behandlungsverfahren in Deutschland .....	140
Tabelle 26:	Kohlekraftwerke zur Klärschlammverbrennung .....	142
Tabelle 27:	Aktueller (Planungs-)Stand großtechnischer Phosphorrückgewinnungsanlagen in Deutschland .....	147
Tabelle 28:	Ermitteltes Klärschlamm- und Klärschlammverbrennungsascheaufkommen der verschiedenen Größenklassen .....	150
Tabelle 29:	Übersicht in Vorbereitung, Planung oder Bau befindlicher Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland.....	153
Tabelle 30:	Kurzzusammenfassung des Hintergrunds der Teilnehmenden der Expertenbefragung.....	159
Tabelle 31:	Kurzzusammenfassung der Ergebnisse der Expertenbefragung .....	160
Tabelle 32:	Abschätzung der Kapazitäten gemäß Expertenbefragung .....	161
Tabelle 33:	Anforderungen an Rezyklat-Düngemittel gemäß DüMV Anlage 2 Tabelle 5.7 bzw. EU-DüPV (EU) 2019/1009 .....	167
Tabelle 34:	Schadstoffgrenzwerte der AbfKlärV, DüMV und EU-DüPV (EU) 2019/1009 .....	168
Tabelle 35:	Produktorientierte Verfahrenszusammenstellung der Phosphor-Rezyklate aus verschiedenen Phosphorrückgewinnungsverfahren .....	170
Tabelle 36:	Produktsteckbrief Struvit.....	171
Tabelle 37:	Produktsteckbrief Calciumphosphat .....	172
Tabelle 38:	Produktsteckbrief Eisen(II)Phosphat (Vivianit).....	173
Tabelle 39:	Produktsteckbrief P-haltiges CSH .....	174
Tabelle 40:	Produktsteckbrief Phosphorsäure.....	175
Tabelle 41:	Produktsteckbrief P-haltiges Ascheprodukt aus nasschemischen Verfahren .....	176

Tabelle 42:	Produktsteckbrief P-haltiges Ascheprodukt aus thermischen Verfahren.....	177
Tabelle 43:	Produktsteckbrief P-haltige Schlacke .....	179
Tabelle 44:	Produktsteckbrief Weißer Phosphor .....	180
Tabelle 45:	Qualitätsmerkmale verschiedener Phosphorsäureklassen ....	186
Tabelle 46:	Zusammenstellung der Nebenprodukte aus der Phosphorrückgewinnung.....	191
Tabelle 47:	Randbedingungen für Klärschlammeigenschaften bei der Betrachtung der Szenarien .....	196
Tabelle 48:	Massen- und Kohlenstoffausbeute des HTC-Prozess (Blöhse, 2017).....	197
Tabelle 49:	Luftzahlen für die Massenbilanzierung der Verbrennung.....	197
Tabelle 50:	Parameter zur Massenbilanzierung der Phosphorrückgewinnung (Kraus et al., 2019) .....	198
Tabelle 51:	Strom- und Wärmebedarfe der Prozesse zur Schlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung.....	199
Tabelle 52:	Parameter zur Energiebilanzierung des Transports (Transmit GmbH; UBA, 2022).....	199
Tabelle 53:	Parameter zur CO <sub>2</sub> -Bilanzierung (Juhlich, 2016; Transmit, 2021; UBA, 2021).....	200
Tabelle 54:	Spezifische Kosten der Prozesse zur Schlammbehandlung- und Phosphorrückgewinnung sowie der Reststoffentsorgung .....	201
Tabelle 55:	Spezifische Erlöse für Produkte der Phosphorrückgewinnung .....	201
Tabelle 56:	Bewertung der Entsorgungsoptionen .....	226
Tabelle 57:	Gewichtung der Bewertungskriterien .....	227
Tabelle 58:	Bewertung der Entsorgungsoptionen .....	228
Tabelle 59:	Angaben zu den Stammdaten .....	248
Tabelle 60:	Angaben zur Abwasserbehandlung.....	248
Tabelle 61:	Angaben zum Klärschlammmanfall und der Klärschlammbehandlung.....	251
Tabelle 62:	Angaben zur Phosphorrückgewinnung .....	253
Tabelle 63:	Müllverbrennungsanlagen zur Klärschlamm-Mitverbrennung in Deutschland.....	256
Tabelle 64:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Multi-Solid .....	258
Tabelle 65:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage NuReSys .....	260
Tabelle 66:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Aiprex Berlin .....	263
Tabelle 67:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Aiprex Mönchengladbach.....	265

Tabelle 68:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage erw. PARFORCE-Ansatz.....	268
Tabelle 69:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage MSE-Verfahren .....	271
Tabelle 70:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage PS- fix .....	274
Tabelle 71:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage EuPhoRe.....	277
Tabelle 72:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage AshDec Variante B .....	279
Tabelle 73:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Drehrohrkessel .....	282
Tabelle 74:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Ash2Phos .....	284
Tabelle 75:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage PHOS4Green .....	287
Tabelle 76:	Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage TetraPhos.....	289



## Abkürzungsverzeichnis

<b>(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Ammoniumsulfat
<b>AbfKlärV</b>	Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost
<b>AOX</b>	Adsorbierbar organisch gebundene Halogene
<b>ASL</b>	Ammoniumsulfat-Lösung
<b>ASN</b>	Abfallschlüsselnummer
<b>AVV</b>	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung)
<b>BAM</b>	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
<b>BImSchV</b>	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
<b>Bio-P</b>	erweiterte biologische Phosphatelimination
<b>C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub></b>	Zitronensäure
<b>CHEM-P</b>	chemische Phosphatelimination
<b>DAP</b>	Diammoniumphosphat
<b>DCP</b>	Dicalciumphosphat
<b>DepV</b>	Verordnung über Deponien und Langzeitlager
<b>Destatis</b>	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
<b>DM</b>	Dry mass
<b>DüMV</b>	Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln
<b>DüV</b>	Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen
<b>DWA</b>	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
<b>E</b>	Einwohner
<b>JMW</b>	Jahresmittelwert
<b>EBS</b>	Ersatzbrennstoff
<b>EVS</b>	Entsorgungsverband Saar
<b>EW</b>	Einwohnerwerte
<b>FS</b>	Faulschlamm
<b>GV</b>	Glühverlust
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	Wasserstoffperoxid
<b>HCl</b>	Salzsäure
<b>HLNUG</b>	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
<b>HTC</b>	Hydro-thermal carbonisation (Hydrothermale Karbonisierung)
<b>HKW</b>	Heizkraftwerk
<b>ICL</b>	Israel Chemicals Ltd., Israelisches Unternehmen
<b>ISA</b>	Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen University
<b>ITAD</b>	Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen e.V.

<b>KA</b>	Kläranlage
<b>KEA</b>	Kumulierter Energieaufwand
<b>KKT</b>	Kommunale Klärschlammverwertung Thüringen
<b>KS</b>	Klärschlamm
<b>KSA</b>	Klärschlammverbrennungsasche
<b>LANUV</b>	Landesverband für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
<b>LCA</b>	Life Cycle Analysis
<b>LCC</b>	Life Cycle Costing
<b>MAP</b>	Monoammoniumphosphat oder auch Magnesiumammoniumphosphat (siehe auch Struvit)
<b>MCP</b>	Monocalciumphosphat
<b>MgO</b>	Magnesiumoxid
<b>MUEEF</b>	Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz
<b>MVA</b>	Müllverbrennungsanlage
<b>NP</b>	Stickstoff Phosphat
<b>NPK</b>	Stickstoff Phosphat Kalium
<b>PK</b>	Phosphat Kalium
<b>NaOH</b>	Natronlauge
<b>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub></b>	Ammoniumnitrat
<b>NH<sub>4</sub>OH</b>	Ammoniumhydroxyd
<b>OS</b>	Originalsubstanz
<b>P</b>	Phosphor
<b>PCB</b>	Polychlorierte Biphenyle
<b>REACH</b>	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
<b>RS</b>	Rohschlamm
<b>SSP</b>	Single Super Phosphat
<b>TDH</b>	Thermodruckhydrolyse
<b>TEER</b>	Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft der RWTH Aachen University
<b>TM</b>	Trockenmasse
<b>TR</b>	Trockenrückstand
<b>TRL</b>	Technology readiness level (Technologie-Reifegrad)
<b>TSP</b>	Triple Super Phosphat
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt, Dessau
<b>ÜSS</b>	Überschussschlamm
<b>VDZ</b>	Verein Deutscher Zementwerke e.V.
<b>VWZ</b>	Verweilzeit
<b>ZV</b>	Zweckverband

## Zusammenfassung

### Hintergrund und rechtliche Rahmenbedingungen

Die Novellierungen von Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und Düngemittelverordnung (DüMV) führen zu einer Neuordnung der Entsorgungspfade für kommunale Klärschlämme. Diese werden bislang in der Landwirtschaft, im Landschaftsbau sowie durch thermische Behandlung in Klärschlammverbrennungsanlagen oder durch Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen oder Zementwerken verwertet. Um den Eintrag von Schadstoffen wie Schwermetalle oder organische Schadstoffe in die Umwelt zu vermeiden, wird die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen zukünftig weitgehend unterbunden. Klärschlamm enthält jedoch auch wichtige Nährstoffe, insbesondere Phosphor (P), welcher von der europäischen Kommission seit 2014 als kritischer Rohstoff eingestuft ist (Europäische Kommission, 2017). Die EU-Staaten sind infolgedessen zu Maßnahmen zur Erhöhung der Nutzungseffizienz und des Recyclings verpflichtet. Als wesentlicher Bestandteil der im Jahr 2017 novellierten AbfKlärV wird die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm daher zukünftig gesetzlich vorgeschrieben. Gleichzeitig werden weitere etablierte Entsorgungspfade, wie die Mitverbrennung, eingeschränkt. Daraus folgt ein steigender Bedarf an Kapazitäten zur Klärschlammverbrennung.

Die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung greift für alle Klärschlämme, die den Grenzwert für Phosphor von 20 g P/kg<sub>TM</sub> überschreiten. Alle Kläranlagen, die ihren Klärschlamm nicht bodenbezogen verwerten, müssen eine verfahrenstechnische Lösung für die Phosphorrückgewinnung wählen. Gegenwärtig befindet sich eine Vielzahl an Verfahren zur Phosphorrückgewinnung in der Entwicklung, die unterschiedliche Technologiereifegrade aufweisen. In dieser Studie wird der aktuelle Stand der Technik der thermischen Klärschlammbehandlung sowie der Phosphorrückgewinnung dargestellt. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sollen die rückzugewinnenden Phosphorprodukte, die Rezyklate, dem Phosphor-Kreislauf wieder zugeführt werden. Je nach Eingangsstoff und Verfahrensführung können Rezyklate hergestellt werden, die Phosphor in chemisch unterschiedlich gebundener Form enthalten. Diese werden anhand ihrer Zusammensetzung und ihrer Einsatzgebiete sowie im rechtlichen Kontext beleuchtet.

Um die gegenwärtig verfügbaren Behandlungskapazitäten zur thermischen Klärschlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung zu erheben, wurden Umfragen bei den Betreibern von Abwasserbehandlungsanlagen, thermischen Klärschlammbehandlungsanlagen und der Phosphorrückgewinnung durchgeführt. Ziel war es, avisierte Behandlungspfade zu ermitteln und ungedeckte Kapazitäten zu identifizieren. Auf Basis der ermittelten Daten wurde eine Prognose zur Entwicklung der thermischen Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphorrückgewinnung erstellt. Zusätzlich wurde durch Expertenbefragungen zum Marktgeschehen eine Prognose zur Entwicklung der Behandlungskapazitäten entwickelt.

Innerhalb verschiedener Szenarien wurden Optionen für die zukünftige Klärschlammentsorgung aufgezeigt. Als Entscheidungsgrundlage wurde eine multikriterielle Nutzwertanalyse für verschiedene Behandlungspfade durchgeführt. Auf Basis dieser Analyse erfolgte die Bewertung, welche der betrachteten Optionen künftig zur Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung beitragen können und welche Rahmenbedingungen dabei einzuhalten sind. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Bewertung wurden Hemmnisse und Schwierigkeiten betrachtet sowie Handlungsempfehlungen entwickelt, die den Verantwortlichen als Entscheidungshilfe dienen sollen.

### **Stand der Technik der Thermischen Klärschlammbehandlung**

Mit einem Anteil von 76,7 % am Gesamtaufkommen von 1,74 Mio. t<sub>TM</sub> im Jahr 2020 ist die thermische Behandlung der derzeit vorherrschende Entsorgungspfad für kommunalen Klärschlamm in Deutschland. Weitere Entsorgungswege sind die landwirtschaftliche Verwertung (14,9 %) und der Einsatz im Landschaftsbau (7,4 %). (Destatis, 2022b)

Von den 1,33 Mio t<sub>TM</sub> an Klärschlämmen, die im Bezugsjahr 2020 thermisch behandelt wurden, kamen 60 % im Rahmen der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen oder Zementwerken zum Einsatz, während 38 % in Klärschlammverbrennungsanlagen (Monoverbrennung) entsorgt wurden. Der Anteil der Nutzung von Mitverbrennungspfaden und die dort eingesetzte Klärschlammmenge nahm über die letzten Jahre stetig zu; im Jahr 2015 lag der Anteil bei lediglich 39 %. (Destatis, 2022b)

Durch die zukünftige Pflicht zur Phosphorrückgewinnung werden Mitverbrennungspfade stark eingeschränkt. Hieraus resultiert eine künftige Verlagerung von Stoffströmen aus der Mitverbrennung zur Klärschlammverbrennung, mit erhöhtem Bedarf an Kapazitäten.

Das derzeit in Deutschland etablierte Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung ist die stationäre Wirbelschichtfeuerung. In 23 der 29 zum Berichtszeitpunkt großtechnisch betriebenen Klärschlammverbrennungsanlagen wird diese Feuerungsbauart genutzt. Weitere, nur vereinzelt eingesetzte Apparate zur Klärschlammverbrennung sind Drehrohre, Etagenöfen, Etagenwirbler und Rostfeuerungen. Neben Verfahren zur Klärschlammverbrennung und Klärschlammmitverbrennung werden derzeit vereinzelt sonstige Behandlungsverfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung, wie die Pyrolyse oder die Klärschlammvergasung, erprobt. Ihr Anteil am thermisch behandelten Klärschlamm ist jedoch gering.

### **Stand der Technik der Phosphorrückgewinnung**

Die Phosphorrückgewinnung kann aus den Stoffströmen Schlammwasser, Faulschlamm (Geltungsbereich Wasserrecht) bzw. Klärschlamm sowie der Klärschlammverbrennungsasche (Geltungsbereich Abfallrecht) erfolgen. Die Optionen der Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser sowie dem Faulschlamm zielen darauf ab, den Phosphorgehalt im Klärschlamm auf Werte unter 20 g P/kg<sub>TM</sub> zu reduzieren. Im Geltungsbereich der AbfKlärV muss der Phosphorgehalt im Klärschlamm durch ein geeignetes Phosphorrückgewinnungsverfahren entweder unter 20 g P/kg<sub>TM</sub> reduziert werden oder die Phosphorrückgewinnungseffizienz für Schlämme mit Ausgangsgehalten von über 40 g P/kg<sub>TM</sub> muss oberhalb 50 % liegen. Für Verfahren, die Phosphor aus Klärschlammverbrennungsasche rückgewinnen, ist eine Rückgewinnungsquote von mindestens 80 % vorgeschrieben.

Technologien zur Phosphorrückgewinnung stehen in ihrer Entwicklung noch am Anfang. Eine bevorzugte Lösung gibt es aktuell nicht. Es ist davon auszugehen, dass es künftig nicht nur eine bevorzugte Verfahrenstechnologie geben wird. Die Zusammensetzung der Klärschlämme ist zu verschieden, um für alle Verfahren gleichermaßen geeignet zu sein. Im Rahmen einer Literaturrecherche und einer Befragung von Verfahrensentwicklern wurde für 30 Phosphorrückgewinnungsverfahren ein technischer Überblick zusammengestellt. Die Verfahrensauswahl wurde anhand des technologischen Reifegrads (TRL) getroffen. Es wurden Verfahren mit mindestens TRL 6 berücksichtigt.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind einige Technologiebausteine bzw. Verfahren zur Phosphorrückgewinnung vollständig einsatzbereit. Kombinationsprozesse und die Einbindungen von Pilotanlagen in die Kläranlagenperipherie werden im Rahmen von Förderprojekten getestet sind allerdings noch zu wenig erprobt. Der Großteil der Ansätze zur Phosphorrückgewinnung ist an die jeweiligen spezifischen Anforderungen der

Rückgewinnungsaufgabe angepasst und zentral von der zukünftigen rechtlichen Auslegung abhängig. Weitere Optimierungen sind erforderlich, besonders bezüglich der Rückgewinnungseffizienz, der Rezyklat-Qualitäten sowie der Energie- und Betriebsmittelbedarfe. Dazu sind belastbare ökologische (LCA) und ökonomische (LCC) Untersuchungen notwendig. Absehbar ist, dass aufgrund der Komplexität vieler Verfahren, insbesondere der nasschemischen Technologien, nur Anlagen mit sehr großen Kapazitäten wirtschaftlich sinnvoll sein werden.

### **Rezyklate**

Um die Eignung eines Produkts zu evaluieren, ist maßgeblich, ob es im Markt Anwendung findet und wirtschaftlich tragfähig ist. Rezyklate, die den rechtlichen Vorgaben entsprechen, stellen als Sekundärrohstoffe eine Alternative zu fossil gewonnenen Rohstoffen dar. Sie sind vielseitig einsetzbar, sowohl als Düngemittel oder Intermediate in der Düngemittelindustrie als auch für industrielle Anwendungen. Der rückgewonnene Phosphor sollte dabei möglichst vollständig genutzt werden und im besten Fall als Sekundärrohstoff weniger umweltfreundliche Primärrohstoffe ersetzen.

Über gesicherte Verwertungswege für Rezyklate lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt kaum Aussagen treffen, da keine nennenswerten Produktmengen auf dem Markt verfügbar sind. Da Rezyklate teils neuartige Produkte darstellen, die es ausreichend zu charakterisieren gilt, ist der rechtliche Status bezüglich der Anwendung für bestimmte Zwecke (z. B. Zulassung als Zusatzstoff für die Lebensmittelindustrie) ungeklärt. Die Aufnahme als zulässiger Stoff und die Einschätzung der verantwortlichen Akteure zu den Gesundheitsschutzanforderungen benötigt Zeit. Außerdem gestaltet sich die Charakterisierung der Produkte in Verbindung mit geforderten Qualitätssicherungsmaßnahmen als nicht trivial. Neben der Pflanzenverfügbarkeit muss der Schadstoffeintrag in die Umwelt kontrolliert, also die Schadstofffracht im Produkt analysiert werden. Die Charakterisierung der Produkte erfordert weitestgehend konstante Qualitäten. Analysen der Rezyklate verschiedener Phosphorrückgewinnungsverfahren zeigen, dass die Vorschriften und Grenzwerte der DüMV eingehalten werden können. Bei der Beurteilung von Rezyklaten scheitert die Anwendung konventioneller Löslichkeitskriterien zur Qualitätsbewertung. Die Rezyklate weisen, trotz Unterschreitung der rechtlich festgelegten Wasserlöslichkeit, in Topfversuchen eine gute Pflanzenverfügbarkeit für Phosphor auf. Die Bestimmung der Pflanzenverfügbarkeit über Topfversuche lässt aufgrund fehlender Standardisierung von Wachstumsversuchen und der Verwendung unterschiedlicher Böden und Kulturen eine vergleichende Betrachtung nicht zu. Um dem Grundgedanken der Wiederverwendung gerecht zu werden, muss die Wirksamkeit eines Rezyklates geprüft werden. Um den Anforderungen der Industrie gerecht zu werden, müssen die Rezyklate in gleichbleibender Qualität bei möglichst konstant großen Mengen verfügbar sein und die geltenden rechtlichen Vorschriften einhalten. Viele potenzielle Abnehmer sind derzeit noch zögerlich mit Aussagen bezüglich des Einsatzes von Rezyklaten. Zudem bestimmen der Eingangsstoff und die Funktionsweise des Phosphorrückgewinnungsverfahrens die Rezyklat-Zusammensetzung. So ermöglicht es nicht jedes Verfahren, schadstoffreiche bzw. kontaminierte Eingangsstoffe einzusetzen, um ein „sauberes“ Produkt zu erzielen. Insgesamt ist es nötig, die Phosphorrückgewinnungsverfahren technologisch voranzutreiben und Anreize zur Rezyklatabnahme und -verwertung zu schaffen.

### **Bestandsanalyse Abwasserbehandlung**

Um den aktuellen Status der Abwasserbehandlungsanlagen in Deutschland zu erfassen, wurden für die Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5 Daten zur Abwasserbehandlung, klärschlammbezogene Daten, wie beispielsweise die einzelnen Entsorgungswege, sowie Daten zu aktuellen bzw. zukünftigen Plänen zur Umsetzung der Phosphorrückgewinnung recherchiert und



abgefragt. Ziel der Bestandsanalyse war es, Daten aller direkt von technischen Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung betroffenen Kläranlagen zu evaluieren. Einige Bundesländer konnten nicht im vollen Umfang betrachtet werden, da beispielsweise größenklassenspezifische Daten, insbesondere zur Größenklasse 4b, nicht zur Auswertung zur Verfügung standen. Da insbesondere das größenklassenspezifische Klärschlamm-aufkommen für Bayern und Baden-Württemberg nicht verfügbar war, wurde das Gesamt-Klärschlamm-aufkommen zur Phosphorrückgewinnung anhand veröffentlichter Klärschlamm-daten des statistischen Bundesamts abgeschätzt (vgl. Tabelle 16). Dies ergab eine Abschätzung des Gesamt-Klärschlamm-aufkommens zur technischen Phosphorrückgewinnung von 1,5 Mio.  $t_{TM}$ .

### **Bestandsanalyse und Entwicklungsprognose Thermische Klärschlammbehandlung**

Zum Berichtszeitpunkt werden in Deutschland 29 Klärschlammverbrennungsanlagen mit einer theoretischen Gesamtkapazität von 1.127.455  $t_{TM}/a$  betrieben. In sieben dieser Anlagen werden vorwiegend industrielle Klärschlämme verbrannt. Somit ergeben sich aus den übrigen 22 Anlagen, in denen hauptsächlich kommunale Klärschlämme zum Einsatz kommen, theoretische Verbrennungskapazitäten von 880.752  $t_{TM}/a$ . Für das Jahr 2020 wurden in 23 Klärschlammverbrennungsanlagen, die an einer Betreiberbefragung teilgenommen haben, genehmigte Kapazitäten von 958.253  $t_{TM}/a$  (inkl. Kapazitäten für die Behandlung industrieller Schlämme) ermittelt. Demgegenüber steht eine tatsächlich behandelte Klärschlamm-menge von ca. 731.137  $t_{TM}$ . Dies entspricht einem Ausnutzungsgrad der genehmigten Kapazitäten von 76,3 %. Die entsprechende Klärschlamm-menge, die in 16 Verbrennungsanlagen (Teilnahme an der Befragung), in denen vorwiegend kommunale Klärschlämme verbrannt werden, zum Einsatz kommt, beläuft sich auf 515.544  $t_{TM}$ . Ausgehend von einer in Deutschland im Jahr 2020 insgesamt angefallenden kommunalen Klärschlamm-menge von 1.740.556  $t_{TM}$ , wurde somit ca. 30 % des kommunalen Klärschlamm-aufkommens in Klärschlammverbrennungsanlagen behandelt. Die vorhandenen 16 Anlagen hätten bei voller Ausnutzung der genehmigten Kapazitäten eine Behandlung von 41 % der anfallenden Schlämme ermöglicht.

Neben Verfahren zur Klärschlammverbrennung konnten acht Anlagen zur sonstigen thermischen Klärschlammbehandlung identifiziert werden. Die in Recherchen und Betreiberbefragungen ermittelten genehmigten Kapazitäten von sieben dieser acht Anlagen ergeben sich zu 11.744  $t_{TM}/a$ . Demgegenüber steht eine im Jahr 2020 tatsächlich behandelte Klärschlamm-menge von 2.756  $t_{TM}$  (Ausnutzungsgrad 23,5 %).

Als weiterer thermischer Verwertungspfad stehen Kapazitäten zur Klärschlammmitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen, Kohlekraftwerken und Zementwerken zur Verfügung. Die Erfassung dieser Kapazitäten erweist sich angesichts der unzureichenden Datenlage und eingeschränkter Befragungsbeteiligung der Anlagenbetreiber als schwierig. Im Rahmen dieser Studie konnte im Bezugsjahr 2020 für den Mitverbrennungspfad eine genutzte Kapazität von 674.060  $t_{TM}$  ermittelt werden. Davon entfallen 320.230  $t_{TM}$  auf Kohlekraftwerke, 204.821  $t_{TM}$  auf Müllverbrennungsanlagen und 149.009  $t_{TM}$  auf Zementwerke.

Die Bedeutung der Klärschlammverbrennung wird in den kommenden Jahren zunehmen. Neben den 29 Bestandsanlagen zur Klärschlammverbrennung und den acht Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung mittels sonstiger thermischer Behandlungsverfahren, existieren zum Berichtszeitpunkt 44 durch die Autoren identifizierte Vorhaben zur Errichtung neuer Anlagen. Ein Großteil dieser Anlagen ist als stationäre Wirbelschichtfeuerung geplant. Würden alle 44 Vorhaben umgesetzt, ergäben sich bis zum Jahr 2029 neue Kapazitäten zur thermischen Klärschlammbehandlung von 1.332.656  $t_{TM}/a$ . Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Planungen von Ersatzbauten stünden bei Umsetzung aller Vorhaben zusätzliche Kapazitäten von 1.175.566  $t_{TM}/a$  zur Verfügung. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle geplanten

Vorhaben tatsächlich umgesetzt werden, wurde im Rahmen der Studie eine Expertenbefragung zur Umsetzungswahrscheinlichkeit einzelner Vorhaben durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Expertenbefragung wurden drei verschiedene Szenarien abgeleitet. In Szenario 1 wurden nur Vorhaben berücksichtigt, die sich gemäß Kenntnis der Autoren bereits im Bau befinden oder deren Umsetzung in der Expertenbefragung als wahrscheinlich eingeschätzt wurden. In diesem konservativen Szenario ergeben sich bis zum Jahr 2029 zusätzliche Kapazitäten zur thermischen Klärschlammbehandlung in Höhe von 312.000 t<sub>TM</sub>/a (8 Anlagen). Mit steigender Umsetzungswahrscheinlichkeit in der Expertenbefragung ergeben sich in den Szenarien 2 und 3 Kapazitäten in Höhe von 500.854 t<sub>TM</sub>/a (20 Anlagen) bzw. 851.210 t<sub>TM</sub>/a (33 Anlagen).

### **Bestandsanalyse und Entwicklungsprognose Phosphorrückgewinnung**

Derzeit sind in Deutschland zwei Phosphorrückgewinnungsanlagen großtechnisch umgesetzt. Die TetraPhos-Anlage in Hamburg und die PHOS4Green/Seraplant-Anlage in Haldensleben zielen beide auf einen nasschemischen Aufschluss der Klärschlammverbrennungssasche. Die kommerzielle Inbetriebnahme der TetraPhos-Anlage wird für Mitte 2023 erwartet, der Betrieb der PHOS4Green/Seraplant-Anlage ist im September 2022 aufgrund eines Insolvenzverfahrens eingestellt worden. Das TetraPhos-Verfahren ist in Hamburg am Standort der Kläranlage Köhlbrandhöft umgesetzt und mit seiner Kapazität darauf ausgelegt, die vor Ort anfallende Klärschlammverbrennungssasche (ca. 20.000 t/a) zu behandeln. Die Besonderheit liegt in dem verhältnismäßig hohen Phosphorgehalt von durchschnittlich 10 % in der Hamburger Klärschlammverbrennungssasche. Die PHOS4Green-Anlage in Haldensleben besitzt keinen Verfahrensschritt zur Schadstoff-Ausschleusung. Dies führt zu Einschränkungen bei der Annahme der einsetzbaren Klärschlammverbrennungssaschen, welche die Grenzwerte der DüMV bereits einhalten müssen (DüMV Anlage 2, Tabelle 7.3.16 in Verbindung mit Tabelle 7.4.3).

Um Voraussagen zu den zukünftig nötigen Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. Klärschlammverbrennungssasche zu erstellen, sind die Phosphorrückgewinnungstechniken hinsichtlich ihrer Effizienz und Technologiereife sowie im Hinblick auf die Erfüllung der Vorgaben der AbfKlärV zu betrachten. Welche Verfahrenstechnologien zum geforderten Zeitpunkt in die Großtechnik umgesetzt sein werden, lässt sich aktuell nicht vorhersagen. Dafür sind die Verfahren noch nicht ausreichend erprobt und viele Klärschlammerzeuger bzw. Klärschlammentsorger haben sich noch nicht auf ein Verfahren festgelegt. Zum Berichtszeitpunkt befinden sich bereits einige Anlagen in der Umsetzung bzw. wurde eine Umsetzung der Anlagen angekündigt.

Eine Hochrechnung auf Basis der vorhandenen Datenlage zur den bekannten Phosphorrückgewinnungskapazitäten ergibt bis 2029 eine Behandlungskapazität von 41 % für ein zu behandelndes Klärschlamm-aufkommen von 1,5 Mio. t<sub>TM</sub> Klärschlamm. Die Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm decken ca. 7 %, jene zur Rückgewinnung aus Klärschlammverbrennungssasche 34 % ab. Für 59 % des prognostizierten Klärschlamm-aufkommens sind bisher keine geplanten Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung bekannt.

### **Technologiebewertung und Entsorgungsoptionen**

Um eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Entsorgungspfade und Verfahrensketten schaffen zu können, wurden im Rahmen der Studie sechs unterschiedliche Szenarien zur Klärschlamm-entsorgung entwickelt. Für diese Szenarien wurden Massen-, Energie- und vereinfachte CO<sub>2</sub>-Bilanzen aufgestellt und um eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit ergänzt. Die Ergebnisse dieser Bilanzierungen dienten teilweise als Bewertungsgrundlage für die multikriterielle Nutzwertanalyse. Die folgenden Szenarien wurden betrachtet:

- ▶ Szenario A: Phosphorrückgewinnung auf der Abwasserbehandlungsanlage mit anschließender Mitverbrennung im Zementwerk
- ▶ Szenario B: Klärschlammverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche und nachfolgender Ascheverwertung (Bergversatz)
- ▶ Szenario C: Klärschlammverbrennung mit anschließender Aschebehandlung und vollständiger bodenbezogener Verwertung zu Düngezwecken
- ▶ Szenario D: Unzureichende Phosphorrückgewinnung auf der Abwasserbehandlungsanlage und Klärschlammverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche
- ▶ Szenario E: Erzeugung eines kohlenstoffhaltigen Prozessrückstands mittels Pyrolyse mit anschließender energetischer Verwertung, Phosphorrückgewinnung und Ascheverwertung
- ▶ Szenario F: Erzeugung eines kohlenstoffhaltigen Prozessrückstands mittels HTC-Verfahren mit anschließender energetischer Verwertung, Phosphorrückgewinnung und Ascheverwertung

Die höchsten Wärmebedarfe weisen die Szenarien A und E auf, während die Szenarien B, C und D unter Einsatz von Klärschlammverbrennungsverfahren einen geringeren Wärmebedarf haben. Analog zum Wärmebedarf haben die Szenarien A und E auch den höchsten Strombedarf, während die Szenarien B und D den geringsten Strombedarf zeigen. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die Szenarien B, D und F ihren Strombedarf vollständig aus der Eigenherzeugung der thermischen Anlagen decken können. Szenario A hat mit  $840 \text{ kWh/t}_{\text{KS},25\%\text{TR}}$  ebenfalls den mit Abstand höchsten kumulierten Energieaufwand sowie mit  $460 \text{ kg CO}_2/\text{t}_{\text{KS},25\%\text{TR}}$  den größten  $\text{CO}_2$ -Ausstoß, während die Szenarien B, C und D mit  $155\text{-}161 \text{ kWh/t}_{\text{KS},25\%\text{TR}}$  einen deutlich geringeren Energieaufwand bzw. mit ca.  $286 \text{ kg CO}_2/\text{t}_{\text{KS},25\%\text{TR}}$  die geringsten  $\text{CO}_2$ -Emissionen aufweisen.

### Nutzwertanalyse der Entsorgungsoptionen

Um eine Vergleichsbasis für die in der Technologiebewertung entwickelten Entsorgungsszenarien zu schaffen, wurde eine multikriterielle Nutzwertanalyse durchgeführt. Die Szenarien wurden auf Basis unterschiedlicher Kriterien miteinander verglichen, um so eine Entscheidungsgrundlage für zu bevorzugende Entsorgungspfade zur Verfügung zu stellen. Die Auswahl der fünf Bewertungskriterien erfolgte so, dass sie eine möglichst geringe Schnittmenge untereinander aufweisen und Redundanzen bei der Bewertung vermieden werden. Die sechs Entsorgungsszenarien wurden in den Kriterien Behandlungskosten, Arbeits- und Betriebssicherheit, Anlagenverfügbarkeit, Betriebsaufwand und Energieaufwand verglichen. Auf Basis der Ergebnisse der Nutzwertanalyse ist der am besten bewertete Entsorgungspfad die Klärschlammverbrennung mit anschließender Aschebehandlung und vollständiger bodenbezogener Verwertung zu Düngezwecken (Szenario C). Nur geringfügig schlechter war die Klärschlammverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche und nachfolgender Ascheverwertung (Szenario A). Am schlechtesten bewertet wurden die Erzeugung eines kohlenstoffhaltigen Prozessrückstands mittels Pyrolyse mit anschließender energetischer Verwertung, Phosphor-Extraktion und Ascheverwertung (Szenario E) sowie die Erzeugung eines kohlenstoffhaltigen Prozessrückstands mittels HTC-Verfahren (Szenario F).

### Hemmnisse und Schwierigkeiten

Entscheidungen für den Bau großtechnischer Phosphorrückgewinnungsanlagen sind derzeit selten. Verfahrenstechnische Herausforderungen, unkalkulierbare Verzögerungen in

Lieferketten für den Anlagenbau sowie Bedenken bezüglich der Bereitstellung von Betriebsmitteln erschweren die Entscheidungsfindung. Da zum jetzigen Zeitpunkt kein Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Asche großtechnisch im kommerziellen Betrieb ist und Rezyklate nicht in marktüblichen Mengen produziert werden können, ist die Charakterisierung und Marktetablierung der Rezyklate verzögert. Ebenso gibt es Unsicherheiten bezüglich der Rezyklatabnahme bzw. -verarbeitung, sowohl auf Seiten der Betreiber von Phosphorrückgewinnungsanlagen als auch auf Seiten der Düngemittelindustrie.

Dennoch werden bis zum Jahr 2029 einige Phosphorrückgewinnungskapazitäten geschaffen. Diese decken voraussichtlich etwa 41 % des in dieser Studie prognostizierten Gesamt-Klärschlämmaufkommens ab, welches künftig einer Phosphorrückgewinnung unterzogen werden muss. Zur fristgerechten Phosphorrückgewinnung ist es notwendig, dass sich die Klärschlammerzeuger intensiv mit den verfügbaren Technologien beschäftigen und sich zeitnah für ein Verfahren entscheiden. Ein Großteil der in dieser Studie dargestellten großtechnischen Phosphorrückgewinnungsverfahren für Klärschlamm und Klärschlammverbrennungsasche wird in den nächsten Jahren gebaut bzw. in Betrieb gehen. Um zukünftig sicherzustellen, dass die Pflichten zur Phosphorrückgewinnung erfüllt werden, ist es erforderlich, dass die Betroffenen zeitnah eine Entscheidung für eine der aufgezeigten Strategien zur Phosphorrückgewinnung treffen. Um die Entscheidung bzgl. des zu behandelnden Stoffstroms zu erleichtern, wurde auf Basis der ermittelten Ergebnisse ein Prüfschema aufgestellt. Die Entscheidung für eine spezifische Verfahrenstechnologie ist dadurch zwar nicht ohne Weiteres abzubilden, schränkt jedoch die in Frage kommenden Verfahrenstypen bzw. Einsatzstellen ein. Außerdem beschränken die Vorgaben der DüMV den Einsatz von höher metallbelasteten Klärschlämmen bzw. Klärschlammverbrennungsaschen zur direkten Erzeugung von Düngemitteln. Dies führt dazu, dass Verfahren trotz integrierter Schadstoffausschleusung kein Düngeprodukt herstellen dürfen. Somit stehen für höher belastete Klärschlämme bzw. Klärschlammverbrennungsaschen nur nasschemische oder thermochemische Verfahren zur Erzeugung von Phosphorsäure zur Verfügung.

Es ist erforderlich, dass sich die Klärschlammerzeuger mit der Zusammensetzung ihres Eingangsstoffs zur Phosphorrückgewinnung auseinandersetzen und die Möglichkeiten zur Phosphorrückgewinnung evaluieren. Die Verfahren benötigen weitere Optimierungen. Die Grenzen der Prozesse werden erst über den standardisierten kontinuierlichen Betrieb ersichtlich werden. Dazu ist es notwendig, zeitnah großtechnische Anlagen umzusetzen, um bis zum Jahr 2029 entsprechende Kapazitäten und Erfahrungen verfügbar zu machen. Darunter fallen insbesondere auch Technologien, die für Klärschlämme bzw. Klärschlammverbrennungsaschen geeignet sind, die hohe Schadstoffgehalte aufweisen, aber gemäß AbfKlärV einer Phosphorrückgewinnung zuzuführen sind. Neben einer unmittelbaren Phosphorrückgewinnung besteht die Möglichkeit, Klärschlammverbrennungsaschen zwischenzulagern und einer späteren Phosphorrückgewinnung zu unterziehen. Die Zwischenlagerung kann eine Übergangslösung darstellen, falls bis 2029 keine ausreichenden Anlagenkapazitäten zur Verfügung stehen. Es muss jedoch geeigneter Deponieraum vorhanden sein bzw. geschaffen werden und die Rückholung der Klärschlammverbrennungsaschen zur späteren Aufbereitung und Mitverarbeitung sichergestellt werden. Hierfür müssen die entsprechenden Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung aus den zwischengelagerten Aschen beim Anlagenausbau mitberücksichtigt werden.

## Summary

The amendments to the Sewage Sludge Ordinance (AbfKlärV) and Fertilizer Ordinance (DüMV) lead to a reorganization of the disposal pathways for municipal sewage sludge. Up to now, these have been utilized in agriculture, landscaping, as well as through thermal treatment in sewage sludge incineration plants or co-incineration in coal-fired power plants, waste incineration plants, or cement plants. To ensure that pollutants such as heavy metals or organic contaminants are not released into the environment, agricultural utilization of sewage sludge will be largely prevented. However, sewage sludge is rich in important nutrients, especially phosphorus (P), which was classified by the EU-commission as a critical resource in 2014 (European Commission, 2017). Subsequently, EU-countries are obligated to increase the usage efficiency and to commit to recycling. As an essential part of the amendment to AbfKlärV, the recovery of phosphorus from sewage sludge is required by law. At the same time, other established disposal pathways, such as co-incineration, are being restricted. Therefore, the demand for sewage sludge mono-incineration capacity is increasing.

The obligation to recover phosphorus applies to all sewage sludges exceeding the limit value of 20 g/kg<sub>DM</sub>. All wastewater treatment plants, that do not utilize their sewage sludge in agriculture, have to choose a process for phosphorus recovery. There is currently a variety of processes being developed, which show different stages of technological readiness. In this study, the state of the art of thermal sewage sludge treatment as well as phosphorus recovery is being discussed. To achieve a circular economy the recovered phosphorus is supposed to be reintroduced in the phosphorus cycle. Depending on the input material and process approach, recyclates can be produced containing phosphorus in chemically diverse bound forms. These are examined on the basis of their composition and their areas of application as well as in the legal context.

To assess the available treatment capacities for thermal sewage sludge treatment, surveys were conducted among the operators of wastewater treatment plants, thermal sewage sludge treatment plants and phosphorus recovery. The aim was to determine current recommended treatment paths and to identify uncovered capacities. Based on the data obtained, a forecast of the development of thermal sewage sludge treatment and phosphorus recovery was made. Furthermore, a forecast for the development of treatment capacities was developed through expert interviews on market developments.

Within several scenarios, different options for the future sewage sludge disposal were identified. A multi-criteria utility analysis for different treatment pathways was performed as a basis for decision making. Based on this analysis, it was evaluated which of the options for future sewage sludge treatment and phosphorus recovery could be advantageous and what framework conditions need to be met. The results were used to identify barriers and difficulties as well as recommendations for measures to support decision making.

### State of the Art of Thermal Sewage Sludge Treatment

With a share of 76.7% of the total of 1.74 million t<sub>DM</sub> in the year 2020, the majority of the municipal sewage sludge in Germany was thermally treatment. Other disposal pathways were utilization in agriculture (14.9%) and landscaping (7.9%). (Destatis, 2022b)

Of the 1.33 million t<sub>DM</sub> of sewage sludge thermally treated in the reference year 2020, 60 % was disposed of by co-incineration in coal-fired power plants, waste incineration plants, or cement plants, while 38 % was disposed of in sewage sludge incineration plants (mono-incineration). The share of co-incineration paths and the amount of sewage sludge used there has been steadily increasing in recent years; in 2015, the rate was only 39%. (Destatis, 2022b)



The future obligation to recover phosphorus will severely limit co-incineration paths. This will result in a future shift of material flows from co-incineration to sewage sludge incineration, with increased capacity requirements.

The most established process for thermal sewage sludge treatment in Germany is the fluidized bed incineration. In 23 of the 29 large-scale sewage sludge incineration plants, this process is currently being used. Furthermore, rotary kilns, multiple hearth furnaces, combined multiple hearth fluidized bed furnaces and grate furnaces are used less frequently. In addition to the classic sewage sludge incineration and sewage sludge co-incineration processes, there are some other treatment processes, such as pyrolysis or sewage sludge gasification. However, the proportion of sewage sludge thermally treated in this way is very small.

### **State of the Art of Phosphorus Recovery**

Phosphorus recovery can be conducted from sewage liquor, digested sludge (Scope of water law), sewage sludge or sewage sludge ash respectively (Scope of waste law). The phosphorus recovery from sewage liquor or digested sludge aims to reduce the phosphorus content under 20 g P/kg<sub>DM</sub>. In order to comply with the requirements of the AbfKlärV, the phosphorus concentration must be reduced to below the limit value of 20 g P/kg<sub>DM</sub> by means of a phosphorus recovery process or, if the sludge has a concentration of 40 g P/kg<sub>DM</sub> or more, the phosphorus recovery efficiency must be above 50%. For processes that recover phosphorus from sewage sludge ash, a recovery rate of 80% is required.

Technologies for phosphorus recovery are still in early stages of development. There is not yet a preferred solution. It is most likely, that there will be more than one preferred process in future. The composition of sewage sludge is too diverse to be equally suitable for all processes. Through literature research and the consultation of process developers, a technical overview of 30 phosphorus recovery processes was conducted. The specific processes were selected based on their technology readiness level (TRL), as only processes with a TRL of at least 6 were considered.

There are currently a number of operational processes for phosphorus recovery. Combination processes and integration of pilot plants in the periphery of wastewater treatment plants are being tested in funding projects. However, they have not been in operation long enough. Most phosphorus recovery technologies are optimized for specific requirements. Further improvements are needed, especially in regard to the recovery efficiency, the recycle quality as well as the energy and resource demand. It is clear that due to the complexity of the various processes, especially the wet-chemical processes, only plants with large capacities can be economically successful.

### **Recyclates**

To evaluate the qualification of a product it is essential to know if it has an application in the market and if it is economically sensible. Recyclates that meet regulatory requirements are secondary resources and an alternative to fossil resources. They are versatile, as they can be utilized as fertilizer, as an intermediate for the fertilizer industry, or in an industrial application. Recovered phosphorus as a secondary resource is more environmentally friendly and replaces commonly used primary resources.

Since there are very small quantities of recyclates on the market, secured utilization routes are not established yet. Recyclates are, at least partially, a new product that has not yet been sufficiently characterized, so the legal status for certain applications (as food additives) is still undecided. The authorization as a permitted additive and the assessment by officials in regard to the safety requirements needs time. Furthermore, the characterization of the product in relation

to the quality assurance measures is not trivial. Moreover, alongside the plant availability, the release of pollutants into the environment and the pollutant load need to be analyzed. The characterization of the product requires constant quality. Data on recyclates from various phosphorus recovery processes show that the regulations and limit values of the DüMV can be met. An issue in assessing the recyclates is that conventional quality analysis fails because the solubility of the product is quite low. Nevertheless, even though the recyclates fall below the legally required water solubility, the plant availability in pot experiments is good. The comparability of these pot experiments is rather poor due to the lack of standardized growing experiments and the usage of different soils. Therefore, the effectiveness of the recycle needs to be thoroughly tested. To meet the requirements of the industry, recyclates must be readily available in large quantities while meeting the legal requirements. Many potential customers are still unsure whether to give any proposition to utilize recyclates. Furthermore, the recycle composition is determined due to the source compound as well as the methodology used for the phosphorus recovery. Overall, it is necessary to promote technological research for phosphorus recovery processes to increase recycle usage.

### **Status Analysis Wastewater**

To assess the current status of wastewater treatment plants in Germany, data on wastewater treatment, sludge-related data such as individual disposal methods, and data on current or planned implementation of phosphorus recovery were investigated and collected for sewage treatment plants of size categories 4b and 5. The aim of the inventory analysis was to evaluate data for all wastewater treatment plants directly affected by technical measures for phosphorus recovery. Some federal states could not be fully considered due to the lack of size-specific data, especially for size category 4b. As size-specific sludge generation data for Bavaria and Baden-Württemberg were not available, the total sludge generation for phosphorus recovery was estimated using published sludge data from the Federal Statistical Office (see Table 16). This resulted in an estimated total amount of sewage sludge for technical phosphorus recovery of 1.5 million  $t_{DM}$ .

### **Status Analysis and Development Forecast Thermal Sludge Treatment**

As of the reporting period, there are 29 sewage sludge incineration plants in Germany with a theoretical total capacity of 1,127,455  $t_{DM}/a$ . Seven of these plants primarily incinerate industrial sludges. Thus, the remaining 22 plants, which mainly incinerate municipal sewage sludge, have a theoretical incineration capacity of 880,752  $t_{DM}/a$ . For 2020, 23 sewage sludge incineration plants that participated in the operator survey, had approved capacities of 958,253  $t_{DM}/a$  (including capacities for treating industrial sludges). In contrast, the actual amount of treated sewage sludge was 731,137  $t_{DM}$ , resulting in a utilization rate of 76.3% of the approved capacities. The corresponding amount of sewage sludge treated in 16 incineration plants (participating in the survey), which mainly incinerate municipal sewage sludge, amounts to 515,544  $t_{DM}$ . Based on a total municipal sewage sludge generation in Germany of 1,740,556  $t_{DM}$  in 2020, about 30% of the municipal sewage sludge was treated in mono-incineration plants. The existing 16 plants, if fully utilized, could have treated 41% of the sewage sludge generated.

In addition to incineration processes, eight plants for other thermal sludge treatment processes were identified. The approved capacities for seven of these eight plants, identified through research and operator surveys, amount to 11,744  $t_{DM}/a$ . In contrast, the actual amount of sewage sludge treated in 2020 was 2,756  $t_{DM}$  (utilization rate of 23.5%).

Another thermal utilization pathway is the co-incineration of sewage sludge in waste incineration plants, coal-fired power plants, and cement plants. Due to insufficient data and limited participation from plant operators, these capacities were difficult to measure. Within the

framework of this study, a used capacity of 674,060 t<sub>DM</sub> could be determined for the co-incineration pathway in the reference year 2020. This includes 320,230 t<sub>DM</sub> for coal-fired power plants, 204,821 t<sub>DM</sub> for waste incineration plants, and 149,009 t<sub>DM</sub> for cement plants.

The importance of sewage sludge incineration is expected to increase in the coming years. In addition to the 29 existing incineration plants and eight plants for other thermal sludge treatment, the authors identified 44 projects for the construction of new plants. Most of these are planned as stationary fluidized bed incinerators. If all 44 projects were realized, new thermal sludge treatment capacities of 1,332,656 t<sub>DM</sub>/a would be available by 2029. Including replacement projects, the implementation of all these projects would provide additional capacity of 1,175,566 t<sub>DM</sub>/a. Since not all of the planned projects are likely to be realized, the study included an expert survey on the likelihood of implementation of individual projects. Three different scenarios were derived from the results of this expert survey. Scenario 1 considers only projects that are already under construction to the best of the authors knowledge, or are likely to be implemented according to the results of the expert survey. In this conservative scenario, additional thermal sludge treatment capacities of 312,000 t<sub>DM</sub>/a (8 plants) would be available by 2029. With decreasing likelihood of implementation in the expert survey, scenarios 2 and 3 would provide capacities of 500,854 t<sub>DM</sub>/a (20 plants) and 851,210 t<sub>DM</sub>/a (33 plants), respectively.

#### **Status Analysis and Development Forecast Phosphorus Recovery**

Currently, two large-scale phosphorus recovery plants are in operation in Germany. The TetraPhos plant in Hamburg and the PHOS4Green/Seraplant plant in Haldensleben both use wet-chemical digestion of sewage sludge ash. The commercial start of the TetraPhos plant is expected in mid-2023, while the operation of the PHOS4Green/Seraplant plant ceased operation in September 2022 due to insolvency proceedings. The TetraPhos process is implemented at the Köhlbrandhöft sewage treatment plant in Hamburg and is designed to treat the locally generated sewage sludge ash (20,000 t/a). The uniqueness lies in the relatively high phosphorus content of about 10 % in the Hamburg sewage sludge ash. The PHOS4Green plant in Haldensleben does not have a pollutants removal step. This leads to restrictions in the acceptance of the ash, which already has to comply with the limit values of the Fertilizer Ordinance (DüMV Annex 2, Table 7.3.16 in connection with Table 7.4.3).

In order to make predictions about the capacities needed for phosphorus recovery from sewage sludge or sewage sludge ash in the future, the phosphorus recovery techniques must be considered in terms of their efficiency, technological maturity, and compliance with the requirements of AbfKlärV. Currently, it is not possible to predict which process technologies will be implemented on a large scale at the required time. These processes have not been sufficiently tested, and many sewage sludge producers or processors have not yet chosen a specific technology to recycle phosphorus. At the time of reporting, some plants are already being implemented or announced for construction.

An extrapolation based on the available data on known phosphorus recovery capacities results in a treatment capacity of 41 % for an estimated sewage sludge generation of 1.5 million t<sub>DM</sub>. The capacities for phosphorus recovery from sewage sludge cover about 7 %, and those for recovery from sewage sludge ash cover 34 %. For 59 % of the predicted sewage sludge, no planned capacities for phosphorus recovery are known.

#### **Technology Assessment and Disposal Options**

To establish comparability between different disposal paths and process chains, six different scenarios for sewage sludge treatment were developed in the study. For these scenarios, mass,



energy, and simplified CO<sub>2</sub> balances were investigated and economic assessment was added. The results of these balances were partially used as a basis for the multi-criteria utility analysis. The following scenarios have been considered:

- ▶ •Scenario A: Phosphorus recovery at the wastewater treatment plant followed by co-incineration at a cement plant
- ▶ Scenario B: Sewage sludge incineration followed by phosphorus recovery from the ash and subsequent ash utilization (landfill)
- ▶ Scenario C: Sewage sludge incineration followed by ash treatment and complete soil-based utilization for fertilization purposes
- ▶ Scenario D: Insufficient phosphorus recovery at the wastewater treatment plant and sewage sludge incineration followed by phosphorus recovery from the ash
- ▶ Scenario E: Production of a carbon-containing process residue through pyrolysis followed by energy recovery, phosphorus recovery and ash utilization
- ▶ Scenario F: Production of a carbon-containing process residue through HTC process followed by energy recovery, phosphorus recovery and ash utilization

Scenarios A and E have the highest heat requirements, while scenarios B, C, and D with sewage sludge incineration processes have lower heat demand. Similar to the heat demand, scenarios A and E also have the highest electricity demand, while scenarios B and D have the lowest electricity demand.

It should be noted that scenarios B, D, and F can fully cover their electricity demand through self-generating of thermal plants. Scenario A has the highest cumulative energy demand of 840 kWh/t<sub>sewage sludge, 25% DM</sub> and the highest CO<sub>2</sub> emissions of 460 kg CO<sub>2</sub>/t<sub>sewage sludge, 25% DM</sub>. In contrast, scenarios B, C, and D exhibit significantly lower energy demands (155-161 kWh/t<sub>sewage sludge, 25% DM</sub>) and the lowest CO<sub>2</sub> emissions of about 286 kg CO<sub>2</sub>/t<sub>sewage sludge, 25% DM</sub>.

### Efficiency Analysis of Disposal Options

To create a basis for comparing the developed disposal scenarios in the technology assessment, a multi-criteria utility analysis was conducted. The scenarios were compared on the basis of different criteria to provide a decision basis for the preferred disposal pathways. The five evaluation criteria were chosen to have minimal overlap between them and to avoid redundancy in the evaluation. The six disposal scenarios were compared on the basis of treatment costs, work and operational safety, plant availability, operational effort, and energy consumption. Based on the results of the efficiency analysis, the best-rated disposal path was sewage sludge incineration followed by ash treatment and complete soil-based utilization for fertilization purposes (Scenario C). Sewage sludge incineration followed by phosphorus recovery from the ash and subsequent ash utilization (Scenario B) was slightly less favourable. The least favourable ratings were for the production of a carbon-containing process residue through pyrolysis followed by energy recovery, phosphorus extraction, and ash utilization (Scenario E), as well as the production of a carbon-containing process residue through the HTC process (Scenario F).

### Barriers and Challenges

Decisions to build large-scale phosphorus recovery plants are currently rare. Technical challenges, unpredictable delays in supply chains for plant construction, and concerns about the resource availability complicate decision-making. The lack of large-scale commercial operations

for phosphorus recovery from ash, and the inability to produce recyclate in marketable quantities, has delayed the characterization and establishment of recyclates. There are also uncertainties about recyclate acceptance or processing, both by phosphorus recovery plant operators and the fertilizer industry.

However, some phosphorus recovery capacities will be created by 2029. These are expected to cover about 41 % of the total sewage sludge volume forecasted in this study that will require phosphorus recovery. To meet the phosphorus recovery requirements on time, sewage sludge producers must thoroughly explore available technologies and promptly make decisions on a process. A significant portion of the large-scale phosphorus recovery processes presented in this study for sewage sludge and sewage sludge ash will be constructed or operational in the coming years. To ensure future compliance with phosphorus recovery obligations, stakeholders will need to make timely decisions regarding the phosphorus recovery strategies presented. While the derived results may not directly reflect the decision on the specific process technology, they do narrow down the potential process types or application sites.

Furthermore, the requirements of the DüMV limit the use of sewage sludges or sewage sludge ashes with higher metal content for direct fertilizer production. As a result, even processes with integrated pollutant removal cannot produce fertilizer products. Therefore, only wet-chemical or thermochemical processes for the production of phosphoric acid are available for higher-contaminated sewage sludge or sewage sludge ash that must undergo phosphorus recovery according to the AbfKlärV. It is necessary for sewage sludge producers to consider the composition of their input material for phosphorus recovery and evaluate the possibilities for phosphorus recovery. The processes require further improvements, and the limits of the processes will only become apparent in standardized continuous operation. Therefore, it is necessary to implement large-scale plants promptly to make appropriate capacities and experience by 2029. This includes technologies suitable for sewage sludges or sewage sludge ashes with high pollutant contents that need to undergo phosphorus recovery, according to AbfKlärV. In addition to direct phosphorus recovery, there is an option to temporarily store sewage sludge ashes for subsequent phosphorus recovery. Temporary storage may be an interim solution if sufficient treatment capacities are not available by 2029. However, suitable landfill space must be available or created, and the retrieval of sewage sludge ashes for subsequent processing and co-incineration must be ensured. The necessary capacity for phosphorus recovery from the stored ash must also be considered when expanding the plants.

# 1 Hintergrund zur Phosphorrückgewinnung in Deutschland

In Deutschland ist mit der Novellierung der Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung - AbfKlärV) eine Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm bzw. Klärschlammverbrennungsasche mit Übergangsfristen verpflichtend eingeführt worden. Die AbfKlärV definiert Klärschlamm gemäß Art 1 § 2 Abs. 2 Satz 1 als einen Abfall, der aus einer abgeschlossenen Behandlung von Abwasser in Abwasserbehandlungsanlagen resultiert. Die AbfKlärV, als Regelung des Abfallrechts, gilt für entwässerten oder getrockneten Klärschlamm sowie für Klärschlammverbrennungsasche. Im Wasserrecht ist keine Phosphorrückgewinnung verankert und somit existieren keine Vorgaben, die eine Phosphorrückgewinnung aus den Stoffströmen Abwasser, Schlammwasser oder nicht entwässertem Faulschlamm vorschreiben. Dennoch ist es möglich, Phosphor aus diesen Strömen rückzugewinnen. Bei weitreichender Abtrennung des Phosphors kann somit erreicht werden, dass der entstehende Klärschlamm so wenig Phosphor enthält, dass er nicht mehr unter die entsprechenden Regelungen der AbfKlärV fällt und es somit mehr Freiheitsgrade bei der Klärschlammentsorgung gibt.

Neben der Vorschrift zur Phosphorrückgewinnung wird die bodenbezogene Verwertung für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße ab 100.000 bzw. 50.000 Einwohnerwerte (Einheit: E = Einwohner) zum 01.01.2029 bzw. 01.01.2032 unzulässig. Kleinere Kläranlagen dürfen jedoch noch ihren Klärschlamm bodenbezogen verwerten, sofern sie neben den Grenzwerten der AbfKlärV Regelungen des Düngerechts (Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV), Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV)) und die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) erfüllen.

Die Rückgewinnungspflicht für Phosphor gilt ab 2029 für alle Kläranlagen bei Überschreitung des Phosphor-Grenzwertes im Klärschlamm von  $\geq 20 \text{ g P/kg}_{\text{TM}}$ . Kläranlagen mit einer Ausbaugröße  $> 100.000 \text{ E}$  sind dann verpflichtet, technische Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung durchzuführen. Eine bodenbezogene Verwertung ist für diese Größenklasse ab 2029 nicht mehr zulässig. Ab 2032 entfällt auch die Möglichkeit der bodenbezogenen Verwertung für Klärschlämme aus Kläranlagen mit  $> 50.000 \text{ E}$ , so dass auch für diese Schlämme zwingend technische Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung vorzusehen sind. Bei kleineren Kläranlagen bleibt die Möglichkeit der bodenbezogenen Verwertung zur Schließung des Phosphor-Kreislaufs bestehen. Sofern die Grenzwerte der zuvor genannten Verordnungen nicht eingehalten werden, müssen jedoch auch diese Klärschlämme Verfahren zur gezielten Phosphorrückgewinnung zugeführt werden.

Zur Erfüllung der gesetzlichen Auflagen muss der Phosphorgehalt gemäß § 3a Satz 1 AbfKlärV auf weniger als  $20 \text{ g P/kg}_{\text{TM}}$  reduziert werden oder durch ein geeignetes Phosphorrückgewinnungsverfahren um mindestens 50 % abgereichert werden (Ausnahme bei Klärschlämmen, die einen Phosphorgehalt größer  $40 \text{ g/kg}_{\text{TM}}$  aufweisen). Der durch den Einsatz eines Phosphorrückgewinnungsverfahrens P-abgereicherte Rückstand darf im Anschluss nicht landwirtschaftlich verwertet werden und muss einer thermischen Behandlung gemäß den allgemeinen Anforderungen des Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) unterzogen werden. Für den Fall, dass Phosphor im Klärschlamm entsprechend der o. g. Vorgaben nur unzureichend abgereichert wurde, ist gemäß AbfKlärV eine weitere Phosphorrückgewinnung aus dem thermisch behandelten Klärschlamm vorgeschrieben.

Zur Erfüllung der Phosphorrückgewinnungspflicht aus Asche muss ein Verfahren angewendet werden, welches mindestens 80 % des Phosphors aus der Verbrennungsasche bzw. dem kohlenstoffhaltigen Rückstand rückgewinnt. Im Gegensatz zur unmittelbaren Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm kann die Klärschlammverbrennungsasche für eine spätere Phosphorrückgewinnung einer separaten Langzeitlagerung, zum Zwecke einer späteren Phosphorrückgewinnung, zugeführt werden. Die Deponierung ist gemäß § 23 Abs. 1 und 6 der Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) für maximal 5 Jahre (Verlängerung möglich) erlaubt und in der AbfKlärV über § 3b Abs. 3 geregelt. Es handelt sich bei der Deponierung jedoch nicht um einen Verwertungsweg. Dennoch besitzt sie Praxisrelevanz, da sie als eine Übergangslösung in Erwägung gezogen werden kann, falls bis 2029 keine ausreichenden Anlagenkapazitäten zur Verfügung stehen.

Die Phosphorrückgewinnung im Zusammenhang mit der kommunalen Abwasserbehandlung ist ebenfalls möglich. Auch wenn die verfahrenstechnischen Lösungen, die beispielsweise im Schlammwasserbereich ansetzen, formal nicht durch die AbfKlärV (Abfallrecht) geregelt sind, sondern unter den Rechtsbereich des Wasserrechts fallen, stellen diese ebenfalls Lösungen für den Ressourcenschutz dar, wenn die Rezyklate in den Kreislauf zurückgeführt werden. Somit kann die integrierte Phosphorrückgewinnung in die Abwasserbehandlung bei Unterschreiten des Grenzwertes von 20 g P/kg<sub>TM</sub> eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungsasche ersetzen.

Zur Erfüllung der AbfKlärV wird kein Rückgewinnungsverfahren vorgegeben, sodass Kläranlagenbetreiber bzw. Entsorgungsunternehmen ein geeignetes Verfahren auswählen und umsetzen müssen, um so die rechtlichen Vorgaben zu erfüllen.

Klärschlammherzeuger, die im Kalenderjahr 2023 eine Abwasserbehandlungsanlage betreiben, sind nach § 3a (1) der AbfKlärV verpflichtet, zum 31.12.2023 ihrer zuständigen Behörde einen Bericht über die geplanten und bereits eingeleiteten Maßnahmen zur Sicherstellung der ab 01.01.2029 verpflichtenden Phosphorrückgewinnung vorzulegen. Ebenso müssen Angaben sowie die Maßnahmen zur Auf- oder Einbringung von Klärschlamm auf oder in Böden oder die sonstige Klärschlamm Entsorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) vorgelegt werden. Ebenso muss dem Bericht nach § 3a (2) der Phosphorgehalt sowie der Gehalt an basisch wirksamen Stoffen im Klärschlamm beigefügt werden.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Thermische Klärschlammbehandlung

#### 2.1.1 Übersicht

Die thermische Klärschlammbehandlung ist bereits heute der wichtigste Entsorgungspfad für Klärschlamm in Deutschland. Im Jahr 2020 wurden 76,7 % der anfallenden kommunalen Klärschlämme thermisch behandelt (Destatis, 2022a). Aufgrund der zukünftigen Pflicht zur Phosphorrückgewinnung und der Einschränkung der bodenbezogenen Verwertung wird die thermisch behandelte Klärschlammmenge weiter steigen und eine Verlagerung von der Mitverbrennung zur Klärschlammverbrennung (häufig auch als Monoverbrennung bezeichnet) stattfinden.

Neben der Mono- und Mitverbrennung werden zur thermischen Klärschlammbehandlung, wie in Tabelle 1 dargestellt, auch sonstige thermische Behandlungsverfahren eingesetzt. Die Klärschlammverbrennung erfolgt in Deutschland überwiegend in großen zentralen Anlagen mit stationärer Wirbelschichttechnik. Vereinzelt werden zudem Drehrohre, Etagenöfen, Etagenwirbler und Rostfeuerungen sowie weitere Verfahrenstechniken, die speziell für die kleinere dezentrale Anwendung ausgelegt sind, eingesetzt. Die Mitverbrennung von Klärschlamm erfolgt in Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und Zementwerken. Als sonstige thermische Klärschlammbehandlungsverfahren sind die Pyrolyse, Vergasung, metallurgische Schmelzvergasung und die hydrothermale Karbonisierung zu nennen.

**Tabelle 1: Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland**

Klärschlammverbrennung	Mitverbrennung	Sonstige thermische Behandlungsverfahren
Stationäre Wirbelschicht (23)	Kohlekraftwerk Staubfeuerung (8)	Pyrolyse PYREG (3)
Drehrohr (2+1*)	Kohlekraftwerk Zirkulierende Wirbelschicht (3)	Pyrolyse TCR (0+1*)
Etagenofen (1)	Kohlekraftwerk Rostfeuerung (1)	Pyrolyse Sonstige (1)
Etagenwirbler <sup>1</sup> (1)	Müllverbrennung Rostfeuerung (> 25)	Vergasung Kopf Syngas (2)
Rostfeuerung (1)	Müllverbrennung Wirbelschicht (1)	Schmelzvergasung Mephrec (0+1*)
Vorschubofen (1)	Zementwerk (17) - Ofeneinlauf, Kalzinator (8) - Hauptbrenner (5) - unbekannt (4)	HTC
Staubfeuerung (0+1*)		
Klärschlammreformer Thermoystems (2)		

\* In Klammern ist die Anzahl der in Deutschland in Betrieb befindlichen großtechnischen Anlagen angegeben. Bekannte Pilot- oder Technikumsanlagen sind mit \* gekennzeichnet.

<sup>1</sup> Rückbau geplant

Die verschiedenen Behandlungsverfahren unterscheiden sich zum Teil erheblich, unter anderem hinsichtlich

- ▶ des Vorbehandlungsaufwandes (Trocknung) bzw. der Anforderungen an den eingesetzten Klärschlamm (z. B. Heizwert, TR-Gehalt),
- ▶ der Anlagengröße bzw. Durchsatzkapazität und Feuerungswärmeleistung,
- ▶ der erforderlichen Abgasreinigungstechnik zur Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte,
- ▶ des Reststoffaufkommens und eines eventuell erforderlichen Nachbehandlungsaufwandes zur umweltgerechten und sicheren Entsorgung (z. B. für kohlenstoffhaltige Rückstände),
- ▶ des aktuellen Entwicklungsstandes bzw. des technologischen Reifegrades sowie typischer Standzeiten bzw. Anlagenverfügbarkeiten und Revisionszeiträume,
- ▶ der einsetzbaren Phosphorrückgewinnungsverfahren sowie
- ▶ der Energieeffizienz der Gesamtbehandlung (Trocknungsaufwand, Wärmeauskopplung usw.).

Die wichtigsten Informationen zu den in Deutschland eingesetzten thermischen Klärschlammbehandlungsverfahren werden im Folgenden dargestellt und in Factsheets hinsichtlich der genannten Verfahrens- und Leistungsmerkmale vergleichbar gemacht. Die Auflistung der nachfolgenden Verfahren erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Insbesondere für die dezentrale Klärschlammbehandlung befinden sich aktuell weitere Verfahren in der Entwicklung und Erprobung. Die verschiedenen Verfahrensansätze werden durch die im Folgenden beschriebenen Prozesse jedoch grundsätzlich weitestgehend abgebildet.

## **2.1.2 Klärschlammverbrennung**

### **2.1.2.1 Stationäre Wirbelschicht**

#### **Beschreibung des Verfahrens**

Der Aufbau der stationären Wirbelschicht ist schematisch in Abbildung 1 gezeigt. Die Hauptkomponente des Verfahrens ist eine feuerfest ausgemauerte Brennkammer, deren unterer Teil aus einem Düsenboden besteht. Es werden zwei Varianten des Düsenbodens unterschieden, der geschlossene und der offene Düsenboden. Der geschlossene Düsenboden besteht aus feuerfester Ausmauerung oder hitzebeständigem Stahl und ist mit einer Vielzahl von metallischen Luftdüsen versehen. Die Größe der Düsenöffnungen beträgt etwa 0,5 bis 1 mm. Der offene Düsenboden besteht aus Rohren mit aufgesetzten Düsen, durch die die Verbrennungsluft zugeführt wird. Durch die offene Bauweise können im Betrieb Verunreinigungen bis zu einer bestimmten Größe aus dem Feuerraum abgeführt werden. (DWA, 2011; Schnell et al., 2018)

Die einströmende Verbrennungsluft fluidisiert oberhalb des Düsenbodens eine Sandschicht, welche das Wirbelbett bildet. In der Anfahrphase wird die Energie zum Aufheizen des Wirbelbettes auf die vorgeschriebene Betriebstemperatur mit einem Öl- oder Gasbrenner bereitgestellt, nach Erreichen der Betriebstemperatur wird der Klärschlamm in das Wirbelbett eingebracht. Das Verhältnis von Brennstoff (Klärschlamm) zu Sand beträgt in der Regel 1 zu 99 bis 3 zu 97 Vol.-%. (Basse et al. 2011; Schnell et al. 2018)

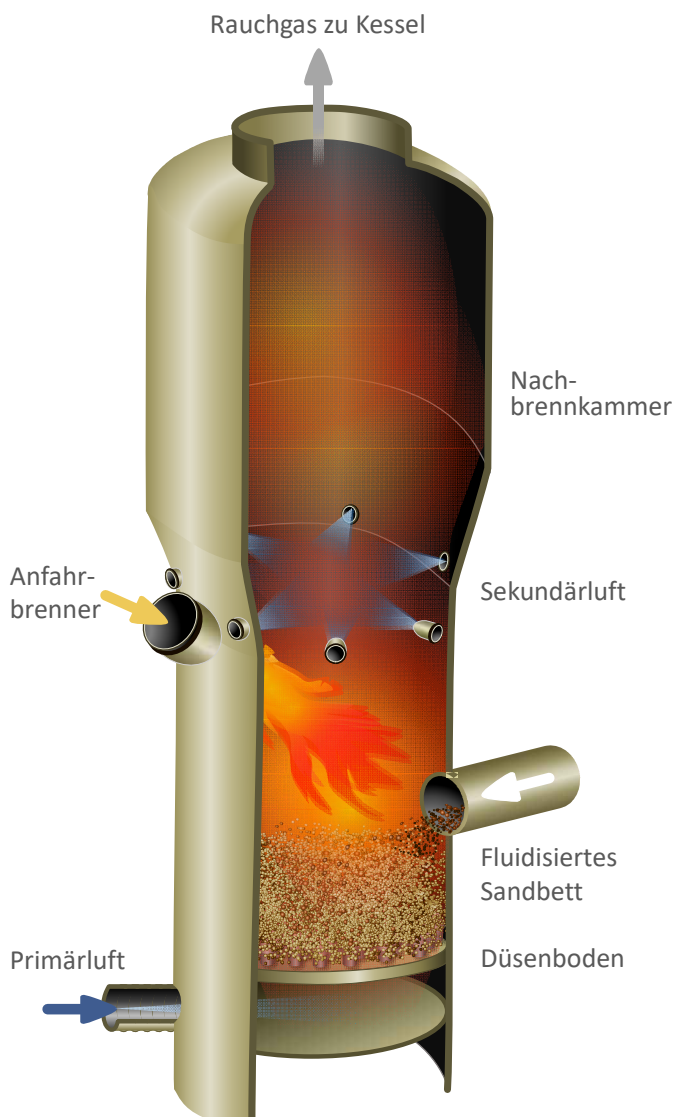
Bei der Wirbelschichtverbrennung kommen drei Varianten der Beschickung zum Einsatz. Wurfbeschicker geben den Klärschlamm seitlich in den Ofen und verteilen ihn möglichst gleichmäßig auf der Wirbelschichtoberfläche. Durch Öffnungen in der Ofendecke kann der Klärschlamm direkt auf die Wirbelschicht aufgegeben werden. Bei der dritten Variante wird der



Klärschlamm über auf Wirbelbetthöhe angebrachte Lanzen mittels Dickstoffpumpen in die Feuerung dosiert. (DWA, 2011; Schnell et al., 2018)

Bei einer gestuften Verbrennung erfolgt die Primärluftzugabe in das Wirbelbett als erste Stufe leicht unterstöchiometrisch. Der Klärschlamm bzw. die Klärschlammverbrennungasche wird durch Verwirbelung und Reibung mit dem Sand des Wirbelbetts und den Reaktorwandungen zerkleinert. Ab einer entsprechend geringen Korngröße werden Asche und Sand zusammen als Flugasche mit dem Rauchgas in die Nachbrennkammer ausgetragen. Größere Aschepartikel, die nicht mit dem Rauchgas ausgetragen werden, können direkt am Düsenboden entnommen werden. Der Anteil dieser Grobasche an der insgesamt anfallenden Asche ist mit weniger als einem Prozent allerdings gering (van de Velden et al., 2008). In der Nachbrennkammer findet bei der gestuften Verbrennung die vollständige Oxidation der brennbaren Gaskomponenten unter Zugabe von Sekundärluft statt. Anschließend verlassen Abgas und Flugasche den Ofen und werden den Wärmeübertragern, der Ascheabtrennung und der weitergehenden Abgasreinigung zugeführt. (DWA, 2011; Schnell et al., 2018)

**Abbildung 1: Schematische Darstellung einer stationären Wirbelschicht (Ausführungsbeispiel)**



Quelle: eigene Darstellung, Peter Quicker (TEER)

### Typische Brennstoff- und Anlagendaten

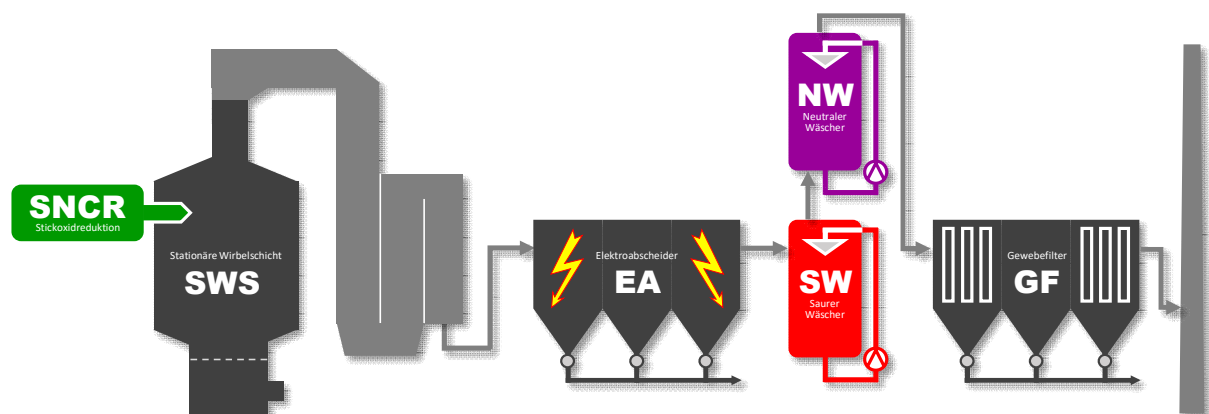
Eine autotherme Verbrennung von Klärschlamm ist in der stationären Wirbelschicht ab Heizwerten von ungefähr 4,5 MJ/kg möglich, welche in der Regel durch eine vorgeschaltete Teiltrocknung erreicht werden. Bei der Verbrennung von Klärschlämmen mit niedrigeren TR-Gehalten und Heizwerten wird durch Stützbrennstoffe oder durch Vorwärmung der Verbrennungsluft zusätzlich Energie in den Feuerraum eingebracht. Durch eine Luftvorwärmung ist eine autotherme Verbrennung auch noch bei Heizwerten von ca. 4,0-4,2 MJ/kg möglich. Hohe Temperaturen beim Einsatz von Klärschlämmen mit erhöhten Heizwerten können unter anderem durch Rezirkulation von Rauchgas, welches zusammen mit der Verbrennungsluft im Wirbelbett zugegeben wird, vermieden werden. Typische Verbrennungstemperaturen im Wirbelbett betragen (750) 850-950 °C. Das Ascheschmelzverhalten des Klärschlammes ist maßgeblich für die obere Temperaturgrenze, da Versinterungen der Asche zur Beeinträchtigung des Wirbelbetts führen können. Nach der letzten Verbrennungsluftzugabe – bei der gestuften Verbrennung in der Nachbrennkammer – muss eine Temperatur von 850 °C für eine Gasverweilzeit von mindestens zwei Sekunden überschritten werden, um die Anforderungen der 17. BImSchV einzuhalten. Hiernach ergibt sich die Auslegungsgröße für die Nachbrennkammer. Die Verbrennung in Wirbelschichtöfen ist aufgrund der gestuften Luftzufuhr mit niedrigen Luftzahlen bis 1,2 möglich. Bei ungestufter Verbrennung sind höhere Luftzahlen für die vollständige Oxidation erforderlich. Mit Ausnahmegenehmigungen können Verbrennungsanlagen auch bei niedrigeren Temperaturen als 850 °C und/oder kürzeren Verweilzeiten als 2 Sekunden betrieben werden, um Betriebsprobleme (z. B. Ascheschmelze, Zusatzbrennstoffbedarf oder erhöhte Stickoxidemissionen) zu vermeiden. (DWA, 2011; Schnell et al., 2018)

Großtechnische Anlagen mit stationärer Wirbelschichttechnik zur Verbrennung von Klärschlämmen werden in Deutschland mit genehmigten Klärschlamm durchsätzen von 2.500-106.000 t<sub>TM</sub> pro Jahr in einer Verbrennungslinie betrieben. Dies entspricht Feuerungswärmeleistungen von unter 1 MW bis 37 MW.

### Erforderliche Abgasreinigungstechnik

Die Reinigung von Abgasen aus Klärschlammverbrennungsanlagen kann sehr unterschiedlich aufgebaut sein. Ein Beispiel für eine mögliche Konfiguration ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

**Abbildung 2: Schematische Darstellung einer exemplarischen Abgasreinigung einer Klärschlammverbrennung.**



Quelle: eigene Darstellung, TEER



Durch die räumliche Trennung von Feststoff- und Gasausbrand sowie die gestufte Verbrennung können besonders niedrige Stickoxid- bei gleichzeitig geringen Kohlenmonoxidemissionen in stationären Wirbelschichten erreicht werden. In der Regel ist so eine Unterschreitung der  $\text{NO}_x$ - und CO-Grenzwerte der 17. BImSchV ohne zusätzliche Minderungsmaßnahmen möglich. Für Stickoxide liegt dieser Grenzwert für Anlagen im Leistungsbereich bis 50 MW bei  $200 \text{ mg/m}^3$  (Tagesmittelwert) sowie für Kohlenmonoxid bei  $50 \text{ mg/m}^3$  (Tagesmittelwert). Bei niedrigen Verbrennungstemperaturen  $< 900^\circ\text{C}$  können erhöhte Lachgasemissionen ( $\text{N}_2\text{O}$ ) auftreten (Stöcklein et al., 2018). In der aktuellen Fassung der 17. BImSchV existiert derzeit kein Grenzwert für Lachgas. Im Zuge der kommenden Novellierung der 17. BImSchV (siehe EU-Durchführungsbeschluss 2019/2010) wird allerdings ein verpflichtendes Monitoring für  $\text{N}_2\text{O}$  eingeführt (BVT, 2019). Sofern zukünftig entsprechende Grenzwerte eingeführt oder bestehende Grenzwerte für  $\text{NO}_x$  verschärft werden, ist auch bei der Klärschlammverbrennung in der stationären Wirbelschicht von der Notwendigkeit primärer und sekundärer Minderungsmaßnahmen zur Stickoxidreduktion auszugehen. Als primäre Minderungsmaßnahmen wird die Verbrennungsluft gestuft zugegeben, um in der ersten Stufe leicht unterstöchiometrische Bedingungen zu schaffen. Gebildete Stickoxide werden auf diese Weise durch reduzierende Gaskomponenten wie CO abgebaut. Dieser Effekt kann durch die Rezirkulation von Rauchgas verstärkt werden. In den bestehenden Anlagen kommen zudem bereits heute vereinzelt SNCR-Verfahren (selektive nichtkatalytische Reduktion) zum Einsatz. Katalytische Verfahren (SCR) werden in Klärschlammverbrennungsanlagen bisher nur in Ausnahmefällen angewendet (Schnell et al., 2018).

Der hohe Aschegehalt von Klärschlamm führt insbesondere in Verbindung mit einer Wirbelschicht zu einer hohen Staubbelastung des Rohgases. Aus diesem Grund wird in den meisten Anlagen als erste Reinigungsstufe nach dem Kessel ein Staubabscheider eingesetzt. In der Regel werden Elektroabscheider eingesetzt, da diese im Vergleich zu filternden Verfahren hohe Staubbeladungen bei vergleichsweise kompakten Baugrößen robust abscheiden. Durch diese erste Stufe wird die Staubfracht deutlich reduziert und nachfolgende Apparate bzw. Verfahrensschritte werden geschützt. (Schnell et al., 2018). Die im Elektroabscheider abgetrennte Flugasche macht 99 % der insgesamt anfallenden festen Reststoffe (Grobasche, Flugasche, weitere Rauchgasreinigungsrückstände) aus (van de Velden et al., 2008). Der Grenzwert für Staubemissionen gemäß 17. BImSchV beträgt für Anlagen im Leistungsbereich bis 50 MW,  $10 \text{ mg/m}^3$  (Tagesmittelwert). Vor dem Hintergrund der zukünftigen Pflicht zur Phosphorrückgewinnung sollte die Klärschlammverbrennungsasche in der ersten Stufe der Rauchgasreinigung entnommen werden, um Anlagerungen von im Abgas enthaltenen Schadstoffen (z. B. Schwermetalle) an die Asche zu vermeiden. Neben Elektroabscheidern kommen dafür zum Beispiel Zyklone oder auch Gewebefilter in Betracht.

Anschließend an die Staubabscheidung folgt in der Regel eine Reinigungsstufe zur Abscheidung der Sauergase, insbesondere von  $\text{SO}_2$ . Diese Verfahrensstufe kann sehr unterschiedlich aufgebaut sein, aufgrund der hohen Beladungen werden jedoch in den meisten Anlagen mehrstufige Verfahren angewandt. Dadurch wird eine effektive Reduktion der  $\text{SO}_2$ -Emissionen auch bei hohen Rohgasbeladungen von  $1.000\text{-}5.000 \text{ mg/m}^3$  ermöglicht und die zuverlässige Einhaltung des  $\text{SO}_2$ -Grenzwerts der 17. BImSchV von  $50 \text{ mg/m}^3$  (Tagesmittelwert) sichergestellt. In neueren und insbesondere in kleineren Verbrennungsanlagen werden zur Sauergasabscheidung auch trockene Verfahren unter Einsatz von Natriumhydrogencarbonat oder nach vorheriger Konditionierung des Rauchgases unter Verwendung von Kalkhydrat eingesetzt. Kombinationen verschiedener trockener und unter Umständen mehrstufiger nasser Reinigungsverfahren sind ebenfalls möglich. (Schnell et al., 2018)

Bei der Klärschlammverbrennung ist insbesondere die zuverlässige Abscheidung von Schwermetallen wie Quecksilber von hoher Bedeutung. Durch Zugabe von Aktivkohle oder Herdofenkoks kann dies prinzipiell erreicht werden. Wenn das im Abgas enthaltene Quecksilber überwiegend als metallisches Quecksilber vorliegt, kann die Anwendung von Komplexbildnern im Wäscher oder speziell imprägnierten bzw. dotierten Aktivkohlen oder der Einsatz von Festbettadsorbern erforderlich sein. Der Grenzwert der 17. BImSchV für Quecksilber beträgt  $0,03 \text{ mg/m}^3$  (Tagesmittelwert). (Schnell et al., 2018)

### **Reststoffaufkommen**

Aufgrund des hohen mineralischen Anteils im Klärschlamm von rund 30 bis 50 %, bezogen auf die Trockenmasse, bildet die Klärschlammverbrennungsasche den größten Teil der anfallenden Reststoffe bei der Klärschlammverbrennung. Durch die vollständige Oxidation der organischen Bestandteile des Klärschlammes und die intensive Durchmischung im Wirbelbett ist die anfallende Asche weitestgehend frei von organischen Schadstoffen. Die Konzentration der im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle erhöht sich aufgrund der Verbrennung des organischen Anteils in den Aschen je nach Element um den Faktor 2 bis 3. Ausgenommen davon sind die Schwermetalle, die durch ihre Flüchtigkeit beim Verbrennungsprozess teilweise oder überwiegend in die Gasphase übergehen. Ein Beispiel hierfür ist Quecksilber. Wie beim Klärschlamm sind folglich auch bei Klärschlammverbrennungsaschen teils große Unterschiede in der Zusammensetzung feststellbar. Phosphor verbleibt bei der Verbrennung überwiegend (> 95 %) in der Asche. Daher bietet sich die Phosphorrückgewinnung aufgrund der im Vergleich zum Klärschlamm oder Abwasser deutlich höheren Phosphorkonzentrationen insbesondere für die Aschen an. Aktuell werden Klärschlammverbrennungsaschen überwiegend im Bergversatz verwertet oder deponiert. Ein weiterer Teil wird im Deponie- und Landschaftsbau oder als Zuschlagstoff im Bauwesen eingesetzt (Schnell et al., 2018). Zudem wird ein Teil der Aschen als Düngemittel verwendet. Voraussetzung hierfür ist die Einhaltung der Grenzwerte und der Anforderungen des Düngerechts.

Je nachdem, welche Verfahren in der nachgeschalteten Rauchgasreinigung zum Einsatz kommen, fallen weitere Reststoffe, wie Prozessabwässer und Sorptionsmittelrückstände an. Feste Rückstände aus der Abgasreinigung müssen aufgrund ihrer Schadstoffgehalte nahezu vollständig deponiert oder im Bergversatz verwertet werden. (Schnell et al., 2018)

### **Energieeffizienz und Technologiereifegrad**

Charakteristisch für die Wirbelschichttechnik ist der aus der intensiven Durchmischung von Feststoffpartikeln und Verbrennungsluft resultierende sehr gute Wärme- und Stoffübergang. Die gestufte Verbrennung ermöglicht den Betrieb bei niedrigen Luftzahlen, woraus geringe Luft- und Abgasmengen resultieren. Somit werden Wärmeverluste über den Kamin reduziert, der Aufwand zur Überwindung des gaseitigen Druckverlustes wird verringert und die Abgasreinigung kann kompakt gehalten werden. Dadurch können Klärschlammverbrennungsanlagen mit stationärer Wirbelschicht bei der Verbrennung von Klärschlämmen wie zuvor beschrieben autotherm betrieben werden. Die Energie der Abwärme wird überwiegend im Abhitzeessel zur Dampferzeugung verwendet. Die im Dampf enthaltene Wärmeenergie wird zur Klärschlamm-trocknung, Luftvorwärmung und Stromerzeugung genutzt, sodass kein externer Strom- und Wärmebedarf besteht. Überschüssige Energie kann z. B. als Fernwärme und Prozessdampf für andere Anwendungen ausgekoppelt werden.

Die stationäre Wirbelschicht ist das weltweit am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Klärschlammverbrennung. Auch in Deutschland hat sich die Technik der großtechnischen thermischen Behandlung von Klärschlamm etabliert und bewährt (Schnell et al., 2018). Für Bestandsanlagen werden in Deutschland gemäß Umfragen (vgl. Kapitel 3.2.1) Verfügbarkeiten

von deutlich über 85 % in Volllast erreicht. Neuanlagen werden mit Verfügbarkeiten von 8.000 h/a geplant. Der technologische Reifegrad ist somit mit der höchsten Stufe, TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes), zu charakterisieren. Das Verfahren stellt den Stand der Technik dar.

**Tabelle 2: Steckbrief Stationäre Wirbelschicht**

Verfahren	Stationäre Wirbelschicht	TRL	9
<b>Hersteller/Anbieter</b>	Diverse, z. B. Küttner (Martin), Sludge2Energy, Wehrle Werk, Standardkessel Baumgarte, Raschka Engineering, Doosan Lentjes, Andritz, Suez Degremont, Veolia	<b>Anzahl Referenzanlagen</b>	23 (in Deutschland)
		<b>Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden</b>	5.204-8.365 h (Durchschnitt 2016-2020)
		<b>Jährlicher Klärschlamm-durchsatz</b>	2.073-115.116 t <sub>TM</sub> (pro Linie, Bezugsjahr 2020)
<b>Standorte</b>	siehe Kapitel 3.2.1	<b>Feuerungs-wärmeleistung</b>	0,9-62 MW (Standort) 0,9-37 MW (pro Linie)

<b>Verfahren / Reaktor</b>	Stationäre Wirbelschicht
<b>Ziel</b>	vollständige Oxidation von Feststoff und Flüchtigen
<b>Besonderheiten</b>	Intensive Durchmischung, geringer Verschleiß
<b>Annahmepreis</b>	248-442 €/t <sub>TM</sub> (= 62-110,5 €/t bei 25 % TR) für entwässerten Klärschlamm in 2020

Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
Entwässerter und (teil)getrockneter Klärschlamm	Korngröße	< 300 mm	Luftzahl	1,2-1,5
	TR-Gehalt	28-65 %	Temperatur	(750) 850-950 °C
	Heizwert	4,2-7,6 MJ/kg	VWZ	< 0,3-3 h (Feststoff) 1-3 s (Gas)
	P-Gehalte	13-40 g/kg <sub>TM</sub>	Hilfsbrennstoffe (spezifische Einsatzmenge)	Kohle (0-204 kg/t <sub>TM</sub> ) Erdgas (0-0,2 m³/t <sub>TM</sub> ) Heizöl (0-44 (832) kg/t <sub>TM</sub> ) EBS (0-252 kg/t <sub>TM</sub> ) Faulgas (0-75 (302) m³/t <sub>TM</sub> ) Rechengut (0-112 kg/t <sub>TM</sub> )
	Annahme nach Abfall-verzeichnis-verordnung	überwiegend 190805, teilw. weitere z. B. 190812, 190814		
ab TR von ca. 40 % und Heizwerten von 4,5 MJ/kg ist eine selbstgängige Verbrennung ohne Zusatzenergie möglich				

Output		
Fest (spezifische Menge)	Klärschlammverbrennungs- asche (300-500 kg/t <sub>TM</sub> )	Wirbelbettmaterial (1,5-2,5 kg/t <sub>TM</sub> ) Rauchgasreinigungsrückstände (1,5-2,5 kg/t <sub>TM</sub> )
flüssig	ggf. Rauchgasreinigungsrückstände	
gasförmig	Abgas	
Produktnutzung/Reststoffentsorgung (Klärschlammverbrennungsasche)		
ist (Kosten)	Berg- und Untertageversatz, Deponie (>28-80 €/t)	Landschaftsbau, Zuschlags- stoff (61-63 €/t), Düngemittel (46-48 €/t)
geplant (erwartete Kosten)	Ascheverwertung als Düngemittel (40-50 €/t) P-Extraktion bzw. spezifischen Phosphorrückgewinnungsverfahren	

### 2.1.2.2 Drehrohr

#### Beschreibung des Verfahrens

Im Bereich der thermischen Abfallbehandlung werden Drehrohröfen insbesondere für die Verbrennung gefährlicher Abfälle eingesetzt. Auch in der Zementherstellung, bei der Abfälle in großem Umfang als Ersatz für fossile Brennstoffe verwendet werden, kommen Drehrohrreaktoren zum Einsatz. Daneben gibt es einige Pyrolyseverfahren, in denen ebenfalls Drehrohre eingesetzt werden (Quicker, 2020). Die folgenden Ausführungen zur Drehrohrtechnik beziehen sich auf die Anwendung zur Verbrennung von Klärschlamm.

Drehrohrreaktoren bestehen aus einem langsam rotierenden, annähernd horizontal angeordneten Rohr, das in der Regel mit Feuerfestausmauerung ausgekleidet und optional zu Kühlungs- und Wärmeübertragungszwecken von einem Wassermantel umgeben sein kann. Der Klärschlamm wird über Eintragsschnecken in das Drehrohr gefördert und bildet dort ein Brennstoffbett, welches durch die Rotation des Rohres bewegt und durch selbiges gefördert wird. Über die Drehzahl und Neigung lässt sich die Verweilzeit des Feststoffs im Reaktor einstellen. Es werden direkt und indirekt beheizte Drehrohre unterschieden. Bei direkter Beheizung, die in der Regel bei der Klärschlammbehandlung verwendet wird, wird die benötigte thermische Energie entweder über den eingetragenen Brennstoff, durch Brenner innerhalb des Drehrohres oder durch die Einleitung von Heißgasen aus anderen Verbrennungsprozessen (z. B. bei Kopplung mit einer MVA) bereitgestellt. (Schnell et al., 2018)

Drehrohre können sowohl nach dem Gegenstrom- als auch dem Gleichstromprinzip betrieben werden. Im Gegenstromverfahren wird der zu oxidierende Brennstoff entgegen der Strömungsrichtung der Verbrennungsluft bzw. des Verbrennungsgases durch das Drehrohr gefördert. Nach dem Gleichstromprinzip werden Verbrennungsluft und Brennstoff in der gleichen Richtung durch das Drehrohr geführt. Innerhalb des Drehrohrreaktors können sich dadurch neben unterschiedlichen Temperaturbereichen auch gezielt Reaktionszonen, z. B. Trocknungs-, Entgasungs- und Verbrennungszonen, ausbilden. In beiden Varianten strömt die Verbrennungsluft bzw. das heiße Verbrennungsgas über das am Rohrboden transportierte Brennstoffbett. Die im Vergleich zur stationären Wirbelschicht schlechtere Durchmischung von Brennstoff und Gas erfordert in Drehrohren zur vollständigen Oxidation hohe Luftüberschüsse und lange Verweilzeiten sowie teilweise zusätzliche Einbauten zur Materialumwälzung.

Andernfalls sind höhere Restkohlenstoffgehalte in den anfallenden Aschen im Vergleich zu anderen Verbrennungsverfahren möglich. Die ausgebrannte Asche wird am Ende des Drehrohres durch Schleusensysteme aus dem Prozess ausgetragen, um den Zutritt von Falschluff in die Feuerung zu vermeiden. (Schnell et al., 2018; Moggert et al., 2021)

Das Abgas aus dem Drehrohr wird in einer (Nach-)Brennkammer unter Zugabe von Sekundärluft vollständig oxidiert und anschließend den Wärmeübertragern und der Rauchgasreinigung zugeführt. Drehrohre können in Kopplung mit anderen Verbrennungsanlagen betrieben werden. So ist es beispielsweise möglich, das Abgas aus dem Drehrohr in einen MVA-Kessel zur Nachverbrennung zu leiten und den dort vorhandenen Wasser-Dampf-Kreislauf oder die Rauchgasreinigung der MVA zu nutzen.

### **Typische Brennstoff- und Anlagendaten**

Für eine autotherme Verbrennung ohne zusätzlich eingebrachte Energie (ausgenommen Anfahrprozesse) erfolgt eine vorgeschaltete Volltrocknung des Klärschlammes auf TR-Gehalte über 85 % (Moggert et al., 2021). In Schüttorf wird ein Drehrohr nach dem Gleichstromprinzip mit Einbringung vollgetrockneten Klärschlammes betrieben. Die Anlage ist modular aus drei Drehrohren mit einer Feuerungswärmeleistung von jeweils 500 kW aufgebaut und für die Verbrennung von ca. 4.500 t<sub>TM</sub>/a ausgelegt. Das Abgas aus den Drehrohren wird in Nachbrennkammern unter Zugabe von Sekundärluft oberhalb von 850 °C, bei einer Verweilzeit von mindestens 2 Sekunden vollständig oxidiert, um die Anforderungen der 17. BImSchV einzuhalten. Für An- und Abfahrprozesse sind die Nachbrennkammern mit gasbetriebenen Stützfeuerungen ausgestattet. Anschließend wird das Abgas den Wärmeübertragern und Rauchgasreinigungsanlagen zugeführt. Die bei der Verbrennung des Klärschlammes abgegebene Energie deckt den Trocknungsenergiebedarf vollständig, sodass der Gesamtprozess autotherm betrieben und überschüssige Energie ausgekoppelt werden kann. (Moggert et al., 2021)

Bei der Verbrennung von lediglich entwässertem Klärschlamm ist ein zusätzlicher Energieeintrag in das Drehrohr erforderlich. Durch die Kopplung mit einer MVA kann diese Energie durch heißes Rauchgas, das aus dem Kessel der MVA abgezogen wird, bereitgestellt werden. Das Rauchgas wird mit Temperaturen von 850-950 °C im Gegenstrom in das Drehrohr eingeleitet. Im Drehrohr bilden sich verschiedene Temperaturzonen aus. Nach der Trocknung und Entgasung des entwässert zugegebenen Klärschlammes, bei Betriebstemperaturen von 650-750 °C, folgt die Verbrennung des festen Kohlenstoffs bei Temperaturen von ca. 950 °C. Die bei der Klärschlamm-trocknung entstehenden Brüden werden gemeinsam mit dem nicht vollständig ausgebrannten Abgas in den Feuerraum der MVA zurückgeführt und dort vollständig oxidiert (Schnell et al., 2018). In Offenbach und der Schweiz (Oftringen und Uvrier) werden Drehrohrreaktoren nach diesem Verfahrensprinzip mit einem Klärschlamm-durchsatz von bis zu 10.000 t<sub>TM</sub>/a betrieben. Weitere Drehrohranlagen zur Verbrennung von Klärschlamm befinden sich aktuell im Bau (siehe Kapitel 4.1.1).

### **Erforderliche Abgasreinigungstechnik**

Durch den zusätzlichen Gasausbrand, welcher bei den aktuell betriebenen Anlagen entweder in einer Nachbrennkammer oder durch Rückführung der Abgase in einen MVA-Kessel erfolgt, ist die Unterschreitung der CO-Grenzwerte der 17. BImSchV ohne zusätzliche Maßnahmen möglich. Da der Großteil der Asche am Ende des Drehrohres ausgetragen wird und keine Fluidisierung des Brennstoffs im Verbrennungsprozess erfolgt, ist von deutlich niedrigeren Staubgehalten im Rohgas, im Vergleich zur stationären Wirbelschicht auszugehen. Dennoch kann eine Vorabscheidung von Flugaschepartikeln zur Entlastung der folgenden Aggregate sinnvoll sein. Für die Rauchgasreinigung gelten grundsätzlich die gleichen Anforderungen und es kommen die gleichen Verfahren wie nach der Verbrennung in einer stationären Wirbelschicht zur



Anwendung. Aufgrund der teilweise hohen Stickstoff-, Schwefel- und Schwermetallgehalte im Klärschlamm, muss die Rauchgasreinigung insbesondere für eine effektive Abscheidung der resultierenden Schadstoffe, also  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  und Schwermetall(salz)e, ausgelegt sein. Aufgrund der im Vergleich zur stationären Wirbelschicht höheren Verbrennungstemperaturen spielt die Bildung von Lachgasemissionen (zu Lasten höherer  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen) eine untergeordnete Rolle.

### **Reststoffaufkommen**

Die Klärschlammverbrennungsasche bildet auch hier den größten Teil der anfallenden Reststoffe. Die Schwermetall- und Phosphorgehalte sind grundsätzlich vergleichbar mit Aschen aus der stationären Wirbelschicht. Aufgrund der schlechteren Durchmischung des Feststoffs mit der Verbrennungsluft sind im Vergleich zu Aschen aus der stationären Wirbelschicht höhere Restkohlenstoffgehalte zu erwarten, sofern keine geeigneten Gegenmaßnahmen (hohe Verweilzeiten, Einbauten zur Umwälzung) angewendet werden.

Eine simultane Phosphorrückgewinnung bei der thermischen Behandlung im Drehrohr wird z. B. durch das EuPhoRe-Verfahren angestrebt. Schwermetalle sollen in die Gasphase überführt und dadurch in der Asche reduziert, sowie die Phosphorlöslichkeit bzw. -verfügbarkeit gesteigert werden. Unter Einhaltung der Grenzwerte und weiteren Anforderungen des Düngerechts sollen diese Aschen direkt als Düngemittel eingesetzt werden können. Ansonsten stehen für die Aschen aus Drehrohrreaktoren die gleichen Phosphorrückgewinnungsverfahren wie beim Einsatz von Klärschlammverbrennungsaschen aus anderen Verbrennungsprozessen zur Verfügung.

### **Energieeffizienz und Technologiereifegrad**

Im Vergleich zur stationären Wirbelschicht läuft der Wärme- und Stoffübergang aufgrund der wesentlich schlechteren Brennstoff-Gas-Durchmischung deutlich langsamer ab. Die hierfür erforderlichen höheren Luftzahlen resultieren in größeren Abgasmengen und folglich Druck- und Wärmeverlusten. Der Wärmebedarf der Trocknung kann im Dauerbetrieb vollständig durch die Klärschlammverbrennung abgedeckt werden, sodass ein autothermer Betrieb möglich ist.

Entwässerter Klärschlamm kann im Drehrohr in einem Prozessschritt getrocknet, entgast und verbrannt werden. Für dieses Verfahrensprinzip ist ein zusätzlicher Energieeintrag, z. B. durch heißes Verbrennungsgas erforderlich. In der Praxis wird dies durch die Kopplung des Drehrohres mit einem MVA-Kessel erreicht. Die Energie aus der Klärschlammverbrennung wird in diesem Fall bei der Nachverbrennung der Gase im MVA-Kessel auf den Wasser-Dampf-Kreislauf übertragen. Neben der Nutzung eines gemeinsamen Wasser-Dampf-Kreislaufes bietet auch die Synergie zur Nutzung einer gemeinsamen Rauchgasreinigungsanlage Vorteile.

Drehrohre werden in Deutschland erst seit Kurzem für die Verbrennung von Klärschlamm verwendet. Die beiden aktuell in Betrieb befindlichen Anlagen bestehen in Schüttorf (IBN 2020) und Offenbach (IBN 2021). In der Schweiz werden Drehrohre schon länger erfolgreich und zuverlässig zur Klärschlammverbrennung eingesetzt. Der technologische Reifegrad liegt somit bei TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes). Im Vergleich zur stationären Wirbelschicht sind die Betriebserfahrungen allerdings deutlich geringer und auf wenige Anlagen beschränkt.

**Tabelle 3: Steckbrief Drehrohr**

Verfahren	Drehrohr	TRL	9
Hersteller/Anbieter	Diverse, z. B. Werkstätten Heating GmbH, Standardkessel Baumgarte, Mitsubishi Hitachi Power Systems	Anzahl Referenzanlagen	2 (in Deutschland)
		Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	bis zu 8.400 h
		Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	1.500-10.000 t <sub>TM</sub> (pro Linie)
Standorte	Schüttorf, Offenbach	Feuerungs-wärmeleistung	ab 500 kW

Verfahren / Reaktor	Drehrohr
Ziel	vollständige Oxidation des Feststoffs, Nachverbrennung der Gasphase erforderlich
Besonderheiten	lange Feststoffverweilzeiten

Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
Entwässerter und getrockneter Klärschlamm	Korngröße	keine Einschränkung	Luftzahl	1,5-2,5
	TR-Gehalt	> 85 % bzw. > 20 % (Kopp-lungsbetrieb)	Temperatur	650-1.100 °C
	Heizwert	1-10 MJ/kg	VWZ	bis zu 10 h (Feststoff), Gasphase deutlich kürzer (> 2 s)
ab TR von ca. 85 % und Heizwerten von > 9 MJ/kg ist eine selbstgängige Verbrennung ohne Zusatzenergie möglich			Hilfsbrennstoffe	Erdgas, Hausmüll (Kopplungsbetrieb MVA)

Output		
Fest (spezifische Menge)	Klärschlammverbrennungs-asche (300-500 kg/t <sub>TM</sub> )	Rauchgasreinigungsrückstände
flüssig	ggf. Rauchgasreinigungsrückstände	
gasförmig	Abgas	



#### Produktnutzung/Reststoffentsorgung (Klärschlammverbrennungsasche)

ist (Kosten)	Düngemittel (46-48 €/t, Voraussetzung Einhaltung Grenzwerte des Düngerechts)
geplant	Ascheverwertung als Düngemittel

### 2.1.2.3 Etagenofen

#### Beschreibung des Verfahrens

Der Etagenofen wurde für die direkte Verwertung entwässerten Klärschlammes ohne vorherige Trocknung konzipiert. Der Ofen besteht aus einer vertikalen feuerfesten zylindrischen Brennkammer, in der horizontale feuerfeste Zwischenböden eingebaut sind. Der Klärschlamm wird oben in den Ofen eingebracht. Durch langsam umlaufende Krählarms wird der Schlamm über die einzelnen Etagen, welche im Wechsel mit Öffnungen in der Mitte und am Rand versehen sind, von oben nach unten transportiert. Die Krählarms werden durch eine in der Ofenmitte senkrecht angeordnete Welle angetrieben. Ofenwelle und Krählarms sind zu Kühlungs Zwecken hohl ausgeführt und werden mit Luft durchströmt. (Schnell et al, 2018)

Der Etagenofen kann in eine Trocknungs-, eine Verbrennungs- und eine Kühlungszone unterteilt werden. In der Trocknungszone wird der Klärschlamm durch die aus der darunterliegenden Verbrennungszone aufsteigenden heißen Rauchgase getrocknet. Diese Rauchgase und die bei der Trocknung anfallenden Brüden werden gemeinsam mit dem übrigen Rauchgas aus der Verbrennungszone in eine Nachbrennkammer geführt. Unter Zugabe von Zusatzbrennstoffen (z. B. flüssige Abfälle) erfolgt die vollständige Oxidation. Anschließend strömt das Rauchgas zur Wärmeübertragung in einen Dampfkessel und weiter zur Abgasreinigung. Die bei der Verbrennung anfallende Asche passiert am Ofenboden eine Kühlungszone, in der als Kühlmittel ebenfalls Luft eingesetzt wird, die in der darüberliegenden Zone als Verbrennungsluft dient. (Schnell et al, 2018)

#### Typische Brennstoff- und Anlagendaten

In Deutschland wird zurzeit lediglich ein Etagenofen mit einer genehmigten Kapazität von 30.000 t<sub>TM</sub>/a und einer Feuerungswärmeleistung von ca. 28,5 MW in Leverkusen betrieben. Diese Anlage wird für die Verbrennung von Klärschlämmen sowohl aus industriellen als auch kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen und weiteren schlammartigen Abfällen genutzt. Der zylindrische Etagenofen hat einen Durchmesser von 8 m und eine Höhe von 12 m mit insgesamt acht Etagen. Die oberen drei Etagen bilden die Trocknungszone, auf die der entwässerte Klärschlamm zugegeben wird. Auf den nachfolgenden zwei Etagen erfolgt die Verbrennung sowie auf den unteren drei Etagen die Kühlung der Klärschlammverbrennungsasche. (Currenta, 2023)

Die Temperatur in der Verbrennungszone beträgt bis zu 1.000 °C. In Zeiten, in denen der Klärschlamm nicht selbstgänglich brennt, wird eine seitlich neben der Verbrennungszone montierte Anfahrerbrennkammer betrieben. In der Nachbrennkammer wird das Rauchgas durch Zugabe flüssiger Abfälle bei ca. 1.030 °C vollständig oxidiert. Im Dampfkessel erfolgt die Wärmeübertragung vom heißen Rauchgas auf den Prozessdampf, der im benachbarten Chemiepark eingespeist wird. (Currenta, 2023)

## Erforderliche Abgasreinigungstechnik

Da in der bestehenden Anlage in Leverkusen neben kommunalen Klärschlämmen auch industrielle Klärschlämme und andere Abfallstoffe verwertet werden, kann die Abgaszusammensetzung im Vergleich zur Verbrennung ausschließlich kommunaler Klärschlämme abweichen. Aus diesem Grund wird in Leverkusen eine mehrstufige nasse und trockene Rauchgasreinigungsanlage eingesetzt. Die Anlage zur Abscheidung von SO<sub>2</sub>, HCl, Schwermetallen, organischen Schadstoffen und Staub besteht aus einer Quenche, einem sauer betriebenen Rotationszerstäuberwäscher, einem alkalisch betriebenen Strahlwäscher, einem Flugstromreaktor mit Zugabe von Adsorptionsmitteln sowie einem Gewebefilter. Als letzte Stufe wird eine SCR-Anlage zur Reduktion der Stickoxidemissionen betrieben. (Currenta, 2023)

## Reststoffaufkommen

Der Großteil der Klärschlammverbrennungsasche (80-90 %) wird am Boden des Etagenofens ausgetragen und anschließend deponiert. Weitere Reststoffe fallen als flüssige und feste Rauchgasreinigungsrückstände an.

## Energieeffizienz und Technologiereifegrad

Im Etagenofen in Leverkusen werden neben kommunalen Klärschlämmen auch Industrieschlämme sowie weitere Abfälle mit zum Teil höheren Heizwerten verwertet. Inwiefern ein autothermer Betrieb des Etagenofens nur mit (kommunalem) Klärschlamm möglich ist, kann vor diesem Hintergrund aktuell nicht eingeschätzt werden.

Der bestehende Etagenofen in Leverkusen wird bereits seit 1988 betrieben und erreicht eine Anlagenverfügbarkeit von über 8.000 h/a. Die Technik wird auch in weiteren Ländern in Europa sowie in Japan und den USA für die Klärschlammverbrennung eingesetzt. Der technologische Reifegrad ist somit mit TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes) zu charakterisieren. Aufgrund der Nachteile des aufwändigen Ofenaufbaus mit beweglichen Teilen in heißen Verbrennungszonen konnte sich die Technik gegenüber der stationären Wirbelschicht jedoch nicht behaupten.

**Tabelle 4: Steckbrief Etagenofen**

Verfahren	Etagenofen	TRL	9
Hersteller/Anbieter	Lurgi	Anzahl Referenzanlagen	1 (in Deutschland)
		Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	7.853 h (Durchschnitt 2016-2020)
		Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	25.445 t <sub>TM</sub> (Bezugsjahr 2020)
Standorte	Leverkusen	Feuerungswärmeleistung	28,5 kW
Verfahren / Reaktor	Etagenofen		
Ziel	Verbrennung von entwässertem Klärschlamm ohne vorherige Trocknung		

Besonderheiten	Ofenaufbau mit beweglichen Teilen in heißen Zonen			
Annahmepreis	240 €/t <sub>TM</sub>			
Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
Entwässertes Klärschlamm	Korngröße	keine Einschränkung	Luftzahl	keine Angabe
	TR-Gehalt	33 %	Temperatur	ca. 1.000 °C
	Heizwert	keine Einschränkung	VWZ	Hohe Feststoffverweilzeiten > 2 s (Gas)
	Annahme nach AVV	Diverse (19 08 04/05, 19 08 11/12, und weitere)	Hilfsbrennstoffe (spezifische Mengen)	Flüssigabfälle (786 kg/t <sub>TM</sub> )
falls keine selbstgängige Verbrennung möglich ist, wird zusätzlich eine Anfahrbrennkammer betrieben				
Output				
Fest (spezifische Menge)	Klärschlammverbrennungsasche (300-500 kg/t <sub>TM</sub> )		Rauchgasreinigungsrückstände	
flüssig	Rauchgasreinigungsrückstände			
gasförmig	Abgas			
Produktnutzung/Reststoffentsorgung (Klärschlammverbrennungsasche)				
ist (Kosten)	Deponie (35 €/t)			
geplant	Deponie			

#### 2.1.2.4 Etagenwirbler

##### Beschreibung des Verfahrens

Der Etagenwirbler ist eine Kombination aus Etagenofen und stationärer Wirbelschicht. Wie beim Etagenofen ist die direkte Verwertung entwässerten Klärschlammes ohne vorherige Trocknung möglich. Dazu ist ein Etagenofen zur Klärschlamm-trocknung oberhalb einer Wirbelschichtfeuerung angeordnet. Ein Teil der Rauchgase aus der Klärschlammverbrennung wird, wie beim Etagenofen, zur Trocknung des entwässerten Klärschlammes genutzt. Durch Krählarne wird der Klärschlamm durch die Etagen des Trockners gefördert und fällt schließlich von oben in die Wirbelschicht. Die bei der Trocknung entstehenden Brüden werden in den Brennraum zurückgeführt. Das Rauchgas wird am oberen Ende der Wirbelschicht zur

Wärmeübertragung und Rauchgasreinigung abgeleitet. Die im Etagentrockner als Kühlmittel genutzte Luft wird in der Wirbelschicht als vorgewärmte Verbrennungsluft verwendet. Für den Anfahrprozess wird ein Ölbrenner unterhalb der Wirbelschicht eingesetzt. (Schnell et al 2018)

### **Typische Brennstoff- und Anlagendaten**

In Deutschland wird zurzeit lediglich eine Klärschlammverbrennungsanlage mit Etagenwirblern in Frankfurt betrieben, deren Ersatz durch eine stationäre Wirbelschicht allerdings bereits geplant ist. Die Anlage besteht aus vier Linien mit einer genehmigten Kapazität von insgesamt 52.560 t<sub>TM</sub>/a und einer Feuerungswärmeleistung von ca. 40 MW. Es werden maximal drei Etagenwirbler gleichzeitig betrieben, sodass die tatsächlich verwertete Klärschlammmenge ca. 35.000 t<sub>TM</sub>/a beträgt. In der Anlage wird unausgefaulter Rohschlamm nach Entwässerung verwertet.

Nach der Trocknung im Etagenofen wird der Klärschlamm bei ca. 830 °C in der Wirbelschicht verbrannt. Zur Stützfeuerung kann Heizöl in die Wirbelschicht zugegeben werden. Das heiße Rauchgas strömt in einen Abhitzekeessel. Die Wärme wird auf einen Wasser-Dampf-Prozess übertragen und in ca. 2,5 MW Strom umgewandelt. Dieser Strom wird zur Deckung des Eigenbedarfs der Anlage genutzt. (Schmid, 2018)

### **Erforderliche Abgasreinigungstechnik**

Die Abgasreinigung der Anlage in Frankfurt besteht aus einer SNCR-Anlage zur Minderung der Stickoxidemissionen, einer Entstaubung mittels E-Abscheider sowie einer zweistufigen nassen Abscheidung von SO<sub>2</sub>. Weiterhin durchströmt das Abgas einen Aktivkohle-Festbettfilter zur Adsorption von Quecksilber und organischen Schadstoffen. (Schmid, 2018)

### **Reststoffaufkommen**

Wie bei der Klärschlammverbrennung in stationären Wirbelschichten wird ein Großteil der Klärschlammverbrennungsasche über das Rauchgas ausgetragen und anschließend im E-Abscheider abgeschieden. Weiterhin fallen flüssige und feste Rauchgasreinigungsrückstände an.

### **Energieeffizienz und Technologiereifegrad**

Durch den höheren Heizwert des unausgefaulten Klärschlammes gegenüber dem üblicherweise eingesetzten Faulschlamm, ist die autotherme Klärschlammverbrennung im Etagenwirbler in der Regel problemlos möglich. Über den Wasserdampfprozess wird mit Turbine und Generator Strom zur Deckung des Eigenbedarfs erzeugt.

Der bestehende Etagenwirbler in Frankfurt wird bereits seit 1981 betrieben. Durch die redundante Ausführung der Verbrennungs- und Abgasreinigungslinien wird eine sehr hohe Anlagenverfügbarkeit von über 95 % erreicht. Der technologische Reifegrad ist mit TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes) zu charakterisieren. Der Ersatz der bestehenden Anlage durch eine stationäre Wirbelschicht befindet sich allerdings bereits in Planung. Neuinstallationen dieser Verbrennungstechnik hat es zuletzt nicht gegeben.

**Tabelle 5: Steckbrief Etagenwirbler**

Verfahren	Etagenwirbler		TRL	9
Hersteller/Anbieter	Lurgi		Anzahl Referenzanlagen	1 (in Deutschland)
			Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	8.568 h (Durchschnitt 2016-2020)
			Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	31.494 t <sub>TM</sub> (aufgeteilt auf 4 Linien, davon 3 parallel in Betrieb Bezugsjahr 2020)
Standorte	Frankfurt am Main		Feuerungs-wärmeleistung	ca. 10 MW je Linie

Verfahren / Reaktor		Etagenwirbler	
Ziel	Verbrennung von entwässertem Klärschlamm ohne vorherige Trocknung		
Besonderheiten	Ofenaufbau mit beweglichen Teilen in heißen Zonen, Rohschlammverbrennung, integrierte Trocknung		

Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
Entwässertes Rohschlamm	Korngröße	keine Einschränkung	Luftzahl	keine Angabe
	TR	25-28 %	Temperatur	ca. 830 °C
	Heizwert	keine Einschränkung	VWZ	Hohe Feststoffverweilzeiten > 2 s (Gas)
falls keine selbstgängige Verbrennung möglich, wird Hilfsbrennstoff zugegeben			Hilfsbrennstoffe (spezifische Menge)	Heizöl (80 kg/t <sub>TM</sub> )

Output		
Fest (spezifische Menge)	Klärschlammverbrennungs-asche (300-500 kg/t <sub>TM</sub> )	Rauchgasreinigungsrückstände
flüssig	Rauchgasreinigungsrückstände	
gasförmig	Abgas	

Produktnutzung/Reststoffentsorgung (Klärschlammverbrennungsasche)	
ist (Kosten)	Verwertung als Baustoff (67 €/t)
geplant	Ascheaufbereitung zur Verwertung als Düngemittel

#### 2.1.2.5 Rostfeuerung

##### Beschreibung des Verfahrens

Die Rostfeuerung wird zur thermischen Verwertung verschiedener fester Brennstoffe, wie z. B. Abfall und Biomasse, eingesetzt. Die Klärschlammverbrennung erfolgt sowohl durch Mitverbrennung in Rostfeuerungen von MVA als auch in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen mit Rostfeuerung. Für eine selbstgängige Verbrennung wird der Klärschlamm getrocknet aufgegeben. Zur Beschickung können spezielle Schleuderräder bzw. Wurfbeschicker eingesetzt werden, mit denen der Klärschlamm in die Brennkammer direkt auf das Glutbett des Rostes geworfen wird. Die Verbrennungsluft wird von unten durch den Rost in den Brennraum geleitet und soll so für einen vollständigen Feststoffausbrand sorgen. Die Klärschlammverbrennungsasche wird am Rostende über den Ascheaustrag aus der Brennkammer ausgeschleust. Bei geringen Korngrößen besteht die Gefahr, dass kleine Klärschlammpartikel durch den Rost fallen und der vollständige Feststoffausbrand nicht sichergestellt ist. Das Rauchgas strömt nach Verlassen der Brennkammer durch einen Abhitzekeessel und wird anschließend der Abgasreinigung zugeführt. (Schnell et al 2018)

##### Typische Brennstoff- und Anlagendaten

In Deutschland wird aktuell nur eine Rostfeuerungsanlage zur Klärschlammverbrennung in Altenstadt betrieben. Diese Anlage befindet sich seit 2008 in Betrieb und hat eine genehmigte Kapazität von 41.250 t<sub>TM</sub>/a sowie eine Feuerungswärmeleistung von ca. 15 MW, aufgeteilt auf zwei Verbrennungslinien.

In dieser Rostfeuerung wird der auf einen TR-Gehalt von 75 % getrocknete Klärschlamm bei ca. 900 °C verbrannt. Zur Aufrechterhaltung der Mindestfeuerraumtemperatur von 850 °C gemäß 17. BImSchV kann bedarfsweise ein Gasbrenner zugeschaltet werden. Die Wärmeenergie des Rauchgases wird im Abhitzekeessel auf ein Wärmeträgeröl übertragen, welches zur Wärmezufuhr im Trocknungsprozess eingesetzt wird. Überschüssige Wärme wird einer angrenzenden Biogasanlage zugeführt.

##### Erforderliche Abgasreinigungstechnik

Zur Abgasreinigung wird in der bestehenden Anlage eine SNCR-Anlage, ein Zyklon zur Vorabscheidung von Staub, eine Trockensorptionsstufe mit anschließendem Gewebefilter sowie ein Strahlwäscher mit Tropfenabscheider eingesetzt. Wie bei der stationären Wirbelschicht können aufgrund der vergleichsweise niedrigen Verbrennungstemperaturen zukünftig zusätzliche Maßnahmen zur Minderung von Lachgasemissionen erforderlich werden.

##### Reststoffaufkommen

Die Klärschlammverbrennungsasche wird über einen Ascheaustrag am Rostende sowie einen Zyklon als erste Stufe der Abgasreinigung abgeschieden. Aktuell wird die Asche bereits als Düngemittel eingesetzt, was aufgrund der geringen Schadstoffbelastung des behandelten Klärschlammes möglich ist. Weitere feste und flüssige Reststoffe fallen in der Rauchgasreinigung an.

## Energieeffizienz und Technologiereifegrad

In Kopplung mit der vorgeschalteten Trocknung ist in der Regel ein autothermer Betrieb der Anlage mit Klärschlamm möglich. Zudem kann überschüssige Wärme ausgekoppelt werden.

Die Anlage in Altenstadt wird bereits seit 2008 mit einer hohen Anlagenverfügbarkeit von ca. 8.000 h/a betrieben. Der technologische Reifegrad ist somit mit TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes) zu charakterisieren. Rostfeuerungen für die Klärschlammverbrennung sind allerdings selten und werden in der Regel für Brennstoffe mit größeren Korngrößen eingesetzt.

**Tabelle 6: Steckbrief Rostfeuerung**

Verfahren	Rostfeuerung		TRL	9
Hersteller/Anbieter	Aldavia BioEnergy GmbH (insolvent)		Anzahl Referenzanlagen	1 (in Deutschland)
			Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	ca. 8.000 h
			Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	ca. 40.000 t <sub>TM</sub> (zwei Linien, Bezugsjahr 2020)
Standorte	Altenstadt		Feuerungs-wärmeleistung	15 MW (Standort)

Verfahren / Reaktor		Rostfeuerung	
Ziel	Verbrennung von vorgetrocknetem Klärschlamm		
Besonderheiten	Gefahr von Rostdurchfall bei der Verbrennung, insbesondere bei kleinen Korngrößen		

Prozessbeschreibung					
Input		Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
Getrockneter Klärschlamm	Korngröße	kleine Körner können durch Rost fallen		Luftzahl	1,4-1,8
	TR	75 %		Temperatur	ca. 900 °C
	Heizwert	8 MJ/kg		VWZ	20 min (Feststoff) > 2 s (Gas)
	Annahme nach AVV	190805		Hilfsbrennstoffe	Erdgas
falls keine selbstgängige Verbrennung möglich, kann ein Gasbrenner zugeschaltet werden					



Output		
Fest (spezifische Menge)	Klärschlammverbrennungs- asche (300-500 kg/t <sub>TM</sub> )	Rauchgasreinigungsrückstände
flüssig	Rauchgasreinigungsrückstände	
gasförmig	Abgas	
Produktnutzung/Reststoffentsorgung (Klärschlammverbrennungsasche)		
ist	Düngemittel	
geplant (erwartete Kosten)	Ascheverwertung als Düngemittel	

### 2.1.2.6 Weitere Verbrennungsverfahren

#### 2.1.2.6.1 Staubbrenner

##### Beschreibung des Verfahrens

Staubfeuerungen sind vorwiegend aus der Kohlekraftwerkstechnik bekannt. Ein Staubbrenner der speziell für die Verbrennung von getrocknetem Klärschlamm entwickelt wurde, ist der sogenannte Impulsbrenner der Firma Carbotechnik Energiesysteme GmbH. Der Brenner wird aktuell insbesondere für die Anwendung in dezentralen Behandlungsanlagen vermarktet. Nach Trocknung muss der Klärschlamm zunächst aufgemahlen werden. Anschließend wird der pulverförmige Brennstoff über ein spezielles Dosiersystem zum Impulsbrenner gefördert. Mittels Luftstufung (Primär-, Sekundär- und Tertiärluft) und Erzeugung einer intensiven Turbulenz werden Brennstoff und Luft optimal durchmischt. Primär- und Sekundärluft werden im Brenner selbst zugeführt, die Tertiärluft wird in der anschließenden Nachbrennkammer eingebracht. Durch die radiale Strömung im Brenner und der nachgeschalteten Nachbrennkammer wird die Flamme von der Wand getrennt, sodass laut Anbieter auf eine Feuerfestausmauerung verzichtet werden kann. Das Rauchgas durchströmt zur Wärmeübertragung an einen Wasser-Dampf-Kreislauf einen Abhitzekeessel und wird anschließend der Rauchgasreinigung zugeführt.

##### Typische Brennstoff- und Anlagendaten

Aktuell bestehen eine Technikums- und eine Pilotanlage in Magdeburg mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW. Die Pilotanlage wurde im Mai 2022 in Betrieb genommen und ist für einen Klärschlammumsatz von 225 kg/h, bezogen auf die Trockenmasse, ausgelegt. Der entwässerte Klärschlamm wird in einem Bandtrockner auf einen TR-Gehalt von ca. 90 % getrocknet und hat einen Heizwert von ca. 12,6 MJ/kg.

Im Impulsbrenner können Temperaturen von bis zu 1.300 °C erreicht werden. Verschlackungen sollen durch Kühlung der Wände bzw. durch sehr kurze Verweilzeiten der Feststoffpartikel in den heißen Zonen vermieden werden. Innerhalb der Nachbrennkammer sinkt die Temperatur auf ca. 900 °C. Durch entsprechende Dimensionierung der Nachbrennkammer wird sichergestellt, dass die Anforderungen an Verweilzeit (2 s) und Temperatur (850 °C) der 17. BImSchV eingehalten werden.

### Erforderliche Abgasreinigungstechnik

Das Abgas wird über eine Rauchgasreinigungsanlage, bestehend aus Elektroabscheider, Trockensorption und Gewebefilter, einem Kamin zugeführt. Eine Stickoxidminderung ist trotz der hohen Verbrennungstemperaturen nach Herstellerangaben zur Einhaltung der Grenzwerte nicht erforderlich.

### Reststoffaufkommen

Die Klärschlammverbrennungsasche wird größtenteils direkt unterhalb der Nachbrennkammer und vor Abkühlung des Rauchgases im Kessel abgezogen. Bei Einhaltung der Grenzwerte und weiteren Anforderungen des Düngerechts kann die Asche direkt als Düngemittel eingesetzt werden. Weiterhin fällt Klärschlammverbrennungsasche in der ersten Stufe der Abgasreinigung, dem Elektroabscheider, an, welche einer Phosphorrückgewinnung zugeführt wird. Weitere feste Reststoffe fallen am Gewebefilter als feste Rauchgasreinigungsrückstände an.

### Energieeffizienz und Technologiereifegrad

In Kopplung mit einer vorgeschalteten Trocknung ist ein autothermer Anlagenbetrieb mit dem Impulsbrenner möglich. Die im Abhitzeessel an den Wasser-Dampf-Kreislauf übertragene Wärme kann zur Stromerzeugung in einer Turbine sowie zur Trocknung des Klärschlammes genutzt werden. Überschüssige Energie kann zudem aus dem Prozess ausgekoppelt werden.

Die Pilotanlage des Verfahrens in Magdeburg befindet sich seit Mai 2022 in Betrieb. Das Verfahren ist zudem im Technikum, ebenfalls mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW, über mehrere Jahre hinweg erfolgreich erprobt worden. Entsprechend wird das Verfahren hinsichtlich des Technologiereifegrades in TRL 6-7 (Prototyp in Einsatzumgebung/im Einsatz seit 1-5 Jahren) eingestuft.

**Tabelle 7: Steckbrief Staubfeuerung**

Verfahren	Staubfeuerung (Impulsbrenner)	TRL	6-7
<b>Hersteller/Anbieter</b>	Carbotechnik Energiesysteme GmbH	<b>Anzahl Referenzanlagen</b>	2 (Pilot-/Technikumsanlage)
		<b>Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden</b>	keine Angabe
		<b>Jährlicher Klärschlamm-durchsatz</b>	keine Angabe
<b>Standorte</b>	Magdeburg (Pilotanlage), Burghausen (Technikum)	<b>Feuerungs-wärmeleistung</b>	1 MW (Upscaling möglich)
<b>Verfahren / Reaktor</b>	Staubbrenner (Impulsbrenner)		
<b>Ziel</b>	Dezentrale Verbrennung von vollgetrocknetem Klärschlamm		
<b>Besonderheiten</b>	keine Feuerfestausmauerung erforderlich		

Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
getrockneter Klärschlamm	Korngröße	< 100 µm	Luftzahl	> 1
	TR	90 %	Temperatur	900 °C (1.300 °C in der Kernzone der Flamme)
	Heizwert	11-13 MJ/kg	VWZ	< 0,5 s (Feststoff in der Kernzone bei 1.300 °C) > 2 s (Gas)
Trocknung und Mahlung zu Staub erforderlich			Hilfsbrennstoffe	keine
Output				
Fest (spezifische Menge)	Klärschlammverbrennungsasche (300-500 kg/t <sub>TM</sub> )		Rauchgasreinigungsrückstände	
flüssig	ggf. Rauchgasreinigungsrückstände			
gasförmig	Abgas			
Produktnutzung/Reststoffentsorgung (Klärschlammverbrennungsasche)				
ist	bisher nur Versuchs- bzw. Pilotbetrieb			
geplant	Düngemittel (nach Aufbereitung)			

#### 2.1.2.6.2 Paddelofen

##### Beschreibung des Verfahrens

Der Paddelofen der Firma Michaelis wurde ursprünglich für die Verbrennung von Siedlungs- und Sonderabfall konzipiert, wird aktuell aber auch für die Verbrennung von Klärschlamm eingesetzt. Der Ofen besteht aus einer Hauptbrennkammer, die mit Feuerfestmaterial ausgekleidet ist. In dieser wird der Brennstoff durch Paddel vom Aufgabeschacht bis zum Ascheaustrag vorgeschoben. Die Paddel sind an wassergekühlten Wellen befestigt und individuell vor- und rückwärts steuerbar, sodass interne Rezirkulation bzw. Rückmischungen des Feststoffes ermöglicht werden. Zur Aufheizung und Aufrechterhaltung der Verbrennungstemperatur von mindestens 750 °C ist die Hauptbrennkammer mit Stützbrennern ausgestattet. Brennstoff und Rauchgas werden dabei im Gleichstrom geführt. Am unteren Ende der Hauptbrennkammer wird die Asche in einen Aschekasten ausgetragen. Das Rauchgas strömt anschließend weiter in die Nachbrennkammer. Dort werden die Rauchgase aus der Hauptbrennkammer vollständig oxidiert. Zur Einhaltung der Anforderungen der 17. BImSchV (850 °C für mindestens 2 s) kann in der ersten Stufe der Nachbrennkammer, der sogenannten Mischkammer, mit Hilfe eines Brenners die Verbrennungstemperatur angehoben werden. In der Mischkammer werden Brennerabgas und Rauchgas durch hohe Turbulenz gleichmäßig durchmischt. Durch mehrere Umlenkungen in der anschließenden Verweilzeitkammer wird die vollständige Oxidation aller Rauchgasbestandteile gewährleistet. Das Abgas durchströmt

anschließend einen Thermalölkessel, die Rauchgasreinigung, einen Gas-Gas-Wärmeübertrager sowie einen Luftvorwärmer und wird schließlich dem Kamin zugeführt.

### **Typische Brennstoff- und Anlagendaten**

Im Jahr 2017 wurde der erste Paddelofen zur Klärschlammverbrennung am Standort Obernburg (Bayern) in Betrieb genommen. Die Anlage ist auf eine Feuerungswärmeleistung von 6,4 MW und für einen jährlichen Klärschlammumsatz von 9.120 t<sub>TM</sub>/a ausgelegt. Der entwässerte Klärschlamm wird zunächst in einem Dünnschichttrockner auf einen TR-Gehalt von 38 % getrocknet. Da der Heizwert des behandelten Klärschlammes unterhalb von 4,5 MJ/kg liegt, muss im Dauerbetrieb zusätzliche Energie in Form von Erdgas über die Zünd- und Stützbrenner im Prozess zugegeben werden.

Das Abgas aus der Nachbrennkammer wird in einem Thermalölkessel von 850-900 °C auf ca. 400 °C abgekühlt. Die Wärme wird ausgekoppelt und einem Verbraucher zur Verfügung gestellt. Die zur Trocknung des Klärschlammes benötigte Energie wird mittels Wärmeübertragung aus dem Abgas nach der Rauchgasreinigung bereitgestellt.

### **Erforderliche Abgasreinigungstechnik**

Das ca. 400 °C heiße Abgas wird zunächst auf einen Gas-Gas-Wärmeübertrager geleitet, um es nach einer zweistufigen Sauergasabscheidung vor der Entstickung in einer SCR-Anlage wieder aufzuheizen. Die Sauergasabscheidung besteht aus einer Trockenstufe, in der Kalkhydrat und Aktivkohle in das Rauchgas eingedüst und anschließend an einem Gewebefilter abgeschieden werden. Die zweite Stufe ist ein Sprühwäscher mit Einsatz von Natronlauge. In der SCR-Anlage wird Harnstoff als Reduktionsmittel zur Minderung der Stickoxidemissionen eingesetzt.

### **Reststoffaufkommen**

Der Großteil der Klärschlammverbrennungsasche fällt am Ascheaustrag in der Hauptbrennkammer an. Diese Asche wird aufgrund der hohen Zink-Gehalte des am Standort verwerteten Klärschlammes einer Verhüttung zur Zink-Rückgewinnung zugeführt. Weiterhin werden am Gewebefilter trockene Rauchgasreinigungsrückstände abgeschieden. Im Sprühwäscher fällt Abwasser an.

### **Energieeffizienz und Technologiereifegrad**

Aufgrund des niedrigen Heizwertes des auf einen TR-Gehalt von 38 % getrockneten Klärschlammes ist ein autothermer Betrieb der Anlage nicht jederzeit möglich. Zusatzenergie wird in Form von Erdgas in den Prozess eingebracht. Die Abwärme des Verbrennungsprozesses wird einerseits zur Klärschlamm-trocknung und zur Wiederaufheizung des Rauchgases vor der Entstickung in einer SCR-Anlage verwendet. Andererseits wird die an einen Thermalölkreislauf übertragene Energie aus dem Prozess ausgekoppelt und einem Verbraucher zur Verfügung gestellt.

Der Paddelofen zur Klärschlammverbrennung wird seit 2017 am Standort Obernburg betrieben. Seit 2006 wurden für andere Brennstoffe mehr als 18 Anlagen erfolgreich in Betrieb genommen, welche für thermische Leistungen im Bereich von 0,5-16 MW ausgelegt sind. Für die Klärschlammverwertung wird das Verfahren mit TRL 8 (Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich) bewertet.

**Tabelle 8: Steckbrief Paddelofen (Vorschubofen)**

Verfahren	Paddelofen (Vorschubofen)		TRL	8
Hersteller/Anbieter	Michaelis GmbH & Co. KG		Anzahl Referenzanlagen	1
			Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	keine Angabe
			Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	9.120 t <sub>TM</sub> /a (Genehmigung)
Standorte	Obernburg	Feuerungs-wärmeleistung	6,4 MW	

Verfahren / Reaktor	Paddelofen			
Ziel	Dezentrale Verbrennung von teilgetrocknetem Klärschlamm			
Besonderheiten	Robustes Verbrennungsverfahren, unempfindlich gegenüber Schwankungen der Brennstoffeigenschaften			

Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
getrockneter Klärschlamm	Korngröße	keine Vorgaben	Luftzahl	keine Angabe
	TR	38 %	Temperatur	750-900 °C
	Heizwert	ca. 3-4 MJ/kg	VWZ	hohe Feststoffverweilzeiten > 2 s (Gas)
	P-Gehalte	1,3 %	Hilfsbrennstoffe	Erdgas
Klärschlammvortrocknung aktuell auf 38 % TR-Gehalt. Damit allerdings kein autothermer Anlagenbetrieb möglich. Aktuell Verbrennung von überwiegend industriellem Klärschlamm mit hohen Zinkgehalten (> 10 %)				

Output		
Fest (spezifische Menge)	Klärschlammverbrennungs-asche (300-500 kg/t <sub>TM</sub> )	Rauchgasreinigungsrückstände
flüssig	Abwasser aus Sprühwäscher (Rauchgasreinigungsrückstand)	
gasförmig	Abgas	

Produktnutzung/Reststoffentsorgung (Klärschlammverbrennungsasche)	
ist	Verhüttung zur Zink-Rückgewinnung
geplant	Phosphor-Recycling

#### 2.1.2.6.3 Klärschlammreformer

##### Beschreibung des Verfahrens

Im Klärschlammreformer der Firma Thermo-System wird getrockneter Klärschlamm in einem mehrstufigen Verbrennungsprozess thermisch verwertet. Ursprünglich war das Verfahren als Klärschlammvergasung geplant und wurde aufgrund von Betriebsproblemen von zwei Pilotanlagen in ein mehrstufiges Verbrennungsverfahren umgerüstet. Der Reaktor ist in drei räumlich getrennte Zonen unterteilt. In der ersten Zone wird der aufgegebene Klärschlamm unter Sauerstoffabschluss pyrolysiert. Feststoff und Pyrolysegas werden anschließend in zwei unterschiedlichen Kammern vollständig oxidiert. Durch die räumliche Trennung soll eine unabhängige Regelung der Prozessbedingungen ermöglicht werden. Die entstehende Asche wird aus dem Prozess ausgeschleust, abgekühlt und anschließend in Big Bags abgefüllt. Das Abgas wird über einen Wärmeübertrager abgekühlt und durchströmt anschließend die Rauchgasreinigung.

##### Typische Brennstoff- und Anlagendaten

Aktuell befinden sich zwei Klärschlammreformer in Betrieb. Eine Anlage wird in Renningen betrieben, die andere in Grünstadt. Die Anlage in Renningen ist für einen Klärschlammdurchsatz von ca. 700 t<sub>TM</sub>/a ausgelegt und hat eine Feuerungswärmeleistung von 300 kW. Der Klärschlamm wird vor der Verbrennung in einem Solartrockner auf einen TR-Gehalt von 75-90 % getrocknet. Im Dauerbetrieb der Anlage ist zur Einhaltung der Anforderungen der 17. BImSchV keine Zugabe von Stützbrennstoffen erforderlich. Die Verbrennung des Pyrolysegases erfolgt bei etwa 900 °C. Das entstehende Abgas wird in einem Wärmeübertrager abgekühlt. Die ausgekoppelte Energie wird einerseits zur Klärschlamm Trocknung verwendet und andererseits in einem ORC-Prozess in elektrische Energie umgewandelt, welche zur teilweisen Deckung des Eigenenergiebedarfs der Anlage verwendet wird.

##### Erforderliche Abgasreinigungstechnik

Nach Durchströmen des Wärmeübertragers wird das Abgas einer dreistufigen Abgasreinigung zugeführt. In der ersten Stufe werden Staubpartikel abgeschieden. Die zweite Stufe besteht aus einer Nasswäsche zur Abscheidung von Sauergasen. Ein Polzeifilter zur Abscheidung von Schwermetallen und organischen Schadstoffen bildet die dritte Stufe der Abgasreinigung. Anschließend wird das gereinigte Abgas einem Kamin zugeführt.

##### Reststoffaufkommen

Im Betrieb der Anlage fallen ca. 250-350 t Klärschlammverbrennungsasche (in Abhängigkeit des Aschegehalts des Klärschlammes) pro Jahr an, welche nach Granulierung anschließend als Düngemittel eingesetzt werden soll. In der Rauchgasreinigung fallen zudem feste und flüssige Rauchgasreinigungsrückstände an.

##### Energieeffizienz und Technologiereifegrad

Durch die abwärmegestützte Trocknung des Klärschlammes auf einen TR-Gehalt von über 75 % ist ein autothermer Betrieb der Anlage möglich. Nur in Anfahrprozessen wird Zusatzenergie in Form von Erdgas benötigt. Die Abwärme aus dem Prozess wird einerseits zur Trocknung des

Klärschlamm und andererseits zur Erzeugung elektrischer Energie in einem ORC Prozess genutzt, wodurch ein Großteil des Eigenstrombedarfes der Anlage gedeckt werden kann.

Aktuell befinden sich zwei Klärschlammreformer in Betrieb. Das Verfahren wird von der Firma Thermo-System aktuell jedoch nicht weiter angeboten. Eine der in Betrieb befindlichen Anlagen wird über das Umweltinnovationsprogramm des BMU gefördert. Fördervoraussetzung ist, dass das Verfahren nicht Stand der Technik ist. Der technologische Reifegrad des Verfahrens wird mit TRL 7 (Prototyp im Einsatz für 1-5 Jahre) bewertet.

**Tabelle 9: Steckbrief Klärschlammreformer**

Verfahren	Klärschlammreformer	TRL	7	
Hersteller/Anbieter	Thermo-System	Anzahl Referenzanlagen	2	
		Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	keine Angabe	
		Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	1.300 t <sub>TM</sub>	
Standorte	Grünstadt, Renningen	Feuerungs-wärmeleistung	285 kW	
Verfahren / Reaktor				
Klärschlammreformer (Mehrstufiger Verbrennungsprozess)				
Ziel	Dezentrale thermische Klärschlammverwertung für mittelgroße Kläranlagen (25.000-100.000 EW)			
Besonderheiten	Umrüstung eines Vergasungsverfahrens in ein gestuftes Verbrennungsverfahren			
Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
getrockneter Klärschlamm	Korngröße	keine Vorgaben	Luftzahl	> 1
	TR	80-85 %	Temperatur	900 °C
	Heizwert	ca. 7 MJ/kg	VWZ	Hohe Feststoffverweilzeiten 2 s (Gas)
	P-Gehalte	1,3 %	Hilfsbrennstoffe	Erdgas
Klärschlamm wird in einem abwärmegestützten Solartrockner getrocknet				



Output		
Fest (spezifische Menge)	Klärschlammverbrennungs- asche (250-350 kg/t <sub>TM</sub> )	Rauchgasreinigungsrückstände
flüssig	ggf. Rauchgasreinigungsrückstände	
gasförmig	Abgas	
Produktnutzung/Reststoffentsorgung (Klärschlammverbrennungsasche)		
ist (Kosten)	Deponie (120 €/t)	
geplant	vollständige Ascheverwertung als Düngemittel	

### 2.1.3 Mitverbrennung

#### 2.1.3.1 Kohlekraftwerke

Für die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken gibt die 17. BImSchV die maßgeblichen Rahmenbedingungen vor. Trägt Klärschlamm zu weniger als 25 % zur Feuerungswärmeleistung bei, gelten gesonderte Grenzwerte gemäß § 9 und Anlage 3 der Verordnung. Die zulässigen Emissionsgrenzwerte werden teilweise rechnerisch mittels Mischungsregel, anteilig zum eingesetzten Klärschlamm, bezogen auf den Grundbrennstoff, festgelegt. Klärschlamm wird sowohl in Kohlekraftwerken eingesetzt, die primär der Stromerzeugung dienen und überwiegend als Staubfeuerung ausgeführt sind, als auch in Veredlungs- bzw. Heizkraftwerken, in denen zirkulierende Wirbelschichten oder Rostfeuerungen als Verbrennungsverfahren eingesetzt werden.

In Kraftwerken mit Staubfeuerung liegen die eingesetzten Klärschlamm-mengen deutlich unterhalb des Anteils von 25 % der Feuerungswärmeleistung, Werte von weniger als 2 % sind die Regel (Schnell et al., 2020). Die Gründe hierfür liegen insbesondere in der Verfahrenstechnik. Der Einsatz von Klärschlamm wird einerseits durch die zur Verfügung stehenden Trocknungskapazitäten begrenzt, da der Klärschlamm in diesen Anlagen in der Regel in entwässerter Form in die Fallschächte vor den Kohlemühlen zugegeben wird. Dort wird der Klärschlamm mit der Kohle vermischt, vermahlen und getrocknet. Die zur Trocknung verfügbare Wärme ist in diesem Fall ein limitierender Faktor für die Kapazität der Mitverbrennung (Basse et al., 2011). Andererseits wird der Einsatz von Klärschlamm in diesen Anlagen durch die Veränderung der Abgaszusammensetzung sowie die resultierenden hohen Belastungen der Rückstände, wie Aschen und REA-Gips, mit Schadstoffen aus dem Klärschlamm (z. B. Schwermetalle) begrenzt. Die Mitverbrennungskapazitäten in Kohlekraftwerken mit Staubfeuerung werden aufgrund des beschlossenen Ausstiegs Deutschlands aus der Kohleverstromung bis 2038 schrittweise wegfallen. (Schnell et al., 2020)

Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken mit zirkulierender Wirbelschicht oder Rostfeuerung erfolgt die Zuführung direkt in die Feuerung. Dabei wird sowohl entwässerter als auch teil- und vollgetrockneter Klärschlamm mitverbrannt. Die eingesetzte Klärschlamm-menge wird durch die genehmigte Kapazität begrenzt. Die Mitverbrennungskapazitäten in Veredlungs- und Heizkraftwerken sind vom Ausstieg aus der Kohleverstromung zunächst nicht betroffen, da sie nicht zur Stromproduktion dienen. Allerdings

können auch diese Kraftwerke spätestens ab 2038 von der geplanten Stilllegung der Braunkohletagebaue betroffen sein. (Schnell et al., 2020)

#### **2.1.3.2 Müllverbrennung**

Die Mitverbrennung von Klärschlamm erfolgt überwiegend in MVA mit Rostfeuerung sowie vereinzelt in EBS-Kraftwerken mit Wirbelschichtfeuerung. Die Klärschlämme werden sowohl in entwässelter als auch teil- oder vollgetrockneter Form eingesetzt, allerdings können vollgetrocknete Schlämme leichter durch den Rost fallen. Entwässelter Klärschlamm stellt den überwiegenden Anteil der mitverbrannten Klärschlämme dar. Aufgrund der niedrigen Heizwerte ist der Anteil an der Feuerungswärmeleistung entsprechend gering. Verfahrens- und emissionstechnisch ist die Mitverbrennung von Klärschlamm in MVA bis zu einem gewissen Anteil unbedenklich. Bei hohen Anteilen können, neben einem unvollständigen Ausbrand, die hohen Staub- und Schwefelemissionen problematisch sein (Schnell et al., 2018). Die genehmigten Kapazitäten zur Mitverbrennung von Klärschlamm werden in den meisten Anlagen allerdings weitestgehend unterschritten. Die Mitverbrennung von Klärschlamm ist ab 2029 nur noch bei Unterschreitung eines Phosphorgehaltes von 20 g/kg<sub>TM</sub> möglich. Nachgeschaltete Verfahren zur Phosphorrückgewinnung sind aufgrund der Einbindung des Phosphors in die MVA-Schlacke nicht möglich bzw. ab 2029 nicht zulässig.

#### **2.1.3.3 Zementwerke**

Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken gelten ebenfalls die Anforderungen der 17. BImSchV § 9 und Anlage 3 an die Emissionsgrenzwerte. Klärschlamm wird in Zementwerken sowohl in entwässelter als auch teil- und vollgetrockneter Form mitverbrannt. Da hohe Wassergehalte zu Problemen beim Klinkerbrennprozess führen können, werden entwässerte und teilgetrocknete Klärschlämme nur am Ofeneinlauf oder Kalzinator zugegeben (Schnell et al., 2018). Vollgetrocknete Klärschlämme werden sowohl am Ofeneinlauf und Kalzinator als auch im Hauptbrenner eingesetzt. Als Voraussetzung zur Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken gibt es insbesondere Anforderungen an den Phosphor-, Chlor- und Schwefelgehalt des Klärschlammes sowie bezüglich der Maximalkonzentration diverser Schwermetalle. Während die Limitierung des Phosphorgehalts verfahrenstechnisch begründet ist, da Phosphor die Qualität des Klinkers beeinträchtigen kann, werden die Grenzwerte für die weiteren Elemente in der Regel durch die Genehmigung vorgegeben, da sie emissionstechnisch problematisch sind. Auch die Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken ist ab 2029 nur noch bei Unterschreitung eines Phosphorgehaltes von 20 g/kg<sub>TM</sub> möglich, da die Klärschlammverbrennungsasche vollständig in die Klinkermatrix eingebunden wird und somit eine nachgeschaltete Phosphorrückgewinnung nicht möglich ist.

#### **2.1.4 Sonstige thermische Behandlungsverfahren**

Als sonstige thermische Behandlungsverfahren für Klärschlämme werden die Pyrolyse und die Vergasung eingesetzt. Weiterhin wird Klärschlamm mittels hydrothormaler Karbonisierung (HTC) behandelt. Diese Verfahren unterscheiden sich von den Verbrennungsverfahren insbesondere dadurch, dass keine vollständige Oxidation der organischen Bestandteile erfolgt und somit ein kohlenstoffhaltiger Rückstand als Feststoff und (teilweise kondensierbare) Gase mit brennbaren Bestandteilen entstehen (Schnell et al., 2018).

##### **2.1.4.1 Pyrolyse**

Als Pyrolyse wird allgemein die thermolytische Zersetzung von Materialien durch äußere Erwärmung unter Ausschluss von Sauerstoff bezeichnet. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich insbesondere durch die verfahrenstechnischen Prozessparameter, wie

Reaktionstemperaturen, Aufheiz-, Verweil- und Abkühlzeiten. Die Wahl dieser Parameter ist insbesondere von den gewünschten Zielprodukten abhängig. Je höher die Reaktionstemperatur, desto höher ist der Anteil gasförmiger Produkte (Pyrolysegas). Gleichzeitig sinken die Anteile kondensierbarer Bestandteile (Pyrolyseöl) und des festen kohlenstoffhaltigen Rückstands. Zur Behandlung von Klärschlamm wird insbesondere die langsame Pyrolyse in Drehrohr- oder Schneckenreaktoren bei Temperaturen im Bereich von 400-800 °C angewendet. Pyrolysegas bestehen üblicherweise aus Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Methan und weiteren Kohlenwasserstoffen. Die Konzentrationen weiterer Bestandteile, wie flüchtiger Schwermetalle oder Stickstoff- und Schwefelverbindungen, hängen im Wesentlichen von der Klärschlammzusammensetzung ab. Der feste Rückstand besteht überwiegend aus inerten Stoffen (Mineralien) sowie Kohlenstoff, nichtflüchtigen Schwermetallen, Schwefel, Salzen und geringen Mengen Stickstoff. (Schnell et al., 2021)

Im Vergleich zur Verbrennung, Vergasung und HTC ist die Pyrolyse prinzipiell ein einfacher Prozess, da nur Wärme und keine weiteren Reaktionspartner erforderlich sind. Allerdings sind aufwändige Systeme zur Abdichtung der Reaktoren notwendig. Einerseits besteht bei unkontrolliertem Lufteintrag ein hohes Explosionsrisiko, andererseits geht von austretendem Pyrolysegas aufgrund der enthaltenen organischen Schadstoffe eine Umwelt- und Gesundheitsgefährdung aus. (Schnell et al., 2021)

Für die weitere Nutzung der im Pyrolyseprozess erzeugten Produkte sind in der Regel zusätzliche Aufbereitungsschritte erforderlich. Im Pyrolysegas können z. B. Teere, organische Schadstoffe, Schwefelverbindungen und Schwermetalle enthalten sein. Häufig werden die Pyrolysegas daher prozessintern verbrannt und so Wärme für die Beheizung des Pyrolysereaktors bereitgestellt (Schnell et al., 2021). Der feste kohlenstoffhaltige Rückstand ist für eine direkte Nutzung als (Phosphat-)Dünger nicht zugelassen. Ab 2029 sind nach aktuellem Stand somit eine zusätzliche thermische Behandlung sowie die Phosphorrückgewinnung aus der anfallenden Asche erforderlich.

#### **2.1.4.1.1 PYREG-Verfahren**

##### **Beschreibung des Verfahrens**

Im PYREG-Verfahren wird vollständig getrockneter Klärschlamm einer langsamen Pyrolyse bei 500-750 °C für 15-30 Minuten unterzogen. Der feste kohlenstoffhaltige Rückstand wird als Produkt über eine Zentralschleuse aus dem Prozess ausgeschleust und mit Wasser gekühlt. Das entstehende Pyrolysegas wird über einen Prozessgasfilter einer Nachbrennkammer zugeführt und darin vollständig oxidiert. Durch den Einsatz eines FLOX-Brenners (flammlöse Oxidation) werden besonders geringe NO<sub>x</sub>-Emissionen erzeugt. Weiterhin soll durch die direkte Nachverbrennung des Pyrolysegases die Kondensation von problematischen Stoffen, wie Ölen und Teeren, vermieden werden. Die Nachbrennkammer wird mithilfe eines Startbrenners und dem Einsatz von Klärgas vorgeheizt. Das heiße Abgas aus der Nachbrennkammer wird zur Beheizung des Pyrolysereaktors genutzt. In einem weiteren Wärmeübertrager kann zudem Wärme aus dem Prozess ausgekoppelt werden, um zum Beispiel einen Teil der benötigten Wärme für die Klärschlamm Trocknung zu ersetzen. Anschließend wird das Rauchgas nach Durchströmen einer Rauchgasreinigungsanlage einem Kamin zugeführt.

##### **Typische Brennstoff- und Anlagendaten**

Für eine Referenzanlage gibt PYREG einen Klärschlammdurchsatz von bis zu 2.870 t<sub>TM</sub>/a und eine Feuerungswärmeleistung von ca. 1.500 kW an. Der Klärschlamm wird vor der Pyrolyse auf einen TR-Gehalt von ca. 90 % getrocknet. Für die Anlagenauslegung wird mit einem Heizwert von 11 MJ/kg und einem Organikanteil von 60 % kalkuliert. Die jährliche Anlagenverfügbarkeit

beträgt laut Herstellerangaben bis zu 7.500 Stunden. Das bei der Pyrolyse erzeugte Gas wird bei ca. 1.000 °C vollständig verbrannt.

#### **Erforderliche Abgasreinigungstechnik**

Durch den Einsatz eines FLOX-Brenners sind keine zusätzlichen Minderungsmaßnahmen für Stickoxide im Prozess erforderlich. Die Rauchgasreinigung besteht aus einem nassen Wäscher zur Absorption von Sauer gasen, einem Staubabscheider sowie einem Aktivkohlefilter zur Minderung von Schwermetallen wie Quecksilber und organischen Schadstoffen.

#### **Reststoffaufkommen**

Im Prozess fallen in der Referenzanlage jährlich bis zu 1.480 t kohlenstoffhaltiger Rückstand an. Dieses Material ist nach aktuellem Stand in Deutschland nicht als Düngemittel zugelassen und muss entsprechend weiter thermisch verwertet bzw. einer Phosphorrückgewinnung zugeführt werden. Weiterhin fallen in der Rauchgasreinigung nasse und trockene Rauchgasreinigungsrückstände an.

#### **Energieeffizienz und Technologiereifegrad**

Da es sich bei der Pyrolyse um einen endothermen Prozess handelt, dem von außen Wärme zugeführt werden muss, wird ein Teil der Abwärme aus der Nachverbrennung der Pyrolysegase zur Beheizung des Prozesses selbst benötigt. Die Wärme die zusätzlich ausgekoppelt werden kann, reicht in der Regel nicht aus, um die erforderliche Trocknungsenergie für die Klärschlammvolltrocknung abzudecken. Somit ist der Prozess unter Einbeziehung der Klärschlamm-trocknung nicht autotherm, sondern es muss zusätzliche externe Energie bereitgestellt werden.

In Deutschland werden aktuell drei Anlagen des Herstellers PYREG zur Behandlung von Klärschlamm betrieben (Linz-Unkel, Homburg und Lorsbach). Die tatsächlichen Betriebsstunden und behandelten Klärschlamm-mengen dieser Anlagen liegen zum Teil erheblich unter den Herstellerangaben. Eine der in Betrieb befindlichen Anlagen wird über das Umweltinnovationsprogramm des BMU gefördert. Fördervoraussetzung ist, dass das Verfahren nicht Stand der Technik ist. Somit wird der technologische Reifegrad des Verfahrens mit TRL 7 (Prototyp im Einsatz für 1-5 Jahre) bewertet.

**Tabelle 10: Steckbrief PYREG-Verfahren**

Verfahren	PYREG-Verfahren	TRL	7
Hersteller/Anbieter	PYREG GmbH	Anzahl Referenzanlagen	3
		Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	2.665 h/a (Umfrage, eine Anlage) 7.500 h/a (Hersteller)
		Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	700-2.870 t <sub>TM</sub>
Standorte	Homburg, Linz-Unkel, Lorsbach	Feuerungs-wärmeleistung	500-1.500 kW

Verfahren / Reaktor	Pyrolyse-Schneckenreaktor mit nachgeschalteter FLOX-Brennkammer			
Ziel	Dezentrale Klärschlammbehandlung mittels Pyrolyse			
Besonderheiten	Pyrolysegas wird mittels FLOX-Brenner direkt nachverbrannt			
Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
getrockneter Klärschlamm	Korngröße	keine Einschränkung	Luftzahl	0 (Pyrolyse) > 1 (Nachverbrennung)
	TR	85 %	Temperatur	500-750 °C (Pyrolyse) 1.000 °C (Nachverbrennung)
	Heizwert	12,8 MJ/kg	VWZ	15-30 min (Feststoff) > 2 s (Gas, Nachbrennkammer)
	P-Gehalte	26 g/kg <sub>TM</sub>	Hilfsbrennstoffe	Klärgas (Startbrenner)
Klärschlamm wird in einem Niedertemperaturbandtrockner vollständig getrocknet. Die Wärmebereitstellung erfolgt durch Abwärme aus dem Prozess und zusätzlich z. B. aus einem Klärgas-BHKW				
Output				
Fest	Kohlenstoffhaltiger Rückstand (Produkt)		Rauchgasreinigungsrückstände	
flüssig	ggf. Rauchgasreinigungsrückstände			
gasförmig	Abgas			
Produktnutzung/Reststoffentsorgung				
ist	Lagerung			
geplant	vollständige Verwertung des kohlenstoffhaltigen Rückstandes als Düngemittel (sofern entsprechende Produktzulassung erfolgt)			

#### **2.1.4.1.2 TCR-Verfahren**

##### **Beschreibung des Verfahrens**

Das vom Fraunhofer Institut UMSICHT (Sulzbach-Rosenberg) entwickelte thermo-katalytische Reforming (TCR) ist ein mehrstufiges Pyrolyseverfahren. In der ersten Stufe wird Klärschlamm in einem Schneckenreaktor bei 400-500 °C pyrolysiert. Der dabei entstehende feste kohlenstoffhaltige Rückstand wird in einer nachgeschalteten zweiten Stufe bei 500-700 °C als Reformierschicht für das Produktgas genutzt. Das Produktgas wird anschließend abgekühlt. Die kondensierbaren Bestandteile werden entfernt. Das Verfahren zielt speziell auf die weitere Aufbereitung und Nutzung der Pyrolysegase und -öle als Brennstoffe ab. (Schnell et al., 2018)

##### **Typische Brennstoff- und Anlagendaten**

Es bestehen Versuchsanlagen des TCR-Verfahrens mit Durchsätzen von 2-300 kg/h. Zur Demonstration des Verfahrens wurde eine Anlage im Rahmen des EU-Förderprojektes To-Syn-Fuel im Markt Hohenburg im Landkreis Amberg-Sulzbach errichtet. Diese Anlage ist für einen Durchsatz von 500 kg/h getrockneten Klärschlamm ausgelegt. Bei einem TR-Gehalt von 95 % des behandelten Klärschlammes fallen im Prozess ca. 40-50 % kohlenstoffhaltiger Rückstand, 12-16 % Öl sowie 13-17 % Gas an. Die weiteren 23-27 % bilden das ebenfalls im Prozess anfallende Prozesswasser.

##### **Erforderliche Abgasreinigungstechnik**

Die erforderliche Abgasreinigungstechnik ist von der weiteren Nutzung des Synthesegases abhängig. Wird dieses nachverbrannt und zur Beheizung des Pyrolyseprozesses genutzt, ist eine Rauchgasreinigung zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV erforderlich.

##### **Reststoffaufkommen**

Der kohlenstoffhaltige Rückstand ist als Düngemittel nach aktuellem Stand nicht zugelassen, entsprechend ist eine nachgeschaltete thermische Behandlung und Phosphorrückgewinnung erforderlich. Im Prozess fallen zudem ca. 25 % Prozesswasser, bezogen auf den Klärschlamminput an. Diese können hohe Konzentrationen organischer sowie stickstoffhaltiger Bestandteile aufweisen und bedürfen entsprechend einer geeigneten Behandlung.

##### **Energieeffizienz und Technologiereifegrad**

Zur Beheizung des Pyrolyseprozesses kann ein Teil der Energie aus dem erzeugten Pyrolysegas durch Verbrennung genutzt werden. Die weitere im Pyrolysegas enthaltene Energie steht zum Beispiel für den vorgeschalteten Trocknungsprozess zur Verfügung. Zur Volltrocknung des Klärschlammes auf einen TR-Gehalt von 85-95 % ist jedoch eine zusätzliche Wärmebereitstellung erforderlich. 29-36 % der im getrockneten Klärschlamm enthaltenen Energie werden in den festen kohlenstoffhaltigen Rückstand überführt sowie 35-47 % in das Öl. Für die Verwendung des Öles als Brennstoff sind weitere energetisch aufwändige Aufbereitungsschritte (Hydrierung) erforderlich. Bei Nachverbrennung des kohlenstoffhaltigen Rückstandes kann ein weiterer Teil der im Gesamtprozess benötigten Energie durch Abwärme abgedeckt werden.

Ziel des Projektes To-Syn-Fuel ist die Validierung der Technologie in einem Prototyp im Einsatz für 1-5 Jahre, also einem technologischen Reifegrad von TRL 7. Zudem bestehen Planungen der Firma Bayernoil das Verfahren am Standort Vohburg für einen Durchsatz von 100.000 t<sub>TM</sub>/a zur Herstellung von Benzin, Kerosin und Diesel schrittweise umzusetzen. Bis 2030 soll die geplante Gesamtkapazität zur Verfügung stehen, 50 % bereits bis 2025. Der aktuelle technologische Reifegrad wird mit TRL 5-6 bewertet.

**Tabelle 11: Steckbrief TCR-Verfahren**

Verfahren	TCR-Verfahren		TRL	5-6
Hersteller/Anbieter	Fraunhofer Institut UMSICHT (Sulzbach-Rosenberg), Lizenznehmer Suncor Energy		Anzahl Referenzanlagen	1 (Pilotanlage)
			Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	keine Angaben
			Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	keine Angabe (425-475 kg <sub>TM</sub> /h)
Standorte	Markt Hohenburg (Bayern)		Feuerungs-wärmeleistung	keine Angabe

Verfahren / Reaktor		2-stufiges Pyrolyseverfahren bestehend aus Pyrolyse und Reformer		
Ziel		Erzeugung von Synthesegas, Öl und festem kohlenstoffhaltigen Rückstand		
Besonderheiten		Öl soll für Herstellung von Benzin, Kerosin und Diesel genutzt werden		

Prozessbeschreibung				
Input		Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess
getrockneter Klärschlamm	Korngröße	keine Einschränkung	Luftzahl	0
	TR	85-95 %	Temperatur	400-500 (Pyrolyse) 500-700 (Reformer)
	Heizwert	11 MJ/kg	VWZ	15-30 min
Bisher nur Anlagenprototypen bzw. Pilotanlagen in Betrieb, daher keine genaueren Angaben zum Trocknungskonzept			Hilfsbrennstoffe	keine Angabe

Output		
Fest	Kohlenstoffhaltiger Rückstand (Produkt)	Rauchgasreinigungsrückstände
flüssig	Öl, Prozesswasser, ggf. Rauchgasreinigungsrückstände	
gasförmig	Synthesegas	

Produktnutzung/Reststoffentsorgung	
ist	keine Angaben



geplant

Herstellung von Benzin, Kerosin, Diesel aus Öl und Phosphorrückgewinnung aus kohlenstoffhaltigem Rückstand

#### 2.1.4.1.3 PyroDry-Verfahren

##### Beschreibung des Verfahrens

Unter dem Namen PyroDry vermarktet die Next Generation Elements GmbH ein Pyrolyseverfahren für Klärschlamm in Kombination mit einem Klärschlamm Trockner und Pelletierer der Firma Jumbo Smart Dry GmbH (Schnell et al., 2022). Die eigentliche Pyrolyseeinheit wird auch mit dem Namen T:Cracker bezeichnet.

##### Typische Brennstoff- und Anlagendaten

In einer Referenzanlage der Anlagenhersteller können bis zu 1.250 t TM/a zunächst auf einen TR-Gehalt von ca. 90 % vollgetrocknet werden. Anschließend wird der getrocknete Klärschlamm pelletiert und schließlich der thermischen Behandlung in der Pyrolyseeinheit zugeführt. Die Pyrolyse erfolgt bei einer Temperatur von 500-600 °C. Aus dem Prozess werden laut Herstellerangaben ca. 675 t/a fester kohlenstoffhaltiger Rückstand ausgeschleust. Das Pyrolysegas wird mithilfe eines nachgeschalteten Brenners direkt verbrannt und die Abwärme zur Beheizung des Reaktors genutzt. Das Abgas mit einer Temperatur von ca. 300 °C wird im Trockner als Heißgasmedium zur Klärschlamm Trocknung verwendet und anschließend der Rauchgasreinigung zugeführt.

##### Erforderliche Abgasreinigungstechnik

Nachdem das Abgas aus der Nachverbrennung zur Trocknung des Klärschlammes genutzt wurde, wird das beladene Abgas über einen im Trockner integrierten Gewebefilter und über einen nachgeschalteten Biofilter in die Umgebung entlassen. Für die Einhaltung der Grenzwerte der 17. BImSchV ist davon auszugehen, dass weitere Abgasreinigungsschritte erforderlich sind. Über den weiteren Aufbau sind allerdings keine Informationen verfügbar.

##### Reststoffaufkommen

Für eine Referenzanlage mit einem Klärschlammdurchsatz von 1.250 t<sub>TM</sub>/a gibt der Anlagenhersteller an, dass 675 t/a fester kohlenstoffhaltiger Rückstand anfallen. Dieses Material ist nach aktuellem Stand nicht als Düngemittel zugelassen und muss entsprechend anderweitig, zukünftig unter Berücksichtigung der Phosphorrückgewinnungspflicht, verwertet werden.

Im Gewebefilter fallen zudem feste Rauchgasreinigungsrückstände an. Das Filtermaterial des Biofilters muss nach Erreichen der Standzeit ausgetauscht und je nach Schadstoffbeladung thermisch behandelt werden.

##### Energieeffizienz und Technologiereifegrad

Die Beheizung des Pyrolyseprozesses erfolgt durch die Abwärme aus der Nachverbrennung der Pyrolysegase. Die im Abgas enthaltene Energie wird weiterhin zur Klärschlamm Trocknung eingesetzt. Um den Klärschlamm auf einen TR-Gehalt von ca. 90 % vollständig zu trocknen, muss zusätzliche Energie, z. B. aus dem Abgas eines Klärgas-BHKW eingebracht werden.

Das Verfahren wurde zuletzt auf der Kläranlage Bissingen erprobt. Über den Probetrieb liegen allerdings keine Informationen vor. Der technologische Reifegrad des Verfahrens wird mit 6-7 (Prototyp in Einsatzumgebung/im Einsatz seit 1-5 Jahren) eingestuft.

**Tabelle 12: Steckbrief T:Cracker, PyroDry-Verfahren**

Verfahren	T:Cracker, PyroDry-Verfahren		TRL	6-7
Hersteller/Anbieter	Next Generation Elements GmbH (NGE) Jumbo group smart dry GmbH		Anzahl Referenzanlagen	1 (Testbetrieb)
			Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	keine Angaben
			Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	keine Angabe
Standorte	bisher nur Testbetrieb	Feuerungs-wärmeleistung	450 kW	

Verfahren / Reaktor	T:Cracker (Pyrolyseeinheit mit nachgeschalteter Pyrolysegasverbrennung)			
Ziel	Modulare und dezentrale Klärschlammverwertung			
Besonderheiten	Klärschlamm wird nach Trocknung pelletiert			

Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
getrockneter Klärschlamm	Korngröße	keine Einschränkung	Luftzahl	0 (Pyrolyse) > 1 (Nachverbrennung)
	TR	90 %	Temperatur	500-600 °C (Pyrolyse)
	Heizwert	keine Angabe	VWZ	keine Angabe
Der Klärschlamm wird in einem SpeedRotationstrockner mit heißem Abgas aus der Pyrolysegasverbrennung oder einem BHKW getrocknet.			Hilfsbrennstoffe	keine Angabe

Output		
Fest	Kohlenstoffhaltiger Rückstand (Produkt)	Rauchgasreinigungsrückstände und Biofiltermaterial
flüssig	kein	
gasförmig	Abgas	

Produktnutzung/Reststoffentsorgung	
ist	keine Angaben

geplant	vollständige Verwertung des kohlenstoffhaltigen Rückstandes als Düngemittel (sofern entsprechende Produktzulassung erfolgt)
---------	---

#### 2.1.4.2 Vergasung

In Vergasungsprozessen werden feste kohlenstoffhaltige Verbindungen thermochemisch, unter Zugabe eines Vergasungsmittels, in ein brennbares Gas umgewandelt. Die Klärschlammvergasung wird in der Regel mit Luft als Vergasungsmittel durchgeführt. Durch die teilweise Oxidation des Klärschlammes wird Wärme freigesetzt, welche je nach Heizwert bzw. TR-Gehalt des eingesetzten Klärschlammes für einen autothermen Reaktorbetrieb ausreicht. Neben dem Prozessgas fällt aufgrund des hohen Aschegehalts von Klärschlamm eine erhebliche Menge kohlenstoffhaltigen Rückstands an.

Die Zusammensetzung des Produktgases wird insbesondere durch die verfahrenstechnischen Prozessparameter sowie die Klärschlammzusammensetzung bestimmt. Bei höheren Vergasungstemperaturen nimmt der Anteil von Kohlenmonoxid und Wasserstoff im Prozessgas zu, wohingegen der Anteil an Methan sinkt. Höhere Drücke steigern hingegen die Bildung von Methan und Kohlendioxid. Neben diesen Komponenten besteht das Prozessgas z. B. aus Schwefelwasserstoff, Ammoniak sowie flüchtigen Schwermetallen und organischen Bestandteilen. Durch die Verwendung von Luft als Vergasungsmittel enthält das Produktgas zudem bis zu 60 % Stickstoff (Schnell et al., 2021). Im Vergleich zu Pyrolysegas aus Klärschlamm ist der Heizwert des Gases entsprechend geringer. Vor der weiteren Nutzung des Produktgases, z. B. in BHKW, ist eine Reinigung des Gases, insbesondere zur Abscheidung von Teeren und Staub, erforderlich. Für die Verwertung des festen Rückstandes ist in der Regel eine zusätzliche Oxidation erforderlich, um einen vollständigen Ausbrand zu gewährleisten und so die Nutzung der Asche für eine Phosphorrückgewinnung zu ermöglichen.

##### 2.1.4.2.1 SynGas-Verfahren

###### Beschreibung des Verfahrens

Die Firma KOPF SynGas GmbH & Co. KG bietet unter dem Namen SynGas ein Vergasungsverfahren für Klärschlamm an, bei dem vollständig getrockneter Klärschlamm in einem gestuften Vergaser behandelt wird. Als erste Stufe kommt ein Schneckenreaktor zum Einsatz, mit welchem der Klärschlamm aufgeheizt und in die zweite Stufe gefördert wird. In dieser zweiten Stufe, einem Wirbelschichtvergaser, wird der Klärschlamm vergast. Dort besteht die Möglichkeit zur Zumischung von Zuschlagstoffen, wie z. B. Kalkstein. Der feste Rückstand wird aus der Wirbelschicht ausgetragen und einer Phosphorrückgewinnung zugeführt. Das erzeugte Gas wird je nach Anwendungsfall weiter aufbereitet. Vom Verfahrensanbieter werden drei verschiedene Anwendungsfälle vorgeschlagen. Im Brenngasmodul wird ein Synthesegas erzeugt, welches z. B. für Stützfeuerungen in Zementwerken, MVA oder Heizkraftwerken eingesetzt werden kann. Das Wärmemodul beinhaltet eine direkte Nachverbrennung der Synthesegase zur Wärmeerzeugung für den Betrieb eines Klärschlamm Trockners oder zur Einspeisung in ein bestehendes Wärmenetz. Im BHKW-Modul ist die motorische Synthesegasnutzung mit dem Ziel der Stromerzeugung bei gleichzeitiger Abwärmenutzung vorgesehen.

###### Typische Brennstoff- und Anlagendaten

Aktuell befinden sich in Balingen und Koblenz Anlagen in Betrieb. Der Durchsatz beträgt 2.000 bzw. 4.000 t<sub>TM</sub> pro Jahr, was einer thermischen Leistung von 720 bzw. 1.800 kW entspricht. Der Klärschlamm wird mit einem TR-Gehalt von 85-95 % aufgegeben. Die vorgeschaltete Trocknung erfolgt mittels Bandtrockner. Die Vergasungstemperatur beträgt 850-900 °C und als

Vergasungsmittel wird Luft eingesetzt. Bei der Vergasung entsteht zunächst ein brennbares Gas, welches in einer dem Vergaser nachgeschalteten Gasaufbereitung behandelt wird. Anschließend kann das Gas zur Strom- und Wärmebereitstellung z. B. in einem BHKW oder als Brenngas in anderen Prozessen, wie z. B. Zementwerken, eingesetzt werden.

#### **Erforderliche Abgasreinigungstechnik**

Die erforderliche Abgasreinigung bzw. Synthesegasaufbereitung ist abhängig vom Anwendungsfall. Die höchsten Anforderungen stellt die Nutzung des Synthesegases im BHKW. In diesem Fall besteht die Gasaufbereitung aus einem Zyklon zur Vorentstaubung, einer Gaskühlung, einem Kerzenfilter zur Feinstaubabtrennung, einer Quench zur Teerabscheidung, einem Zentrifugalwäscher zur Aerosolabscheidung, einer sauren Wäsche zur Entfernung von Stickstoffverbindungen, sowie drei Filtern mit speziell dotierten Aktivkohlen zur Abscheidung von Schwermetallen, Schwefelwasserstoff und organischen Schadstoffen (z. B. Teere). Anschließend kann das Gas weitergenutzt werden. (Schnell et al., 2018)

#### **Reststoffaufkommen**

Im Vergasungsprozess fällt ohne zusätzliche Maßnahmen ein fester kohlenstoffhaltiger Rückstand an. Allerdings kann durch eine Nachoxidation ein vollständiger Feststoffausbrand (Organikanteil < 2 %) erreicht werden, sodass die anfallende Asche vergleichbar mit der aus einer Klärschlammverbrennung ist. Diese Asche kann anschließend, bei Einhaltung der Vorgaben der DüMV, als Düngemittel bzw. Ausgangsstoff für Düngemittel genutzt werden oder einem nachgeschalteten Phosphor-Recycling zugeführt werden.

Zusätzlich fallen Reststoffe in den Gasaufbereitungsschritten an. Als feste Reststoffe sind hierbei die Rückstände im Kerzenfilter und den Aktivkohlefiltern zu nennen. Flüssige Rauchgasreinigungsrückstände fallen in den Wäschern an.

#### **Energieeffizienz und Technologiereifegrad**

Im Prozess erfolgt eine Vorwärmung der als Vergasungsmittel eingesetzten Luft mittel Gas-Gas-Wärmeübertrager aus dem im Vergasungsprozess erzeugten Gas. Zusätzlich kann, je nach Strom- und Wärmenutzung des Synthesegases mittels BHKW, Energie für die Klärschlamm Trocknung bereitgestellt werden. Ein Teil des Synthesegases kann für die Beheizung des Schneckenreaktors genutzt werden. Laut Herstellerangaben wird im Gesamtprozess so ein Kaltgaswirkungsgrad von 66-70 % erreicht.

**Tabelle 13: Steckbrief SynGas-Verfahren**

Verfahren	SynGas-Verfahren	TRL	6-7	
Hersteller/Anbieter	Kopf SynGas GmbH & Co. KG	Anzahl Referenzanlagen	3 (in Deutschland)	
		Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden	2.200 h (Umfrage)	
		Jährlicher Klärschlamm-durchsatz	2.000-4.000 t <sub>TM</sub>	
Standorte	Balingen, Koblenz, (Mannheim)	Feuerungs-wärmeleistung	720-1.800 kW	
Verfahren / Reaktor				
2-stufiges Verfahren: Schneckenreaktor (Thermolyse) und Wirbelschichtvergaser				
Ziel				
Synthesegasproduktion und -verwertung je nach Anwendungsfall (3 Module, Brenngasmodul, Wärmemodul, BHKW-Modul)				
Besonderheiten				
Fester Rückstand aus der Vergasung wird nachoxidiert, sodass eine zur Klärschlammverbrennung vergleichbare Asche anfällt				
Prozessbeschreibung				
Input	Vorbehandlung		Thermochemischer Prozess	
getrockneter Klärschlamm	Korngröße	k. A.	Luftzahl	ca. 0,25
	TR	85-95 %	Temperatur	850-950 °C
	Heizwert	10-15	VWZ	ca. 30 Minuten (Feststoff)
Möglichkeit zur Direktentschwefelung durch Kalksteinzugabe im Vergasungsreaktor			Hilfsbrennstoffe	ggf. Faulgas
Output				
Fest	Klärschlammverbrennungsasche		Rauchgasreinigungsrückstände	
flüssig	ggf. Rauchgasreinigungsrückstände			
gasförmig	Abgas			
Produktnutzung/Reststoffentsorgung				
ist	Deponie, Zuschlagsstoff bei der Zementherstellung			

geplant

Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche

#### 2.1.4.2.2 Sonstige Vergasungsverfahren (Schmelzvergasung, metallurgische Verfahren)

Ein metallurgisches Verfahren zur Behandlung von Klärschlamm ist das Mephrec-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird vorgetrockneter und briktierter Klärschlamm in einem Kupolofen oder Schachtofen unter Zugabe von Koks und ggf. weiteren Zuschlagstoffen thermochemisch in Eisen, Schlacke und Brenngas umgewandelt. (Schnell et al., 2021)

Das zugeführte Material bewegt sich als Schüttung senkrecht nach unten durch den Ofen. Im oberen Bereich finden unter Sauerstoffabschluss Pyrolyse- und Vergasungsreaktionen statt. Der Feststoff wird mit bis zu 600 °C vorgewärmter Luft und reinem Sauerstoff als Oxidationsmittel in Kontakt gebracht. Durch die exothermen Reaktionen werden in dieser Zone Temperaturen von bis zu 2.000 °C erreicht. Bei diesen Temperaturen schmilzt der Feststoff und trennt sich aufgrund des Dichteunterschiedes in zwei flüssige Produktschichten, eine Eisenmetalllegierung und eine mineralische, phosphorhaltige Schlacke. Diese Schichten können getrennt aus dem Ofen ausgetragen werden. Die Schlacke wird anschließend gekühlt und granuliert und soll als Dünger verwendet werden. Da bezogen auf das Einsatzmaterial eine unterstöchiometrische Zugabe von Luft bzw. Sauerstoff erfolgt, wird der Prozess auch als Schmelzvergasung bezeichnet, es findet keine vollständige Oxidation statt. Das entstehende Gas strömt durch die Feststoffschüttung zum Reaktorkopf und von dort weiter in eine nachgeschaltete Brennkammer. Durch Zugabe von Luft wird hier eine vollständige Verbrennung erreicht. Die dabei entstehende Wärme wird zur Erwärmung der dem Kupolofen zugeführten Luft genutzt. Anschließend wird das Abgas einer Rauchgasreinigungsanlage zugeführt, die aus einer SNCR, einem Zyklon zur Entstaubung, einer Trockensorption mit Natriumhydrogencarbonat und Aktivkohle sowie einem Gewebefilter zur Feinstaubabscheidung besteht. (Schnell et al., 2018)

Das Verfahren wurde bisher im Rahmen eines Förderprojektes an einer Pilotanlage in Nürnberg erprobt. Nach Abschluss des Projektes konnte die Pilotanlage jedoch nicht in den geplanten Dauerbetrieb überführt werden. Dies war auf verschiedene Probleme bei den durchgeführten Versuchen zurückzuführen. Unter anderem war das erzeugte Rauchgas stark mit Staub, Schwefel und Stickoxiden belastet, so dass die Grenzwerte der 17. BImSchV mit der eingesetzten Rauchgasreinigung nicht eingehalten werden konnten. Weiterhin war der Heizwert des Gases nach der notwendigen Teerabscheidung zu gering, um es z.B. direkt als Brenngas in BHKWs einzusetzen. Der Phosphorgehalt des produzierten Schmelzgranulats war deutlich geringer als zu Projektbeginn angenommen und lag unterhalb der Zulassungsgrenze für Düngemittel. Stattdessen wurde ein Großteil des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors als Staub mit dem Gasstrom aus dem Prozess ausgetragen. Aufgrund weiterer technischer Probleme während der Projektlaufzeit konnten verschiedene Fragen nicht zufriedenstellend geklärt werden, so dass auf die Planung bzw. den Bau einer großtechnischen Anlage zunächst verzichtet wurde. (Hagspiel et al., 2018; Schnell et al., 2018)

#### **2.1.4.3 HTC-Verfahren**

Charakteristisch für hydrothermale Prozesse ist die Behandlung in wässrigem Medium bei erhöhten Temperaturen und Drücken. Das Wasser wird während der Behandlung im flüssigen oder überkritischen Zustand gehalten. Die Prozessparameter sind maßgeblich für die erzielten Produkte. Die hydrothermale Karbonisierung zielt auf die Erzeugung eines festen kohlenstoffhaltigen Rückstands und wird entsprechend zur Behandlung von Klärschlamm eingesetzt.

Der Prozess wird in flüssiger Phase bei Temperaturen von 180-250 °C und Drücken von 10-40 bar mit Verweilzeiten von 2-16 h durchgeführt (Schnell et al., 2021). Der dabei entstehende Rückstand weist nach der Entwässerung im Vergleich zum Inputmaterial einen deutlich höheren TR-Gehalt sowie einen höheren Heizwert und Kohlenstoffgehalt auf. Zur Unterstützung der thermochemischen Umwandlung werden dem Prozess z. B. Säuren zugesetzt (Schnell et al., 2018). Als Nebenprodukte fallen im Prozess einerseits Abgase, bestehend aus Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Schwefelwasserstoff, Wasserstoff, Methan und weiteren flüchtigen Kohlenwasserstoffen an. Andererseits entsteht Abwasser, das säurehaltig und mit organischen Bestandteilen sowie hohen Stickstoffanteilen belastet sein kann.

Das Hauptprodukt der HTC, der feste kohlenstoffhaltige Rückstand, ist in Deutschland nicht als Düngemittel zugelassen. Entsprechend ist zur Einhaltung der Phosphorrückgewinnungspflicht ab 2029 nach aktuellem Stand eine zusätzliche thermische Verwertung erforderlich. Die HTC bietet somit lediglich das Potential als Vorbehandlungsschritt, z. B. als Ersatz der Klärschlammtrocknung.

## **2.2 Phosphorrückgewinnung**

### **2.2.1 Einsatzstellen**

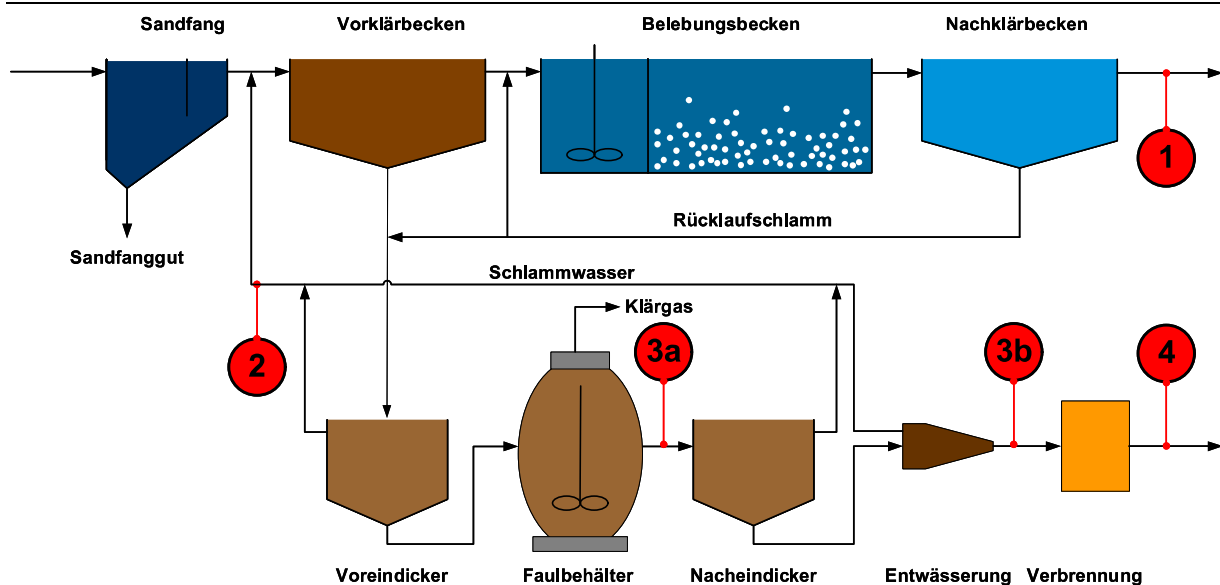
Die möglichen Einsatzstellen zur Phosphorrückgewinnung im Zusammenhang mit der kommunalen Abwasserbehandlung sind in Abbildung 3 dargestellt und vielfach in der Literatur ausführlich beschrieben (u. a. Pinnekamp et al., 2013). Diese sind:

- 1) Ablauf der Nachklärung
- 2) Schlammwasser
- 3a) Faulschlamm
- 3b) Entwässerter Klärschlamm
- 4) Klärschlammverbrennungsasche

Die Differenzierung zwischen der Einsatzstelle 3a und 3b bildet die rechtliche Abgrenzung zwischen Wasserrecht und Abfallrecht.



**Abbildung 3: Einsatzstellen zur Phosphorrückgewinnung**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### Phosphorrückgewinnung an Einsatzstelle 1

Im Kläranlagenablauf liegt Phosphor als gelöstes Orthophosphat vor. Die Phosphorkonzentration beträgt hier üblicherweise  $< 5 \text{ mg P/l}$ , selbst wenn auf eine vorherige gezielte Phosphor-Elimination verzichtet wird, um als letzte Verfahrensstufe P-Elimination und Phosphorrückgewinnung zu koppeln. Das Rückgewinnungspotential für Phosphor beträgt somit zwar maximal ca. 55 % (Montag et al., 2010); es ist dennoch aufgrund strenger werdender Anforderungen an die P-Ablaufwerte in der Regel nicht sinnvoll, Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung im Kläranlagenablauf zu platzieren.

### Phosphorrückgewinnung an Einsatzstelle 2

Im Schlammwasser (Prozesswasser) liegt Phosphor gelöst als Orthophosphat vor. Die Phosphorkonzentration ist stark abhängig von den verschiedenen Betriebsweisen der Kläranlage und setzt i. d. R. eine vermehrte biologische P-Elimination (Bio-P) voraus. Die Rückgewinnungspotentiale liegen theoretisch bei maximal 50 % bezogen auf die Zulauffracht zur Kläranlage, tatsächlich im Betrieb erreichbar scheinen deutlich geringere Quoten (max. ca. 30 %) zu sein. (Pinnekamp et al., 2013)

### Phosphorrückgewinnung an Einsatzstelle 3a

Im Durchschnitt liegt der Phosphorgehalt im Faulschlamm bei 3,7 % P in der Trockenmasse. (Montag, 2008). Die Rücklösung von Phosphor aus dem Faulschlamm basiert entweder auf einer Hydrolyse/Desintegration des Schlammes nach einer vermehrten biologischen P-Elimination (Bio-P) oder auf dem Einsatz starker Säure zum Aufschluss gefällter Phosphorverbindungen. Die Hydrolyse/Desintegration ermöglicht lediglich die Rücklösung des Phosphoranteils aus der Schlammmatrix, welcher biologisch gebunden ist. So ist der Rückgewinnungsgrad direkt an den durch Bio-P gebundenen Anteil gekoppelt und ähnlich wie bei Einsatzstelle 2. Bei der Verwendung mineralischer Säure gibt es diese Limitierung nicht, allerdings wird aufgrund des geringen Feststoffgehaltes eine große Menge Säure benötigt, um Phosphate freizusetzen. Die Rückgewinnungspotentiale liegen in diesem Fall in Abhängigkeit des Säureeinsatzes bei bis zu 70 %.

### **Phosphorrückgewinnung an Einsatzstelle 3b**

Der Phosphorgehalt im entwässerten Klärschlamm liegt bei durchschnittlich 3,3 % P in der Trockenmasse (Montag, 2008). Je nach Phosphor-Elimination kann Phosphor biologisch oder chemisch gebunden vorliegen. Das Rückgewinnungspotential kann insbesondere bei thermischen Rückgewinnungsprozessen bis zu 90 % der Zulauffracht zur Kläranlage betragen, da die vollständige Phosphatfracht abzüglich der Ablauffracht zur Verfügung steht. (Montag et al, 2010)

### **Phosphorrückgewinnung an Einsatzstelle 4**

Durch die Eliminierung des Restwassers und der organischen Bestandteile im Zuge der thermischen Behandlung wird der zu behandelnde Massenstrom deutlich reduziert. Die Klärschlammverbrennungsasche weist bei vollständiger Oxidation keine Belastung durch organische Schadstoffe wie beispielsweise Pathogene und Arzneimittelrückstände auf (Stenzel et al., 2019). Die Klärschlammverbrennungsasche enthält, bis auf sehr geringe Verluste in der thermischen Behandlung, noch die gesamte Phosphorfracht des Klärschlammes. Der Phosphor liegt chemisch anorganisch gebunden vor und erreicht bei einer deutschen Klärschlammverbrennungsasche Gehalte von im Mittel ca. 7,3 % P, bei einer Spanne von ca. 6 bis 13,1 % für überwiegend kommunal geprägte Klärschlammverbrennungsaschen (Krüger und Adam, 2014). Mögliche Schadstoffe (bspw. Pb, Ni) können sich jedoch in der Asche aufkonzentrieren. Andere Schwermetalle wie Quecksilber und Cadmium werden zu großen Teilen innerhalb der Verbrennung in die Gasphase überführt.

Im Allgemeinen werden die Technologien zur Phosphorrückgewinnung von Einsatzstelle 1 zu Einsatzstelle 4 komplexer: Die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche behandelt zwar einen geringeren Massenstrom, ist im Vergleich zu den Technologien aus den übrigen Stoffströmen jedoch in den meisten Fällen verfahrenstechnisch aufwendiger. Dadurch können jedoch auch qualitativ hochwertigere Produkte mit einem größeren Einsatzspektrum generiert werden.

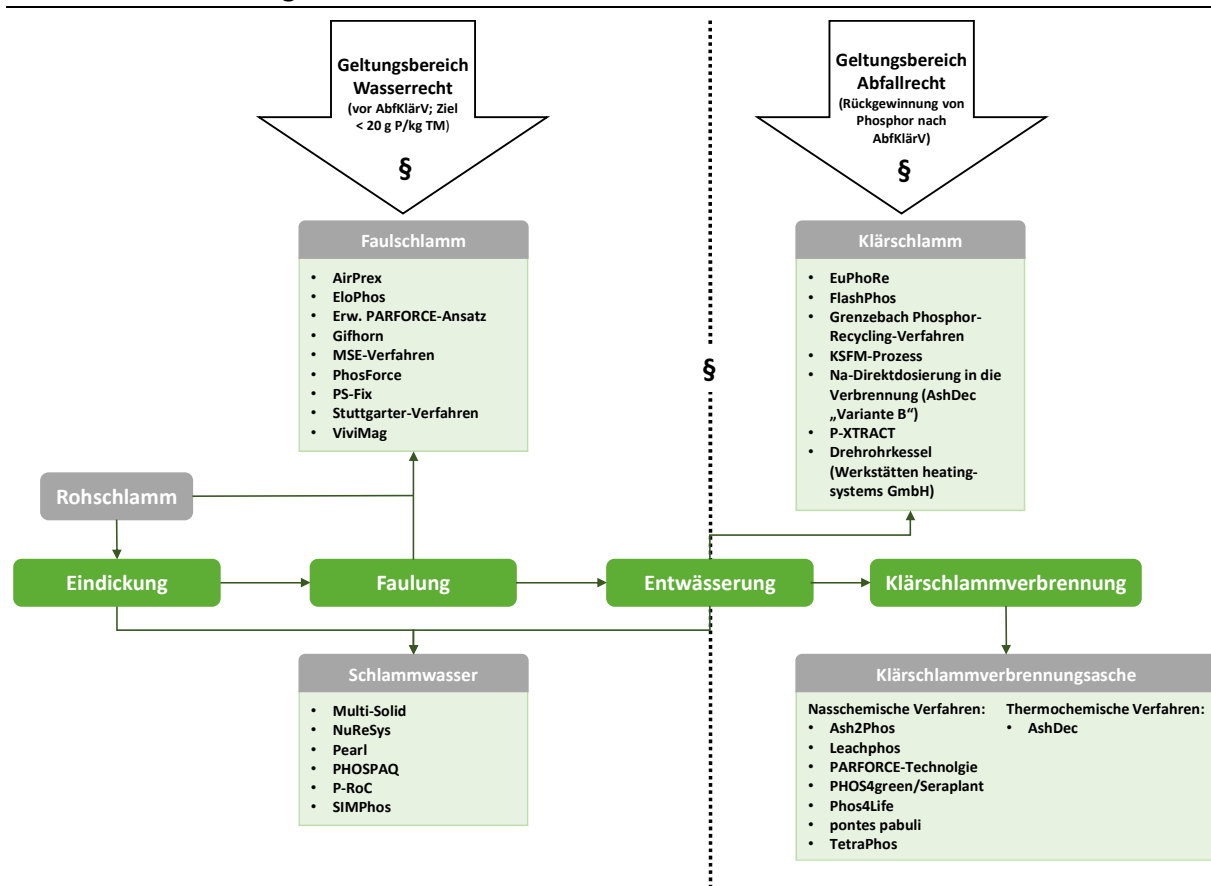
## **2.2.2 Verfahrenstechnischer Überblick**

Im Folgenden ist der Stand der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus verfahrenstechnischer Sicht dargestellt. Dazu sind die Verfahren, die bereits einen Technologiereifegrad (technology readiness level - TRL) größer 6 besitzen, großtechnisch umgesetzt werden oder absehbar vor einem Reifegradsprung stehen, berücksichtigt. Durch eine Recherche sowie im direkten Kontakt mit Verfahrensentwicklern wurde ein umfassender Überblick über die Phosphorrückgewinnungsverfahren mit ihren jeweils spezifischen Verfahrens- und Leistungsmerkmalen zusammengestellt. Die beschriebenen Phosphorrückgewinnungsverfahren werden in diesem Kapitel unabhängig ihrer Umsetzung in Deutschland oder im Ausland betrachtet. Ein Überblick über die bereits in Deutschland großtechnisch umgesetzten Verfahren wird in Kapitel 3.3 gegeben.

Eine intensive vorbereitende Literaturrecherche zu den jeweiligen Verfahren zeigte Lücken, insbesondere bei Informationen zu Mengen und Qualitäten der In- und Outputströme, Energie- und Stoffbedarfe sowie zu Reststoffen und deren Verwertungswegen. Außerdem variieren die öffentlich zugänglichen Informationen zu den Verfahren stark und nicht alle Unternehmen teilen Informationen. Auf Basis der intensiven Recherche zu den verschiedenen Phosphorrückgewinnungsverfahren wurden teilausgefüllte Fragebögen an die Entwickler der Phosphorrückgewinnungsverfahren gesandt.

Abbildung 4 zeigt die in dieser Studie berücksichtigten Phosphorrückgewinnungsverfahren kategorisiert anhand des jeweiligen Eingangsstoffstroms. Dazu werden die Verfahren aus Schlammwasser von den Verfahren aus Schlamm differenziert. Zu den Verfahren aus Schlammwasser zählen entsprechend die Verfahren, die Phosphor aus dem Prozesswasser der Eindickung und/oder der Entwässerung direkt zurückgewinnen. Unter den Verfahren aus Rohschlamm bzw. Überschussschlamm und Faulschlamm werden die Verfahren zusammengefasst, welche den Schlamm als Eingangsstoff nutzen und diesen durch ein zusätzliches Aufschlussmodul bspw. einer Desintegration/Hydrolyse, Ansäuerung o. Ä. aufschließen und dann in einem weiteren Schritt Phosphor rückgewinnen.

**Abbildung 4: Phosphorrückgewinnungsverfahren mit jeweiligem Einsatzort und rechtlichem Geltungsbereich**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

Zum aktuellen Stand ist eine Vielzahl von Phosphorrückgewinnungsverfahren existent. Jedoch befindet sich der Großteil der Verfahren noch im Entwicklungsstadium (TRL < 7). Auch die zukünftig großtechnisch umgesetzten Verfahren (siehe Kapitel 3.3) weisen teils noch TRL von < 7 auf. Diese werden zukünftig voraussichtlich einen Reifegradsprung erfahren und sich in der Großtechnik beweisen müssen.

### 2.2.3 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser

In Tabelle 2 ist ein Überblick über die Phosphorrückgewinnungsverfahren dargestellt, die Phosphor aus dem Schlammwasser (SW) rückgewinnen.

**Tabelle 14: Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser**

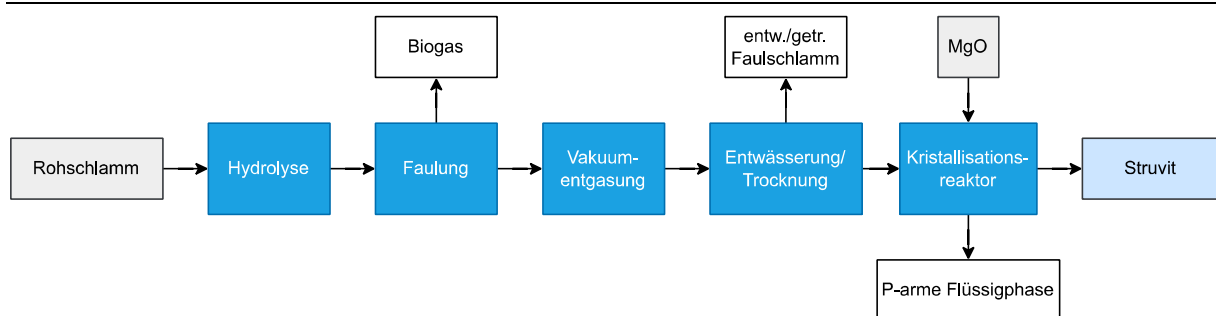
Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Status	TRL
Multi-Solid	P.C.S. GmbH	Kristallisation	in Planung/Umsetzung (KA Hagenow für 2023)	6-7
NuReSys	NuReSys (Nutrients Recovery Systems)	Kristallisation	umgesetzt (KA Braunschweig)	8
Pearl	OSTARA	Kristallisation	umgesetzt (international, bisher nicht in Deutschland)	9
PHOSPAQ	Paques	Kristallisation	umgesetzt (Hünfeld)	9
P-RoC	KIT-Karlsruher Institut für Technologie	Kristallisation (mittels CSH-Phasen)	in Planung (KA Großostheim)	6-7
SIMPhos	Circel	Kristallisation (mittels CSH-Phasen)	in Planung/Umsetzung (KA Neuburg a. d. D.)	6-7

<sup>1</sup> Ziel: Anlagenschutz und Senkung der Rückbelastung

#### 2.2.3.1 Multi-Solid-Verfahren

Im Multi-Solid-Verfahren (Abbildung 5) wird der Rohschlamm zunächst einer vorgezogenen Hydrolyse unterzogen. Im Anschluss an die Faulung wird der ausgefaulte Schlamm einer Vakuumentgasung zugeführt (Entfernung noch vorhandener Methangasanteile), anschließend entwässert und teilgetrocknet. Aus dem Zentrat wird das gelöste Phosphat auskristallisiert. Dafür wird Magnesiumoxid als pulverförmige Mg-Quelle zur pH-Anhebung und Struvit-Bildung zudosiert.

**Abbildung 5: Multi-Solid-Verfahren**



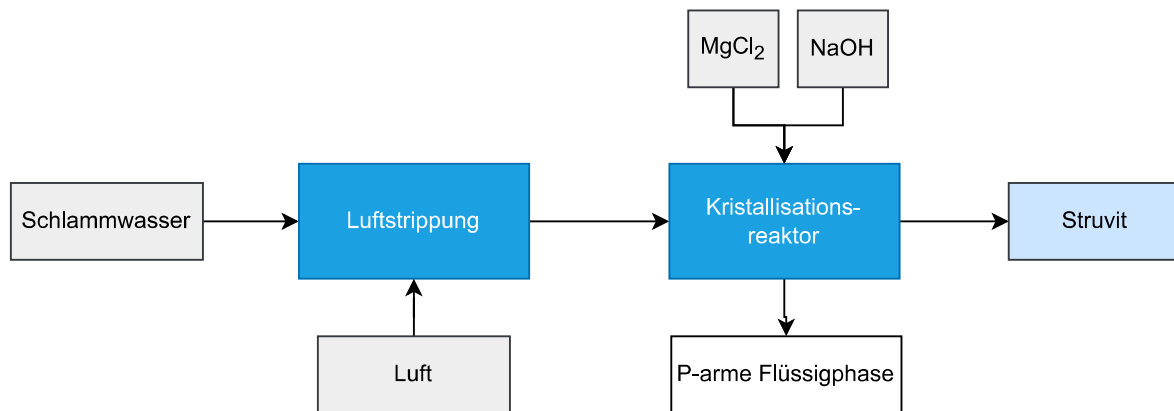
Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.3.2 NuReSys-Verfahren

Im ersten Schritt des NuReSys-Verfahrens (Abbildung 6) wird durch Lufteintrag CO<sub>2</sub> ausgestrippt. Anschließend wird der hierdurch bereits gestiegene pH-Wert mittels Natronlauge

weiter angehoben, eingestellt und Struvit durch Magnesiumchlorid-Dosierung ausgefällt. Im Absetzbehälter werden die Struvit-Kristalle abgetrennt.

**Abbildung 6: NuReSys-Verfahren**

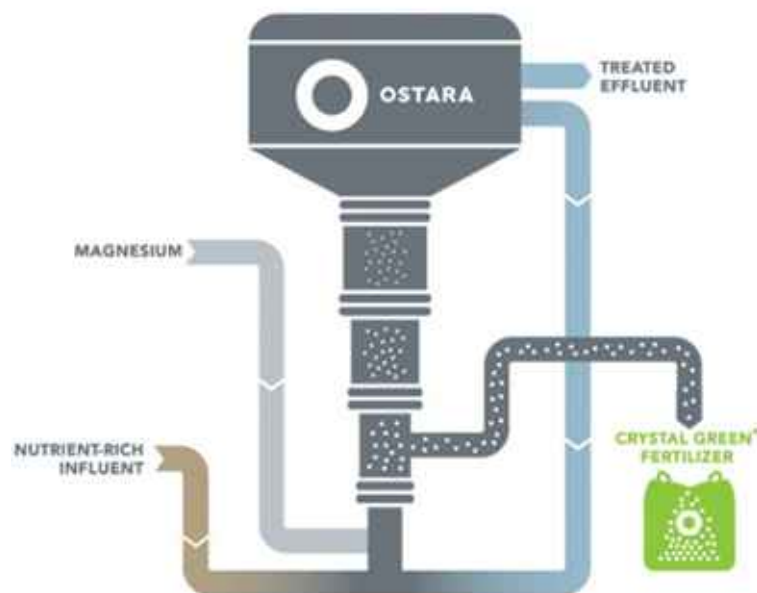


Quelle: eigene Darstellung nach Moerman et al., 2009, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 2.2.3.3 Pearl-Verfahren

Beim Pearl-Verfahren (Abbildung 7) wird Struvit (Eigename von OSTARA: CRYSTAL GREEN) unter Zugabe von Magnesiumchlorid und Natronlauge in einem Wirbelbett-Kristallisor gewonnen. Der Wirbelbettreaktor ermöglicht eine gleichmäßige Zirkulation, die das Kristallwachstum auf die gewünschte Granulatgröße ermöglicht.

**Abbildung 7: Pearl-Verfahren**

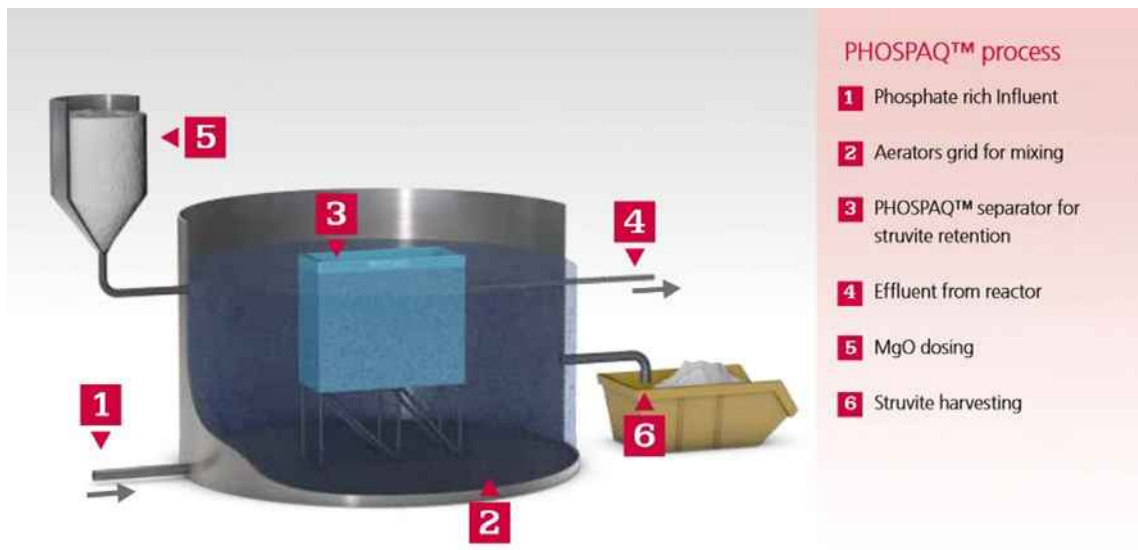


Quelle: Urdalen, 2013

### 2.2.3.4 PHOSPAQ-Verfahren

Im PHOSPAQ-Verfahren (Abbildung 8) wird das Schlammwasser in einen belüfteten Reaktor geführt, wo durch Zugabe von Magnesiumoxid Struvit ausgefällt wird. Anschließend wird das ausgefällte Struvit abgetrennt.

**Abbildung 8: PHOSPAQ-Verfahren**

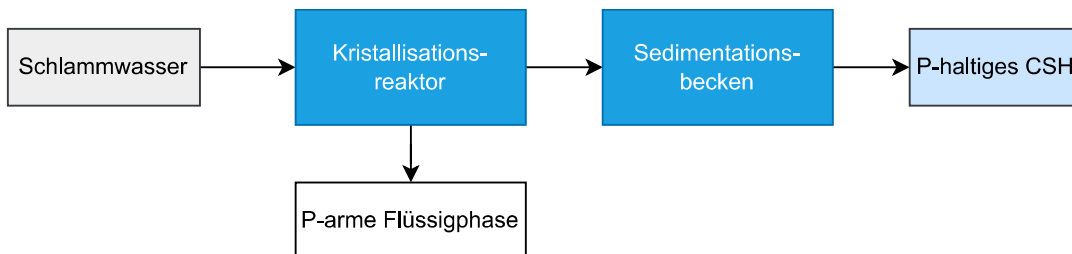


Quelle: Paques

#### 2.2.3.5 P-RoC-Verfahren

Im P-RoC-Verfahren (Abbildung 9) wird im ersten Schritt das Schlammwasser in einem Rühr-Reaktor mit Calcium-Silikat-Hydrat (CSH) suspendiert. Das CSH bietet eine reaktive Oberfläche für die Kristallisation und setzt Hydroxidionen frei, die dazu führen, dass der pH-Wert im Schlammwasser erhöht wird. Nachdem das CSH erfolgreich zu einem P-haltigen CSH-Produkt umgesetzt wurde, wird das Material nach Sedimentation ausgeschleust.

**Abbildung 9: P-Roc-Verfahren**

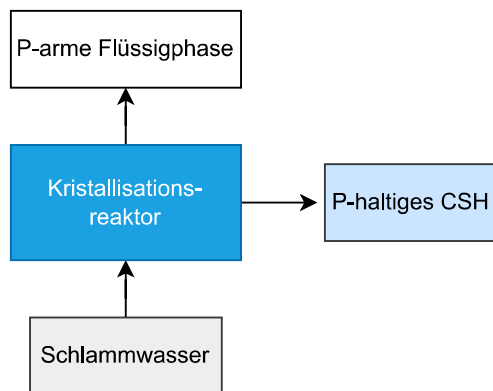


Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.3.6 SIMPhos-Verfahren

Im SIMPhos Verfahren (Abbildung 10) wird das Schlammwasser aus der Entwässerung des Faulschlammes in einen Festbettreaktor eingeleitet. Anschließend wird das P-haltige-Produkt in der flüssigen Phase mittels eines Festbettverfahrens durch Zugabe des CSH SIMPur (Fa. Circel) gefällt. Der prozesstechnische Unterschied zum P-RoC-Verfahren besteht im Kristallisationsreaktor. Im P-RoC-Verfahren ist dies ein Rührreaktor, im SIMPhos-Verfahren ein Festbettreaktor.

**Abbildung 10: SIMPhos-Verfahren**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

## 2.2.4 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Rohschlamm und Faulschlamm

Tabelle 3 zeigt die Phosphorrückgewinnungsverfahren, die als Eingangsstoffstrom Rohschlamm bzw. Überschussschlamm oder Faulschlamm nutzen.

**Tabelle 15: Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Rohschlamm bzw. Überschussschlamm und Faulschlamm**

Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Status	TRL
AirPrex	Berliner Wasserbetriebe	Kristallisation	umgesetzt (z. B. KA Mönchengladbach-Neuwerk, KA Berliner Wasserbetriebe, KA Göppingen, KA Salzgitter-Nord, KA Uelzen)	9
EloPhos	ELIQUO STULZ GmbH	Kristallisation	eingestellt (war seit 2016 umgesetzt auf der KA Lingen)	5
Erw. PARFORCE-Ansatz <sup>1</sup>	PARFORCE Engineering & Consulting GmbH	Kristallisation	in Umsetzung (KA Wolfsburg für 2023)	6-7
Gifhorn	Seaborne EPM A, ASG Stadt Gifhorn	Kristallisation	umgesetzt (KA Gifhorn)	6
MSE-Verfahren	Mobile-Schlammmentwässerungs GmbH	Kristallisation	umgesetzt (mobile Anlage)	8
PhosForce	Veolia	Kristallisation	in Planung (KA Schönebeck)	6
PS-fix	Abwasserbeseitigung Primasens und PFI	Kristallisation	in Planung/Umsetzung (KA Felsalbe, Pirmasens)	6
Stuttgarter Verfahren	ISWA und iat-Ingenieurberatung GmbH	Kristallisation	eingestellt (war umgesetzt auf der KA Offenburg)	7-8



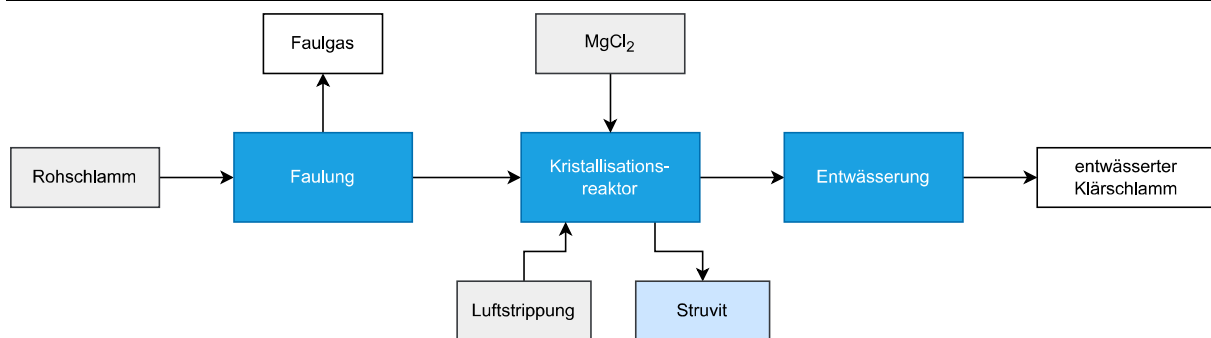
Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Status	TRL
ViviMag	WETSUS, Kemira; TU Delft	Kristallisation	Pilotversuche (KA Schönebeck)	5-6

<sup>1</sup> Ziel: weitgehende P-Ausschleusung

#### 2.2.4.1 AirPrex-Verfahren

Beim AirPrex-Verfahren (Abbildung 11) wird der ausgefaulte Schlamm in ein Reaktorsystem geführt und einer Luftstrippung unterzogen. Das Ausgasen von CO<sub>2</sub> führt dazu, dass der pH-Wert im Reaktor ansteigt. Durch die Zugabe von Magnesiumchlorid-Fällsalzen wird aus dem in der wässrigen Phase enthaltenen Phosphat und Ammonium schließlich Struvit ausgefällt.

**Abbildung 11: AirPrex Verfahren**

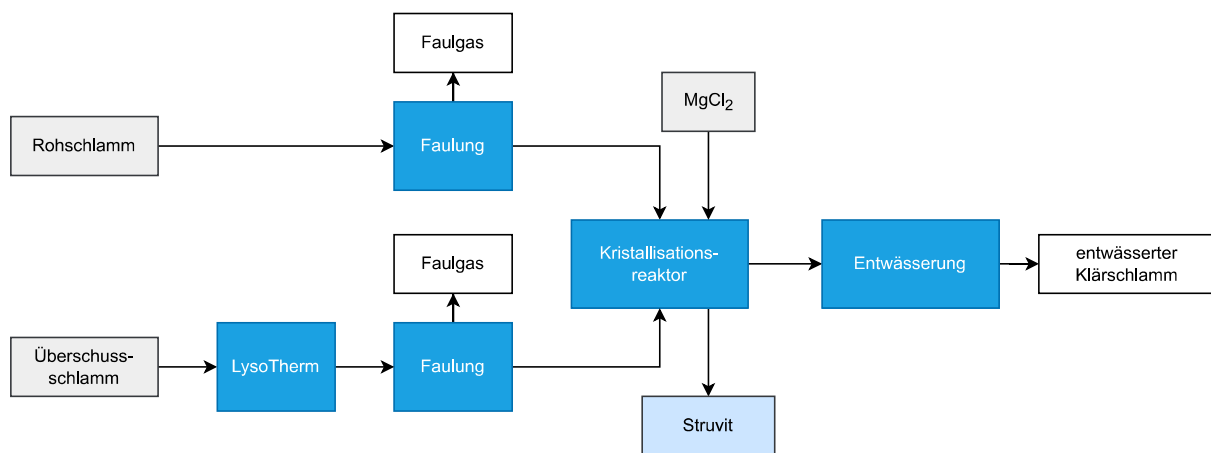


Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.4.2 EloPhos-Verfahren

Vorgeschaltet ist dem EloPhos-Verfahren (Abbildung 12) eine thermische Schlammintegration (Beispiel Kläranlage Lingen: LysoTherm) des Überschussschlammes, die zur Anreicherung der Nährstoffe in der Flüssigphase führt. Wie am Beispiel der Kläranlage in Lingen wird Überschussschlamm und Primärschlamm separiert der Faulung zugeführt. Im Anschluss erfolgt die pH-Wert Anhebung des Schlammablaufs aus dem Faulturm durch eine Vakuumentgasung. Dadurch wird dem Schlamm Methan und Kohlendioxid entzogen, welches in die Klärgasleitung geführt wird. Anschließend wird der Schlamm in den EloPhos-Reaktor gepumpt und kurz vor Eintritt in den Reaktor Magnesiumchlorid zudosiert. Zuletzt werden die erzeugten Struvit-Kristalle ausgeschleust. Der entgaste Faulschlamm wird der Schlammbehandlungsstufe zugeführt.

**Abbildung 12: EloPhos-Verfahren (Beispiel auf der KA Lingen)**



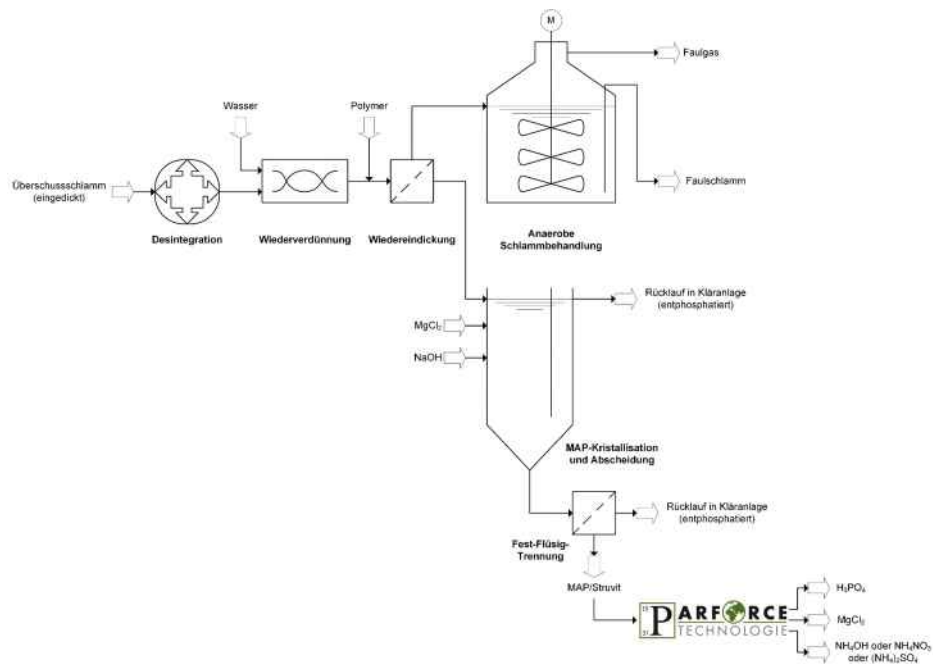
Quelle: eigene Darstellung nach Hüer et al., 2018, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.4.3 Erweiterter PARFORCE-Ansatz

Im ersten Schritt wird im erweiterten PARFORCE-Ansatz (Abbildung 13) der eingedickte Überschussschlamm einer Desintegration unterzogen. Der desintegrierte Schlamm wird im nächsten Schritt mit Zugabe von Brauchwasser verdünnt und mittels Polymereinsatz (PARFLOX) wieder eingedickt. Der desintegrierte Überschussschlamm wird in die Faulung geführt. Aus der separierten, P-angereicherten Flüssigphase des desintegrierten Überschussschlammes wird unter Zugabe von Magnesiumchlorid und Natronlauge Struvit kristallisiert (alternativ kann auch Calciumphosphat gefällt werden). Struvit kann optional anschließend in die klassische PARFORCE Technologie eingeschleust werden und zu Phosphorsäure, Magnesiumchlorid sowie Ammoniumhydroxyd, Ammoniumnitrat oder Ammoniumsulfat veredelt werden.

Der erweiterte PARFORCE-Ansatz kann als Verfahrenserweiterung zur PARFORCE-Technologie (s. Kapitel 2.2.6.4) oder als eigenständiges Verfahren zur Gewinnung von Struvit oder Calciumphosphat im Zuge der Schlammbehandlung einer Kläranlage zu Abreicherung des Phosphorgehaltes im Klärschlamm zum Einsatz kommen.

**Abbildung 13: Erweiterter PARFORCE-Ansatz**

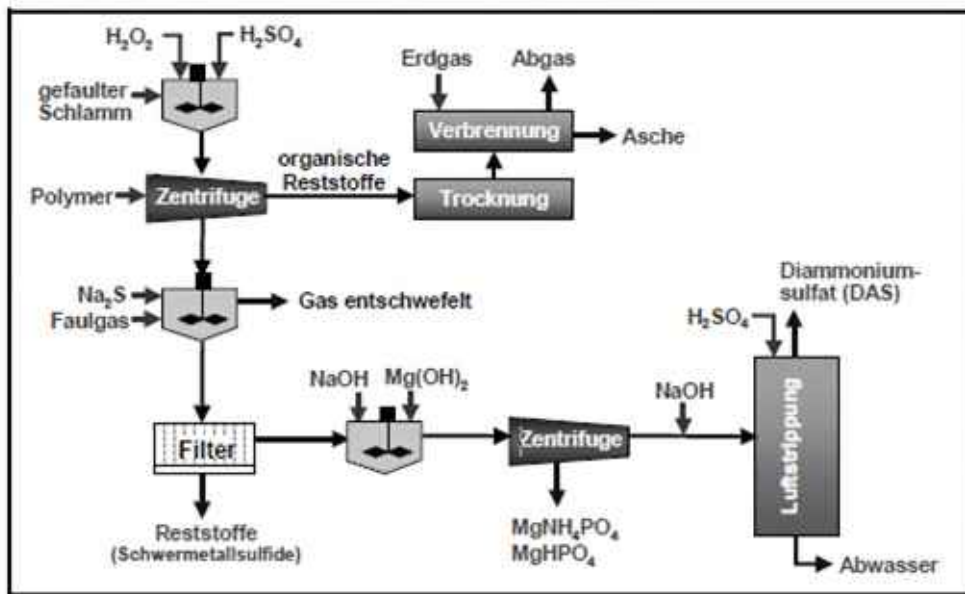


Quelle: PARFORCE Engineering & Consulting GmbH, 2022

#### 2.2.4.4 Gifhorn-Verfahren

Beim Gifhorn-, ehemals Seaborne-Verfahren (Abbildung 14) wird der Klärschlamm unter Zugabe von Wasserstoffperoxid und Schwefelsäure hydrolysiert. Anschließend erfolgt ein Entwässerungsschritt mithilfe einer Zentrifuge. Die gelösten Schwermetalle werden durch sulfidische Fällung entfernt und der Phosphor unter Anhebung des pH-Wertes mittels Natronlauge und Zugabe von Magnesium, zu Struvit gefällt. Das Struvit wird durch Zentrifugation abgetrennt und zuletzt getrocknet. In einem weiteren Schritt kann in der P-armen Flüssigphase durch eine Luftstrippung und Schwefelsäurezugabe Diammoniumsulfat gefällt werden, was die N-Belastung minimiert. Das Abwasser wird anschließend dem Klärprozess wieder zugeführt.

Abbildung 14: Gifhorn-Verfahren

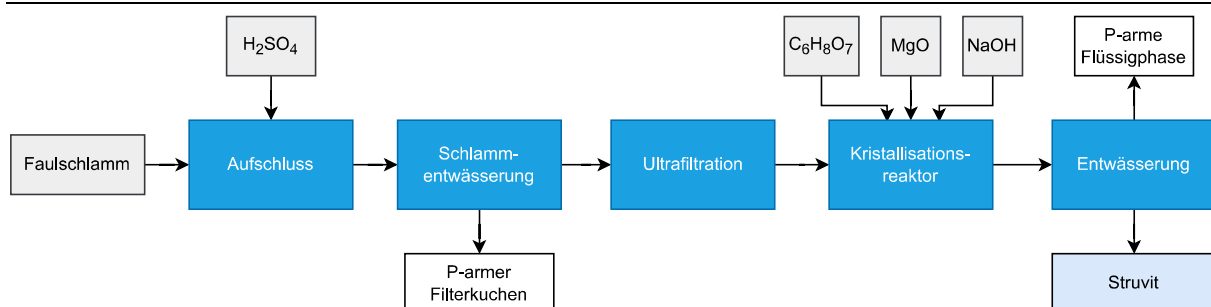


Quelle: Müller-Schaper et al., 2014

#### 2.2.4.5 MSE-Verfahren

In der mobilen Phosphorrückgewinnungsanlage der MSE wird das „Stuttgarter Verfahren“ (vgl. Kapitel 2.2.4.8) angewandt und damit Phosphor aus Faulschlamm nasschemisch rückgewonnen (Abbildung 15). Dabei wird der pH-Wert im Faulschlamm mittels Schwefelsäure abgesenkt, wodurch Phosphor in die wässrige Phase übergeht. Anschließend wird der Faulschlamm entwässert und der P-abgereicherte Filterkuchen kann der Mitverbrennung zugeführt werden. Das Filtrat wird über eine Ultrafiltration aufgereinigt. Um unerwünschter Nebenprodukte und die Komplexierung von Schwermetallen zu vermeiden, wird im Permeat Zitronensäure zugesetzt. Durch die Dosierung von Magnesiumoxid und ggf. Natronlauge wird der pH-Wert angehoben sowie der Phosphor in Form von Struvit ausgefällt.

Abbildung 15: MSE-Verfahren



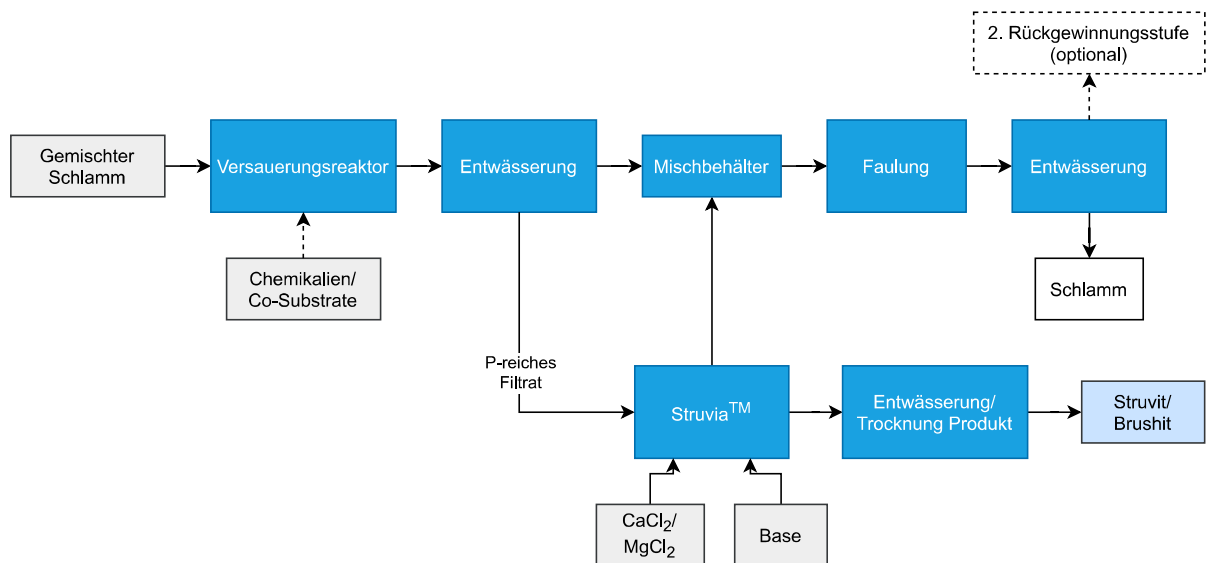
Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.4.6 PhosForce-Verfahren

Beim PhosForce Verfahren (Abbildung 16) wird der Rohschlamm vor der Faulung einer biologischen Versauerung zugeführt und anschließend entwässert. Durch die resultierende pH-Wert-Absenkung (falls nicht ausreichend: Dosierung einer Base in Form von Natronlauge oder Calciumhydroxid) und die Zugabe von Magnesium- oder Calciumchlorid wird Struvit oder Brushit im Struvia-Reaktor ausgefällt, welches nach der Abtrennung der Flüssigphase

entwässert bzw. getrocknet wird. Die P-abgereicherte Flüssigphase wird zusammen mit dem P-abgereicherten Rohschlamm der Faulung zugeführt.

**Abbildung 16: PhosForce Verfahren**

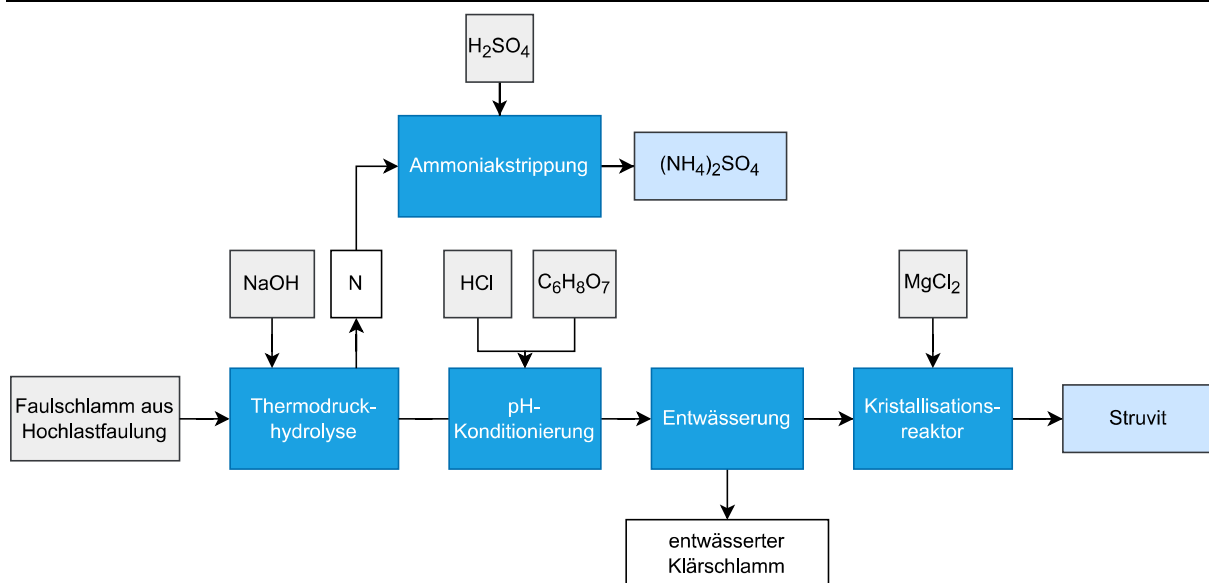


Quelle: eigene Darstellung nach Antakyali et al., 2022, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.4.7 PS-fix-Verfahren

Im ersten Schritt des PS-fix bzw. Pirmasenser-Verfahrens (Abbildung 17), der alkalischen Thermodruckhydrolyse (TDH), wird Faulschlamm mit Natronlauge zur pH-Wert-Anhebung versetzt und bei 140 °C in einer Druckstufe für eine Inkubationsdauer von einer Stunde temperiert. Anschließend wird einerseits Zitronensäure als Komplexbildner zugesetzt, um einer Al-P Ausfällung entgegenzuwirken sowie HCl, um den pH-Wert für die Struvit-Fällung zu senken. Es folgt eine Entwässerung durch den Einsatz einer Zentrifuge. Anschließend wird Struvit ausgefällt.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  wird im Bereich der Ammoniakstrippung eingesetzt: Ammoniak gas aufgrund des hohen pH-Wertes während der TDH aus und wird als Ammoniumsulfat gefällt.

**Abbildung 17: PS-fix Verfahren**

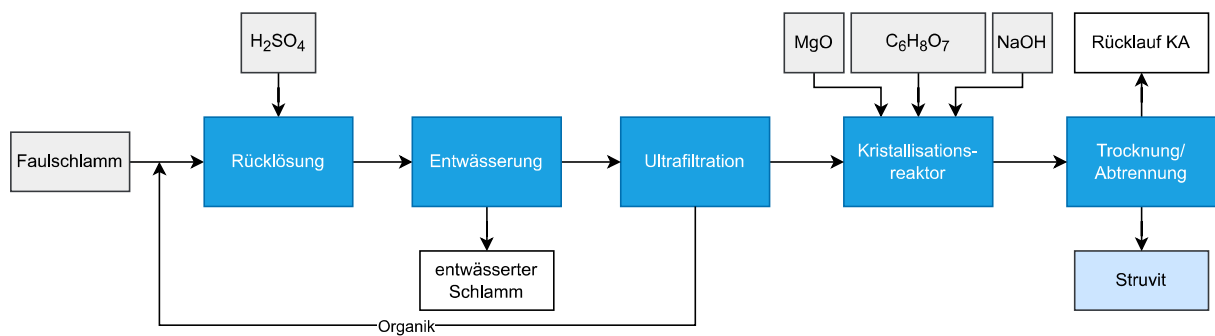


Quelle: eigene Darstellung nach Maas und Fiehn, 2011, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.4.8 Stuttgarter-Verfahren

Im Stuttgarter-Verfahren (Abbildung 18) wird Phosphor aus Faulschlamm nasschemisch rückgewonnen. Zuerst wird der Faulschlamm durch Zugabe von Schwefelsäure aufgeschlüsselt. Anschließend erfolgt eine Entwässerung. Das resultierende Filtrat wird mittels einer Ultrafiltration weiter aufbereitet und zur Komplexierung von Schwermetallen mit Zitronensäure versetzt. Durch die Zugabe von Magnesiumoxid und Natronlauge wird der pH-Wert angehoben und Struvit ausgefällt.

Abbildung 18: Stuttgarter-Verfahren

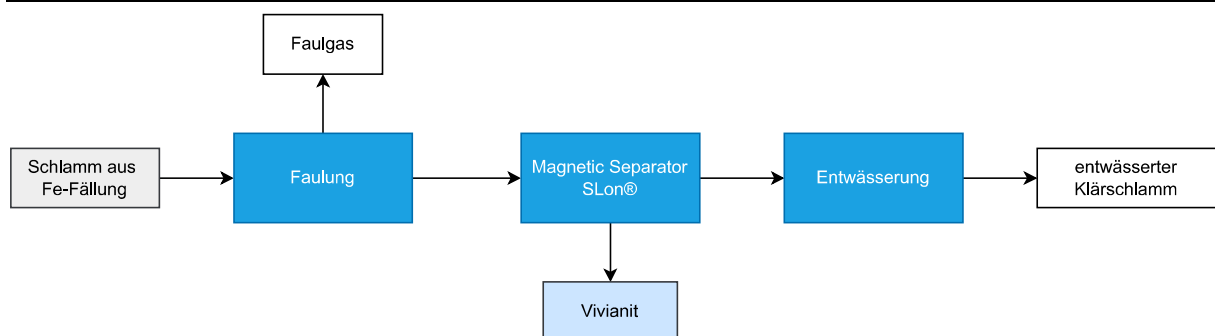


Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.4.9 ViviMag-Verfahren

Mit dem ViviMag-Verfahren (Abbildung 19) kann Vivianit aus Klärschlamm, in den Phosphor mit Eisen-Fällmitteln als Eisenphosphat überführt wurde, rückgewonnen werden. Dabei werden die Vivianit-Partikel selektiv aus dem nassen Klärschlamm magnetisch abgetrennt. Die Vivianit-Partikel bilden sich während des Faulungsprozesses, dabei wird Eisen unter den anaeroben Bedingungen reduziert. Ein Teil des Eisens fällt mit dem im Faulschlamm enthaltenen Schwefel aus, der restliche Teil bildet Vivianit.

Abbildung 19: ViviMag-Verfahren



Quelle: eigene Darstellung nach Grönfors und Cazalet, 2022, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 2.2.5 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm

Die Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm sind in Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 16: Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm**

Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Status	TRL
EuPhoRe	EuPhoRe GmbH	thermochemischer Aufschluss <sup>1</sup> im Drehrohr	in Planung/Umsetzung (HKW Mannheim)	7
FlashPhos	Innerhalb: Konsortium EU-Horizon Projekt FlashPhos	thermochemisches Verfahren	Labor	5 <sup>3</sup>
Grenzbach Phosphor-Recycling-Verfahren	Grenzbach und Forschungszentrum CUTEC der Technischen Universität Clausthal	thermochemisches Verfahren	in Planung/Umsetzung (KA Rodgau)	5 <sup>3</sup>
KSFM-Prozess (Kubota Surface Melting Furnace)	KUBOTA Corporation	thermochemisches Verfahren	umgesetzt (> 30 Anlagen im Ausland (JP))	9
Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec Variante B)	Emter GmbH	thermochemischer Aufschluss <sup>2</sup> in der Rostfeuerung	in Planung/Umsetzung (Altenstadt)	6
P-XTRACT	ZSW, WEHRLE, Uni Freiburg, AZV Staufferer Bucht	thermochemischer Aufschluss <sup>1</sup> in der Wirbelschicht (optionales KSA-Leaching)	in Umsetzung (Demonstrationsanlage in Breisach-Grezhausen)	6
Drehrohrkessel (Werkstätten heating-systems GmbH)	Werkstätten heating-systems GmbH	thermochemischer Aufschluss <sup>1</sup> im Drehrohr	in Umsetzung (Schüttorf, Wallmenroth)	8-9

<sup>1</sup>sofern Additive zur Schadstoff-Ausschleusung eingesetzt werden

<sup>2</sup>durch Additivzugabe zur gezielten Verbesserung der Phosphorverfügbarkeit

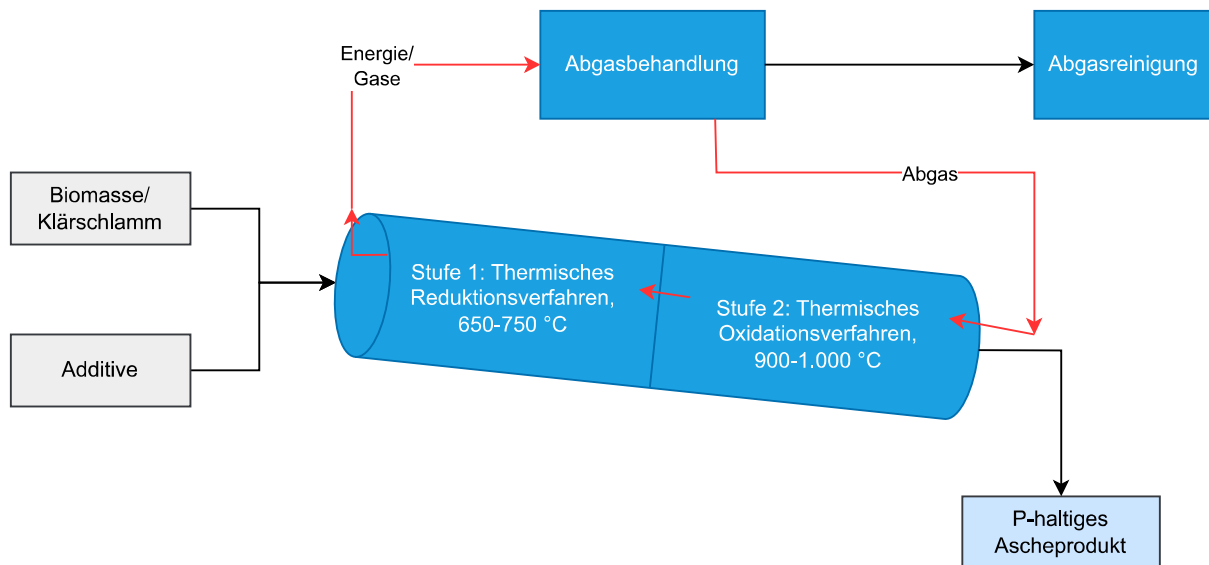
<sup>3</sup>Verfahren TRL < 6 aufgenommen, da konkret geplant ist, diese großtechnisch umzusetzen (vgl. Kapitel 2.2.2)

#### 2.2.5.1 EuPhoRe-Verfahren

Im EuPhoRe-Verfahren (Abbildung 20) wird der Klärschlamm zu Beginn mittels Zugabe von Alkali- und/oder Erdalkalichloriden oder -sulfaten additiviert. Mit der Klärschlamm-Additivierung wird der Schwermetallaustrag aus der Schlammatrix und die Verbesserung der Phosphorlöslichkeit im Ascheprodukt vorbereitet. Im ersten thermischen Behandlungsschritt werden die entwässerten Schlämme getrocknet und es folgt der Übergang in eine Reduktionsphase. In dieser findet die chemische Reduktion von Metallen und die Überführung leichtflüchtiger Schwermetallchloride in die Gasphase statt. Die abschließende Oxidationsstufe bei 900 bis 1.000 °C gewährleistet beim Übergang der Reduktions- in die Verbrennungsphase eine Umkristallisation der ursprünglichen Mineralsubstanzen hin zu pflanzenverfügbaren Phosphaten. Ebenso können auch in dieser Phase weitere Schwermetalle ausgetrieben werden.



**Abbildung 20: EuPhoRe-Verfahren**

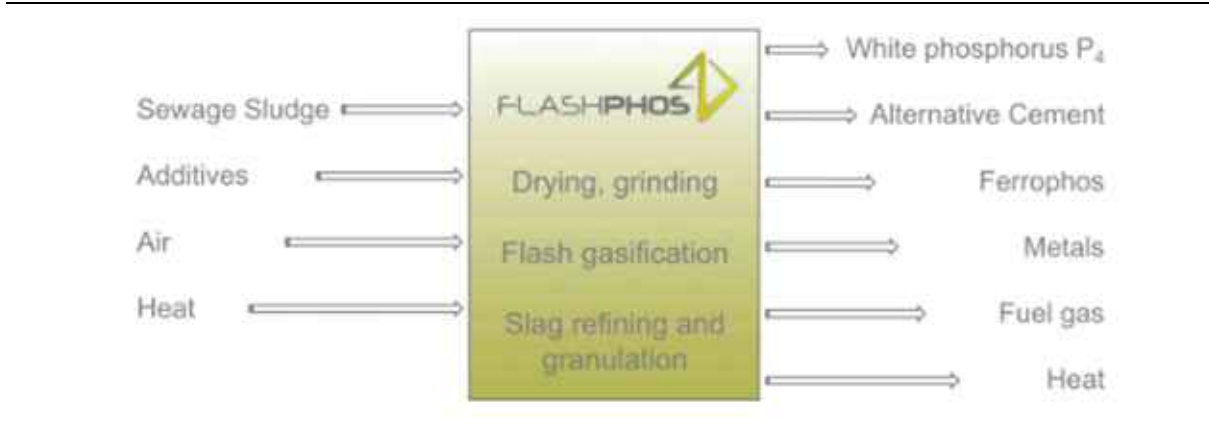


Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 2.2.5.2 FlashPhos-Verfahren

Das FlashPhos-Verfahren (Abbildung 21) ist eine Hochtemperatur-Flugstromvergasung von Klärschlamm. Im ersten Schritt, dem Dryer-Grinder, wird der entwässerte Klärschlamm gleichzeitig getrocknet und gemahlen. Anschließend wird im FlashReaktor der getrocknete Klärschlamm bei Temperaturen  $> 1.500\text{ °C}$  vergast. Der entstehende gasförmige Brennstoff wird in einer Nachbrennkammer verbrannt und in einem Filtrationssystem vom Metall-Konzentrat getrennt. Im Refiner werden bei hohen Temperaturen und durch Zugabe von Koks und Schlacke, reduzierende Bedingungen geschaffen und das Hauptprodukt  $P_4$  produziert. Ebenso entsteht eine Schlacke, die als alternativer Zement-Binder fungieren kann.

**Abbildung 21: FlashPhos-Verfahren**



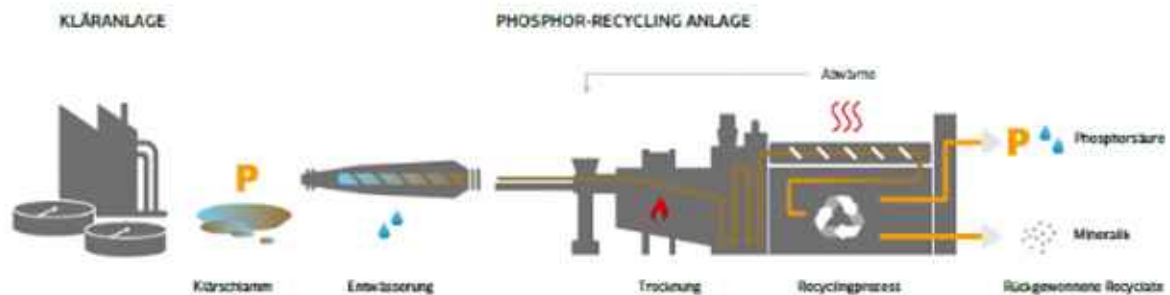
Quelle: Arnout et al., 2022

### 2.2.5.3 Grenzbach-Phosphor-Recycling-Verfahren

Im Grenzbach-Phosphor-Recycling-Verfahren (Abbildung 22) wird der Klärschlamm zunächst entwässert und getrocknet. Anschließend wird durch verschiedene Reduktions- und Oxidationsprozesse, die gezielt gesteuert werden, Phosphor in die Gasphase überführt. Durch

die Zugabe von Sauerstoff und Wasser entsteht Phosphorsäure. Als Nebenprodukt verbleibt die Mineralik aus dem Klärschlamm.

**Abbildung 22: Grenzebach-Phosphor-Recycling-Verfahren**

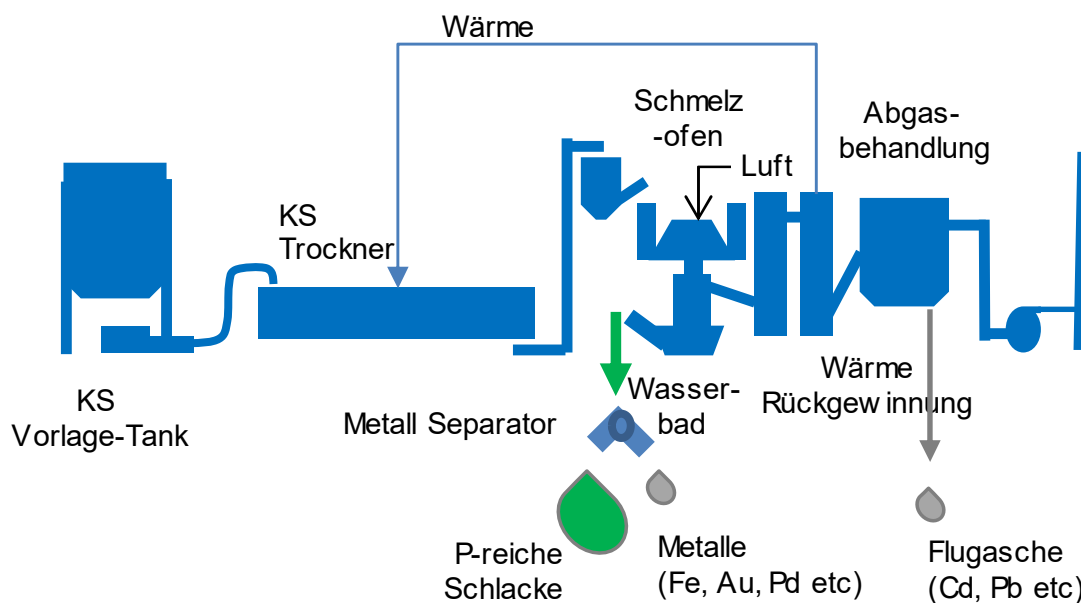


Quelle: Meyer, 2022

#### 2.2.5.4 KSMF-Prozess (Kubota Surface Melting Furnace)

Das Kernstück des KSMF-Prozesses (Abbildung 23) ist ein Schmelzreaktor, welcher eine doppelte Zylinderstruktur aufweist. Der getrocknete Klärschlamm wird in den äußeren Zylinder eingebracht, welcher ständig rotiert und dadurch die gleichmäßig geschichtete Zuführung des Klärschlammes in die Hauptbrennkammer ermöglicht. Dort entsteht bei 1.250 bis 1.350 °C die Schmelze. Die Schmelze fließt in den Granuliertank ab, wo sie im Wasserbad granuliert wird. Die entstandene Schlacke wird mit einem Förderband abgeführt. Die flüchtigen Schwermetalle werden über den Rauchabzug ausgeschleust und ein Großteil der Schwermetalle wird durch die Gasreinigung in die Flugasche überführt. Ca- und Fe-basierte Additive werden dem Klärschlamm zugesetzt, um den Schmelzpunkt und die Phosphorbindung an die Schlacke zu kontrollieren.

**Abbildung 23: KSMF-Prozess**



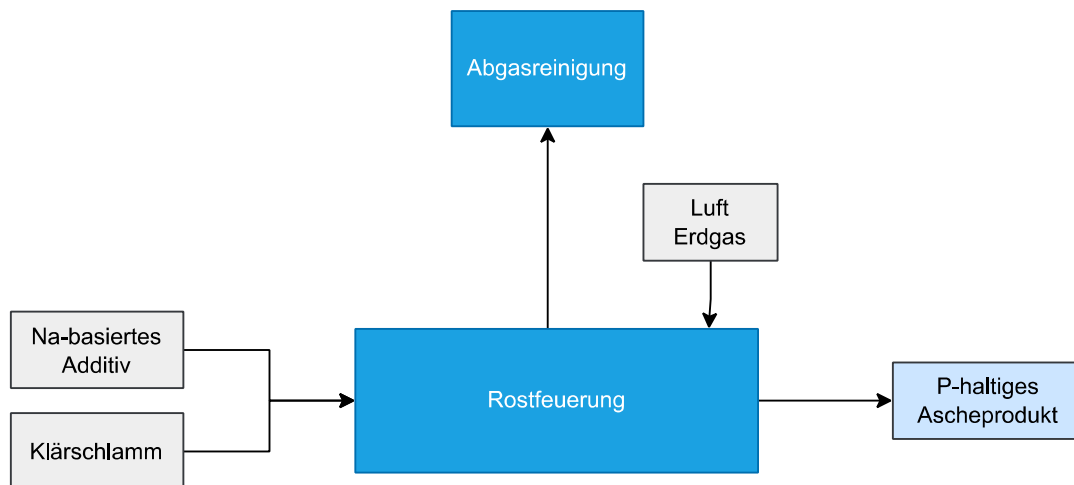
Quelle: KUBOTA Corporation

#### 2.2.5.5 Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec „Variante B“)

Für die AshDec „Variante B“ (Na-Direktdosierung in die Verbrennung) wurde das AshDec Verfahren hinsichtlich des Eingangsstoffstroms und der Verbrennungstechnologie abgewandelt (Abbildung 24). Anstatt des Einsatzes von Klärschlammverbrennungsasche im Drehrohröfen, wird Klärschlamm in einer Rostfeuerung verbrannt. Dabei wird der Klärschlamm nach der Zudosierung von Additiven (z. B.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) in die Rostfeuerung gegeben. Durch die hohe Feststoffverweilzeit (ca. 20 min) in der Rostfeuerung reagieren die Na/K-Additive mit den P-Phasen des Klärschlammes. Es entsteht ein P-haltiges Ascheprodukt, welches  $\text{CaNaPO}_4$ - $\text{CaKPO}_4$ -Phasen enthält.

**Abbildung 24: Na-Dosierung in die Verbrennung**

---

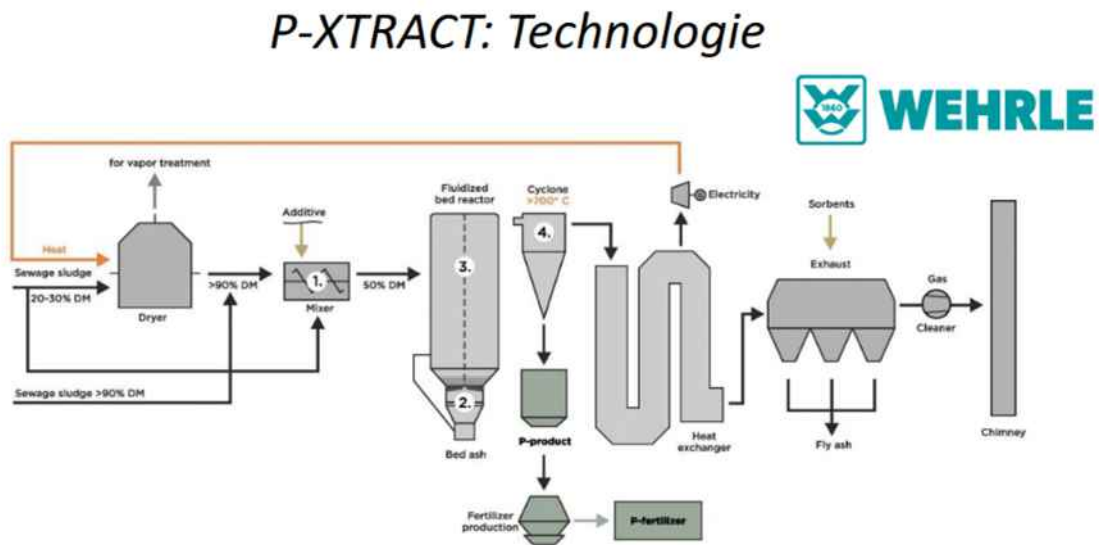


Quelle: eigene Darstellung nach Herzel et al., 2022, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.5.6 P-XTRACT-Verfahren

Im P-XTRACT-Verfahren (Abbildung 25) wird partiell vorgetrockneter Klärschlamm, der zuvor mit einem Na- oder K-basierten Additiv vermischt wurde, im Wirbelschichtofen verbrannt. Anschließend erfolgt die Abscheidung der Klärschlammverbrennungsasche per Heißgaszyklon bei etwa 700 °C mit anschließender Abgasreinigung und Wärmerückgewinnung.

Abbildung 25: P-XTRACT-Verfahren

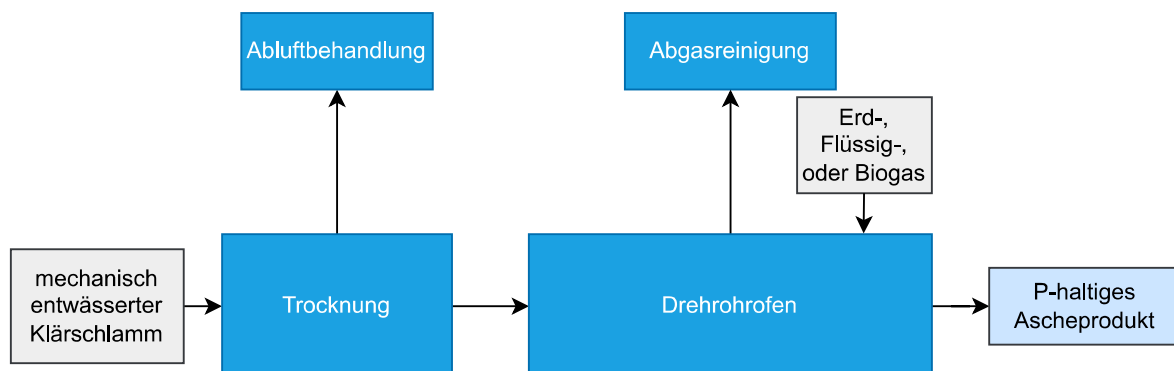


Quelle: Kurz, 2022

#### 2.2.5.7 Drehrohrkessel-Verfahren (Werkstätten heating-systems GmbH)

Im ersten Schritt des Drehrohrkessel-Verfahrens (Abbildung 26) erfolgt eine Vollstromvolltrocknung des mechanisch entwässerten Klärschlamm auf 86 % Trockenmasse. Die Trocknerabluft wird entstaubt, über einen Abluftwäscher gereinigt und über einen Biofilter in die Atmosphäre entlassen. Der getrocknete Klärschlamm wird im wassergekühlten Drehrohrkessel verbrannt. Die Rauchgase werden mittels SNCR und Grobpartikelabscheidung gereinigt, bevor sie in die Abgasbehandlungsanlage überführt werden. Aktuell wird an einer additivbasierten Schwermetall-Abtrennung gearbeitet, sodass ein integriertes Phosphorrückgewinnungsverfahren vorliegt.

Abbildung 26: Drehrohrkessel-Verfahren (Werkstätten heating-systems GmbH)



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.6 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsasche

Die Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsasche sind in Tabelle 5 aufgeführt.

**Tabelle 17: Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsasche**

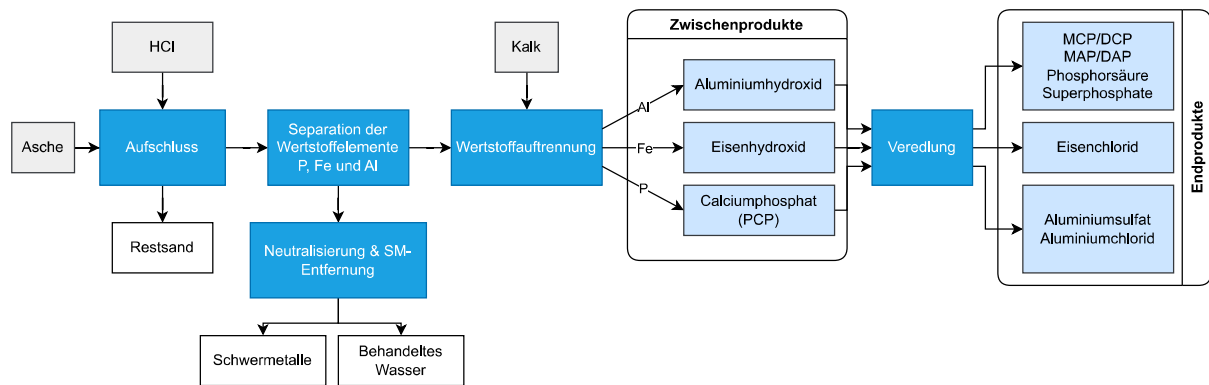
Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Status	TRL
Ash2Phos	Easy Mining	nasschemischer Aufschluss	in Planung/Umsetzung (Chemiepark Schkopau, Chemiepark Süd-West in Baden-Württemberg (Standort noch nicht bekannt))	6
AshDec	Outotec	thermochemischer Aufschluss <sup>1</sup> im Drehrohr	Verfahren eingestellt aufgrund Verfahrensabwandlung	6-7
Leachphos	AIK Technik AG	nasschemischer Aufschluss	Labor	7-8
PARFORCE-Technologie	PARFORCE Engineering & Consulting GmbH	kombiniertes nass- und elektrochemisches Verfahren	in Umsetzung (großtechn. Versuchsanlage auf der KA-Bottrop, Pilotanlage Freiberg bereits vorhanden)	6
PHOS4Green/ Seraplant	Glatt-Ingenieurtechnik	nasschemischer Aufschluss	umgesetzt (Haldensleben)	8-9
PHOS4Green mit Schadstoff-Abtrennung	Glatt-Ingenieurtechnik; IWAR TU Darmstadt	nasschemischer Aufschluss	in Planung (Industriepark Höchst, Frankfurt)	6
Phos4Life	Técnicas Reunidas SA	nasschemischer Aufschluss	in Planung/Umsetzung (Schweiz)	6-7
pontes pabuli	Pontes pabuli GmbH	nasschemischer Aufschluss	Produktionsanlage Betriebslauf ab Ende 10/2022 (Leipzig-Markranstädt)	6
TetraPhos	Remondis	nasschemischer Aufschluss	umgesetzt (Hamburg)	8

<sup>1</sup>durch Additivzugabe zur gezielten Verbesserung der Phosphorverfügbarkeit

### 2.2.6.1 Ash2Phos-Verfahren

Im Ash2Phos-Verfahren (Abbildung 27) wird die Klärschlammverbrennungsasche mit Salzsäure aufgeschlossen und anschließend die Wertstoffelemente Phosphor, Eisen und Aluminium separiert. Die Restasche wird gewaschen und kann beispielsweise als Einsatzstoff in der Baustoffindustrie Anwendung finden. Im nächsten Schritt werden Aluminium, Eisen und Phosphor durch eine Abfolge von Lösungs- und Fällungsschritten aus dem Filtrat gewonnen. Durch Zugabe von Kalk erfolgt die Aufteilung in die Zwischenprodukte Aluminiumhydroxid, Eisenhydroxid und Calciumphosphat (PCP). Zuletzt können die Zwischenprodukte der Veredlung zugeführt werden.

**Abbildung 27: Ash2Phos-Verfahren**

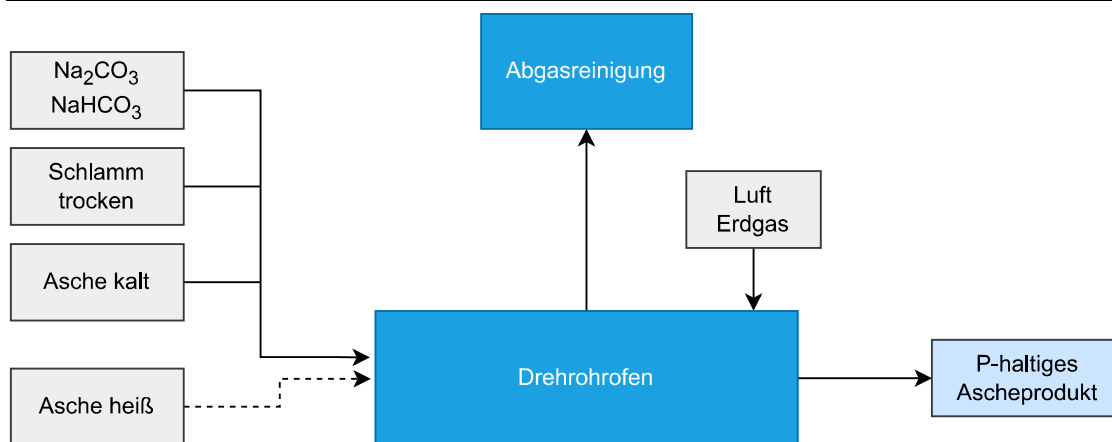


Quelle: eigene Darstellung nach Cohen et al., 2018, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 2.2.6.2 AshDec-Verfahren

Im AshDec-Verfahren (Abbildung 28) wird in einem Intensivmischer Klärschlammverbrennungsasche mit Additiven homogenisiert und pelletiert. Die Pellets werden anschließend einem Drehrohrofen zugeführt. In diesem Reaktor werden die Pellets bis zu 30 Minuten bei ca. 1.000 °C thermisch behandelt. Je nach eingesetzten Additiven reagieren diese mit den in der Klärschlammverbrennungsasche enthaltenen Schwermetalle und werden in die Gasphase überführt. Zudem findet eine Umkristallisation der Mineralphasen statt, wodurch Phosphor in besser verfügbare Formen umgewandelt wird.

**Abbildung 28: AshDec-Verfahren**

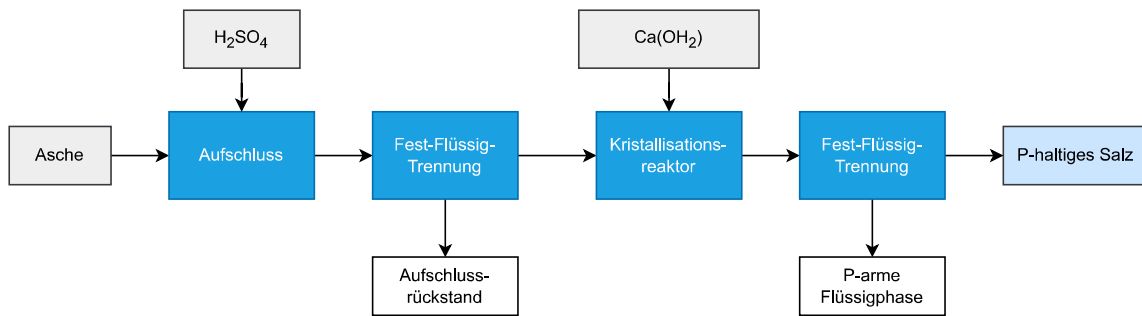


Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 2.2.6.3 Leachphos-Verfahren

Im Leachphos-Verfahren (Abbildung 29) wird die Klärschlammverbrennungsasche mit Schwefelsäure aufgeschlossen und anschließend die P-haltige Flüssigphase vom Ascherückstand getrennt. In der P-haltigen Flüssigphase erfolgt durch Zugabe von Calciumhydroxid die Phosphorprodukt-Fällung. Mit Hilfe einer Fest/Flüssig Trennung wird das Phosphorprodukt abgetrennt. Die Phosphor-arme Flüssigphase kann der Abwasserbehandlung zugeführt werden und wird nachfolgend getrocknet.

**Abbildung 29: Leachphos-Verfahren**

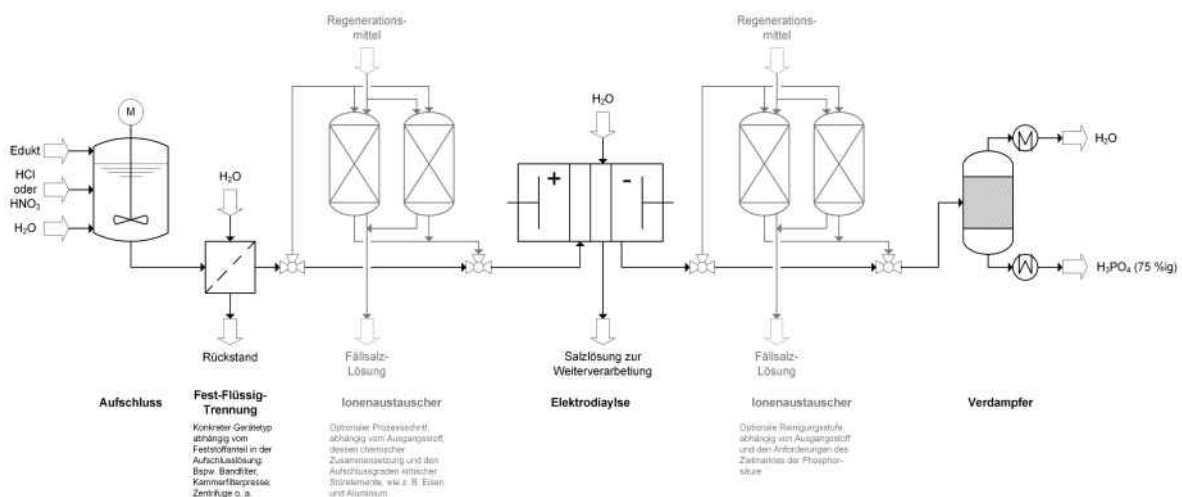


Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.6.4 PARFORCE-Technologie

Die PARFORCE-Technologie (Abbildung 30) besteht grundsätzlich aus vier Verfahrensschritten (Aufschluss, Fest-Flüssig-Trennung, Elektrodialyse, Verdampfung) mit optionalen Einsätzen von Ionenaustauschern vor und/oder nach der Elektrodialyse. Im ersten Prozessschritt wird die Klärschlammverbrennungsasche mittels Salzsäure (oder Salpetersäure, nicht in der Abbildung enthalten) aufgeschlossen und die Aufschlusslösung anschließend vom Rückstand über einen Filtrationsschritt abgetrennt. Optional kann im nächsten Prozessschritt ein Ionenaustauscher eingesetzt werden. Dessen Einsatz ist abhängig von der Zusammensetzung des Ausgangsstoffes und dem Gehalt an kritischen Störelementen (beispielsweise Eisen und Aluminium), welche im Ionenaustauscher abgetrennt werden können. Im nächsten Prozessschritt, der Elektrodialyse, werden ein- und zweiwertige Ionen aus der Aufschlusslösung in eine Salzlösung überführt. In einer weiteren optionalen Reinigungsstufe kann die Rohphosphorsäure abhängig von ihrer Zielanwendung über einen weiteren Ionenaustauscher aufbereitet werden. Zuletzt wird die Rohsäure auf die gewünschte Zielkonzentration eingedampft.

**Abbildung 30: PARFORCE-Technologie**



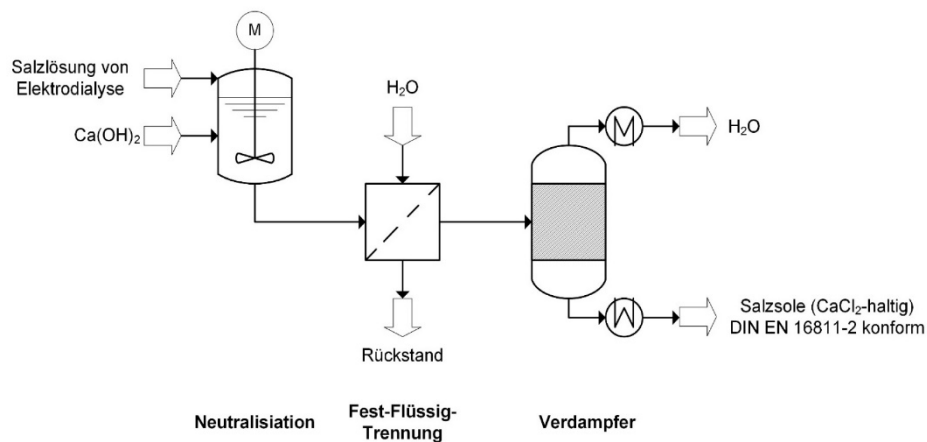
Quelle: PARFORCE Engineering & Consulting GmbH, 2022

Die Salzlösung aus der Elektrodialyse kann gemäß Abbildung 31 weiterverarbeitet werden um Calciumchlorid als Nebenprodukt zu gewinnen.



### Abbildung 31: PARFORCE-Technologie: Weiterverarbeitung der Salzlösung aus der Elektrodialyse

**Beispiel zur Weiterverarbeitung der Salzlösung**  
(Aufschlussäure HCl mit KSA oder Calciumphosphaten)



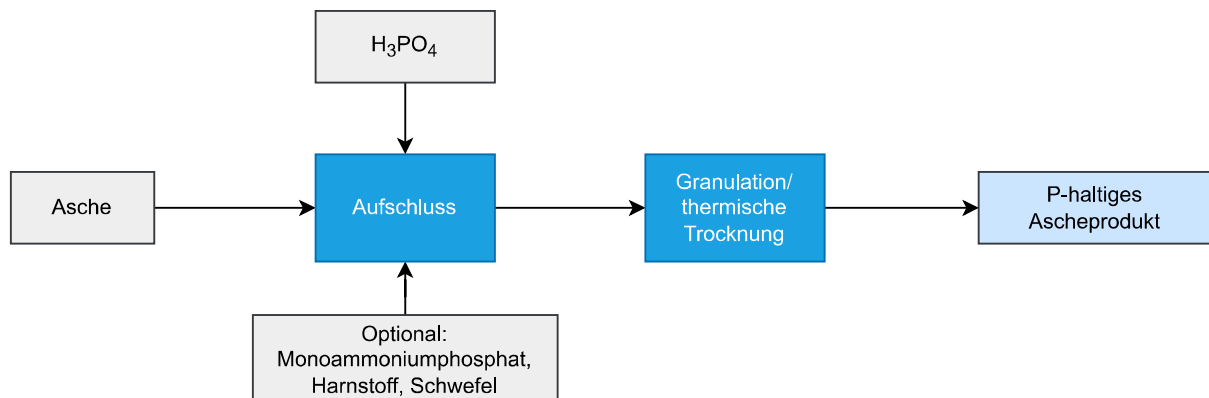
Quelle: PARFORCE Engineering & Consulting GmbH, 2022

Für die PARFORCE-Technologie kann neben Klärschlamm auch Struvit als Eingangsstoff dienen. Bei der Veredlung von Struvit zu Phosphorsäure muss dieses vor dem Aufschluss kalziniert werden. Das ausgetriebene Ammoniak wird aufgefangen. Anschließend wird es wie in Abbildung 30 dargestellt analog zu Klärschlammverbrennungsasche behandelt. Die Weiterverarbeitung der Salzlösung aus der Elektrodialyse ist nicht mehr notwendig. Als Nebenprodukt wird direkt  $\text{MgCl}_2$  gewonnen. Des Weiteren können neben KSA und Struvit auch weitere Sekundär- und auch Primärphosphate als Eingangsstrom verarbeitet werden; dies ist jedoch nicht dargestellt.

#### 2.2.6.5 PHOS4Green/Seraplant-Verfahren

Im PHOS4Green-Verfahren (Abbildung 32) wird eine Suspension aus der Klärschlammverbrennungsasche, Phosphorsäure und ggf. weiterer Nährstoffkomponenten erzeugt. Dabei wird das Phosphat in der Asche durch die Säure aufgeschlossen. Die erzeugte Suspension wird anschließend in einem Wirbelschichtapparat gleichzeitig getrocknet und granuliert.

### Abbildung 32: PHOS4Green-Verfahren



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

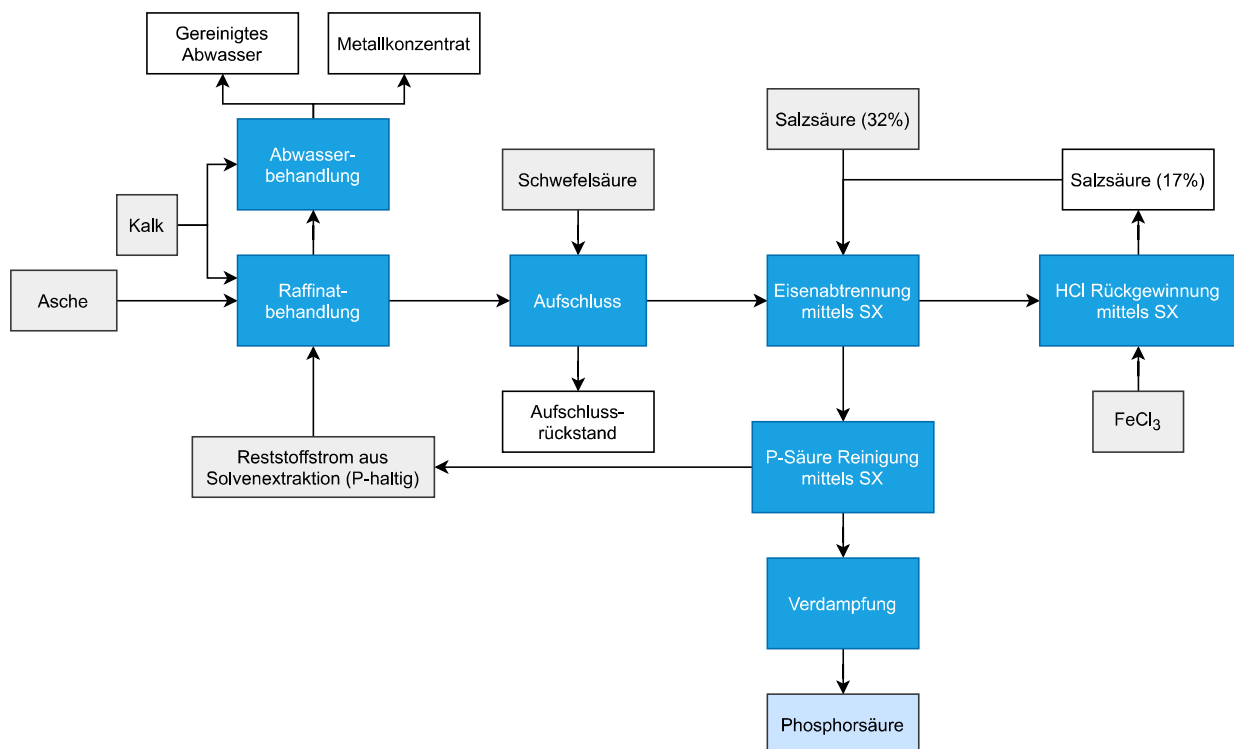
#### PHOS4Green mit erweiterter Schadstoff-Abtrennung:

Das PHOS4Green-Verfahren kann um eine vorgeschaltete Schadstoff-Abtrennung ergänzt werden. Hierzu wurden aufgrund wechselnder Aschequalitäten unterschiedliche Behandlungsvarianten entwickelt. In Variante 1 erfolgt eine selektive Fällung der Schwermetalle. Variante 2 fokussiert im ersten Schritt die Phosphor-Extraktion mit anschließender Wäsche, wobei die ungelösten Schadstoffe im Aufschlussrückstand verbleiben. Variante 3 ergänzt Variante 2 um eine Fällung der Schadstoffe durch Zugabe eines Fällmittels. Das je nach Variante anfallende Filtrat wird dann in den PHOS4Green Prozess eingeschleust. (Engelhart und Kuhn, 2022)

#### 2.2.6.6 Phos4Life-Verfahren

Der erste Schritt des Phos4Life-Verfahrens (Abbildung 33) ist eine Raffinatbehandlung, die dazu dient, dass der Anteil an Phosphor, welcher im letzten Schritt der Solventextraktion nicht ins Endprodukt übergeht, im System bleibt. Um dies zu garantieren wird Kalk zudosiert. Im Anschluss wird die Klärschlammverbrennungsasche mit Schwefelsäure aufgeschlossen. Durch eine Fest-/Flüssig-Trennung wird der verbleibende Aufschlussrückstand von der flüssigen Phase abgetrennt. In der anschließenden ersten Solventextraktion (SX) wird Eisen als Eisenchlorid-Lösung separiert und aufbereitet. In der zweiten Solventextraktion wird die Phosphorsäure von den Schwermetallen getrennt und darauffolgend durch Verdampfen zu technisch reiner, 75 %iger Phosphorsäure aufkonzentriert. Die durch die Solventextraktionen gelösten Schwermetalle werden ausgefällt.

Abbildung 33: Phos4Life-Verfahren



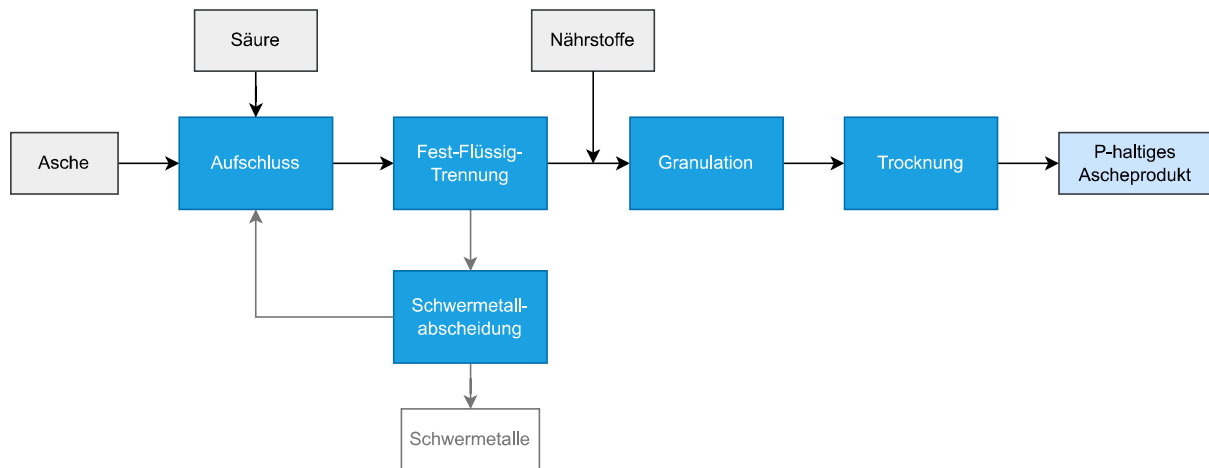
Quelle: eigene Darstellung nach Mehr und Hellweg, 2018, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.6.7 pontes pabuli-Verfahren

Im pontes pabuli-Verfahren (Abbildung 34) wird zunächst die Klärschlammverbrennungsasche mit einer Säure aufgeschlossen. Im zweiten Schritt erfolgt eine mechanische Fest-/Flüssig-Trennung. Das resultierende Prozesswasser wird wieder zum Aufschlussreaktor zurückgeführt,

sodass dieses im Kreislauf geführt wird. Dem feuchten Feststoff werden weitere Nährstoffe untergemischt. Das Gemisch wird mittels eines Granuliertellers granuliert und anschließend getrocknet. Optional kann das Prozesswasser nach der Fest-/Flüssig-Trennung einer Schwermetall-Abtrennung unterzogen werden.

**Abbildung 34: pontes pabuli-Verfahren**

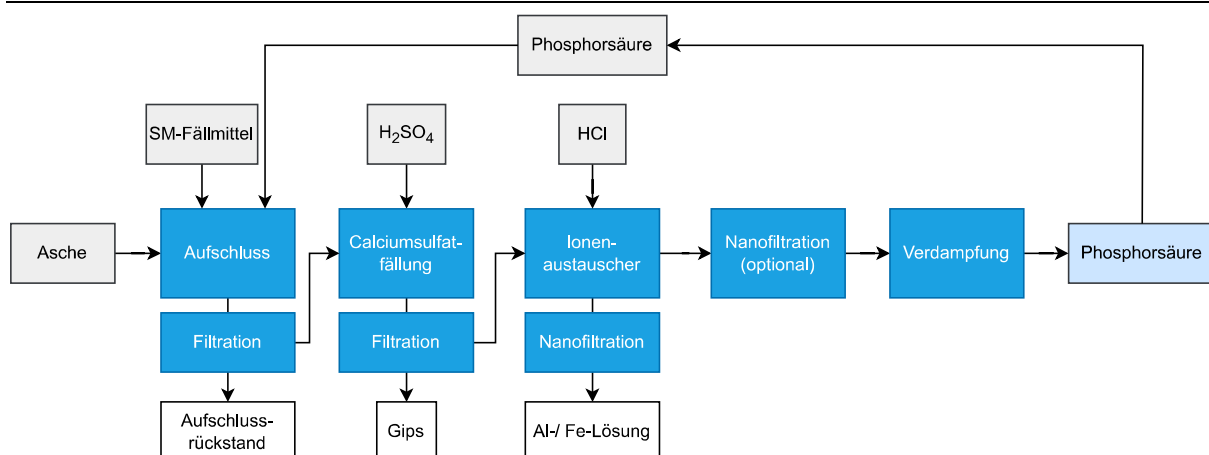


Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 2.2.6.8 TetraPhos-Verfahren

Im ersten Schritt des TetraPhos-Verfahrens (Abbildung 35) wird die Klärschlammverbrennungsasche in einem Reaktor mit verdünnter Phosphorsäure unter Zugabe eines Schwermetall-Fällmittels aufgeschlossen. Anschließend wird das Filtrat vom Ascherückstand abfiltriert, das Filtrat stellt die Roh-Phosphorsäure dar. Im zweiten Schritt wird das aus der Asche gelöste Calcium durch Zugabe von Schwefelsäure aus der Roh-Phosphorsäure als Calciumsulfat ausgefällt. Nachfolgend werden die restlichen Metalle wie Magnesium, Aluminium und Eisen mittels Ionenaustauscher abgetrennt. Zuletzt wird die Rohphosphorsäure mittels optionaler Nanofiltration gereinigt und durch Vakuumverdampfung konzentriert.

**Abbildung 35: TetraPhos-Verfahren**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 2.2.7 Zusammenfassung Verfahrensüberblick

Die im Rahmen der Literaturrecherche und Umfrage ermittelten Verfahrensangaben sind in Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 zusammengestellt. Dazu sind die Ergebnisse der beantworteten Fragebögen mit der entsprechenden Quellenangabe „eigene Abfrage“ und Literaturdaten mit der entsprechenden Literaturstelle gekennzeichnet. Die Angaben zu den jeweiligen Verfahren sind als allgemeine Richtwerte zu verstehen, die sich auf von den Verfahrensentwicklern bisher getestete Eingangsmaterialien beziehen. Da sich nicht alle Verfahrensangaben allgemeingültig darstellen lassen, sind in der Tabelle Verweise zu den standortspezifischen Kennwerten in den Steckbriefen (Anhang C) hinterlegt. Die Vollständigkeit der in dieser Studie behandelten Phosphorrückgewinnungsverfahren ist nicht garantiert. Insbesondere Verfahren, die einen TRL < 6 aufweisen, zu denen keine Literaturdaten vorlagen oder die nicht mehr weiterverfolgt werden (z. B. EcoPhos), wurden nicht näher betrachtet. Pyrolyseverfahren und hydrothermale Verfahren (z. B. PYREG-Verfahren, etc.), die ein P-haltiges Karbonisat erzeugen, wurden in dieser Studie nicht als Phosphorrückgewinnungsverfahren bewertet. Diese werden entsprechend der rechtlichen Situation in der vorliegenden Studie als Klärschlamm-Vorbehandlungsverfahren eingestuft, welche Phosphor in der jeweiligen Matrix aufkonzentrieren, aber hierdurch noch nicht die Forderung nach einer Phosphorrückgewinnung erfüllen.

**Tabelle 18: Stammdaten zu den Phosphorrückgewinnungsverfahren**

Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Technology Readiness Level	Status	Erläuterungen	Quellen
Multi-Solid	P.C.S. GmbH	Kristallisation	6-7	in Planung/Umsetzung (KA Hagenow für 2023)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.1.1	Eigene Anfrage
NuReSys	NuReSys (Nutrients Recovery Systems)	Kristallisation	8	umgesetzt (KA Braunschweig)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.1.2	Eigene Anfrage
Pearl	OSTARA	Kristallisation	9	umgesetzt (international, bisher nicht in Deutschland)		Schönberg et al., 2018
PHOSPAQ	Paques	Kristallisation	9	umgesetzt (Hünfeld)		Eigene Anfrage
P-RoC	KIT-Karlsruher Institut für Technologie	Kristallisation (mittels CSH-Phasen)	6-7	in Planung (KA Großostheim)		Eigene Anfrage
SIMPhos	Circel	Kristallisation (mittels CSH-Phasen)	6-7	in Planung/Umsetzung (KA Neuburg a. d. D.)		Eigene Anfrage

Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Technology Readiness Level	Status	Erläuterungen	Quellen
AirPrex	Berliner Wasserbetriebe	Kristallisation	9	umgesetzt (z.B. KA Mönchengladbach-Neuwerk, KA Berliner Wasserbetriebe, KA Göppingen, KA Salzgitter-Nord, KA Uelzen)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.2.1 bzw. C.2.2	Eigene Anfrage
EloPhos	ELIQUO STULZ GmbH	Kristallisation	5	eingestellt (war seit 2016 umgesetzt auf der KA Lingen)		Eigene Anfrage
Erw. PARFORCE-Ansatz <sup>1</sup>	PARFORCE Engineering & Consulting GmbH	Kristallisation	6-7	in Umsetzung (KA Wolfsburg für 2023)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.2.3	Eigene Anfrage
Gifhorn	Seaborne EPM A, ASG Stadt Gifhorn	Kristallisation	6	umgesetzt (KA Gifhorn)		Müller-Schaper et al., 2014
MSE-Verfahren	Mobile-Schlammmentwässerungs GmbH	Kristallisation	8	umgesetzt (mobile Anlage)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.2.4	Eigene Anfrage
PhosForce	Veolia	Kristallisation	6	in Planung (KA Schönebeck)		Eigene Anfrage; Antakyali et al., 2022

Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Technology Readiness Level	Status	Erläuterungen	Quellen
PS-fix	Abwasserbeseitigung Primasens und PFI	Kristallisation	6	in Planung/Umsetzung (KA Felsalbe, Pirmasens)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.2.5	Eigene Anfrage
Stuttgarter-Verfahren	ISWA und iat-Ingenieurberatung GmbH	Kristallisation	7-8	eingestellt (war umgesetzt auf der KA Offenburg)		Meyer, 2013
ViviMag	WETSUS, Kemira; TU Delft	Kristallisation	5-6	Pilotversuche (KA Schönebeck Kapazität Pilotanlage: 1 m <sup>3</sup> /h)		Grönfors und Cazalet, 2022
EuPhoRe	EuPhoRe GmbH	thermochemischer Aufschluss im Drehrohr <sup>1</sup>	7	in Planung/Umsetzung (HKW Mannheim)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.3.1	Eigene Anfrage
FlashPhos	Innerhalb: Konsortium EU-Horizon Projekt FlashPhos	thermochemisches Verfahren	5 (6 bis 7 erwartet für Pilotanlage)	Pilotanlage mit bis zu 250 kg/h Durchsatz; Erste großtechnische Anlage Bau geplant für 2025, Markteinführung 2028		Arnout, 2022, Flashpos Website; <a href="https://flashphos-project.eu/about/our-concept/">https://flashphos-project.eu/about/our-concept/</a> (Zugriffsdatum: 17.01.23).
Grenzbach Phosphor-Recycling-Verfahren	Grenzbach und Forschungszentrum CUTEC der Technischen Universität Clausthal	thermochemisches Verfahren	5	in Planung/Umsetzung (KA Rodgau mit 3.400 t TM/a (ausgelegt für 90.000 E))		Eigene Anfrage
KSFM-Prozess (Kubota Surface Melting Furnace)	KUBOTA Corporation	thermochemisches Verfahren	9	umgesetzt (> 30 Anlagen im Ausland (JP))		Eigene Anfrage



Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Technology Readiness Level	Status	Erläuterungen	Quellen
Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec „Variante B“)	Emter GmbH	thermochemischer Aufschluss <sup>2</sup> in der Rostfeuerung	6	in Planung/Umsetzung (Altenstadt, Emter GmbH)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.3.2	Eigene Anfrage
P-XTRACT	ZSW, WEHRLE, Uni Freiburg, AZV Staufener Bucht	thermochemischer Aufschluss <sup>1</sup> in der Wirbelschicht (optionales KSA-Leaching)	6	in Umsetzung (Demonstrationsanlage in Breisach-Grezhausen)		Kurz, 2022
Drehrohrkessel (Werkstätten heating-systems GmbH)	Werkstätten heating-systems GmbH	thermochemischer Aufschluss <sup>1</sup> im Drehrohr	8-9	in Umsetzung (Schüttorf, Ems-Vechte-Klärschlamm-Versorgung GmbH Kapazität: ca. 4.200 t TM/; Wallmenroth, Kommunalen Klärschlammverwertung Region Altenkirchen GmbH Kapazität: ca. 4.200 t TM/a)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.3.3	Eigene Anfrage
Ash2Phos	Easy Mining	nasschemischer Aufschluss	6	in Planung/Umsetzung (Chemiepark Schkopau, Chemiepark Süd-West in Baden-Württemberg (Standort noch nicht bekannt))	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.4.1	Eigene Anfrage
AshDec	Outotec/BAM	thermochemischer Aufschluss <sup>2</sup> im Drehrohr	6-7	Planung/Umsetzung eingestellt --> Verfahrensabwandlung		Eigene Anfrage

Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Technology Readiness Level	Status	Erläuterungen	Quellen
Leachphos	AIK Technik AG	nasschemischer Aufschluss	7-8	Labor		Eigene Anfrage
PARFORCE-Technologie	PARFORCE Engineering & Consulting GmbH	kombiniertes nass- und elektro-chemisches Verfahren	6	in Umsetzung (großtechn. Versuchsanlage auf der KA Bottrop für 2023/2024 geplant Kapazität: 1.000 t Asche/a bzw. 3 t Asche/d, Pilotanlage Freiberg Kapazität: 1 t Asche/d)		Eigene Anfrage
Phos4green/Seraplant	Seraplant /Glatt	nasschemischer Aufschluss	8-9	umgesetzt (Haldensleben) Phos4Green mit Störstoff-Abreicherung in Planung (Industriepark Höchst, Frankfurt)	Anlagenspezifische Angaben finden sich im Steckbrief in Anhang C.4.2	Eigene Anfrage
Phos4Life	Técnicas Reunidas SA	nasschemischer Aufschluss	6-7	in Planung/Umsetzung (Schweiz)		Eigene Anfrage
pontes pabuli	Pontes pabuli GmbH	nasschemischer Aufschluss	6	Produktionsanlage Betriebslauf ab Ende 10/2022 Leipzig-Markranstädt Kapazität: 4-10 t Produkt/h		Eigene Anfrage
TetraPhos	Remondis	nasschemischer Aufschluss	8	umgesetzt (Hamburg)	Anlagenspezifische Angaben finden	Eigene Anfrage

Verfahrensname	Verfahrensentwickler	Verfahrensart	Technology Readiness Level	Status	Erläuterungen	Quellen
					sich im Steckbrief in Anhang C.4.3	

<sup>1</sup>sofern Additive zur Schadstoff-Ausschleusung eingesetzt werden

<sup>2</sup>durch Additivzugabe zur gezielten Verbesserung der Phosphorverfügbarkeit

**Tabelle 19: Verfahrensspezifische Angaben der Phosphorrückgewinnungsverfahren**

Verfahrensname	Eingangsstrom	P-Gehalt	Trockenrückstand	Betriebsfähigkeit	Durchsatzkapazität	Betriebsmittel	Rückgewinnungseffizienz	Energiebedarf
Multi-Solid	SW (Bio-P)	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	MgO	90 % bezogen auf gelöstes PO <sub>4</sub> -P	s. Steckbrief
NuReSys	SW (Bio-P)	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	MgCl <sub>2</sub> , NaOH	85 % bezogen auf gelöstes PO <sub>4</sub> -P	s. Steckbrief
Pearl	SW (Bio-P)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	MgCl <sub>2</sub> , NaOH	12-22 % bezogen auf P im Schlamm 85 % bezogen gelöstes PO <sub>4</sub> -P	k.A.
PHOSPAQ	SW (Bio-P)	50 – 400 mg P/l	ca. 70-95 %	ca. 8.755 h/a	abhängig von P-Konz. im Zulauf	MgO oder Mg(OH) <sub>2</sub>	abhängig von Zulaufkonzentration	Sehr unterschiedlich
P-RoC	SW (Bio-P)	< 1.500 mg P/l	< 2%	bis zu 8.000 h/a	Pilotmaßstab: ca. 250 l/h	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> , CSH	< 80 % bezogen auf gelöstes PO <sub>4</sub> -P	je nach Abwasser-Charakteristik 2 - 5 kWh/m <sup>3</sup>
SIMPhos	SW (Bio-P)	123 - 245 mg P/l	k.A.	k.A.	135 m <sup>3</sup> /d bis 180m <sup>3</sup> /d	CSH (SIMPur)	k.A.	k.A.
AirPrex	FS (Bio-P)	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	MgCl <sub>2</sub>	< 5 % bezogen auf P im Schlamm; > 90 % bezogen auf gelöstes PO <sub>4</sub> -P	s. Steckbrief
EloPhos	FS (Bio-P)	3,7 % P TM	2,6 %	8760 h/a	1.200 t TM/a, max. möglich 2.500 t TM/a	MgCl <sub>2</sub> : 3,5 l/m <sup>3</sup>	k.A.	30.000 kWh/a

Verfahrensname	Eingangsstrom	P-Gehalt	Trockenrückstand	Betriebsfähigkeit	Durchsatzkapazität	Betriebsmittel	Rückgewinnungseffizienz	Energiebedarf
Erw. PARFORCE-Ansatz	Hydrolysiertes ÜSS (Bio-P)	100 - 1.300 mg/l	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	MgCl <sub>2</sub> : 3,23 g/((mg P/l)*m <sup>3</sup> ) (Mg:P = 1,05) (wf) NaOH: ca. 0,5 l/m <sup>3</sup> Flüssigphase (wf) Polymerbedarf (PARFLOX): 8 kg Wirksubstanz/t TR bei 44 % TR	bis zu 67 % bezogen auf P im Schlamm > 95 % bezogen auf gelöstes PO <sub>4</sub> -P	s. Steckbrief
Gifhorn	FS (Bio-P)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	k.A.	k.A.
MSE-Verfahren	FS (Fe-Fällung, Al-Fällung, Bio-P)	3 - 7 % P TM	1,7 - 4,8 %	max. 8.760 h/a	max. 5.000 t TM/a	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> : 4,8 l/m <sup>3</sup> FS, MgO: 1,6 l/m <sup>3</sup> FS, NaOH: 2,1 l/m <sup>3</sup> FS	90 % bezogen auf P im Schlamm	12 kWh/m <sup>3</sup> FS (1.714.285 kWh/a bei 5.000 t TM/a)
PhosForce	RS (Bio-P)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	NaOH/Ca(OH) <sub>2</sub> , MgCl <sub>2</sub> /CaCl <sub>2</sub> , Polymer	30 bis 50 % bezogen auf P im Schlamm	k.A.
PS-fix	FS (Bio-P)	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	NaOH, C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> , HCl, MgCl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60 %bezogen auf P im Schlamm	s. Steckbrief
Stuttgarter-Verfahren	FS	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Zitronensäure, MgO, NaOH	50 bis 60 % bezogen auf P im Schlamm	k.A:
ViviMag	FS (Chem-P)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Bis zu 50 % bezogen auf P im Schlamm	k.A.

Verfahrensname	Eingangsstrom	P-Gehalt	Trockenrückstand	Betriebsfähigkeit	Durchsatzkapazität	Betriebsmittel	Rückgewinnungseffizienz	Energiebedarf
EuPhoRe	KS	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	MgCl <sub>2</sub> zzgl. Betriebsmittel für die Rauchgasreinigung	> 80 % (P verbleibt größtenteils in der Asche)	s. Steckbrief
FlashPhos	entw. KS/getr. KS	3,4 % P (getr. KS)	25 % bzw. 85 %	k.A.	Pilotanlage: 250 kg/h getr. KS	CaO: 0,03 kg/kg getr. KS, Koks: 0,06 kg/kg getr. KS	76 % (angestrebt >90 %)	k.A.
Grenzebach Phosphor-Recycling-Verfahren	KS	> 2% P TM	keine Vorgabe	> 8.000 h/a	Komplette Verwertung des anfallenden KS, Anlagengrößen: 50.000-90.000 E, 90.000-130.000 E, 130.000-170.000 E, >170.000 E	k.A.	bis zu 94 % (je nach Fe-Anteil im KS)	k.A.
KSFM-Prozess (Kubota Surface Melting Furnace)	KS/KSA	entw. KS: 2 - 3 % P KSA: 8 - 14 % P	entw. KS: 85 - 95 %, RS: 70 - 80 %, KSA: 85 - 100 %	6.800-7.200 h/a (bis 8160 h/a möglich)	KS: 8,5 t/d - 175 t/d KSA: 1 t - 100 t/d	Additive: Ca(OH) <sub>2</sub> : 2-3 kg/t entw. KS, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 4-5 kg/t entw. KS; Brennstoff zur Trocknung (z.B. Kerosin, Biogas, etc.): Kerosin: 20-25 L/t entw. KS; Brennstoff für die Schmelze: Für KS: fossile Energie nur für die Startphase Für Asche: Plastikmüll als Brennstoff: 400 kg SRF/t KSA oder falls	> 90 %	KS-Schmelze: 100-150 kWh/t entw. KS KSA-Schmelze: 250-300 kWh/t KSA (Angaben abhängig vom Prozessablauf der Anlage)

Verfahrensname	Eingangsstrom	P-Gehalt	Trockenrückstand	Betriebsfähigkeit	Durchsatzkapazität	Betriebsmittel	Rückgewinnungseffizienz	Energiebedarf
						Plastikmüll nicht zugänglich Kerosin (oder anderer Brennstoff): 250 l/t KSA Gasreinigung: NaOH (24 %): 4-6 L/t entw. KS		
Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec „Variante B“)	KS	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Na-basierte Additive (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaHCO <sub>3</sub> ) zzgl. Betriebsmittel für die Rauchgasreinigung	>98 % (P verbleibt größtenteils in der Asche)	k.A.
P-XTRACT	KS	6,5-11 % P TM	20-30 %	k.A.	2.000 - 3.000 t/a KS TM (KS von 7 KA der Region)	Na-/K-basierte Additive, zzgl. Betriebsmittel für die Rauchgasreinigung, zzgl. Betriebsmittel für das Säure-Leaching	>98 % (P verbleibt größtenteils in der Asche)	k.A.
Drehrohrkessel (Werkstätten heating-systems GmbH)	KS	3 - 4 % P	18-35 %	s. Steckbrief	s. Steckbrief	ggfs. Additive; zzgl. Betriebsmittel für die Rauchgasreinigung	>98 % (P verbleibt größtenteils in der Asche)	s. Steckbrief
Ash2Phos	KSA	keine Limitierung (optimal: zwischen 6-12 % P)	trockene Asche (Silo Lagerung)	> 8.000 h/a	Anlagengrößen: 30.000, 60.000, 90.000 t TM/a	HCl, NaOH, Kalkmilch	> 80 %	k.A.



Verfahrensname	Eingangsstrom	P-Gehalt	Trockenrückstand	Betriebsfähigkeit	Durchsatzkapazität	Betriebsmittel	Rückgewinnungseffizienz	Energiebedarf
AshDec	KSA	9 - 10 % P TM	100 %	8.000 h/a (siehe Kommentar Energiebedarf)	15.000 t TM/a (siehe Kommentar Energiebedarf)	Na-basierte Additive (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaHCO <sub>3</sub> ) zzgl. Betriebsmittel für die Rauchgasreinigung	99 % (P verbleibt größtenteils in der Asche)	k.A. (aufgrund der gestiegenen Gaspreise gab es eine Verfahrensveränderung siehe Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec Variante B))
Leachphos	KSA	7 - 8 %P TM	95-100 %	5.000-8.000 h/a	36.000 kg TM/d	H <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> , Ca(OH) <sub>2</sub>	> 80 %	ca. 150 kWh Strom/t KSA
PARFORCE-Technologie	KSA	keine technischen oberen oder unteren Grenzen	i.d.R. trocken (ggfs. zur Staubbinding mit Wasser benetzt) keinen Einfluss auf die Prozesseffektivität oder -effizienz	Kampagnenbetrieb	1.000 kg/d (Freiberg)	verdünnte HCl oder HNO <sub>3</sub> Ionenaustauscherharze und Regenerationsmittel, CaOH zur Neutralisierung (Haupttreiber für die Verbräuche der Betriebsmittel: Ca- und P-Gehalt und Fe und Al zur Abreicherung)	> 80 %	abhängig von der Zusammensetzung
Phos4green/Seraplant	KSA	ideal > 7,9 % P (flexibel, je nach Endprodukt)	100 %	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Phosphorsäure (40 %-ig) zzgl. optional Nährstoffe	> 80 %	s. Steckbrief

Verfahrens- name	Eingangs- strom	P-Gehalt und zugehöriger Rezeptur)	Trocken- rückstand	Betriebs- fähigkeit	Durchsatz- kapazität	Betriebsmittel	Rückgewinnungs- effizienz	Energiebedarf
Phos4Life	KSA	keine Begrenzung	>98%	8.000 h/a	> 35.000 kg TM/d	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96 %), CaO, HCl (32 %)	ca. 95 %	k.A.
pontes pabuli	KSA	4 - 13 % P	> 95 %	7.500 h/a	k.A.	Säuren	ca. 90 %	k.A.
TetraPhos	KSA	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	(rezyklierte) Phosphorsäure, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , SM-Fällmittel, HCl	>80-90 %	k.A.

**Tabelle 20: Rezyklat, Nebenprodukt und Reststoffe der Phosphorrückgewinnungsverfahren**

Verfahrensname	Rezyklat	Rezyklat-aufkommen	P-Gehalt Rezyklat	Reststoffe	Reststoff-aufkommen	P-Gehalt Reststoff	Entsorgungs-/Verwertungsweg Reststoff(e)	Nebenprodukte	Nebenprodukt-aufkommen	P-Gehalt Nebenprodukte	Entsorgungs-/Verwertungsweg Nebenprodukt(e)
Multi-Solid	Struvit	s. Steckbrief	s. Steckbrief	P-arme Flüssigkeit	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Rücklauf KA	keine	entfällt	entfällt	entfällt
NuReSys	Struvit	s. Steckbrief	s. Steckbrief	P-arme Flüssigkeit	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Rücklauf KA	keine	entfällt	entfällt	entfällt
Pearl	Struvit	k.A.	k.A.	P-arme Flüssigkeit	k.A.	k.A.	Rücklauf KA	keine	entfällt	entfällt	entfällt
PHOSPAQ	Struvit	ca. 1.825 t P/a	ca. 12 % P	P-arme Flüssigkeit	k.A.	k.A.	Rücklauf KA	keine	entfällt	entfällt	entfällt
P-RoC	CaP und Struvitristalle in CSH-Substraten	ca. 1 - 2 kg/h	5-12%	P-arme Flüssigkeit	k.A.	k.A.	Rücklauf in Zulauf KA	keine	entfällt	entfällt	entfällt
SIMPhos	Struvit in CSH-Substraten	20 - 50 t/a	4,5 - 13 % P	P-arme Flüssigkeit	k.A.	k.A.	Rücklauf KA	keine	entfällt	entfällt	entfällt
AirPrex	Struvit	s. Steckbrief	s. Steckbrief	entwässerter KS	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	keine	entfällt	entfällt	entfällt
EloPhos	Struvit	k.A.	k.A.	entwässerter KS	k.A.	k.A.	thermische Verwertung	keine	entfällt	entfällt	entfällt

Verfahrens- name	Rezyklat	Rezyklat- aufkommen	P-Gehalt Rezyklat	Reststoffe	Reststoff- aufkommen	P-Gehalt Reststoff	Entsor- gungs/Ver- wertungs- weg Reststoff(e)	Neben- produk- te	Neben- produkt- aufkom- men	P-Gehalt Neben- produkte	Entsorgungs- /Verwer- tungsweg Nebenpro- dukt(e)
Erw. PARFORCE Ansatz	Struvit oder Phosphor- säure (75 %)	s. Steckbrief	s. Steckbrief	desintegrier- ter ÜSS	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Zuführung in die Faulung	keine; bei Veredelu- ng von Struvit zu P-Säure: MgCl <sub>2</sub> , Ammonia- kwasser	entfällt	entfällt	entfällt
Gifhorn	Struvit	k.A.	k.A.	entwässerter KS	k.A.	k.A.	thermische Verwertung	keine	entfällt	entfällt	entfällt
MSE- Verfahren	Struvit	abhängig von der P-Fracht	11,6 % P	P-armer Filterkuchen	abhängig von der KA	< 20 g P/kg T M	thermische Verwertung	keine	entfällt	entfällt	entfällt
PhosForce	Struvit oder Brushit	k.A.	> 10 %	abgereichert er RS	k.A.	k.A.	Zuführung in die Faulung	keine	entfällt	entfällt	entfällt
PS-fix	Struvit	s. Steckbrief	s. Steckbrief	entwässerter KS	s. Steckbrief	s. Steckbrief	thermische Verwertung	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	s. Steckbrie- f	s. Steckbrie- f	Landwirtscha- ft
Stuttgarter- Verfahren	Struvit	k.A.	k.A.	entwässerter KS	k.A.	k.A.	thermische Verwertung	keine	entfällt	entfällt	entfällt
ViviMag	Vivianit	k.A.	k.A.	entwässerter KS	k.A.	k.A.	thermische Verwertung	keine	entfällt	entfällt	entfällt

Verfahrensname	Rezyklat	Rezyklat-aufkommen	P-Gehalt Rezyklat	Reststoffe	Reststoff-aufkommen	P-Gehalt Reststoff	Entsorgungs-/Verwertungsweg Reststoff(e)	Nebenprodukte	Nebenprodukt-aufkommen	P-Gehalt Nebenprodukte	Entsorgungs-/Verwertungsweg Nebenprodukt(e)
EuPhoRe	P-haltiges Ascheprodukt	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Schwermetallhaltiger Filterstaub (als Gemisch mit MVA-Filterstaub)	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	keine	entfällt	entfällt	entfällt
FlashPhos	weißer Phosphor (P <sub>4</sub> )	0,026 kg/kg getr. KS	0,026 kg/kg getr. KS (siehe auch Rezyklataufkommen)	alternativer Zement-Binder	alternativer Zement-Binder: 0,27 kg/kg getr. KS	k.A.	Baustoffindustrie	Gasförmiger Brennstoff, Metallkonzentrat, Fe-Legierung (vorgesehen, ansonsten Reststoff)	Gasförmiger Brennstoff: 2,97 kg/kg getr. KS Metallkonzentrat: 0,0025 kg/kg getr. KS Fe-Legierung: 0,04 kg/kg getr. KS	Fe-Legierung : Hauptverlust von P als Fe-P	Gasförmiger Brennstoff: Ersatz von fossilen Brennstoffen (bspw. in Zementwerken) Metallkonzentrat: Metallindustrie Fe-Legierung: Metallindustrie
Grenzebach Phosphor-Recycling-Verfahren	Phosphorsäure (MGA)	k.A. (je nach P- und Fe-gehalt)	> 52 % gemäß MGA-Spezifikation	Mineralik (entspricht der Zusammensetzung von Basalt)	entspricht Glührückstand des KS	k.A. (abhängig vom Fe-Anteil im KS, unterhalb	Substitut für den Eingangsrohstoff Basalt in der Herstellung	keine	entfällt	entfällt	entfällt

Verfahrensname	Rezyklat	Rezyklat-aufkommen	P-Gehalt Rezyklat	Reststoffe	Reststoff-aufkommen	P-Gehalt Reststoff	Entsorgungs-/Verwertungsweg Reststoff(e)	Nebenprodukte	Nebenprodukt-aufkommen	P-Gehalt Nebenprodukte	Entsorgungs-/Verwertungsweg Nebenprodukt(e)
						der Basalt-Spezifikation)	von Mineralwolle				
KSFM-Prozess (Kubota Surface Melting Furnace)	P-reiche Schlacke	4.000 kg/d (für 100 t/d entw. KS mit 20 % TR)	8 - 10 % P	Flugasche	60 kg/d (für 100 t/d entw. KS mit 20 % TR)	15-20 % P	Verhüttung; Deponierung	Metallkonzentrat (reich an Fe, Au, Pd)	1-5 % des KS Trockengewichts	5-10 % P	Veredelung
Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec Variante B)	P-haltiges Ascheprodukt	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Schwermetallhaltiger Filterstaub	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	keine	entfällt	entfällt	entfällt
P-XTRACT	P-haltiges Ascheprodukt	10 t/d TM	6,5-11 % P	Schwermetallhaltiger Filterstaub	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Drehrohrkessel (Werkstätten heating-systems GmbH)	P-haltiges Ascheprodukt	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Schwermetallhaltiger Filterstaub	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Ammoniumsulfat-Lösung (Nebenprodukt der Abluftwäsche hinter	s. Steckbrief	0	Landwirtschaft

Verfahrensname	Rezyklat	Rezyklat-aufkommen	P-Gehalt Rezyklat	Reststoffe	Reststoff-aufkommen	P-Gehalt Reststoff	Entsorgungs-/Verwertungsweg Reststoff(e)	Nebenprodukte	Nebenprodukt-aufkommen	P-Gehalt Nebenprodukte	Entsorgungs-/Verwertungsweg Nebenprodukt(e)
Ash2Phos	Calciumphosphat	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Sand, Schwermetall-Konzentrat, Abwasser	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Sandfraktion: Baustoffe, Glas SM-Konzentrat: Deponie (ggf. Metallschmelzer)	dem Trockner) FeCl <sub>3</sub> , Natriumaluminat	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Fällsalz: Abwasserreinigung
AshDec	P-haltiges Ascheprodukt	17.000 t TM/a	8 - 9 %	Schwermetallhaltiger Filterstaub	150 t/a	k.A.	Untertagedeponie	keine	entfällt	entfällt	entfällt
Leachphos	P-reiches Salz	ca. 14,4 t/d	140 g P/kg	Aufschlussrückstand, Abwasser	31.000 kg TM/d	ca. 1 %	Deponie	keine	entfällt	entfällt	entfällt
PARFORCE-Technologie	Phosphorsäure (75 %)	abhängig von Zusammensetzung Einsatzstoff und Anlagenkapazität	ca. 24 % P	Aufschlussrückstand, Schwermetallkonzentrat	je nach Einsatzstoff und Anlagenkapazität: bis zu 65 % der eingesetzten KSA	5-10 % P	Aufschlussrückstand: Deponierung oder bei geringer Belastung Baustoffindustrie, Schwermet	CaCl <sub>2</sub> , (Fe-/Al-Salze)	abhängig von Zusammensetzung Einsatzstoff und Anlagenkapazität	k.A.	Fällsalze: Abwasserreinigung, Taumittel (Winterdienst)



Verfahrensname	Rezyklat	Rezyklat-aufkommen	P-Gehalt Rezyklat	Reststoffe	Reststoff-aufkommen	P-Gehalt Reststoff	Entsorgungs-/Verwertungsweg Reststoff(e)	Nebenprodukte	Nebenprodukt-aufkommen	P-Gehalt Nebenprodukte	Entsorgungs-/Verwertungsweg Nebenprodukt(e)
							allkonzentrat: Deponie				
Phos4green/Seraplant	P-haltiges - Ascheprodukt	s. Steckbrief	s. Steckbrief	keine	entfällt	entfällt	entfällt	keine	entfällt	entfällt	entfällt
Phos4Life	Phosphorsäure (75 %)	k.A.	ca. 24 % P	Aufschlussrückstand, Schwermetallkonzentrat, Abwasser	k.A.	< 0,5 %P	Deponie	FeCl <sub>3</sub> (40 %), HCl (17 %)	k.A.	k.A.	Verwertung
pontes pabuli	P-haltiges Ascheprodukt	4-10 t/h	2 - 17 % P	Schwermetallkonzentrat	5-10 % der KSA	< 5 %	Deponie	keine	entfällt	entfällt	entfällt
TetraPhos	Phosphorsäure (75 %)	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Aufschlussrückstand	s. Steckbrief	s. Steckbrief	s. Steckbrief	(Fe-/Al-Salze), Gips	s. Steckbrief	s. Steckbrief	Fällsalze: Abwasserreinigung, Gips: Baustoffindustrie

## **2.3 Optimierungspotentiale der Phosphorrückgewinnungsverfahren**

Mögliche Optimierungspotenziale der Phosphorrückgewinnungsverfahren beziehen sich auf Energieeinsatz und Betriebsmitteleinsatz, Phosphorrückgewinnungsgrad, Rückgewinnung weiterer Wertstoffe (sonstige Nährstoffe und Technologiemetalle) bzw. Entsorgung der Rückstände. Da derzeit nur zwei Phosphorrückgewinnungsverfahren für Klärschlammverbrennungsasche umgesetzt sind, die sich zudem im Stillstand bzw. in der Inbetriebnahme befinden, lassen sich keine konkreten Angaben machen. Für die Verfahren aus Schlammwasser und Faulschlamm lassen sich Optimierungspotentiale hinsichtlich der Erhöhung der Rückgewinnungsquote sowie der gezielten Produktabscheidung ausweisen. Beide Optimierungspotentiale setzen voraus, dass die Phosphat-Rücklösung in die flüssige Phase maximal ist. Verfahrensanbieter geben keine ausreichenden Auskünfte zu möglichen Herausforderungen im Prozess. Ein Grund dafür ist die aktuelle Wettbewerbssituation, durch die jedoch ein hohes Eigeninteresse in der Optimierung der Verfahren besteht.

## 3 Bestandsanalyse

### 3.1 Abwasserbehandlungsanlagen

#### 3.1.1 Vorgehensweise Datenerhebung und -verarbeitung

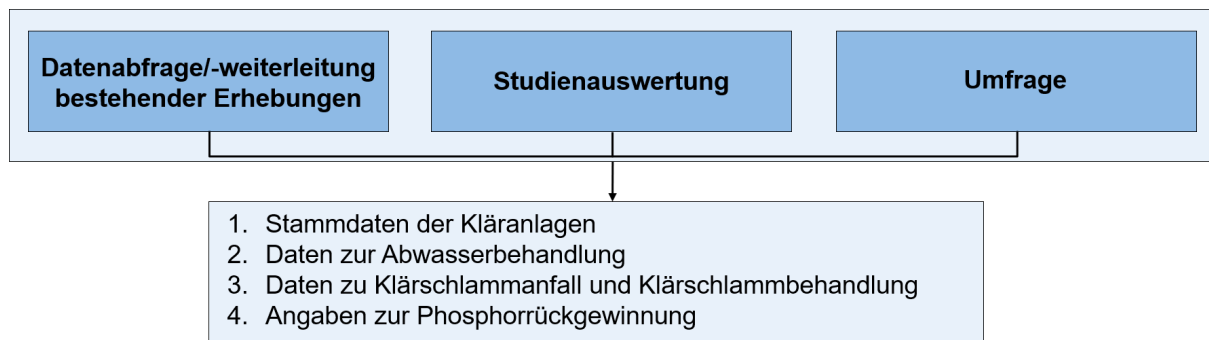
Um den aktuellen Status der Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklassen 4b und 5 in Deutschland darzustellen, wurden neben den Stammdaten der jeweiligen Kläranlagen insbesondere klärschlammbezogene Daten, wie beispielsweise die einzelnen Entsorgungswege sowie Daten zur aktuellen bzw. Pläne zur zukünftigen Umsetzung der Phosphorrückgewinnung, abgefragt.

Folgende Punkte wurden innerhalb der Datenerhebung recherchiert und abgefragt:

1. Angaben zu den Stammdaten
  - a. Stammdaten (Name der Kläranlage, Ausbaugröße, Anschlussgröße bezogen auf Phosphor, Anteil industrieller Einleiter)
2. Angaben zur Abwasserbehandlung
  - a. Art der Fällung und Stabilisierung
  - b. Entwässerungs- und Trocknungsverfahren
  - c. Entsorgungsweg für Rechengut und Sandfang
3. Angaben zum Klärschlammfall und der Klärschlammbehandlung
  - a. Klärschlammmenge (OS und TR) und -zusammensetzung (Trockenrückstand, Glühverlust, Wasser-, Asche- und Phosphorgehalt)
  - b. bisherige Verwertungswege und -kosten für Klärschlamm
  - c. Entsorgungsvertrag vorhanden, Vertragslaufzeit
  - d. Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung
  - e. interne bzw. externe (Zwischen-)Lagerungsmöglichkeiten für Klärschlamm
4. Angaben zur Phosphorrückgewinnung.
  - a. präferiertes Phosphorrückgewinnungsverfahren
  - b. externe, kooperative oder eigenständige thermische KS-Behandlung bzw. Phosphorrückgewinnung
  - c. eigene P-Abreicherungsmaßnahme und Rezyklatverwertung

In Abbildung 36 ist der Ablauf zur Gewinnung der erforderlichen Daten dargestellt. Zur Datenermittlung wurden alle Abwasserbehandlungsanlagen ab 50.000 E (Größenklasse 4b) berücksichtigt. Neben einer Abfrage zu bestehenden Erhebungen der Bundesländer sowie der DWA-Landesverbände sind einschlägige Studien ausgewertet und ergänzend eine online basierte Umfrage entwickelt worden.

**Abbildung 36: Vorgehensweise zur Datenermittlung und -analyse**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 3.1.1.1 Datenabfrage-/Weiterleitung bestehender Erhebungen

Zur Datenermittlung bestehender Erhebungen wurden seit Dezember 2020 entsprechende Anfragen an die jeweiligen DWA-Landesverbände gerichtet sowie punktuell bei den jeweiligen Landes-Umweltministerien bzw. -ämtern angefragt. Zentrale Voraussetzung für die Zusammenstellung der Daten ist, speziell für die Evaluierung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, dass homogene und lückenlose sowie möglichst jahreseinheitliche Daten vorliegen. Dabei war die Auskunftsbereitschaft der jeweiligen Kläranlagenbetreiber bzw. die Beteiligungsbereitschaft von deren regionaler Branchenvereinigung von zentraler Bedeutung.

### 3.1.1.2 Studienauswertung

Die Datenweitergabe konnte nicht für alle Bundesländer erfolgreich angefragt werden. Dadurch bedingt wurden insbesondere für die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern nur bestehende Studien ausgewertet. In Tabelle 9 ist die Herkunft der Datenabfrage bzw. -weiterleitung sowie die jeweiligen Quellen der Literatursauswertung dargestellt.

**Tabelle 21: Datenbereitstellung für die jeweiligen Bundesländer**

Bundesland	Datenabfrage/-weiterleitung bzw. Studienauswertung
Baden-Württemberg	Keine Datenweitergabe; Daten Studie: Meyer et al., 2020
Bayern	Keine Datenweitergabe; Daten Studie: Schaum et al., 2020
Berlin	Datenweitergabe: DWA Nord-Ost
Brandenburg	Datenweitergabe: DWA Nord-Ost
Mecklenburg-Vorpommern	Datenweitergabe: DWA Nord-Ost
Sachsen-Anhalt	Datenweitergabe: DWA Nord-Ost
Bremen	Datenweitergabe: DWA Nord
Hamburg	Datenweitergabe: DWA Nord
Niedersachsen	Datenweitergabe: DWA Nord
Schleswig-Holstein	Datenweitergabe: DWA Nord
Nordrhein-Westfalen	Datenweitergabe: LANUV

Bundesland	Datenabfrage/-weiterleitung bzw. Studienauswertung
	Daten Studie: Umsetzung der Anforderungen der Klärschlamm-Verordnung zur Phosphorrückgewinnung in Nordrhein-Westfalen (Antakyali et al., 2020)
Hessen	Datenweitergabe: HLNUG
Rheinland-Pfalz	Datenweitergabe: MUEEF
Saarland	Datenweitergabe: Entsorgungsverband Saar
Sachsen	Keine Datenweitergabe; Studie: Statusbericht zur Klärschlamm Entsorgung; Wagner et al., 2020
Thüringen	Daten Abschlussbericht: ZV KKT

### 3.1.1.3 Umfrage

Um eine möglichst vollständige Übersicht der Bestandsanalyse der Abwasserbehandlungsanlagen auszuweisen, wurde für die jeweiligen Bundesländer, mit Ausnahme Nordrhein-Westfalens und des Saarlands, eine online basierte Umfrage generiert. Für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Saarland wurden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) bzw. dem Entsorgungsverband Saar (EVS) vollständig Daten zur Verfügung gestellt. Die Umfrage ist mit der Web-Applikation SoSci Survey erstellt worden und war über einen Bearbeitungszeitraum von vier Monaten (10.06.2021 bis 06.10.2021) zugänglich. Die Umfrage wurde gemäß der Abfragepunkte zur Datenerhebung kategorisiert. In Anhang A können der Aufbau sowie die Abfragepunkte eingesehen werden.

## 3.1.2 Datenauswertung

### 3.1.2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Auswertungen der Umfrageergebnisse erfolgten unter sinnvoller Kombination der Datensätze. Trotz heterogener und lückenhafter Datenlage und -bereitstellung soll ein möglichst vollständiges einheitliches Bild der Bestandsanalyse der Abwasserbehandlungsanlagen für die jeweiligen Bundesländer unter Kombination der recherchierten und erfragten Daten entstehen. Zu den Abfragepunkten Entwässerungsverfahren, Entsorgungsweg für Rechengut und Sandfang, Klärschlammzusammensetzung, Verwertungskosten für Klärschlamm, Status des Entsorgungsvertrags, Transportentfernung zur Verwertung bzw. Behandlung und externe kooperative oder eigenständige thermische Klärschlammbehandlung bzw. Phosphorrückgewinnung konnten nicht ausreichend Daten abgefragt bzw. der Literatur entnommen werden, die ein aussagekräftiges Ergebnis für die jeweiligen Bundesländer dargestellt hätten. Dementsprechend werden diese Ergebnisse in der Datenauswertung nicht berücksichtigt.

### 3.1.2.2 Datenverfügbarkeit auf Bundeslandebene

Die Erfahrung der Datenabfrage sowie -weiterleitung zeigt für die jeweiligen Bundesländer ein uneinheitliches Bild. Für die Bundesländer NRW und Saarland konnten die abgefragten Daten, bis auf kleine Einschränkungen, nahezu vollständig bereitgestellt werden. Für die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern konnten trotz mehrerer Nachfragen keine Daten über die DWA-Landesverbände zur Verfügung gestellt werden. Allerdings wurde die Studie von Meyer et al. (2020) vom DWA Landesverband Baden-Württemberg in der Langfassung bereitgestellt.

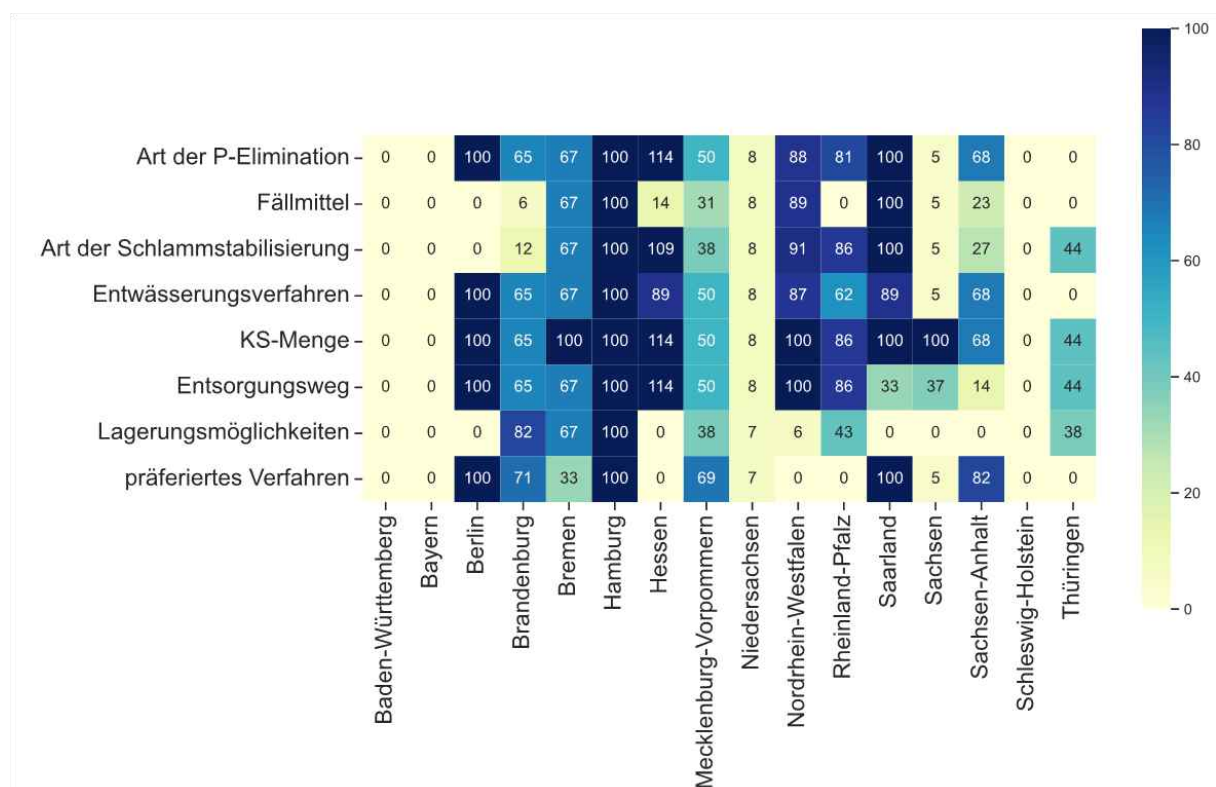
Tabelle 10 zeigt als Grundlage der Datenauswertung die Anzahl und Ausbaugrößen der Abwasserbehandlungsanlagen der verschiedenen Bundesländer. Dazu wird die Datenverfügbarkeit anhand der Kläranlagen-Anzahl bzw. der Ausbaugröße der von Destatis veröffentlichten Zahlen ermittelt (Destatis, 2022a). Die Datenverfügbarkeit ist dabei auf die Daten (Kläranlagen-Anzahl und Ausbaugrößen) aus Destatis, 2022a (Datenerhebung 2020) bezogen und könnte bei einigen Bundesländern über 100 % liegen, sofern mehr Kläranlagen durch die Datenermittlung erfasst wurden (Hessen) oder ein aktueller Datensatz verfügbar ist (Hamburg, Bremen).

**Tabelle 22: Verfügbarkeiten der Daten zu den Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklassen 4b und 5 anhand Literaturdaten von Destatis, 2022a und eigenen Daten**

Bundesland	Anzahl KA 4b Destatis	Anzahl KA 4b Datenbank	Anzahl KA 5 Destatis	Anzahl KA 5 Datenbank	Ausbau-größe 4b+5 Destatis [E]	Ausbau-größe 4b+5 Datenbank [E]	Daten-verfügbarkeit nach Ausbau-größe [%]
Baden-Württemberg	50	0	38	0	13.102.813	0	0
Bayern	43	0	36	0	15.898.230	0	0
Berlin	0	0	1	1	1.600.000	1.600.000	100
Brandenburg	9	4	8	7	4.112.400	3.412.500	83
Bremen	0	0	3	3	1.687.000	1.760.000	104
Hamburg	0	0	1	1	2.920.000	3.000.000	103
Hessen	25	29	10	11	5.550.900	5.931.400	107
Mecklenburg-Vorpommern	12	4	4	4	1.923.000	1.237.700	64
Niedersachsen	32	1	27	4	8.577.800	760.000	9
Nordrhein-Westfalen	75	71	70	74	28.000.493	27.080.028	97
Rheinland-Pfalz	13	11	8	7	2.725.850	2.306.450	85
Saarland	7	7	2	2	820.500	820.500	100
Sachsen	11	12	8	7	3.376.750	3.295.850	98
Sachsen-Anhalt	13	8	9	7	3.496.088	2.430.500	70
Schleswig-Holstein	10	0	7	0	3.418.850	0	0
Thüringen	10	3	6	4	1.980.900	908.300	46

Abbildung 37 zeigt eine Übersicht über die Verfügbarkeit der ermittelten Daten für das jeweilige Bundesland.

**Abbildung 37: Datenverfügbarkeit (Prozentangabe) auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5 bezogen auf die rückgemeldeten/auswertbaren Kläranlagen**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

Für die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Schleswig-Holstein konnten keine Daten ermittelt werden. Grund dafür war die fehlende Bereitstellung der Daten. Aus der Literatur konnten ebenfalls keine GK-spezifischen Daten entnommen werden. Problematisch stellte sich insbesondere die Ermittlung GK-spezifischer Daten dar - insbesondere für die GK 4b, die im Großteil der Literatur mit GK 4a als GK 4 zusammengefasst wird. Dementsprechend lässt sich ein Großteil der Daten aus der Literatur für diese Studie nicht hinreichend auswerten. Hochrechnungen auf die Gesamtheit der Kläranlagen anzustellen ist anhand der verfügbaren Daten nicht zielführend.

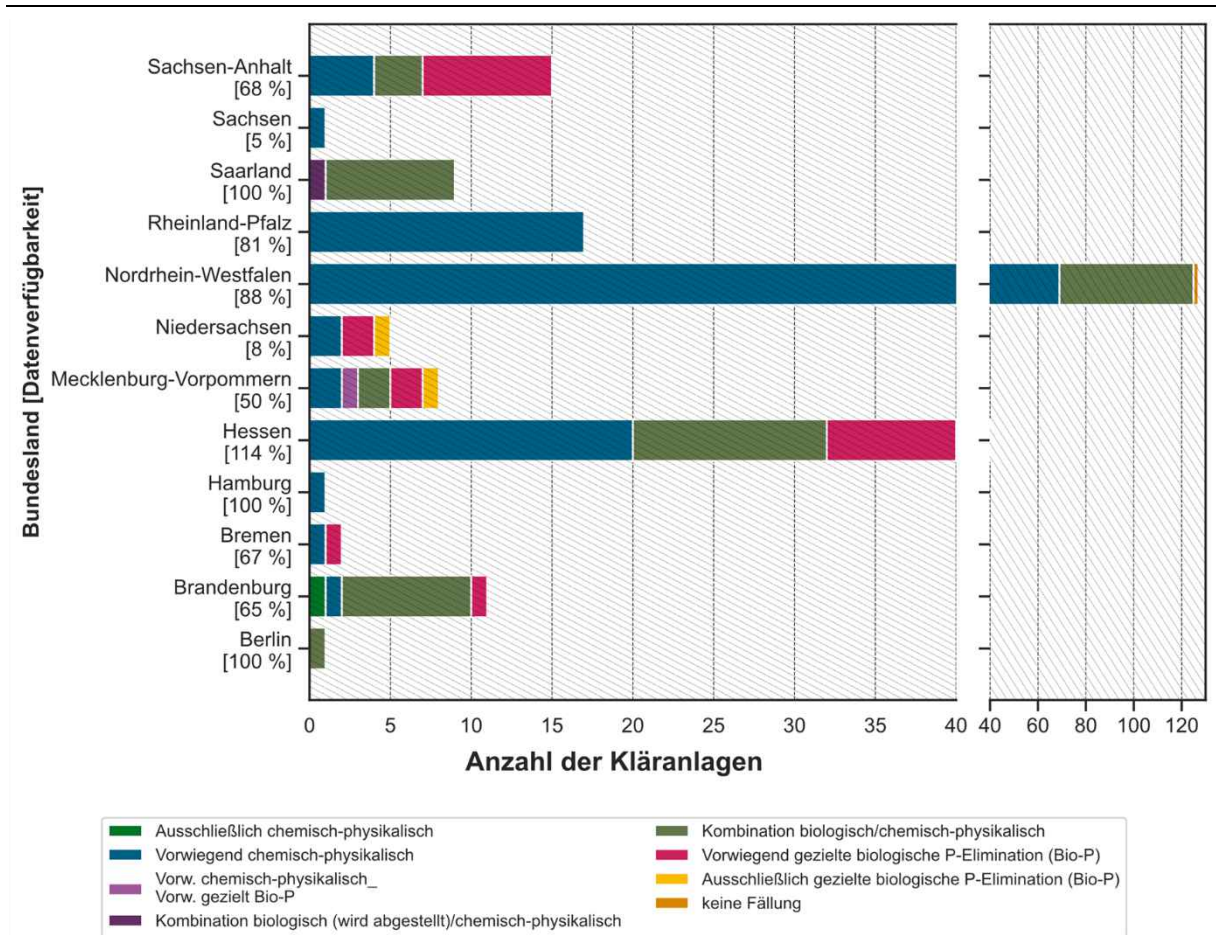
Die Bundesländer Berlin, Hamburg, Nordrhein-Westfalen und Saarland weisen vollständige Datensätze auf. Die Datenverfügbarkeit für Rheinland-Pfalz kann als mäßig gut bewertet werden. Insbesondere die Punkte zu KS-Mengen und Trocknungsverfahren zeigen eine hohe Datendichte. Zur Ermittlung der Trocknungsverfahren wurde auf Daten aus dem Projekt „Überprüfung des nationalen Standes der Technik (SdT): Teilvorhaben 3: Untersuchungen zu Emissionen und Energieaufwand bei der Trocknung und Kompostierung von Klärschlamm zur Optimierung einer weiteren umweltverträglichen Verwertung“ (FKZ 3718 53 302 3) zurückgegriffen, die von der Firma Ramboll Deutschland GmbH bereitgestellt worden sind (M. Kühnl, persönliche Kommunikation, 13. April 2022). Die Datensätze beziehen sich auf alle Größenklassen und sind aus diesem Grund in Tabelle 10 nicht mit ihren Verfügbarkeiten dargestellt. Die Abfragepunkte sind in Abhängigkeit der Datenverfügbarkeit zu bewerten. Dabei handelt es sich aufgrund der Rückmeldungen/Literaturdaten zur P-Elimination jedoch nur um einen geringen Teil.



### 3.1.2.3 Phosphor-Elimination

In Abbildung 38 ist die Art der Phosphor-Elimination, verteilt auf die Bundesländer, dargestellt. Abbildung 39 gibt einen Überblick über die verwendeten Fällmittel bei chemisch-physikalischer Phosphor-Elimination.

**Abbildung 38: Phosphor-Elimination auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5**

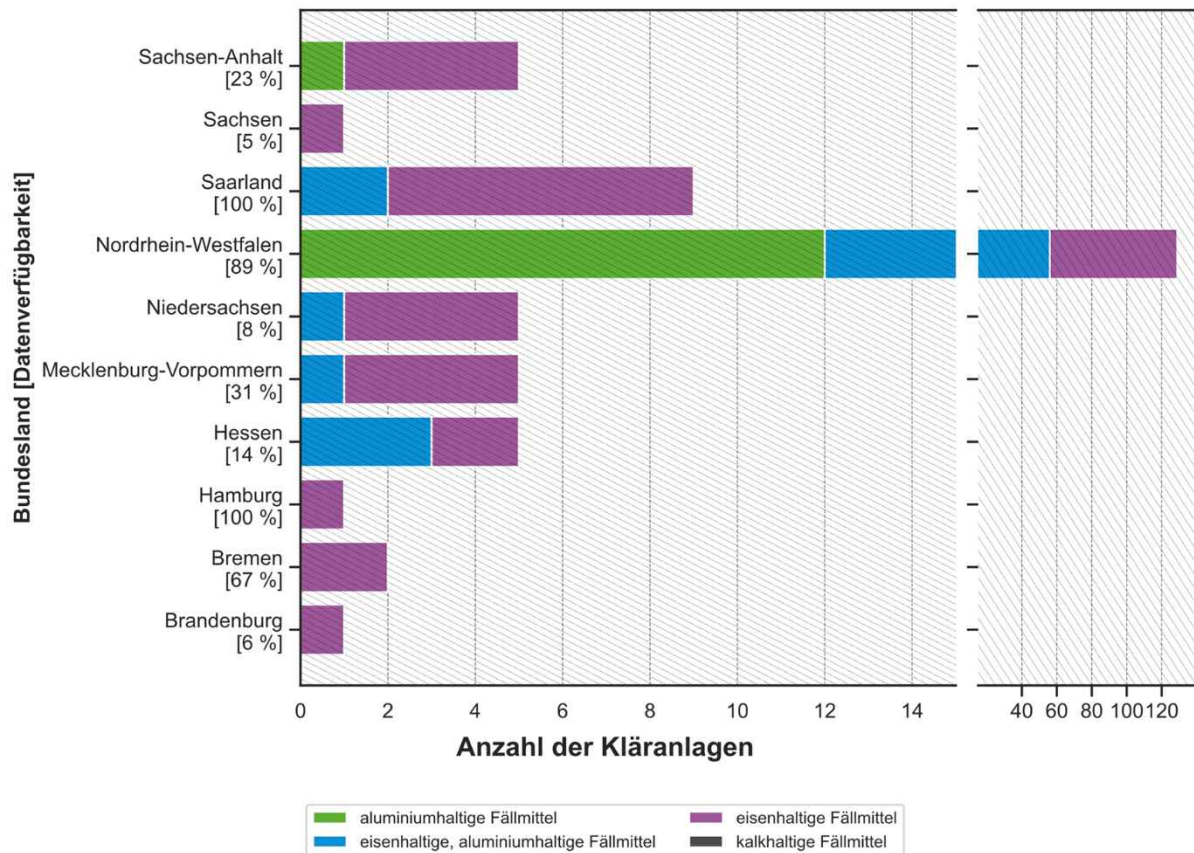


Die Bundesland-spezifische Datenverfügbarkeit ist in Klammern hinter dem Namen ergänzt.

Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

So lässt sich anhand der verfügbaren Daten für Rheinland-Pfalz bei den teilnehmenden Kläranlagen (17 Kläranlagen) eine ausschließlich chemisch-physikalische P-Elimination ausweisen. In Nordrhein-Westfalen, im Saarland, in Brandenburg und in Hessen werden chemische und biologische Eliminationsverfahren kombiniert. In Sachsen-Anhalt lässt sich etwa die Hälfte der Verfahren, bezogen auf den hier ausgewiesenen Anteil, auf die gezielte Bio-P zurückführen.

**Abbildung 39: Fällmittel zur Phosphor-Elimination auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5**



Die Bundesland-spezifische Datenverfügbarkeit ist in Klammern hinter dem Namen ergänzt.

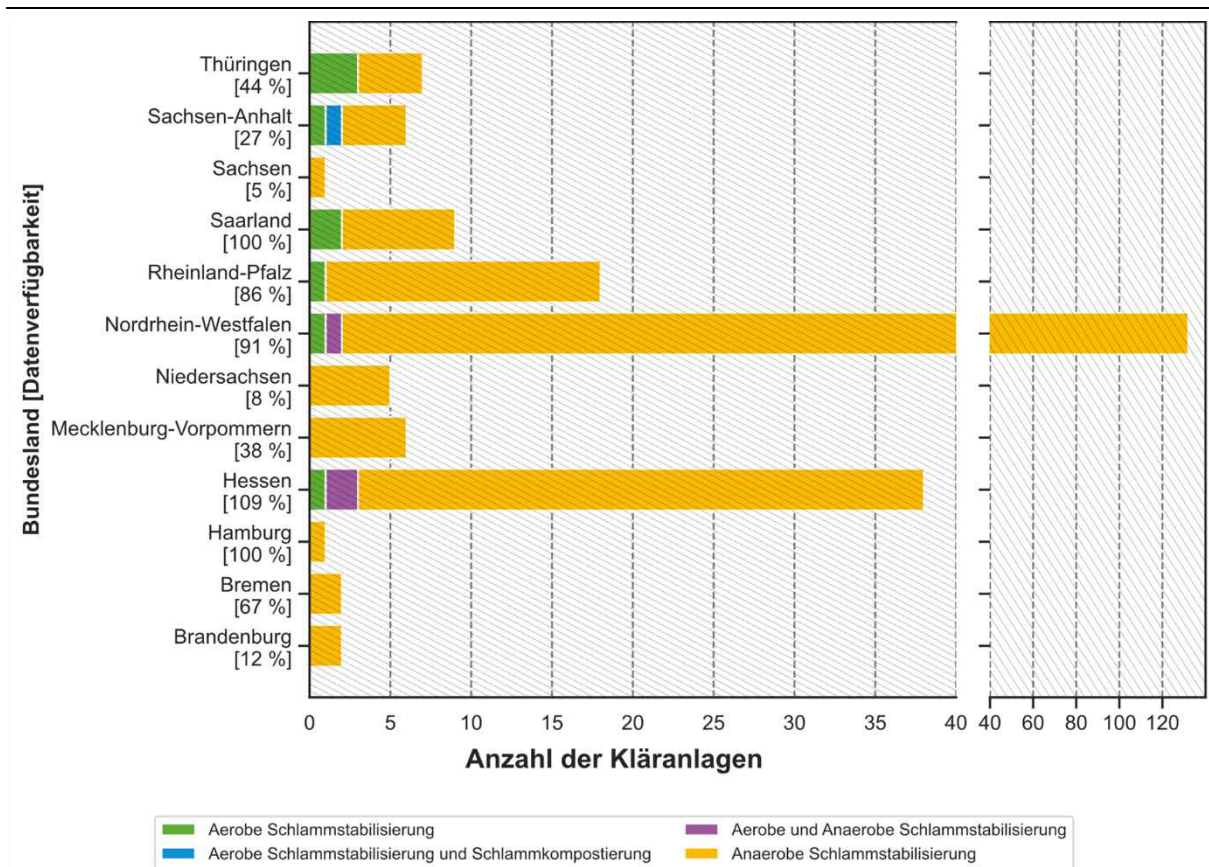
Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

Die Angaben zum Fällmittel sind aufgrund der geringen Datendichte nur für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Saarland aussagekräftig. So wird hauptsächlich Eisen als Fällmittel verwendet. 99 von 163 Kläranlagen in NRW setzen ausschließlich Eisen ein (60,4 %) und nur 8 % verwenden ausschließlich Aluminium. Für das Saarland überwiegt der Anteil an eisenhaltigen Fällmitteln mit etwas mehr als 80 % gegenüber der Kombination aus eisen- bzw. aluminiumhaltigen Fällmitteln. Der Anteil an aluminiumhaltigen Fällmitteln ist im Allgemeinen anhand der ermittelten Daten geringer.

### 3.1.2.4 Schlammstabilisierung

Abbildung 40 zeigt, dass die anaerobe Schlammstabilisierung mit großem Anteil in allen Bundesländern dominiert. Für Thüringen lassen sich aus den Daten der sieben auswertbaren Kläranlagen drei ausweisen, in denen der Schlamm aerob stabilisiert wird.

**Abbildung 40: Verfahren zur Schlammstabilisierung auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5**



Die Bundesland-spezifische Datenverfügbarkeit ist in Klammern hinter dem Namen ergänzt.

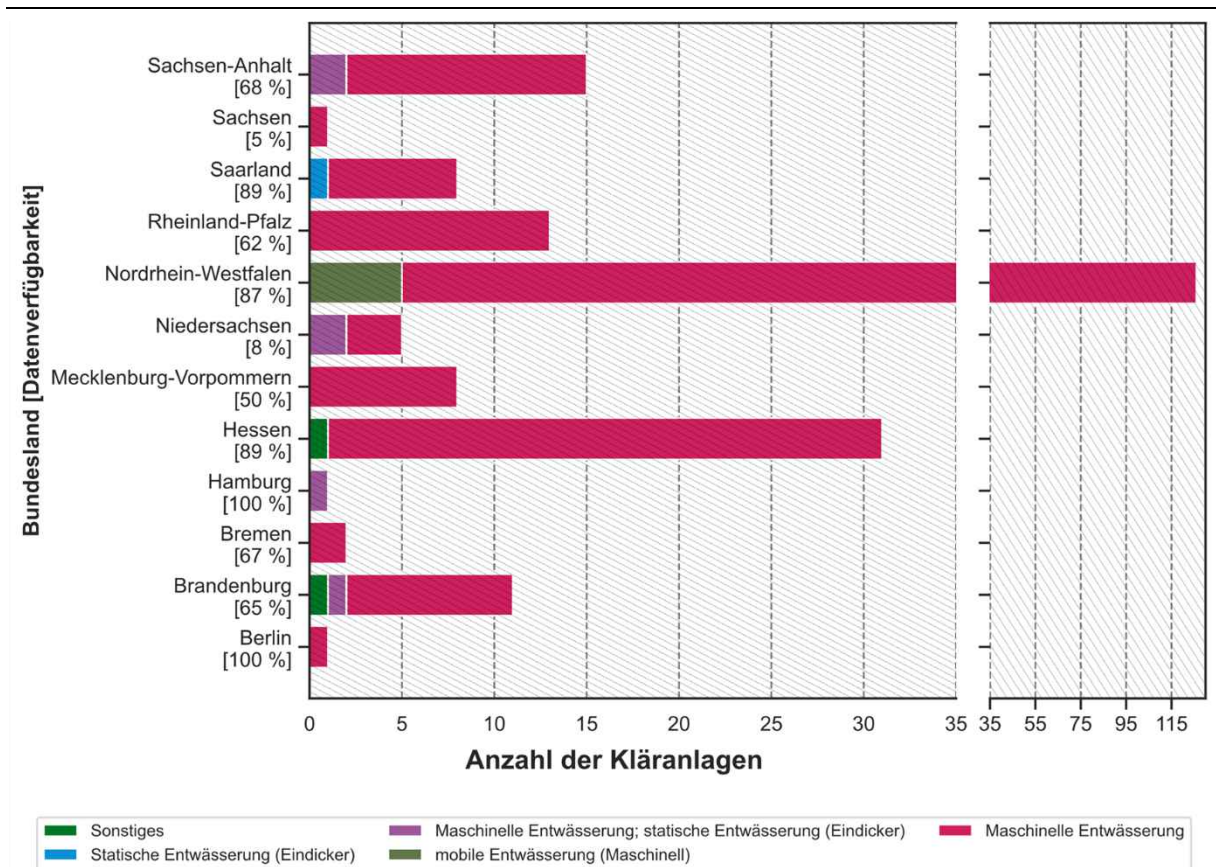
Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 3.1.2.5 Entwässerungs- und Trocknungsverfahren

Der überwiegende Großteil (> 90 %) der Schlämme wird bundeslandübergreifend maschinell entwässert (vgl. Abbildung 41). In Nordrhein-Westfalen nutzen 5 der 126 Anlagen mobile Entwässerungsaggregate.



**Abbildung 41: Entwässerungsverfahren auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5**

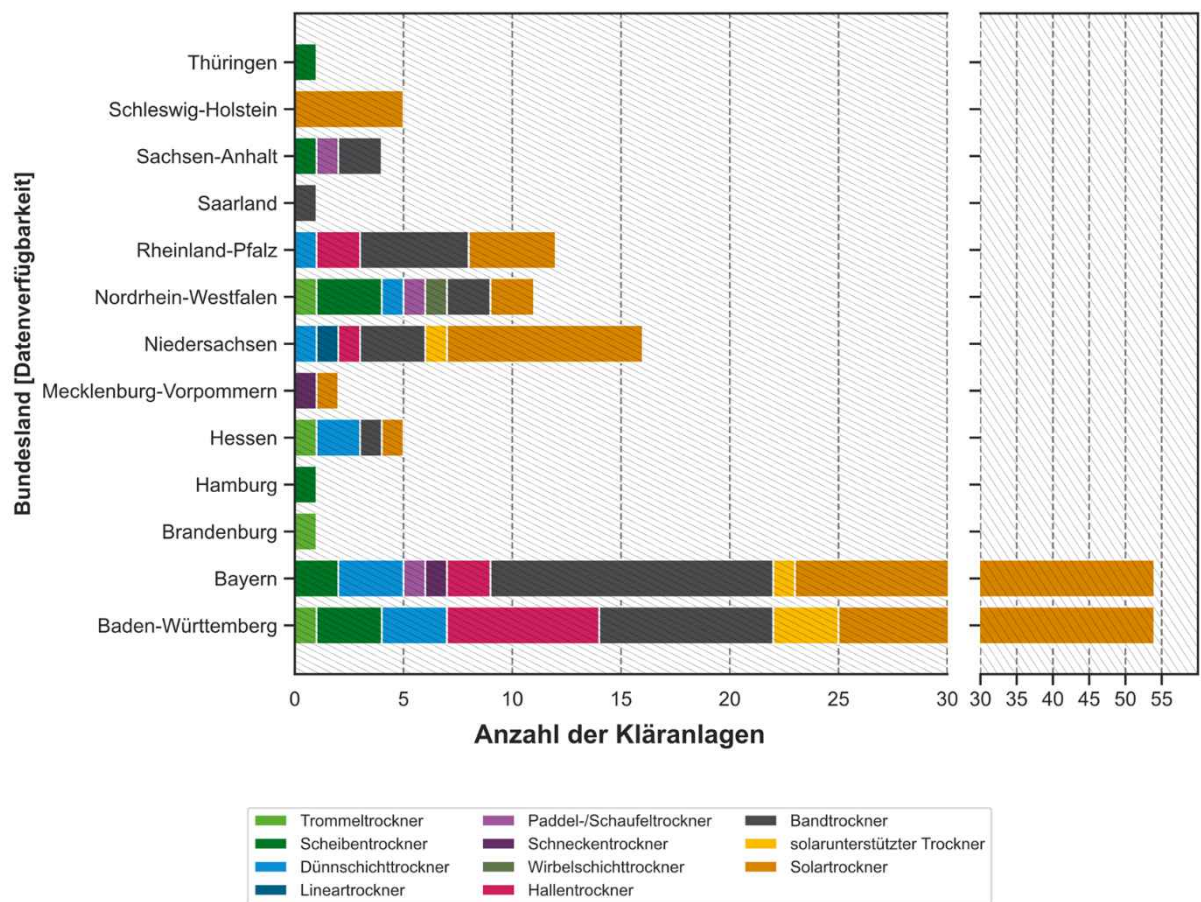


Die Bundesland-spezifische Datenverfügbarkeit ist in Klammern hinter dem Namen ergänzt.

Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

In Abbildung 42 sind die Trocknungsverfahren aller Größenklassen (GK 1-5) als absolute Zahlen dargestellt. Für die Auswertung zu den Trocknungsanlagen wurde auf Daten aus dem Refoplan-Vorhaben „Überprüfung des nationalen Standes der Technik (SdT): Teilvorhaben 3: Untersuchungen zu Emissionen und Energieaufwand bei der Trocknung und Kompostierung von Klärschlamm zur Optimierung einer weiteren umweltverträglichen Verwertung“, zurückgegriffen (Zettl, 2023). 37 % der Anlagen (insgesamt 167) nutzen derzeit solare Trocknungsverfahren, gefolgt von den Bandtrocknern, welche mit 23 % vertreten sind. Ebenso sind Dünnschichttrockner, Schneckentrockner, Scheibentrockner, Paddel-/Schaufeltrockner, Trommeltrockner, Hallentrockner und Lineartrockner im Einsatz.

**Abbildung 42: Trockungsverfahren auf Bundeslandebene der Kläranlagen aller Größenklassen**



Die Bundesland-spezifische Datenverfügbarkeit ist in Klammern hinter dem Namen ergänzt.

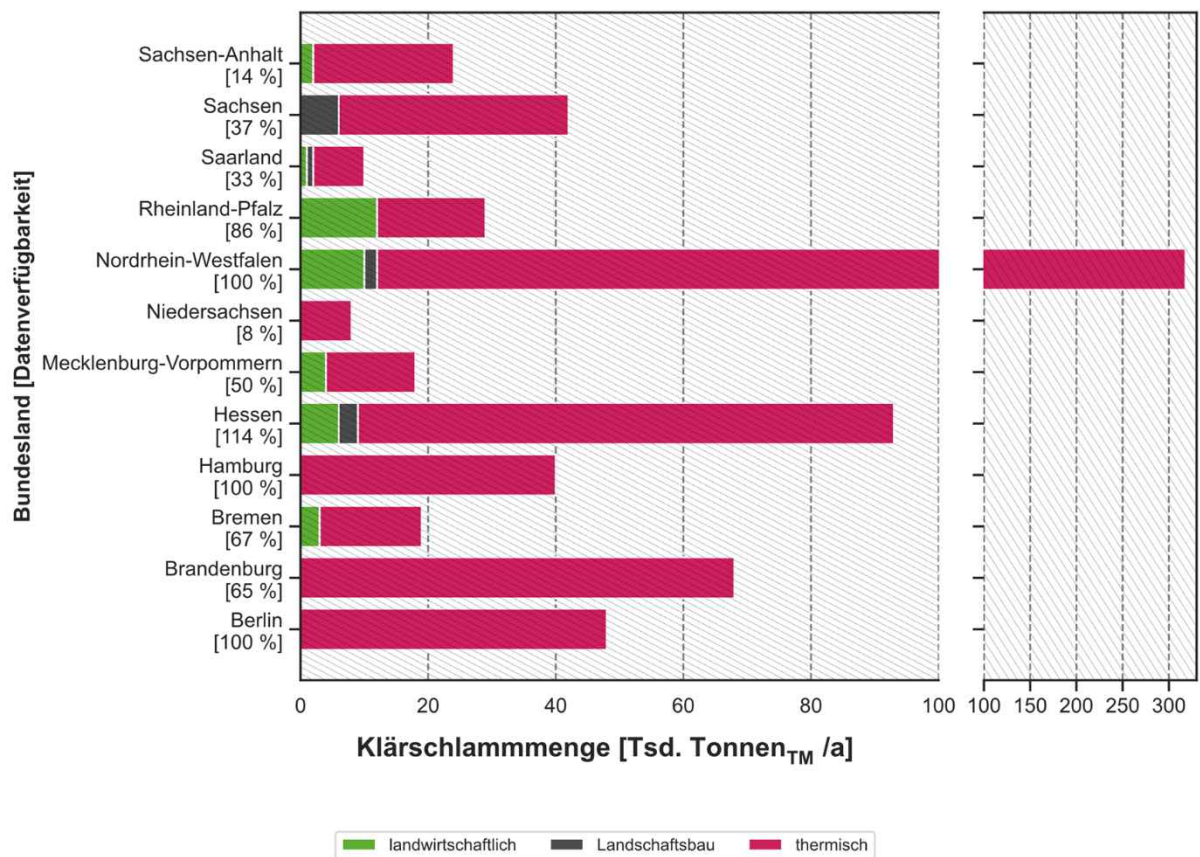
Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 3.1.2.6 Klärschlammverwertung

#### 3.1.2.6.1 Entsorgungswege

Abbildung 43 zeigt einen Überblick über die Klärschlamm Entsorgung der Schlämme aus den Größenklassen 4b und 5. Das statistische Bundesamt veröffentlicht jährlich ebenfalls Daten zur Klärschlammverwertung, die jedoch GK-übergreifend für jedes Bundesland publiziert werden. Anhand der ermittelten Daten lässt sich eine überwiegend thermische Entsorgung bei den großen Kläranlagen für alle Bundesländern darstellen. In Nordrhein-Westfalen werden nur noch 3,15 % bzw. 0,43 % der gesamten Klärschlammmenge landwirtschaftlich bzw. im Landschaftsbau verwertet. Laut Meyer et al (2022) werden in Baden-Württemberg 99 % des gesamten anfallenden Klärschlammes aller GK verbrannt.

**Abbildung 43: Klärschlamm Entsorgungswege auf Bundeslandebene der Kläranlagen der Größenklassen 4b und 5**



Die Bundesland-spezifische Datenverfügbarkeit ist in Klammern hinter dem Namen ergänzt.

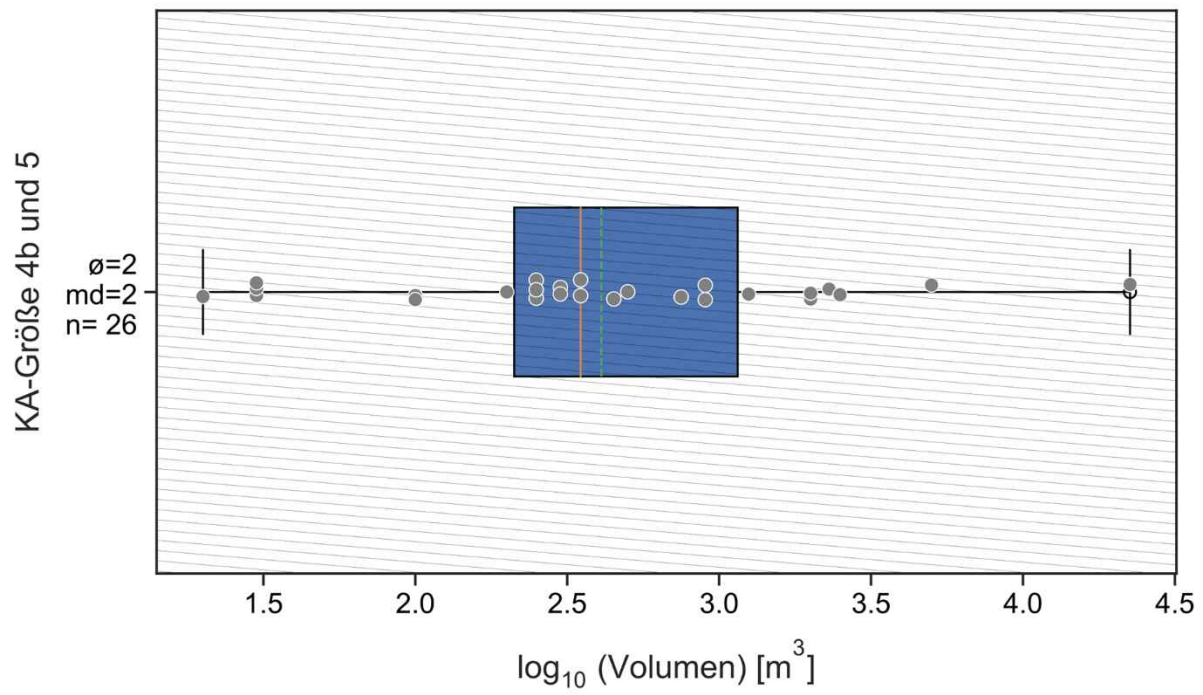
Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 3.1.2.6.2 Zwischenlagerungskapazitäten

Die Zwischenlagerungskapazitäten sind bundeslandübergreifend für alle ermittelten Daten (26 Kläranlagen) der Größenklasse 4b und 5 in Abbildung 44 dargestellt. Es konnten bei der Datenerhebung für 26 Kläranlagen Informationen zur internen Kapazität zur Zwischenlagerung ermittelt werden. Die interne Kapazität liegt beim Großteil der Kläranlagen bei bis zu 500 m<sup>3</sup> (52 %). Die Kapazitäten einzelner Anlagen sind jedoch höher. Der Datensatz einer Kläranlage zeigt eine Kapazität von 22.500 m<sup>3</sup> Klärschlamm, welcher zwischengelagert werden kann.



**Abbildung 44: Bundeslandübergreifende Zwischenlagerungskapazitäten von 26 Kläranlagen der Größenklasse 4b und 5 in Deutschland**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### 3.1.2.7 Präferierte und bereits umgesetzte Phosphorrückgewinnungsverfahren

In Tabelle 11 sind die anvisierten Behandlungspfade der Abwasserbehandlungsanlagenbetreiber dargestellt. Dabei wurde auf Daten aus der eigenen Umfrage, Anfragen an Verfahrensentwickler sowie auf ermittelte Daten durch die LAGA Ad-hoc-AG Bund (LAGA, 2022) zurückgegriffen. Ein vollständiger Überblick über die bisher umgesetzten Verfahren ist in Kapitel 3.3 dargestellt.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass sich der überwiegende Anteil der Abwasserbehandlungsanlagenbetreiber (70 %) noch nicht auf ein bestimmtes Phosphorrückgewinnungsverfahren festgelegt hat. Jedoch würden zwei Drittel eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsaschen bevorzugen. 28 der rückgemeldeten Abwasserbehandlungsanlagenbetreiber haben eine Präferenz für eine spezifische Rückgewinnungstechnologie bzw. diese bereits umgesetzt. Dabei verfolgen alle 9 Kläranlagen im Saarland bzw. der EVS als Betreiber der Anlagen das PYREG-Verfahren. In Niedersachsen wird von den Anlagen, von denen eine Rückmeldung vorliegt, die Struvit-Fällung mit dem AirPrex-Verfahren bevorzugt.



**Tabelle 23: Anvisierte und umgesetzte Phosphorrückgewinnungsverfahren in Deutschland**

		Bundesland														
		Baden-Württemberg	Bayern	Berlin	Brandenburg	Bremen	Hamburg	Hessen	Mecklenburg-Vorpommern	Niedersachsen	Nordrhein-Westfalen	Rheinland-Pfalz	Saarland	Sachsen-Anhalt	Schleswig-Holstein	Gesamt
Konkretes Verfahren (28 Anlagen)	AirPrex	1			1					4	1					7
	Ash2Phos	1														1
	AshDec		1													1
	Bio-P									1						1
	EloPhos									1						1
	EuPhore	1						1			1					3
	P-XTRACT	1														1
	PHOS4Green/Sera-Plant															1
	PYREG-Verfahren*												9			9
	Seaborn									1						1
	TetraPhos						1				1					2
Verfahrenstendenz (41 Anlagen)	Mitverbrennung inkl. Phosphorrückgewinnung															1
	Klärschlammverbrennung inkl. Phosphorrückgewinnung		1		4	1			6	2		2		2		27
	Struvit-Verfahren							1	1							2
	thermochemische Phosphorrückgewinnung mit/ohne Schadstoff-Ausschleusung				1			4								8
	HTC-Verfahren*							1			1	1				3

\*PYREG-Verfahren sowie HTC-Verfahren wurden aufgenommen, da sie im Rahmen der Umfrage mehrmals genannt worden sind; diese werden jedoch im Weiteren nicht als Phosphorrückgewinnungsverfahren, sondern als thermische Vorbehandlung eingestuft.

### 3.2 Thermische Klärschlammbehandlungsanlagen

Zur Erfassung des Anlagenbestands zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland wurden Befragungen von Anlagenbetreibern sowie umfassende Recherchen durchgeführt. Ziel war eine anlagenscharfe und möglichst vollständige Erfassung der zum Berichtszeitpunkt verfügbaren Kapazitäten zur thermischen Klärschlammbehandlung. Durch die Befragung sollte außerdem der Umfang vorhandener Kapazitäten zur Lagerung von Klärschlammverbrennungsaschen ermittelt werden. Dazu wurden durch Recherchen zunächst alle zum Zeitpunkt der Befragung in Betrieb befindlichen Anlagen identifiziert. Berücksichtigt wurden Klärschlammverbrennungsanlagen, Klärschlammbehandlungsanlagen, die Klärschlamm mittels sonstiger thermischer Verfahren, wie Pyrolyse oder Vergasung behandeln, und Anlagen, in denen Klärschlämme mitverbrannt werden (Müllverbrennungsanlagen, Kohlekraftwerke, Zementwerke).

In der Umfrage wurden die folgenden Punkte adressiert:

- ▶ Stammdaten: Anlagenname, Standort, Ansprechpartner für Rückfragen, Kontaktdaten
- ▶ Anlagenkapazität: Klärschlammkapazität genehmigt, tatsächlich behandelte Menge, Verfügbarkeit der Gesamtanlage
- ▶ Schlammannahme: Abfallschlüsselnummer(n) angenommener Klärschlämme, Abfallschlüsselnummer(n) sonstige Abwasserreinigung, Annahmepreis, Phosphorgehalt, Durchschnittlicher TR-Gehalt bei Annahme
- ▶ Trocknung: TR-Gehalt des getrockneten Klärschlammes, Heizwert des getrockneten Klärschlammes, eigene/externe Vortrocknung, eingesetzte Trocknungsverfahren
- ▶ Feuerung: Feuerungstyp, Feuerungswärmeleistung, Anzahl der Feuerungslinien, Anzahl der Rauchgasreinigungslinien, Aufbau der Abgasreinigung, Art und Ort der Klärschlammzugabe (insb. in MVA, EBS-Kraftwerken und Zementwerken)
- ▶ Zukünftige Phosphorrückgewinnung: Präferiertes Phosphorrückgewinnungsverfahren, Transportentfernung zur geplanten Verwertung/Behandlung, Erwartete Kosten für Phosphorrückgewinnung, Planung einer Klärschlammverbrennungslinie in MVA, Planungsstand zur Verbrennung P-abgereicherter Schlämme
- ▶ Sonstiges: Bisheriger Entsorgungsweg Klärschlammverbrennungsaschen, Bisherige Entsorgungskosten Klärschlammverbrennungsaschen, Kapazität Lagerung Klärschlamm, Kapazität (Zwischen-)Lagerung Klärschlammverbrennungsasche, Art und Menge Stütz- und Co-Brennstoffe

Trotz hoher Umfragebeteiligung insbesondere bei Betreibern von Klärschlammverbrennungsanlagen, sind die erhobenen Daten der meisten angefragten Punkte sehr lückenhaft. In einigen Fällen wurde daher auf eine Auswertung und Darstellung der Daten verzichtet, um eine Fehlinterpretation aufgrund eingeschränkter Datengrundlage zu vermeiden.

Für die nachfolgend dargestellten Daten wurde versucht eine Trennung der Verbrennungskapazitäten für kommunale und industrielle Klärschlämme vorzunehmen. Vereinfachend wurde die Annahme getroffen, dass in den sieben Klärschlammverbrennungsanlagen, in denen vorwiegend industrielle Klärschlämme verbrannt werden, ausschließlich Klärschlämme industrieller Herkunft eingesetzt werden. Für die übrigen Klärschlammverbrennungsanlagen wurde die ausschließliche Verbrennung kommunaler Klärschlämme angenommen. In der Realität findet diese stringente Trennung allerdings nicht

statt. Insbesondere in industriellen Klärschlammverbrennungsanlagen wird aktuell auch ein hoher Anteil kommunaler Klärschlämme verbrannt.

Aus den erhobenen Daten ergibt sich für das Bezugsjahr 2020 insgesamt eine thermisch behandelte Klärschlammmenge von 1.407.953 t<sub>TM</sub> (1.195.360 t<sub>TM</sub> kommunale Klärschlämme<sup>1</sup>). Davon wurden 731.137 t<sub>TM</sub> (518.544 t<sub>TM</sub> kommunale Klärschlämme) in Klärschlammverbrennungsanlagen, 2.756 t<sub>TM</sub> in Klärschlammbehandlungsanlagen (sonstige thermische Behandlungsverfahren) und insgesamt 674.060 t<sub>TM</sub> in der Mitverbrennung behandelt (Abbildung 45). Auf die jeweiligen Kapazitäten der einzelnen Verwertungspfade wird nachgehend eingegangen.

Für die Abschätzung verfügbarer Kapazitäten zur Aschezwischenlagerung, um Zeiträume zwischen Inkrafttreten der Phosphorrückgewinnungspflicht gemäß AbfKlärV und Verbreitung großtechnischer Phosphorrückgewinnungstechnologien zu überbrücken, wurden bei der Umfrage die entsprechenden Kapazitäten abgefragt. Einige Betreiber trafen diesbezüglich keine Aussage. Aus den Rückmeldungen ließen sich Lagerkapazitäten für Klärschlammverbrennungsasche<sup>2</sup> von ca. 8.235 m<sup>3</sup> bestimmen.<sup>3</sup>

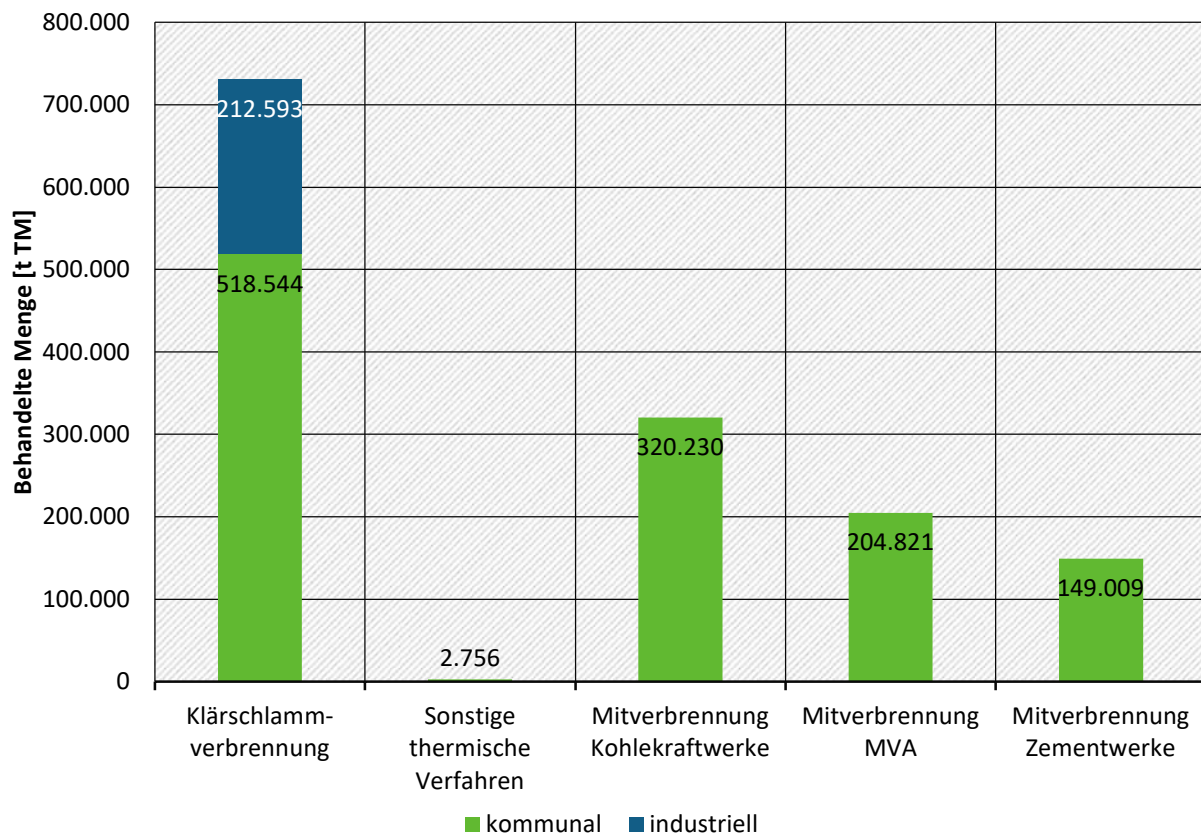
---

<sup>1</sup> Da eine anlagengenaue Erfassung kommunaler bzw. industrieller Klärschlämme auf Basis der vorliegenden Daten nicht möglich ist, erfolgt die Bestimmung der behandelten kommunalen Klärschlämme indem die Kapazitäten der sieben Klärschlammverbrennungsanlagen, in denen vorwiegend industrielle Klärschlämme verbrannt werden (Bitterfeld-Wolfen, Burghausen, Burgkirchen, Elsenfeld, Frankenthal-Mörsch, Frankfurt am Main-Höchst, Marl), nicht berücksichtigt werden. Für sonstige thermische Verfahren sowie die Mitverbrennungspfade ist eine Unterscheidung zwischen kommunalen und industriellen Klärschlämmen auf Basis der verfügbaren Datengrundlage nicht möglich.

<sup>2</sup> Bei Angabe der Betreiber in Tonnen: Annahme zur Aschedichte 0,9 g/cm<sup>3</sup>

<sup>3</sup> n = 17

**Abbildung 45: In Deutschland im Bezugsjahr 2020 thermisch behandelte Klärschlammengen**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 3.2.1 Klärschlammverbrennungsanlagen

In Tabelle 12 zeigt eine Auflistung der zum Berichtszeitpunkt in Deutschland betriebenen Klärschlammverbrennungsanlagen, unter Angabe ihrer Standorte, der Betreiber und der Feuerungsart. Insgesamt handelt es sich um 29 Bestandsanlagen, von denen sieben Anlagen vorwiegend industrielle Klärschlämme verbrennen. Der vorherrschende Feuerungstyp ist die stationäre Wirbelschicht, vereinzelt erfolgt die Verbrennung in einer Rostfeuerung (Altenstadt), einem Vorschubofen (Elsenfeld), einem Etagenwirbler (Frankfurt-Höchst), einem Etagenofen (Leverkusen) oder Drehrohren (Offenbach, Schüttorf). Die Inbetriebnahme der Anlagen in Bitterfeld-Wolfen (KSR Klärschlammrecycling Bitterfeld-Wolfen GmbH), Halle-Lochau, Helmstedt, Mainz, Offenbach und Schüttorf erfolgte erst in den Jahren 2021 bzw. 2022. Daraus ergibt sich, dass diese sechs Neuanlagen in einigen der nachfolgend aufgeführten Statistiken nicht erfasst sind. Aus diesem Grund wird an den entsprechenden Stellen darauf hingewiesen, auf welcher Datengrundlage und Anlagenzahl die Statistiken basieren.

**Tabelle 24: Anlagen zur Klärschlammverbrennung in Deutschland**

Standort	Bundesland	Betreiber	Feuerungsbauart	Genehmigte Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
Altenstadt	Bayern	Emter GmbH	Rostfeuerung	40.000 <sup>[2]</sup>
Berlin-Ruhleben	Berlin	Berliner Wasserbetriebe	stationäre Wirbelschicht	84.000 <sup>[2]</sup>

Standort	Bundesland	Betreiber	Feuerungsbauart	Genehmigte Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
Bitterfeld-Wolfen <sup>[1]</sup>	Sachsen-Anhalt	Gemeinschaftsklärwerk Bitterfeld-Wolfen GmbH	stationäre Wirbelschicht	16.607,5 <sup>[2]</sup>
Bitterfeld-Wolfen	Sachsen-Anhalt	KSR Klärschlammrecycling Bitterfeld-Wolfen GmbH	stationäre Wirbelschicht	60.000 <sup>[2]</sup>
Bonn	Nordrhein-Westfalen	Tiefbauamt Bonn	stationäre Wirbelschicht	14.144 <sup>[2]</sup>
Bottrop	Nordrhein-Westfalen	Emschergenossenschaft	stationäre Wirbelschicht	52.800 <sup>[2]</sup>
Burghausen <sup>[1]</sup>	Bayern	Wacker Chemie	stationäre Wirbelschicht	4.125 <sup>[3]</sup>
Burgkirchen <sup>[1]</sup>	Bayern	InfraServ Gendorf	stationäre Wirbelschicht	10.000 <sup>[3]</sup>
Düren	Nordrhein-Westfalen	Wasserverband Eifel-Rur	stationäre Wirbelschicht	14.000 <sup>[2]</sup>
Elsenfeld/Obernburg <sup>[1]</sup>	Bayern	Gemeinschaftskläranlage Bayerischer Unterrhein GmbH	Vorschubofen	9.120 <sup>[3]</sup>
Elverlingsen-Werdohl	Nordrhein-Westfalen	WFA Elverlingsen GmbH	stationäre Wirbelschicht	61.320 <sup>[2]</sup>
Frankenthal-Mörsch <sup>[1]</sup>	Rheinland-Pfalz	BASF AG	stationäre Wirbelschicht	131.250 <sup>[2]</sup>
Frankfurt am Main	Hessen	Stadtentwässerung Frankfurt am Main	Etagenwirbler	52.650 <sup>[2]</sup>
Frankfurt am Main-Höchst <sup>[1]</sup>	Hessen	Infraserv GmbH	stationäre Wirbelschicht	65.600 <sup>[2]</sup>
Halle-Lochau	Sachsen-Anhalt	WTE Betriebsgesellschaft mbH	stationäre Wirbelschicht	10.750 <sup>[3]</sup>
Hamburg	Hamburg	VERA Klärschlammverbrennung GmbH	stationäre Wirbelschicht	78.840 <sup>[2]</sup>
Helmstedt	Niedersachsen	EEW Energy from Waste GmbH	stationäre Wirbelschicht	34.452 <sup>[2]</sup>
Karlsruhe	Baden-Württemberg	Stadt Karlsruhe	stationäre Wirbelschicht	20.000 <sup>[2]</sup>
Leverkusen	Nordrhein-Westfalen	Currenta GmbH	Etagenofen	30.000 <sup>[2]</sup>
Lünen	Nordrhein-Westfalen	Innovatherm GmbH	stationäre Wirbelschicht	106.000 <sup>[2]</sup>
Mainz	Rheinland-Pfalz	TVM Mainz GmbH	stationäre Wirbelschicht	37.500 <sup>[3]</sup>

Standort	Bundesland	Betreiber	Feuerungsbauart	Genehmigte Kapazität [ $t_{TM}/a$ ]
Marl <sup>[1]</sup>	Nordrhein-Westfalen	Evonik/Chemiepark Marl	stationäre Wirbelschicht	10.000 <sup>[3]</sup>
München	Bayern	Münchner Stadtentwässerung	stationäre Wirbelschicht	50.000 <sup>[2]</sup>
Neu-Ulm	Bayern	Zweckverband Klärwerk Steinhäule	stationäre Wirbelschicht	25.000 <sup>[2]</sup>
Offenbach	Hessen	Energieversorgung Offenbach AG	Drehrohr	25.000 <sup>[3]</sup>
Rügen	Mecklenburg-Vorpommern	Zweckverband Wasserversorgung und Abwasserbehandlung Rügen	stationäre Wirbelschicht	2.500 <sup>[2]</sup>
Schüttorf	Niedersachsen	EKVK – Ems-Vechte-Klärschlamm-Verwertung	Drehrohr	1.500 <sup>[2]</sup>
Stuttgart	Baden-Württemberg	Tiefbauamt Stuttgart	stationäre Wirbelschicht	40.000 <sup>[2]</sup>
Wuppertal	Nordrhein-Westfalen	Wupperverband	stationäre Wirbelschicht	40.296 <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> vorwiegend Verbrennung von Industrieschlämmen

<sup>[2]</sup> Angabe des Betreibers, Teilnahme an Befragung

<sup>[3]</sup> Angabe basierend auf Recherche

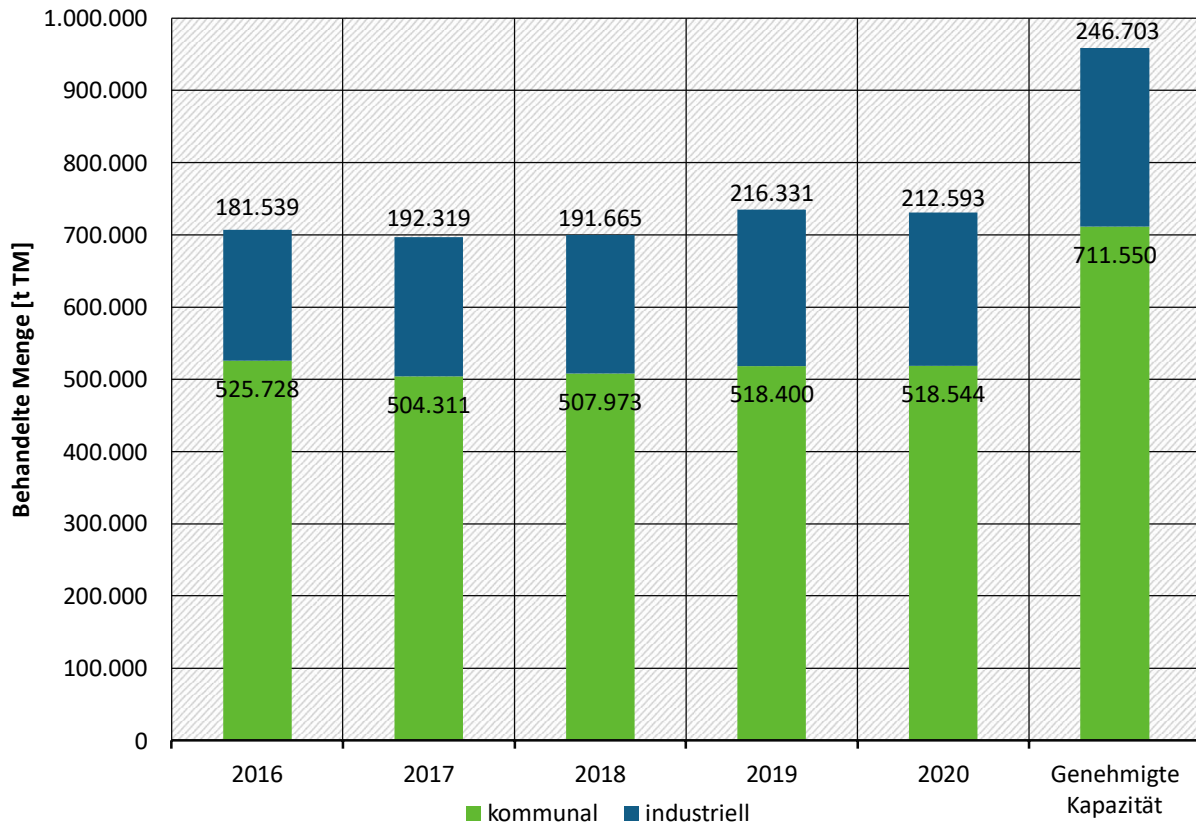
Die 29 betriebenen Klärschlammverbrennungsanlagen besitzen zusammen eine genehmigte Gesamtkapazität von 1.127.454,50  $t_{TM}/a$ . In den Verbrennungsanlagen in Bitterfeld-Wolfen (Gemeinschaftsklärwerk Bitterfeld-Wolfen GmbH), Burghausen, Burgkirchen, Elsenfeld, Frankenthal-Mörsch, Frankfurt am Main-Höchst sowie Marl werden vorwiegend industrielle Klärschlämme verbrannt. Die übrigen 22 Klärschlammverbrennungsanlagen, in denen vorwiegend kommunale Klärschlämme eingesetzt werden, besitzen eine theoretische Verbrennungskapazität von 880.752  $t_{TM}/a$ . Zu berücksichtigen ist, dass aufgrund technischer Einschränkungen (z. B. Redundanzlinien) und Anlagenverfügbarkeiten die genehmigten Kapazitäten nicht vollumfänglich zur tatsächlichen Nutzung zur Verfügung stehen. Der in der Befragung für das Jahr 2020 ermittelten genehmigten Kapazität von 958.253  $t_{TM}/a$  (in 23 zu diesem Zeitpunkt betriebenen Klärschlammverbrennungsanlagen, inkl. Kapazitäten für industrielle Klärschlämme) steht eine im Jahr 2020 tatsächlich verbrannte Klärschlammmenge von 731.137  $t_{TM}$ <sup>4</sup> (Ausnutzung genehmigter Kapazitäten 76,3 %) gegenüber (Abbildung 46). Die entsprechende tatsächlich verbrannte Menge in den 16 Verbrennungsanlagen, in denen vorwiegend kommunale Klärschlämme eingesetzt werden, beträgt 515.544  $t_{TM}$ , bei einer genehmigten Kapazität von 711.550  $t_{TM}$ . Ausgehend von einer in ganz Deutschland insgesamt anfallenden kommunalen Klärschlammmenge von 1.740.556  $t_{TM}/a$  im Jahr 2020 (Destatis, 2022a), wurden 2020 ca. 30 % des kommunalen Klärschlammauftkommens in Klärschlammverbrennungsanlagen behandelt. Die genehmigten Kapazitäten der 16 Anlagen hätten bei voller Ausnutzung eine Behandlung von 41 % der anfallenden Schlämme in

<sup>4</sup> Für die Berechnung der tatsächlich verbrannten Menge lagen aus der Betreiberbefragung Daten aus 19 der 23 im Jahr 2020 betriebenen Klärschlammverbrennungsanlagen vor. Auf Basis dieser Rückmeldung der Anlagenbetreiber wurde die ermittelte Auslastung von 76,3 % auf die Anlagen hochgerechnet, für die keine Daten zur Verfügung standen.



ermöglicht. Die Anlagenverfügbarkeit aller Anlagen (inkl. Anlagen zur Verbrennung industrieller Klärschlämme) lag bei durchschnittlich 7.477 h/a (85,4 %)⁵.

**Abbildung 46: Entwicklung der thermisch behandelten Klärschlamm mengen in Klärschlammverbrennungsanlagen von 2016-2020**



Bei den genehmigten Kapazitäten ist die Klärschlammverbrennungsanlage Rügen (2.500 t<sub>TM</sub>/a) berücksichtigt, die Inbetriebnahme erfolgte erst im Jahr 2019.

Für Anlagen, aus denen keine Daten aus der Betreiberbefragung vorlagen, wurde entsprechend Fußnote 4 mit einer Auslastung von 76,3 % gerechnet.

Quelle: eigene Darstellung, TEER

In Abbildung 47 ist die geografische Verteilung der 29 zum Berichtszeitpunkt in Betrieb befindlichen Klärschlammverbrennungsanlagen dargestellt. 12 der 29 Anlagen haben ihren Standort in den beiden bevölkerungsreichsten Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Bayern. Ein weiterer Ballungsraum befindet sich mit 5 Anlagen im Großraum Frankfurt am Main.

⁵ Aus der Befragung lagen Daten zur Anlagenverfügbarkeit aus 20 der 29 Klärschlammverbrennungsanlagen vor. Bei Bestandsanlagen wurde der Durchschnittswert der Anlagenverfügbarkeit der Jahre 2016-2020 zugrunde gelegt, bei Neuanlagen der Wert aus dem Jahr 2020 bzw. der Zielwert für den Dauerbetrieb.



**Abbildung 47: Bestand Klärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland, Stand 12/2022**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (GIS)

### 3.2.2 Sonstige thermische Behandlungsverfahren

Im Rahmen der Recherchen und Befragungen wurden acht Anlagen identifiziert, die Klärschlämme mittels sonstiger thermischer Verfahren, wie der Pyrolyse oder der Vergasung behandeln. Die Standorte, Betreiber und Verfahrenskonzepte dieser Anlagen sind Tabelle 13 zu entnehmen. Eine weitere fertiggestellte Anlage zur Klärschlammvergasung in Mannheim befindet sich nach derzeitigem Kenntnisstand nicht in Betrieb. Die Inbetriebnahme der Anlage in Lorsbach erfolgte im Jahr 2020. Daraus ergibt sich, dass diese Neuanlage in einigen der nachfolgend aufgeführten Statistiken noch nicht erfasst ist. An den entsprechenden Stellen wird darauf hingewiesen, auf welcher Datengrundlage die Statistiken basieren.

**Tabelle 25: Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung mittels sonstiger thermischer Behandlungsverfahren in Deutschland**

Standort	Bundesland	Betreiber	Verfahren	Genehmigte Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
Balingen	Baden-Württemberg	Zweckverband Abwasserreinigung Balingen	Vergasung	2.000 <sup>[3]</sup>
Homburg	Saarland	Entsorgungsverband Saar	Pyrolyse	2.380 <sup>[2]</sup>
Linz-Unkel	Rheinland-Pfalz	Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel	Pyrolyse	700 <sup>[3]</sup>
Lorsbach	Hessen	Abwasserverband Main-Taunus	Pyrolyse	1.360 <sup>[3]</sup>
Niederfrohna	Sachsen	Zweckverband Frohnbach	Pyrolyse	350 <sup>[2]</sup>
Grünstadt	Rheinland-Pfalz	Entsorgungs- und Servicebetrieb Grünstadt AöR	Vergasung (umgerüstet zu gestufter Verbrennung) <sup>[1]</sup>	1.314 <sup>[2]</sup>
Koblenz	Rheinland-Pfalz	Stadtentwässerung Koblenz	Vergasung	4.000 <sup>[2]</sup>
Renningen	Baden-Württemberg	Stadt Renningen	Vergasung (umgerüstet zu gestufter Verbrennung) <sup>[1]</sup>	1.000 <sup>[3]</sup>

<sup>[1]</sup> vgl. Kapitel 2.1.4

<sup>[2]</sup> Angabe des Betreibers bei Umfrage

<sup>[3]</sup> Angabe basierend auf Recherche

Abbildung 48 zeigt die geografische Verteilung der acht in Betrieb befindlichen Klärschlammbehandlungsanlagen, die mittels sonstiger thermischer Behandlungsverfahren betrieben werden.

**Abbildung 48: Bestand Klärschlammbehandlungsanlagen (sonstige thermische Behandlungsverfahren) in Deutschland, Stand 12/2022**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (GIS)

Bei den Anlagen mit sonstigen thermischen Behandlungsverfahren besteht im Vergleich zu anderen Anlagentypen die größte relative Differenz zwischen genehmigter und tatsächlich behandelter Klärschlammmenge. Aus vier der acht Anlagen liegen Daten aus der Betreiberbefragung vor. Der in Betreiberbefragung und Recherchen ermittelten genehmigten Behandlungskapazität von 11.744 t<sub>TM</sub>/a (aus sieben zu diesem Zeitpunkt betriebenen Anlagen) stehen in 2020 tatsächlich behandelte 2.756 t<sub>TM</sub><sup>6</sup> gegenüber. Die Auslastung der genehmigten Kapazitäten ergibt sich somit zu 23,5 %. Aus den Rückmeldungen der vier Anlagen ergibt sich die durchschnittliche Anlagenverfügbarkeit zu 5.216 h/a (59,5 %). Die angegebenen Einzelwerte schwanken zwischen 2.200 und 8.000 h/a.

<sup>6</sup> Für die Berechnung der tatsächlich behandelten Menge lagen aus der Betreiberbefragung Daten aus 4 der 7 im Jahr 2020 betriebenen sonstigen thermischen Behandlungsanlagen vor. Auf Basis der hieraus ermittelten Auslastung von 23,5 % wurde eine Hochrechnung für die Anlagen durchgeführt, aus denen keine Daten zur Verfügung standen. Aufgrund der unzureichenden Datenlage, die sich durch die hohe Zahl an Anlagenstillständen bei der Inbetriebnahme der neuen Technologien ergibt, wurde für die Auswertung zum Teil auf Durchschnittswerte mehrerer Jahre zurückgegriffen.



### 3.2.3 Mitverbrennung

#### 3.2.3.1 Kohlekraftwerke

Für die Erfassung der Klärschlammmitverbrennungskapazitäten in Kohlekraftwerken konnten aus 12 der 16 Kohlekraftwerke, die Klärschlamm mitverbrennen, Daten bei den Anlagenbetreibern erhoben werden (vgl. Tabelle 14). Zusätzlich aufgeführt ist der jeweilige Zeitpunkt der voraussichtlichen Stilllegung der Kraftwerke, soweit bekannt.

**Tabelle 26: Kohlekraftwerke zur Klärschlammmitverbrennung**

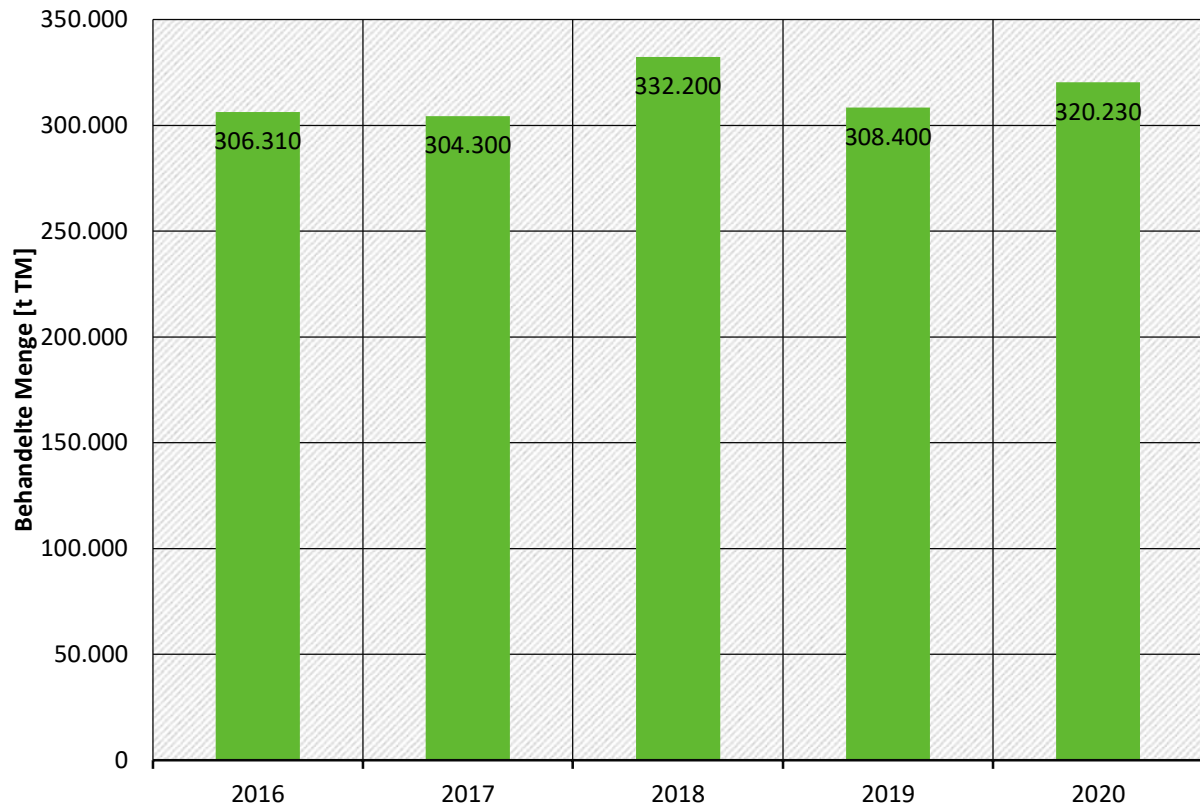
Standort	Betreiber	Voraussichtliche Stilllegung	Feuerungsbauart	Genehmigte Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
Berrenrath (DE 2 und 3)	RWE	k.A.	Zirkulierende Wirbelschicht	87.600
Boxberg (Blöcke N2 und P1)	LEAG	2038	Staubfeuerung	45.000 (Aufgabe entwässerten Klärschlamm)
Boxberg (Block N1)	LEAG	2038	Staubfeuerung	45.000 (Aufgabe getrockneten Klärschlamm)
Deuben	MIBRAG	2021 stillgelegt	Staubfeuerung	k. A.
Farge	Onyx Power	2024 <sup>7</sup>	Staubfeuerung	k. A.
Frechen (Kessel 1 und 2)	RWE	k.A.	Zirkulierende Wirbelschicht	109.500
Goldenberg (Kessel K und J**)	RWE	k.A.	Zirkulierende Wirbelschicht	175.200
Heilbronn	EnBW	2035	Staubfeuerung	70.000
Kassel	EW Kassel	k.A.	Staubfeuerung	k. A.
Lippendorf (Block R)	LEAG	2035	Staubfeuerung	86.000
Lippendorf (Block S)	EnBW	2035	Staubfeuerung	192.500
Schweinfurt	GKS Schweinfurt	k.A.	Rostfeuerung	k. A.
Staudinger (Block 5)	Uniper	2025	Staubfeuerung	16.500
Weisweiler (Blöcke E und F)	RWE	2029	Staubfeuerung	35.000
Wilhelmshaven	Uniper	2021 stillgelegt	Staubfeuerung	12.500
Zolling	Onyx Power	2029	Staubfeuerung	k. A.

Aus den zwölf an der Befragung teilnehmenden Kohlekraftwerken sowie ergänzenden Recherchen für ein weiteres Kraftwerk ergeben sich für das Jahr 2020 genehmigte Gesamtkapazitäten von 919.800 t<sub>TM</sub>. Davon wurden bei einer Anlagenbetriebszeit von

<sup>7</sup> Eine Stilllegung des Kraftwerks Farge war zum 31. Oktober 2022 vorgesehen. Aufgrund der Energiekriege bleibt es vorerst am Netz.

durchschnittlich 6.721 h/a<sup>8</sup> 320.230 t<sub>TM</sub> (vgl. Abbildung 49) zur Mitverbrennung von Klärschlämmen genutzt, sodass sich für Kohlekraftwerke eine Ausnutzung von 34 % der für die Klärschlammmitverbrennung genehmigten Kapazitäten ergibt. Die Mitverbrennungsmengen der Anlagen, zu denen keine Rückmeldungen erfolgten, konnten nicht ermittelt werden.

**Abbildung 49: Entwicklung der in Kohlekraftwerken eingesetzten Klärschlammmengen von 2016-2020**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 3.2.3.2 Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerke

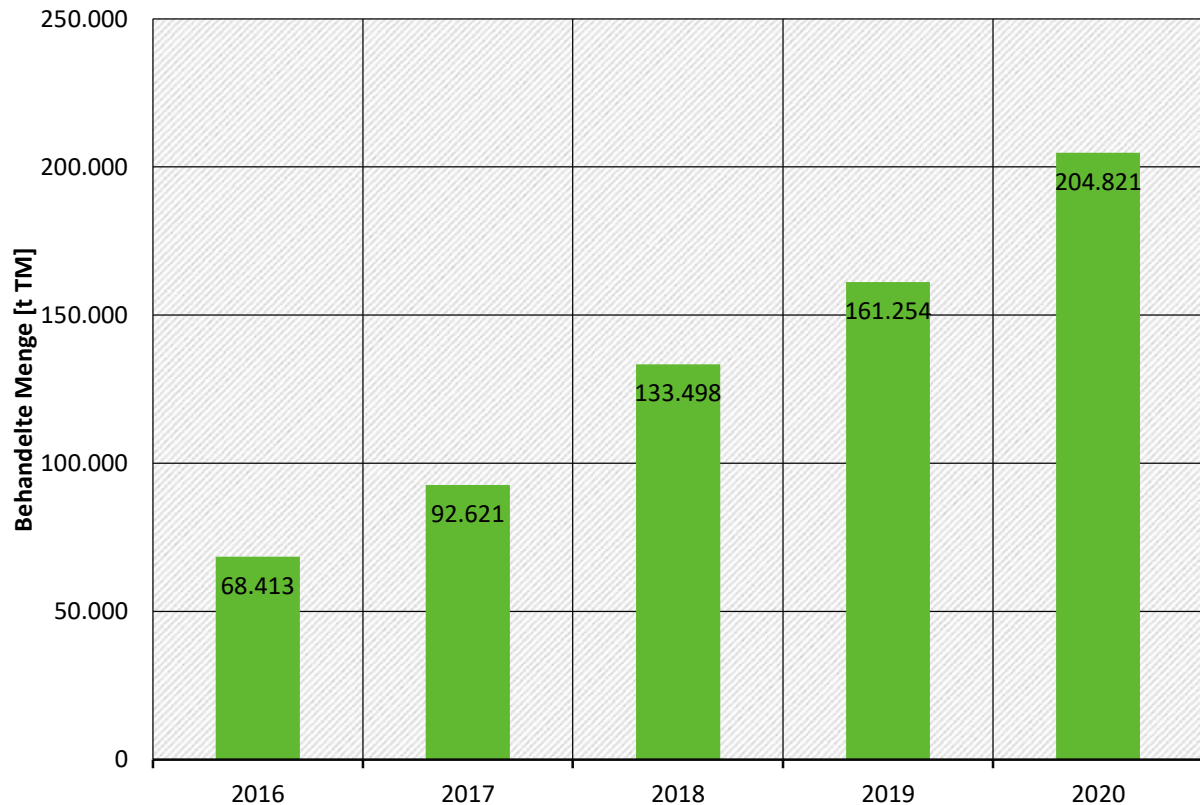
Aufgrund der hohen Anzahl an Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken in Deutschland konnten diese nicht separat kontaktiert und befragt werden. Daher erfolgte die Befragung der Betreiber dieser Anlagentypen über die Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. (ITAD). Die Befragung richtete sich auf diesem Weg an die Betreiber von ca. 100 Abfallverwertungsanlagen in Deutschland. Von 27 der 43 Anlagen, aus denen eine Rückmeldung erfolgt ist, wurde angegeben, dass Klärschlamm mitverbrannt wird. Durch Recherchen konnten mindestens zwei weitere Müllverbrennungsanlagen identifiziert werden, in denen eine Klärschlammmitverbrennung praktiziert wird. In diesen 29 Abfallverwertungsanlagen wurden im Jahr 2020 insgesamt 204.821 t<sub>TM</sub> mitverbrannt. Die in den Anlagen eingesetzte Klärschlammmenge wurde von 2016 bis 2020 nahezu verdreifacht (vgl. Abbildung 50). Die durchschnittliche Anlagenverfügbarkeit liegt bei 8.103 h/a<sup>9</sup> (93 %). Eine Übersicht der Daten für die einzelnen Anlagen ist Anhang B zu entnehmen. Über Mitverbrennungskapazitäten in weiteren Anlagen, die sich nicht an der Befragung beteiligt haben oder die von den Autoren nicht identifiziert werden konnten, kann

<sup>8</sup> n = 7

<sup>9</sup> n = 24

keine Aussage getroffen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass weitere Kapazitäten bestehen und zur Klärschlammmitverbrennung genutzt werden.

**Abbildung 50: Entwicklung der in Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken eingesetzten Klärschlammengen von 2016-2020**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

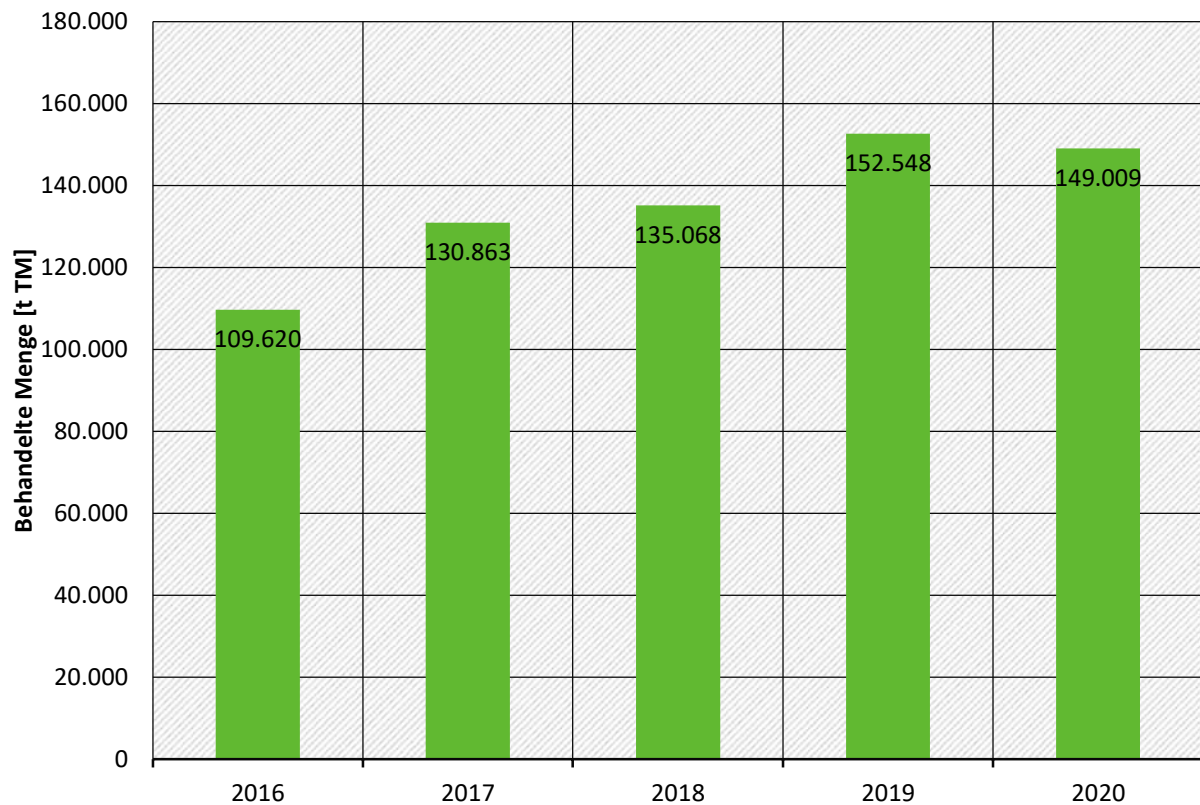
### 3.2.3.3 Zementwerke

Für die Erfassung der Gesamt-Mitverbrennungskapazitäten in Zementwerken wurde eine Anfrage an den Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) gerichtet. Aus den zur Verfügung gestellten Daten konnten die jährliche Gesamtmenge sowie die Anzahl der Zementwerke, die Klärschlamm mitverbrannt haben, abgeleitet werden. Zusätzlich erfolgte eine an 23 Zementwerke gerichtete Befragung zur Erhebung anlagenscharfer Daten. Aus 14 der angefragten Zementwerke erfolgte eine Rückmeldung, auf Basis derer die Daten des VDZ validiert werden konnten.

Gemäß der Rückmeldung des VDZ wurden im Jahr 2020 in 17 deutschen Zementwerken insgesamt 149.009 t<sub>TM</sub> Klärschlamm mitverbrannt. Die Zugabe des Klärschlammes erfolgte an 11 Standorten in getrockneter Form und in 6 Zementwerken als entwässerter Klärschlamm. Die insgesamt eingesetzten Klärschlammengen waren in den letzten Jahren tendenziell zunehmend, die Entwicklung ist Abbildung 51 zu entnehmen. Die angegebene durchschnittliche Anlagenverfügbarkeit beträgt aufgrund der typischen (saisonalen) Betriebsweise 6.970 h/a<sup>10</sup> (79,6 %).

<sup>10</sup> n = 9

**Abbildung 51: Entwicklung der in Zementwerken eingesetzten Klärschlamm-mengen von 2016-2020**



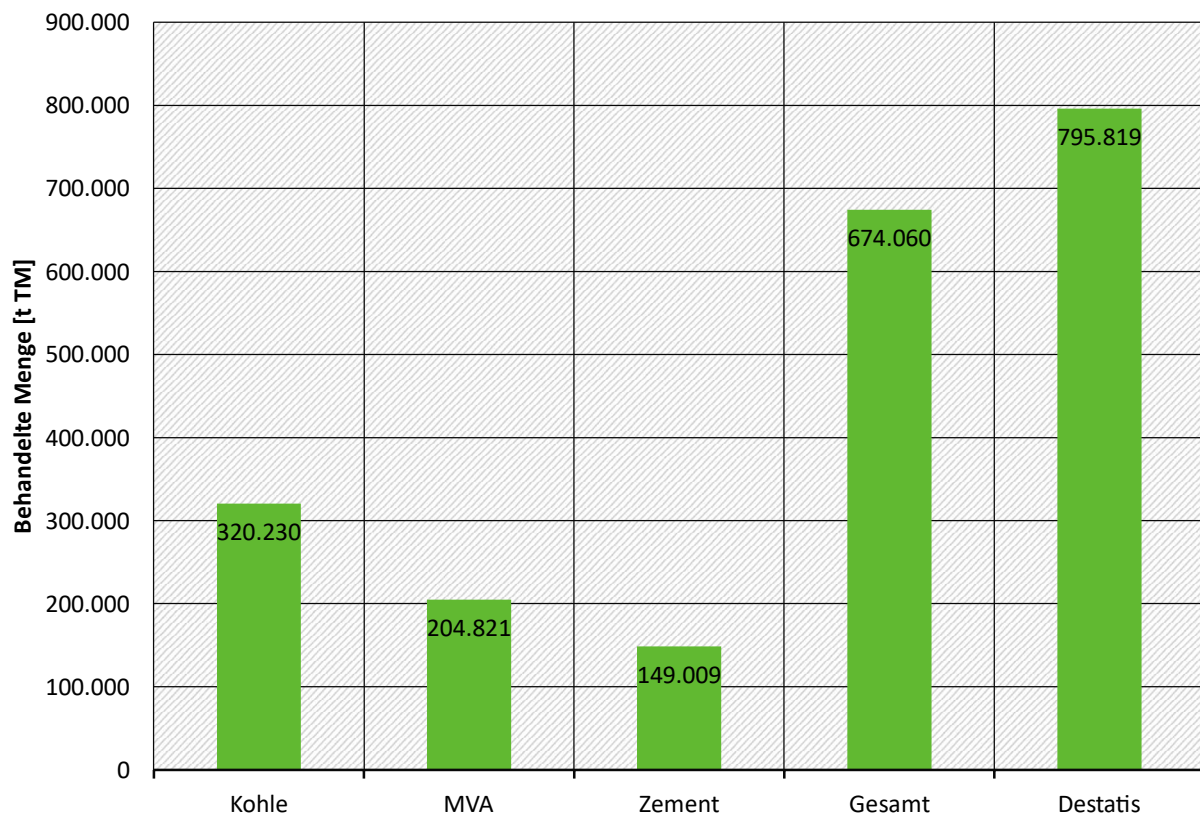
Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 3.2.3.4 Gesamtkapazitäten der Klärschlammmitverbrennung

Aus den erhobenen Daten ergeben sich für das Bezugsjahr 2020 Mitverbrennungsmengen von 320.230 t<sub>TM</sub> in Kohlekraftwerken, 204.821 t<sub>TM</sub> in Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken und 149.009 t<sub>TM</sub> in Zementwerken. Daraus resultiert eine insgesamt mitverbrannte Klärschlamm-menge von 674.060 t<sub>TM</sub>, wobei davon ausgegangen werden muss, dass nicht alle mitverbrannten Mengen durch die Befragung erfasst werden konnten. Diese Einschätzung bestätigt auch der Vergleich mit den Angaben des statistischen Bundesamtes (Abbildung 52). Es besteht eine Differenz von 121.750 t<sub>TM</sub>/a zu den im Rahmen der Studie erhobenen Daten. Diese Differenz ist einerseits auf Anlagen zurückzuführen, zu denen keine Daten erhoben werden konnten. Andererseits wird der TR-Gehalt der behandelten Klärschlämme nicht immer erfasst bzw. kommuniziert, sodass durch Umrechnung auf die Trockemasse in den statistisch erfassten Daten Abweichungen zur tatsächlich behandelten Klärschlamm-menge entstehen.



**Abbildung 52: Im Jahr 2020 in der Mitverbrennung eingesetzte Klärschlamm-mengen**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 3.2.4 Identifizierung bereits vorhandener Phosphorrückgewinnungsstrategien bei Anlagenbetreibern

In der Betreiberbefragung machten insgesamt 14 Betreiber von Klärschlammverbrennungsanlagen eine Aussage zu ihrer zukünftigen Phosphorrückgewinnung. Diese waren in wenigen Fällen konkret auf ein Verfahren festgelegt. Einige andere Betreiber beteiligten sich zwar grundsätzlich an der Befragung, machten zur Abfrage der zukünftigen Phosphor-Strategie allerdings keine Aussage oder teilten mit, dass die Planung noch (verfahrens-)offen sei. Für eine Klärschlammverbrennungsanlage wurde das Rhenania-Verfahren, für eine andere Anlage das PHOS4Green-Verfahren benannt. Für eine dritte Anlage ist eine vollständige Ascheverwertung vorgesehen. Alle anderen Anlagenbetreiber zeigten sich offen hinsichtlich der zukünftigen Phosphorrückgewinnung. Aus den Antworten ließ sich ableiten, dass in den meisten Fällen eine Rückgewinnung aus der Klärschlammverbrennungsasche angestrebt wird. Die Planungen sind jedoch wenig konkret.

## 3.3 Großtechnische Phosphorrückgewinnung in Deutschland

### 3.3.1 Übersicht

Im Folgenden werden die Kapazitäten der bestehenden, in Errichtung und in Planung befindlichen Phosphorrückgewinnungsanlagen dargestellt. Diese sind nach ihrem jeweiligem Eingangsstoffstrom kategorisiert. Ergänzend zu den Studien und veröffentlichten Betreiberinformationen wurde eine Abfrage bei den Betreibern der Phosphorrückgewinnungsanlagen durchgeführt.

Bestandteil der Bestandsanalyse waren die folgenden Punkte:

- ▶ Stammdaten (Standort, Verfahren, Kapazität, Verfügbarkeit, Nebenprodukte)
- ▶ Rückgewinnungseffizienz
- ▶ Angaben zum Inputmaterial (Phosphorgehalt, Schadstoffe)
- ▶ Angaben zum Produkt, Nebenprodukt und Reststoff (Zusammensetzung und Entsorgungsweg)
- ▶ Rezyklatverwertung (Verwertungsvertrag, Vertragslaufzeit, Kosten bzw. Erlöse, Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung)

Tabelle 15 zeigt den aktuellen und geplanten Stand der großtechnischen Phosphorrückgewinnungsanlagen in Deutschland. Die Tabelle zeigt neben den Umsetzungsstandorten auch das Jahr der (geplanten) Fertigstellung sowie die jeweiligen Anlagenkapazitäten. Der verfahrenstechnische Überblick über die Verfahren ist Kapitel 2.2 zu entnehmen.

**Tabelle 27: Aktueller (Planungs-)Stand großtechnischer Phosphorrückgewinnungsanlagen in Deutschland**

Verfahren	Eingangsstrom	Standort/ Umsetzungen	In Betrieb seit/ geplant für	Anlagenkapazität
AirPrex	FS	MG-Neuwerk	2009	7.016 t <sub>TM</sub> /a
		Berlin-Waßmannsdorf	2011	ca. 20.000 t <sub>TM</sub> /a
		Salzgitter Nord	2015	k.A.
		Uelzen	2015/2017	k.A.
		Göppingen	2020	k.A.
		Erlangen	2023	k.A.
Gifhorn	FS	Gifhorn	2007	k.A.
Erw. PARFOCE Ansatz	ÜSS/SW	Wolfsburg	2022	ÜSS: 160.000 m <sup>3</sup> /a (max. 320.000 m <sup>3</sup> /a) FS-Zentrat: 120.000 m <sup>3</sup> /a
Multi-Solid	SW	Hagenow	2023	110.000 m <sup>3</sup> /a
NuReSys	SW	Braunschweig Steinhof	2019	33.814 m <sup>3</sup> /a für 2021; Auslegung 219.000 m <sup>3</sup> /a
PhosForce	RS	Schönebeck	2023	k.A.
PHOSPAQ	SW	Hünfeld	2014	k.A.

Verfahren	Eingangsstrom	Standort/ Umsetzungen	In Betrieb seit/ geplant für	Anlagenkapazität
P-RoC	SW	Bachgau (Großostenheim)	2025	k.A.
SIMPhos	SW	Neuburg	2023	k.A.
PS-fix	FS	Pirmasens (KA Felsalbe)	2020	350 t <sub>TM</sub> /a
MSE-Verfahren	FS	mobile Pilot, MSE (mobile Schlammmentwässerungs GmbH)	2015	5.000 t <sub>TM</sub> /a
Grenzebach Phosphor-Recycling-Verfahren	KS	Rodgau	2023	3.400 t <sub>TM</sub> /a
EuPhoRe	KS	Mannheim	2023	37.000 t <sub>TM</sub> /a
Na-Direktdosierung in die Verbrennung (Emter GmbH)	KS	Altenstadt	2024	55.000 t <sub>TM</sub> /a
PHOS4Green/ Seraplant	KSA	Haldensleben	2021 (Stillstand seit 09/22)	40.000 t Asche/a
TetraPhos	KSA	Hamburg	2023 (seit 2021 in Inbetriebnahme)	20.000 t Asche /a
		Lünen	2025	13.000 t Asche /a
		Kiel	2025	13.000 t Asche /a
Ash2Phos	KSA	Schkopau	2024	30.000 t Asche/a; nach 2027: + 30.000 bis 60.000
		Chemiestandort im Süd-Westen	2028	30.000 t Asche/a; je nach Nachfrage Erweiterung um 30.000 t Asche /a
konv. Düngemittel Produktion	KSA	verschiedene Hersteller testen bereits den Einsatz von Rezyklaten	-	-

SW: Schlammwasser, RS: Rohschlamm, ÜSS: Überschussschlamm, FS: Faulschlamm, KS: Klärschlamm, KSA: Klärschlammverbrennungsasche

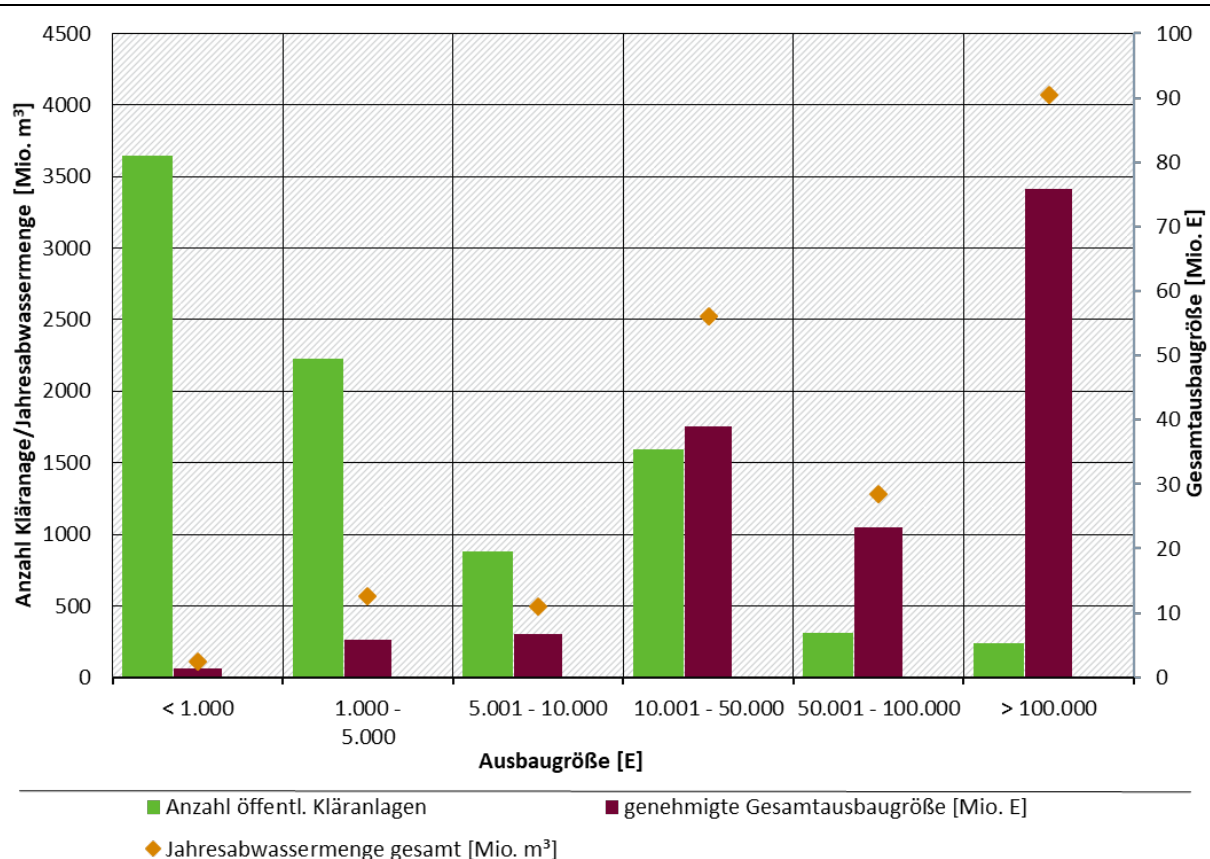
Um die Kapazität der Anlagen zur Phosphorrückgewinnung für die jeweiligen Verfahren anschaulich darzustellen und den absehbaren sowie den zukünftig notwendig werdenden

Bestand zu evaluieren, sind die Phosphorrückgewinnungsanlagen in Form von Steckbriefen im Anhang C zusammengestellt.

### 3.3.2 Ausgangssituation der Abwasserbehandlung in Deutschland

Auf Basis der Daten des statistischen Bundesamtes des Jahres 2019 werden ab 2029 in Deutschland 238 öffentliche Abwasserbehandlungsanlagen (GK 5) direkt der Phosphorrückgewinnungspflicht abseits der bodenbezogenen Verwertung unterliegen. Anfang 2032 erhöht sich die Anzahl um 310 Anlagen der GK 4b auf 548 Anlagen (Abbildung 53) (Destatis, 2022a). Damit sind etwa zwei Drittel der genehmigten Gesamtausbaugröße bzw. der angeschlossenen Einwohnerwerte der Kläranlagen in Deutschland direkt verpflichtet, für die anfallenden Klärschlämme mit  $\geq 20 \text{ g P/kg}_{\text{TM}}$ , eine gezielte Phosphorrückgewinnung vorzusehen. Unberücksichtigt in diesen Zahlen sind die Anlagen, die eine Ausbaugröße  $< 50.000 \text{ E}$  und einen Phosphorgehalt  $\geq 20 \text{ g P/kg}_{\text{TM}}$  aufweisen und ihren Schlamm nicht bodenbezogen verwerten und somit ebenfalls gemäß AbfKlärV Phosphor über technische Prozesse rückgewinnen müssen. Aus diesen Gründen wird neben dem Großteil der Kläranlagen der GK 5 und 4b, vermutlich auch ein Großteil der Kläranlagen GK 4a und ein Teil der kleineren Größenklassen, ihren Klärschlamm einer technischen Anlage zur Phosphorrückgewinnung andienen müssen.

**Abbildung 53: Verteilung der Anzahl der Kläranlagen, der genehmigten Gesamtausbaugröße und der Jahresabwassermenge auf die verschiedenen Größenklassen**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

Im Jahr 2021 sind laut statistischem Bundesamt in Deutschland insgesamt ca. 1,72 Mio.  $\text{t}_{\text{TM}}$  Klärschlamm angefallen (Destatis, 2022a). Die aktuelle Statistik liefert keine Daten zum Klärschlammaufkommen der verschiedenen Kläranlagen, die den Grenzwert zur

Phosphorrückgewinnungspflicht überschreiten und damit nach AbfKlärV Phosphor rückgewinnen müssen. Um das Klärschlammaufkommen zu ermitteln, welches zukünftig zur Phosphorrückgewinnung anfällt, wurde dieses anhand veröffentlichter Daten zu den Jahresmittelwerten der angeschlossenen Einwohner und dem spezifischen Schlammanfall berechnet. Grundlage dafür stellt Tabelle 16 dar, die sich auf die veröffentlichten Daten des statistischen Bundesamts für das Jahr 2019 bezieht (Destatis, 2022a). Zur Ermittlung der Klärschlämme, die den Grenzwert überschreiten, wurden die Phosphorgehalte im Klärschlamm aus dem 32. DWA-Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen herangezogen, auch wenn diese Auswertung offensichtliche Fehleinträge in den Randbereichen enthält (vgl. Tabelle 16) (DWA, 2019). Entsprechend dieser Daten wurde die prozentuale Überschreitung des Phosphorgehalts von 20 g P/kg der verschiedenen Größenklassen auf das jeweilige Klärschlammaufkommen hochgerechnet. In der Summe resultiert daraus ein Klärschlammaufkommen zur Phosphorrückgewinnung von ca. 1.340.000 t<sub>TM</sub>/a.

**Tabelle 28: Ermittelter Klärschlamm- und Klärschlammverbrennungascheaufkommen der verschiedenen Größenklassen**

Größen- klasse	JMW ange- schlossene EW [E]	Anteil JMW ange- schlossene EW [%]	Klärschlamm- aufkommen [t <sub>TM</sub> /a]	Überschrei- tung P > 2 % [%]	Klärschlamm- anfall P > 2 % [t <sub>TM</sub> /a]	Theoretische Klärschlamm- verbrennungs- aschemenge* [t/a]
GK 5	58.813.364	51,0	882.200	85	749.870	299.948
GK 4b	16.955.350	14,7	254.330	85	216.181	86.472
GK 4a	29.125.666	25,2	436.885	85	371.352	148.541
GK 3	5.157.231	4,5	82.516	85	70.138	28.055
GK 2	4.331.283	3,8	73.632	85	62.587	25.035
GK 1	1.049.667	0,9	18.894	66	12.470	4.988

JMW: Jahresmittelwert

\*unter der Annahme eines Aschegehalts von 40 % in der Trockenmasse

Zudem ist einerseits unklar, welcher Anteil der Klärschlammmenge mit einem Phosphorgehalt < 20 g P/kg aus Anlagen der GK 5 und GK 4 z. B. aufgrund anlagenübergreifender Klärschlammkonzepte größerer Betreiber ebenfalls einer Phosphorrückgewinnung unterzogen wird. Andererseits ist auch die Klärschlammmenge der GK 1-4a unbekannt, welche ebenfalls technischen Phosphorrückgewinnungsverfahren angedient wird. Daher wurde basierend auf der o. g. Berechnung eine erhöhte pauschale Abschätzung von 1.500.000 t<sub>TM</sub>/a Klärschlamm vorgenommen. Es ist anzunehmen, dass diese Menge Verfahren zur Phosphorrückgewinnung angedient werden muss. Dies stellt bezogen auf das Gesamt-Klärschlammaufkommen in Deutschland im Jahr 2021 ca. 89 % dar. Demnach wird nur ein geringer Anteil weiterhin bodenbezogen verwertet oder kann anderweitig thermisch entsorgt werden.

### 3.3.3 Vorhandene und prognostizierbare Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung

Die Phosphorrückgewinnungsverfahren, die innerhalb der Abwasserbehandlung ansetzen (Eingangsstrom: Schlammwasser und Faulschlamm) und somit unter den Rechtsbereich des Wasserrechts fallen, wurden in den nachfolgenden Berechnungen nicht berücksichtigt, da diese sich dezentral auf der Kläranlage befinden und somit keine Kapazitäten auf dem Markt anbieten.

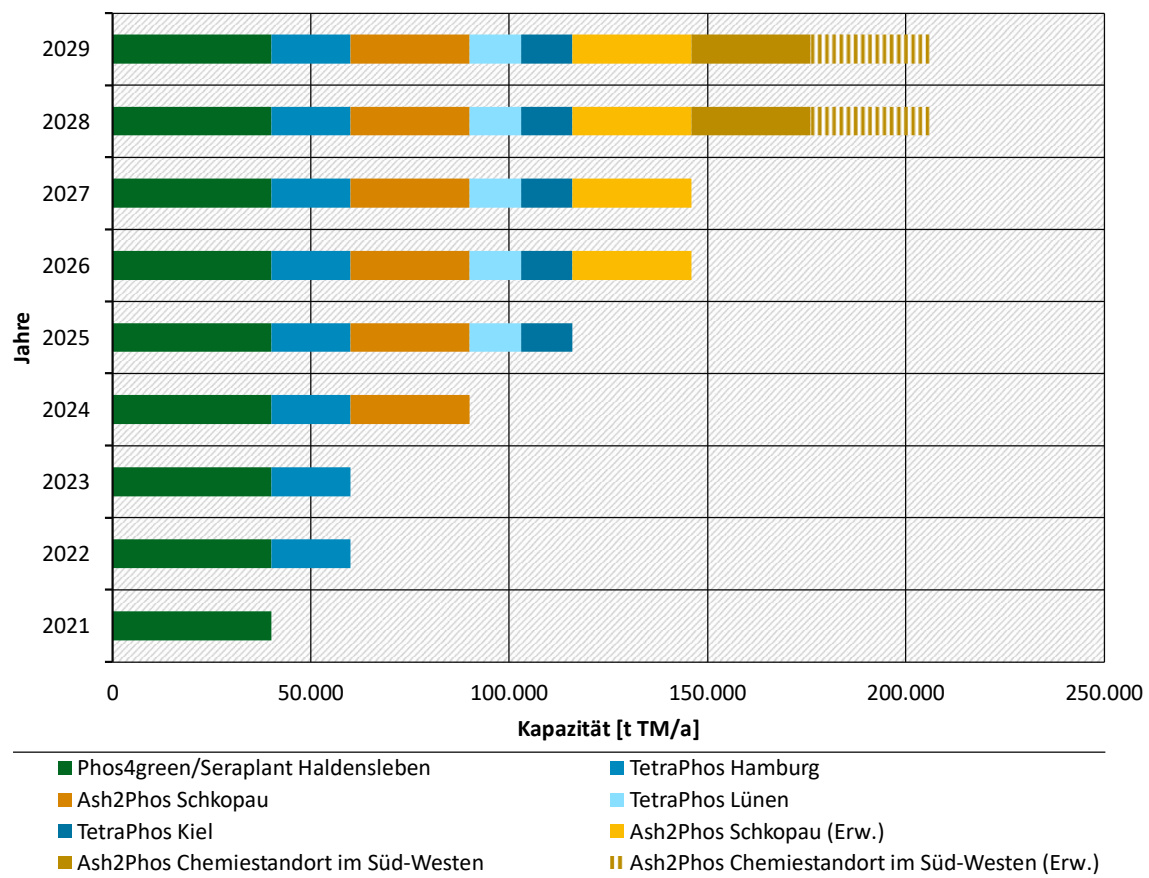


Um diese theoretisch in den Berechnungen mit einzukalkulieren ist es erforderlich, Kenntnis über die Unterschreitung des Grenzwertes zur Phosphorrückgewinnung gemäß AbfKlärV der resultierenden Klärschlämme zu haben. Diese Information ist jedoch nicht verfügbar. Eine Ausnahme unter den dezentralen Anlagen stellt die mobile Anlage des MSE-Verfahrens dar, da die Anlage keinem festen Standort zugeordnet ist und entsprechend auf geeigneten Kläranlagen eingesetzt werden kann, kann sie in der Kapazitätsbetrachtung berücksichtigt werden.

Die Kapazitäten der Verfahren, die im Klärschlamm ansetzen, summieren sich gemäß Tabelle 15 im Jahr 2029 auf ca. 100.000 t<sub>TM</sub>/a. Bezogen auf das abgeschätzte Gesamt-Klärschlammaufkommen entspricht dies einem Anteil von ca. 6,7 %, welcher zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm zur Verfügung steht. Ein Teil der beschriebenen Anlagen ist bzw. wird auf Kläranlagen dezentral errichtet. Diese Kapazitäten werden voraussichtlich nicht auf dem freien Markt verfügbar sein, sondern hauptsächlich die vor Ort anfallenden Klärschlämme behandeln. Die Anrechnung dieser Kapazitäten auf das geschätzte Gesamt-Klärschlammaufkommen zur Phosphorrückgewinnung ist vorgenommen worden, da diese Klärschlämme, unter Voraussetzung der Einhaltung der AbfKlärV nach dem Verfahren, keiner weiteren Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammverbrennungsasche unterzogen werden müssen.

Nach aktuell bekannter Datenlage werden bis 2029 Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche von 206.000 t Klärschlammverbrennungsasche/a zur Verfügung stehen (vgl. Tabelle 15). Unter der Annahme, dass der Klärschlamm abzüglich der o. g. Kapazität zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm vollständig einer thermischen Verwertung in Klärschlammverbrennungsanlagen unterzogen wird, resultiert dies in ca. 560.000 t Klärschlammverbrennungsasche/a. Prozentual ergibt der Kapazitätsvergleich der bekannten und vorhandenen Kapazitäten eine Abdeckung von 37 %. In Abbildung 54 sind die für 2029 erwarteten Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche dargestellt.

**Abbildung 54: Erwartete Kapazitäten der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsasche bis 2029**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft



## 4 Entwicklungsprognose

### 4.1 Thermische Behandlungsanlagen

#### 4.1.1 Zubau

Aufbauend auf die Bestandsanalyse wurde zur Abschätzung der bis zum Inkrafttreten der Artikel 5 und 6 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung verfügbaren Kapazitäten der thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland eine umfangreiche Marktanalyse durchgeführt. Dazu erfolgten zunächst umfassende eigene Recherchen zu geplanten Projekten zum Zubau thermischer Klärschlammbehandlungsanlagen.

Gemäß dieser Recherchen befinden sich zum Berichtszeitpunkt 44 Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Vorbereitung, Planung oder im Bau. Die theoretische Gesamtkapazität dieser Anlagen beträgt in Summe 1.332.656 t<sub>TM</sub>/a. Alle diese Anlagen sollen nach aktuellem Planungsstand bis spätestens 2029 in Betrieb genommen werden. Beim überwiegenden Teil der Anlagen ist als Feuerungstyp eine stationäre Wirbelschicht vorgesehen. In Tabelle 17 ist eine detaillierte Übersicht der zum Berichtszeitpunkt bestehenden Planungen zum Zubau thermischer Klärschlammbehandlungsanlagen (Klärschlammverbrennung/-behandlung und Mitverbrennung) aufgeführt.

Von den 44 geplanten Anlagen handelt es sich nach Kenntnis der Autoren bei drei Standorten – Frankfurt, München und Wuppertal – um Ersatzbauten für bestehende Anlagen. Weiterhin ist seitens der Klärschlammverbrennung in Bonn eine Beteiligung an der KLAR GmbH (Standort Köln) und die Stilllegung der Altanlage im Jahr 2029 geplant. Bei dem Vorhaben in Geseke handelt es sich um eine Erhöhung der Kapazitäten zur Klärschlammmitverbrennung in einem Zementwerk, sodass sich hier keine Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung bietet und lediglich Klärschlämme mit einem Phosphorgehalt von weniger als 2 % (erreichbar z. B. durch vorherige P-Abreicherung) eingesetzt werden können. Bei zwei weiteren Vorhaben – Kleve und Vohburg – handelt es sich um sonstige thermische Behandlungsverfahren mit kohlenstoffhaltigen Rückständen, für die derzeit kein Verfahren zur direkten Phosphorrückgewinnung aus dem festen Rückstand bekannt ist und somit eine zusätzliche Verbrennung erforderlich ist. Unter Berücksichtigung der Ersatzbauten sind zusätzliche Kapazitäten zur thermischen Klärschlammbehandlung von 1.175.566 t<sub>TM</sub>/a zu erwarten.

**Tabelle 29: Übersicht in Vorbereitung, Planung oder Bau befindlicher Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland**

Standort	Betreiber	Anmerkungen	Geplante Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
Bad Krozingen	Abwasserzweckverband Staufener Bucht	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	2.500
Berlin (Waßmannsdorf)	Berliner Wasserbetriebe	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	64.000
Bielefeld	Interargem GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage am Standort bestehender MVA	35.000

Standort	Betreiber	Anmerkungen	Geplante Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
Böblingen	Zweckverband Klärschlammverwertung Böblingen	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	30.000
Bonndorf	KomPhos Bonndorf	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	20.000
Braunsbebra	Wiese Umwelt Service GmbH	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	25.000
Breitenhart (Mallersdorf- Pfaffenberg)	Zirngibl Verwertungs GmbH & Co. KG	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	9.000
Bremen	KENOW GmbH & Co. KG	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	55.000
Darmstadt	Kooperation	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	20.000
Erwitte	Gelsenwasser	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	44.000
Forchheim	Klärschlammverwertung Zweckverband Südbaden	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	20.000
Frankfurt	Stadtentwässerung Fran- kfurt am Main	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage, Ersatz der Bestandsanlage (Etagenwirbler)	50.000
Geiselbullach	Gf A.d.ö.R. Abfallheizkraftwerk	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	6.500
Gersthofen	MVV Umwelt GmbH	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	21.250
Geseke	HeidelbergCement AG	Trocknungsanlage + Mitverbrennung in Zementwerk	17.500
Gießen	Kooperation	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	20.000
Großheirath	?	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	12.500

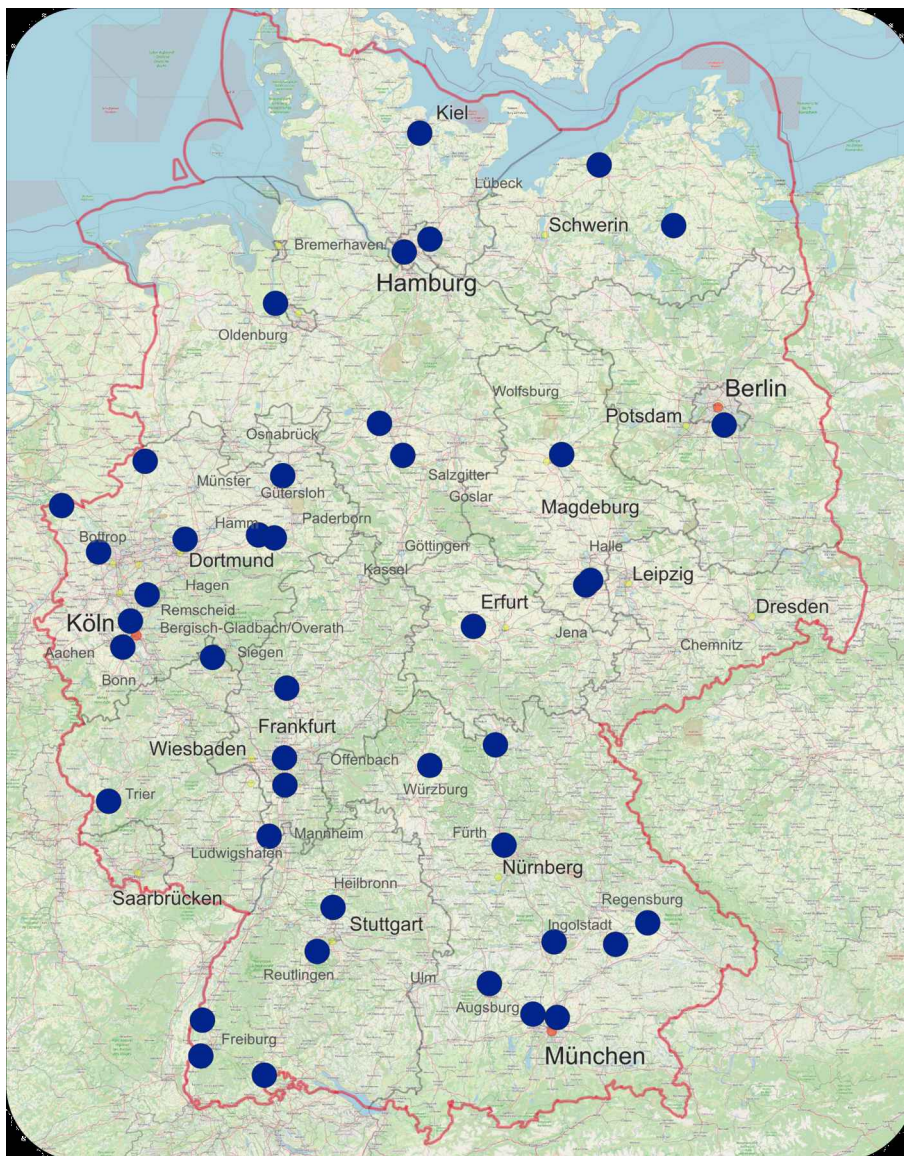
Standort	Betreiber	Anmerkungen	Geplante Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
Hamburg	Hamburg Wasser	Erweiterung der bestehenden Klärschlammverbrennungsanlage	40.000
Hannover Lahe	enercity AG	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	30.000
Heek	Klärschlamm-Verwertungs-Gesellschaft Münsterland mbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	17.000
Hildesheim	Kommunale Nährstoffrückgewinnung Niedersachsen GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	33.500
Hürth	RWE	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	45.000
Kamp-Lintfort (Asdonkshof)	LINEG	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	25.000
Kiel	Müllverbrennung Kiel GmbH & Co. KG	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	30.000
Kleve	Stadt Kleve	Neubau einer PYREG-Pyrolyse-Anlage	1.856
Köln	STeB Köln/KLAR GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	35.000
Leuna	MVV TREA Leuna	Erweiterung der bestehenden MVA um Klärschlammverbrennungslinien (Drehrohrtechnik)	30.000
Lünen	Remondis	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	30.000
Magdeburg-Rothensee	EEW	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	12.500
Mannheim	MVV Umwelt GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	45.000
München	Münchner Stadtentwässerung	Neubau einer Klärschlammverbren-	35.000

Standort	Betreiber	Anmerkungen	Geplante Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
		nungsanlage, Ersatz der Bestandsanlage	
Nürnberg	Stadt Nürnberg	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	30.000
Rostock	Klärschlammkooperation Mecklenburg-Vorpommern GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	25.000
Schweinfurt	GKS Schweinfurt GmbH	Umrüstung des Kohleteils im Gemeinschaftsheizkraftwerk	60.000
Stapelfeld	EEW Energy from Waste Stapelfeld GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	31.500
Stavenhagen	EEW Energy from Waste Stavenhagen GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	31.500
Straubing	Biomasseverwertung Straubing GmbH (Kooperation)	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	40.000
Trier	Kooperation	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	20.000
Vohburg	BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH	Neubau einer Klärschlammbehandlungsanlage mittels TCR-Verfahren	100.000
Walheim	EnBW Energie Baden-Württemberg AG	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	45.000
Wallmenroth	Kommunale Klärschlammverwertung Region Altenkirchen GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	4.550
Warza	Wiese Umwelt Service GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage	25.000
Wuppertal	Klärschlammverwertung Buchenhofen GmbH	Neubau einer Klärschlammverbrennungsanlage, Ersatz der Bestandsanlage	36.000

Standort	Betreiber	Anmerkungen	Geplante Kapazität [t <sub>TM</sub> /a]
nicht festgelegt	KMW (Klärschlammmanageme nt Westsachsen) GmbH	Neubau einer Klärschlammverbren- nungsanlage	22.000

In Abbildung 55 ist die geografische Verteilung der geplanten neuen Standorte zur thermischen Klärschlammbehandlung bis zum Jahr 2029 dargestellt, soweit über die konkreten Standorte der jeweiligen Projekte bereits entschieden wurde.

**Abbildung 55: Übersicht in Vorbereitung, Planung oder Bau befindlicher Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland, Stand 12/2022**

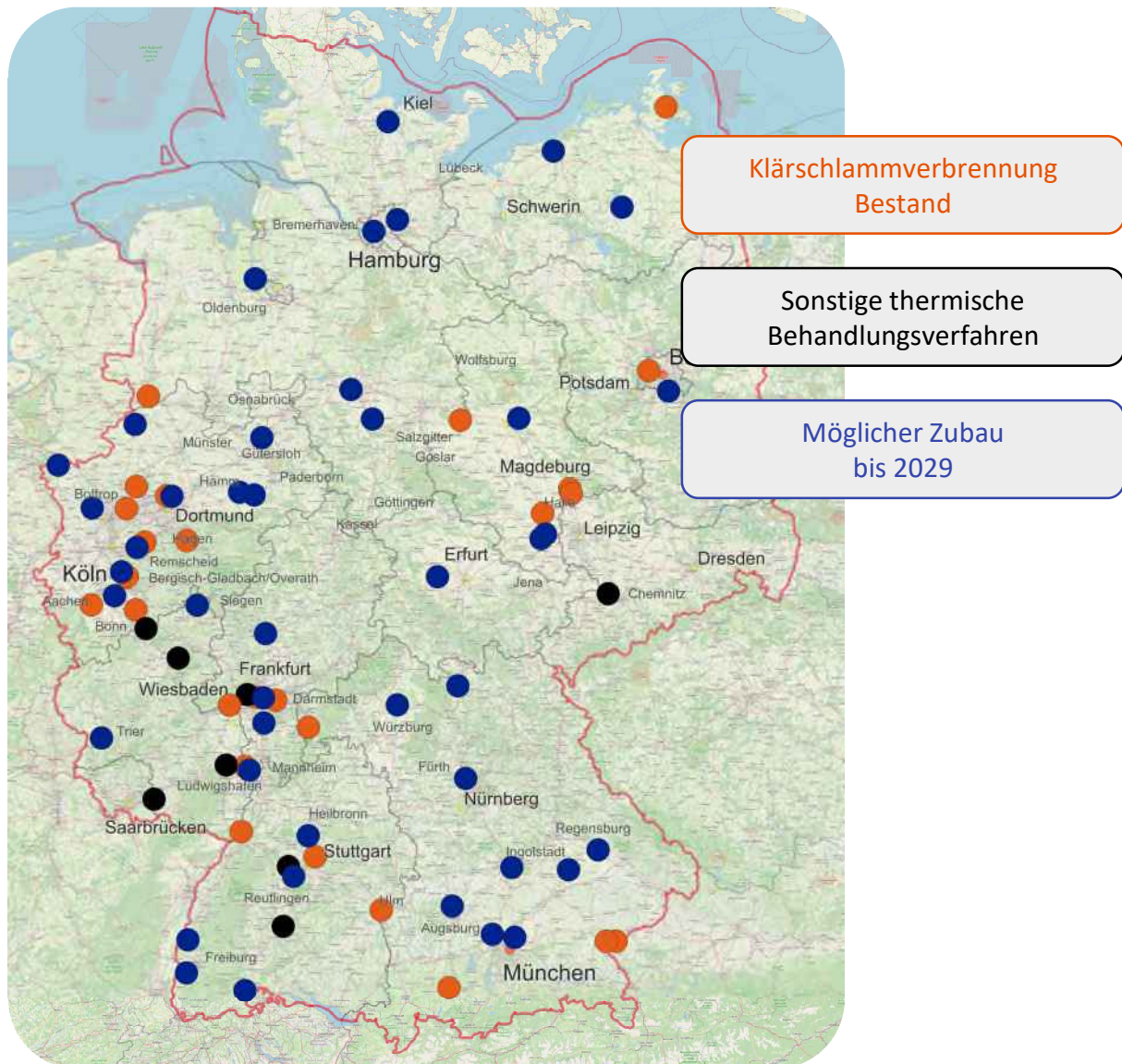


Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (GIS)

Abbildung 56 zeigt die Standorte bestehender Klärschlammverbrennungs- und -behandlungsanlagen sowie den möglichen Zubau bis zum Jahr 2029.



**Abbildung 56: Bestand und möglicher Zubau von Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland, Stand 12/2022**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (GIS)

Um für eine Prognose bis zum Jahr 2029 eine belastbare Basis schaffen zu können, wurden im Rahmen einer Befragung Expertenmeinungen zum Marktgeschehen der thermischen Klärschlammbehandlung in Deutschland eingeholt. Unter Angabe einer Auflistung der recherchierten Anlagen wurden Meinungen zur Realisierungswahrscheinlichkeit abgefragt („Für wie wahrscheinlich halten Sie es, dass die jeweilige Anlage gebaut wird?“ – 0 = wird auf keinen Fall gebaut, 10 = wird auf jeden Fall gebaut). Die Befragten hatten auch die Möglichkeit, bei mangelnder Kenntnis auf eine Einschätzung zu einzelnen Anlagen zu verzichten sowie Angaben zum Hintergrund ihrer Einschätzung zu machen.

Um den fachlichen Hintergrund der Teilnehmenden einschätzen zu können, wurden diese im Rahmen der Befragung ebenfalls hierzu um Angaben gebeten („Sie haben...“, „Sie sind...“ bzw. „Ihr aktuelles Unternehmen/aktueller Arbeitgeber...“ – 0 = trifft überhaupt nicht zu, 10 = trifft vollständig zu). Die Ergebnisse sind Tabelle 18 zu entnehmen. Der Großteil des Teilnehmerkreises schreibt sich selbst einen soliden Überblick über den Stand der thermischen Klärschlammverwertung in Deutschland zu ( $\emptyset = 6,8$ ;  $\bar{x} = 7$ ). Die meisten Teilnehmenden haben

einen ingenieurtechnischen ( $\emptyset = 8,5$ ;  $\bar{x} = 10$ ) bzw. naturwissenschaftlichen ( $\emptyset = 5,1$ ;  $\bar{x} = 6$ ) Ausbildungshintergrund und sind auch derzeit in diesem Feld beruflich tätig ( $\emptyset = 7,9$ ;  $\bar{x} = 10$ ). 19 der 30 Teilnehmenden, die Angaben zu ihrem Hintergrund machten, sind derzeit für einen Arbeitgeber/ein Unternehmen tätig, der/das im Bereich der thermischen Klärschlammbehandlung aktiv ist.

**Tabelle 30: Kurzzusammenfassung des Hintergrunds der Teilnehmenden der Expertenbefragung<sup>11</sup>**

		Mittelwert	Median
Sie haben...	... einen Überblick über den Stand der thermischen Klärschlammverwertung in Deutschland	6,8	7
	... einen ingenieurtechnischen Ausbildungshintergrund	8,5	10
	... einen juristischen Ausbildungshintergrund	0,6	0
	... einen kaufmännischen Ausbildungshintergrund	1,7	0
	... einen naturwissenschaftlichen Ausbildungshintergrund	5,1	6
Sie sind...	... im technischen/wissenschaftlichen Bereich tätig	7,9	10
	... im kaufmännischen/administrativen Bereich tätig	4,4	4,5
Ihr aktuelles Unternehmen/aktueller Arbeitgeber...	... ist in der thermischen Klärschlammbehandlung tätig	6,7	10
	... ist der Wissenschaft zuzuordnen	1,3	0
	... ist der Produktion zuzuordnen	2,1	0
	... ist dem Dienstleistungssektor zuzuordnen	5,7	5,5
	... ist der Consulting Branche zuzuordnen	2,6	0
	... ist ein Branchen-/Interessenverband	1,0	0

Die Anzahl der Rückläufer auf die Befragung belief sich auf insgesamt 32, von denen lediglich 30 der Teilnehmenden eine Einschätzung zur Marktanalyse abgeben wollten. Die wenigsten Einschätzungen wurden zum Vorhaben in Heek ( $n = 4$ ) abgegeben, die meisten zum Vorhaben in Straubing ( $n = 19$ ). In Tabelle 19 ist die Auswertung der zugrundeliegenden Daten aufgeführt. Zusätzlich zur Einschätzung der Realisierungswahrscheinlichkeit hatten die Teilnehmenden der Befragung die Möglichkeit, die Liste zu ergänzen. Die Übersicht enthält daher vereinzelt Vorhaben, die nicht in der Umfrage enthalten waren. Für die Anlagen, auf die die Autoren im

<sup>11</sup>  $n = 30$



Rahmen der Expertenbefragung aufmerksam gemacht wurden, liegt entsprechend keine repräsentative Datenbasis vor.

**Tabelle 31: Kurzzusammenfassung der Ergebnisse der Expertenbefragung**

Standort	Mittelwert	Median	Anzahl Einschätzungen
Bad Krozingen	6,33	7	9
Berlin (Waßmannsdorf)	8,86	10	14
Bielefeld	6,08	6	13
Böblingen	7,23	7	13
Bonnndorf	nicht in Umfrage enthalten		
Braunsbebra	nicht in Umfrage enthalten		
Breitenhart	7,64	8	11
Bremen	9,33	10	18
Darmstadt	4,70	5	10
Erwitte	1,50	0	12
Forchheim	4,50	5	10
Frankfurt	7,36	9	11
Geiselbullach	3,43	3	7
Gersthofen	7,82	8	11
Geseke	7,63	9	8
Gießen	2,71	3	7
Großheirath	nicht in Umfrage enthalten		
Hamburg	9,00	10	15
Hannover Lahe	9,33	10	15
Heek	5,00	5	4
Hildesheim	6,85	8	13
Hürth	7,23	7	13
Kamp-Lintfort (Asdonkshof)	7,58	8,5	12
Kiel	9,21	10	14
Kleve	nicht in Umfrage enthalten		
Köln	6,77	7	13
Leuna	6,71	7	7
Lünen	7,40	8	15

Standort	Mittelwert	Median	Anzahl Einschätzungen
Magdeburg-Rothensee	7,57	8	14
Mannheim	9,25	10	16
München	9,00	10	14
Nürnberg	3,08	1	13
Rostock	6,29	7	14
Schweinfurt	7,18	8	11
Stapelfeld	8,76	10	17
Stavenhagen	8,78	9,5	18
Straubing	6,68	7	19
Trier	5,57	5	7
Vohburg	3,00	2,5	6
Walheim	5,56	6	9
Wallmenroth	6,78	8	9
Warza	nicht in Umfrage enthalten		
Wuppertal	8,12	9	17
Standort nicht festgelegt (KMW GmbH)	nicht in Umfrage enthalten		

Aufbauend auf den Befragungsergebnissen zu den Realisierungswahrscheinlichkeiten wurden drei verschiedene Szenarien entwickelt:

- Szenario 1: nur Anlagen mit einem Median von 10 werden realisiert; zusätzlich Anlagen, von denen das Projektteam sicher weiß, dass sie sich bereits im Bau befinden
- Szenario 2: nur Anlagen mit einem Median von  $\geq 8$  werden realisiert
- Szenario 3: nur Anlagen mit einem Median von  $\geq 5$  werden realisiert.

Die resultierenden Kapazitäten der einzelnen Szenarien sind Tabelle 20 zu entnehmen. Bei den Szenarien ist zu berücksichtigen, dass sechs der 44 identifizierten Vorhaben (Bonndorf, Braunsbebra, Großheirath, Kleve, Warza und das Vorhaben der KMW GmbH) nicht in der Befragung aufgelistet waren und somit keine Berücksichtigung in den Szenarien finden.

**Tabelle 32: Abschätzung der Kapazitäten gemäß Expertenbefragung**

Szenario	Anzahl realisierter Anlagen im Szenario	Realisierte Anlagen im Szenario	Resultierende Kapazitäten [ $t_{TM}/a$ ]
1	8	Berlin, Bremen, Hamburg, Hannover-Lahe, Kiel, Mannheim,	312.000 (362.500)

Szenario	Anzahl realisierter Anlagen im Szenario	Realisierte Anlagen im Szenario	Resultierende Kapazitäten [ $t_{TM}/a$ ]
		München, Stapelfeld, Stavenhagen	
2	20	Berlin, Breitenhart, Bremen, Frankfurt, Gersthofen, Geseke, Hamburg, Hannover-Lahe, Hildesheim, Kamp-Lintfort, Kiel, Lünen, Magdeburg-Rothensee, Mannheim, München, Schweinfurt, Stapelfeld, Stavenhagen, Wallmenroth, Wuppertal	500.854 (661.300)
3	33	Bad Krozingen, Berlin, Bielefeld, Böblingen, Breitenhart, Bremen, Darmstadt, Forchheim, Frankfurt, Gersthofen, Geseke, Hamburg, Hannover-Lahe, Heek, Hildesheim, Hürth, Kamp-Lintfort, Kiel, Köln, Leuna, Lünen, Magdeburg-Rothensee, Mannheim, München, Rostock, Schweinfurt, Stapelfeld, Stavenhagen, Straubing, Trier, Walheim, Wallmenroth, Wuppertal	851.210 (1.025.800)

In der Spalte „resultierende Kapazitäten“ sind die um wegfallende Kapazitäten bei Ersatzbauten korrigierten Kapazitäten aufgeführt. In Klammern dahinter findet sich die Kapazität ohne Korrektur. In Szenario 1 und 2, die eine Umsetzung des Vorhabens in Köln nicht Vorsehen, wird bei der Korrektur davon ausgegangen, dass die Anlage in Bonn weiterbetrieben wird. In Szenario 1, das eine Umsetzung der Vorhaben in Frankfurt und Wuppertal nicht vorsieht, wird bei der Korrektur davon ausgegangen, dass die Altanlagen nicht stillgelegt, sondern weiterbetrieben werden.

Die betrachteten Szenarien ergeben zusätzliche Behandlungskapazitäten für die Klärschlammverbrennung– in Abhängigkeit des Szenarios – zwischen 312.000 und 851.210  $t_{TM}/a$ .

#### 4.1.2 Bedarf an Kapazitäten bis 2029 bzw. 2032

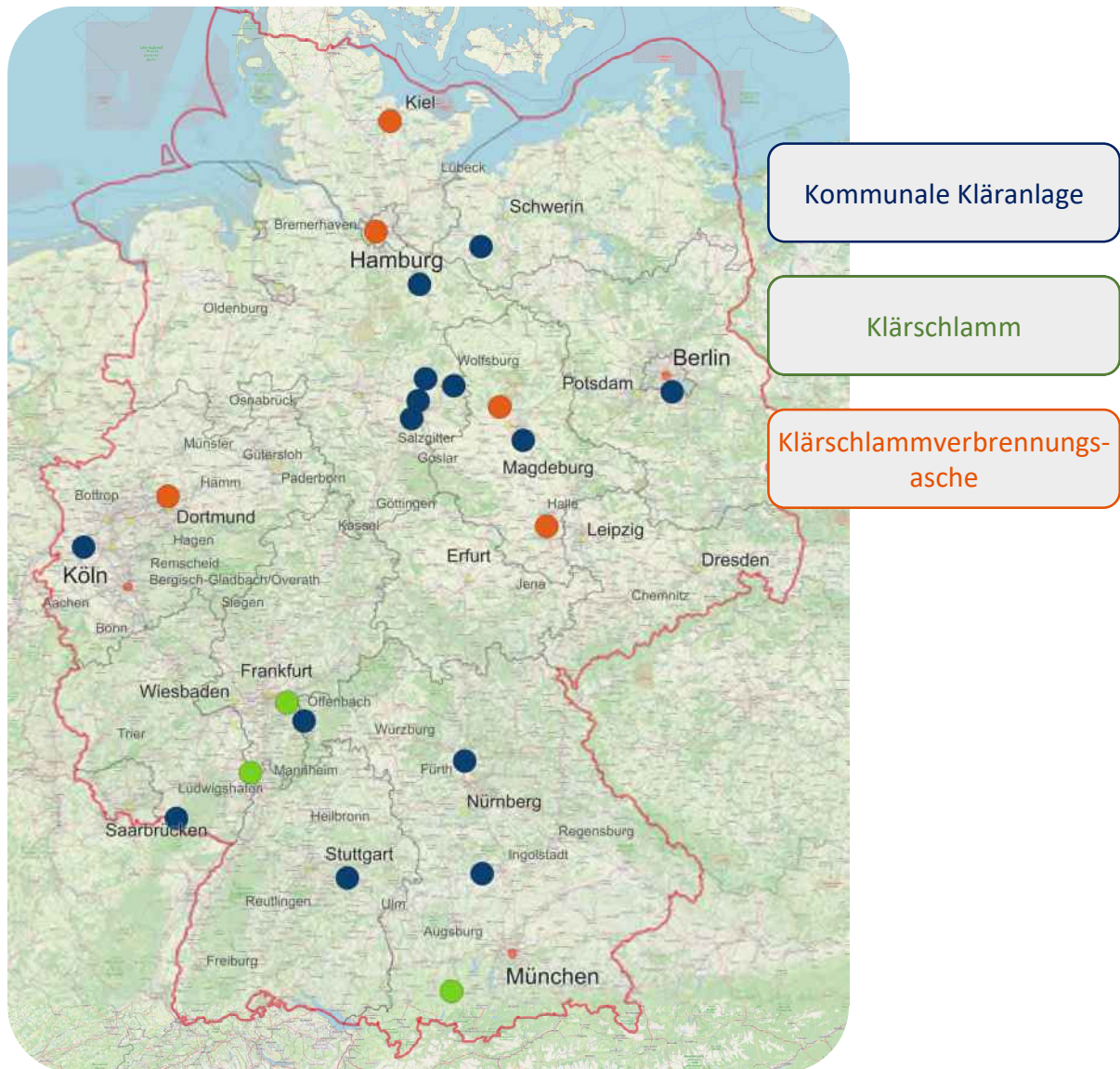
Gemäß statistischem Bundesamt fielen im Jahr 2020 in Deutschland 1.740.556  $t_{TM}$  an kommunalem Klärschlamm an (Destatis, 2022a). Zum Berichtszeitpunkt bestehen theoretische Kapazitäten von 880.752  $t_{TM}/a$  für die Klärschlammverbrennung kommunaler Klärschlämme (vgl. Kapitel 3.2.1). Nach einer Erhebung der DWA fallen in etwa 15 % der deutschen Kläranlagen Klärschlämme mit einem Phosphorgehalt von weniger als 2 %, bezogen auf die Trockenmasse an, sodass diese Klärschlämme nicht der Phosphorrückgewinnungspflicht unterliegen (DWA, 2019). Aus den vorliegenden Informationen und unter der Annahme, dass entsprechend aktuellen Erkenntnissen und Entwicklungen die Phosphorrückgewinnung aus der

Klärschlammverbrennungsasche den vorherrschende Rückgewinnungspfad darstellen wird, wurde im Rahmen der Studie die Annahme getroffen, dass etwa 1,5 Mio t<sub>TM</sub>/a einer Phosphorrückgewinnung unterzogen werden müssen. Ausgehend von der im Rahmen der Betreiberbefragung ermittelten Auslastung von nur 76,3 % der genehmigten Kapazitäten von Klärschlammverbrennungsanlagen und auf Basis der Annahme, dass die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammverbrennungsasche künftig den vorherrschenden Pfad des P-Recyclings darstellen wird, ergibt sich ein Gesamtbedarf an genehmigten Kapazitäten für die Klärschlammverbrennung in Höhe von 1,97 Mio t<sub>TM</sub> und somit ein erforderlicher Zubau von 1,09 Mio t<sub>TM</sub>. Bei Umsetzung aller in Tabelle 17 aufgeführten Vorhaben, korrigiert um die Ersatzbauten und sonstige thermische Behandlungsverfahren, ergäben sich zusätzliche Klärschlammverbrennungs-Kapazitäten für die Behandlung von 1,06 Mio t<sub>TM</sub>. Unter den getroffenen Annahmen und bei Umsetzung aller Vorhaben würde der erforderliche Bedarf an Kapazitäten somit gedeckt.

## 4.2 Phosphorrückgewinnungsanlagen

Nach aktuellem Stand der verfügbaren Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung gemäß Tabelle 15, lassen sich für 2029 AbfKlärV-konforme Kapazitäten für eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm von 100.000 t<sub>TM</sub>/a und für Klärschlammverbrennungsasche von 206.000 t<sub>TM</sub>/a prognostizieren. In Abbildung 57 ist eine Zusammenstellung bestehender Phosphorrückgewinnungsanlagen inklusive der möglichen Zubauten gemäß Tabelle 15 bis zum Jahr 2029 dargestellt.

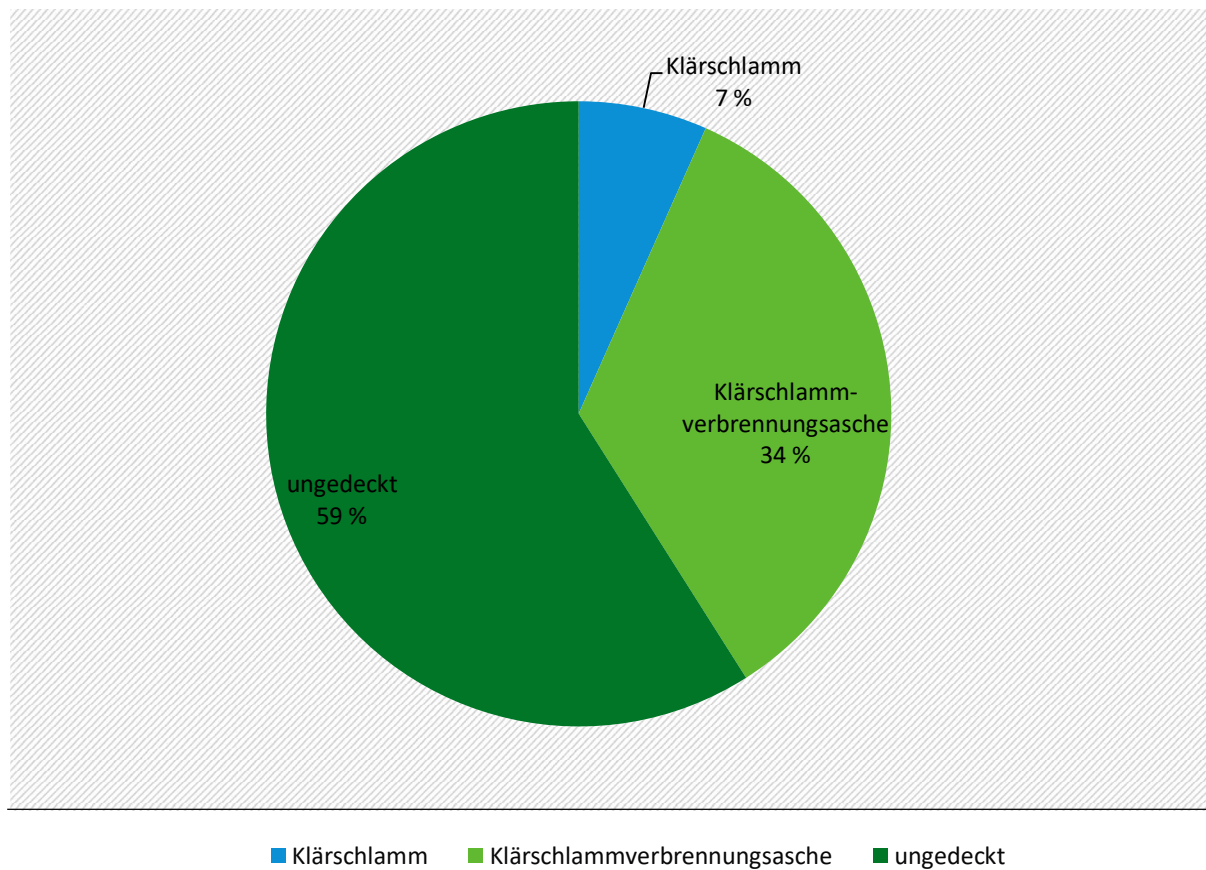
**Abbildung 57: Bestand und möglicher Zubau von Anlagen zur Phosphorrückgewinnung in Deutschland, Stand 12/2022**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (GIS)

Entsprechend sind damit ca. 7 % des pauschal abgeschätzten Klärschlammaufkommens von 1,5 Mio. t<sub>TM</sub>/a für eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm abgedeckt. Für Klärschlammverbrennungsasche sind es ca. 34 % (vgl. Abbildung 58). Daraus ergibt sich, dass in Summe 41 % des pauschal abgeschätzten Klärschlammaufkommens mit den 2029 vorhandenen Kapazitäten abgedeckt sind und entsprechend für ca. 59 % des Klärschlamms nach aktuell bekanntem Stand bislang keine Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung zur Verfügung stehen werden.

**Abbildung 58: Prognose Kapazitätsvergleich zur Phosphorrückgewinnung ausgehend von 1,5 Mio. t<sub>TM</sub>/a Klärschlamm**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft



## 5 Rezyklate: Produkte der Phosphorrückgewinnung

### 5.1 Rechtliche Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung

Im deutschen Recht gelten bei der Verwertung von Klärschlämmen zunächst die Regelungen der Klärschlammverordnung (AbfKlärV). Die rechtlichen und praktischen Voraussetzungen für den Einsatz von Rezyklaten in der Landwirtschaft regelt dann zusätzlich das Düngerecht sowie die Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV). Dieses beinhaltet die Vorschriften des Düngegesetzes, der Düngeverordnung und der Düngemittelverordnung. Hierbei sind entscheidend für die Zulassung von Rezyklaten als Düngemittel die Vorgaben der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) und im europäischen Raum die Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2019 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 (EU DüPV). Für das Phosphorsäure-Rezyklat, welches abseits der Düngemittelindustrie in anderen industriellen Zweigen Anwendung findet, gelten die Verpflichtungen zur Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH).

Rechtliche Aspekte gemäß AbfKlärV:

- ▶ Pflicht zur Phosphorrückgewinnung bei P Gehalten  $\geq 20 \text{ g /kg}_{\text{TM}}$
- ▶ Rückgewinnungseffizienz

Rechtliche Aspekte für den Einsatz von Rezyklaten zu Dünge Zwecken in der Landwirtschaft:

- ▶ Düngemittelrechtliche Zulassung
- ▶ Einhaltung der DüMV bzw. EU-DüPV (bzgl. Ausgangsstoffe, Nährstoffgehalte, Löslichkeiten, Schadstoffgehalte etc.)

### 5.2 Rechtliche Vorgaben für Rezyklate

Die Definition von „Abfall“ in § 3 Abs. 1 Satz 1 KrWG besagt, dass alle Stoffe oder Gegenstände als Abfall zu verstehen sind, wenn sich deren Besitzer ihrer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Somit ist die erfolgte, subjektiv beabsichtigte oder rechtlich gebotene Entledigung maßgebend für die Definition. Ein „Produkt“ dagegen ist ein Stoff oder Gegenstand, der seine Abfalleigenschaften abgelegt hat und aus diesem Grund nicht Regelungen des Abfallrechts unterliegt, sondern dem Produktrecht zugeordnet wird.

Phosphor-Rezyklate verlieren nach § 5 Abs. 1 KrWG erst den rechtlichen Status als Abfall, wenn ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren (definiert in § 3 Abs. 23 KrWG und Nennung von Verwertungsverfahren in Anlage 2 KrWG) durchlaufen wurde und der Stoff oder Gegenstand nachfolgend so beschaffen ist, dass

- ▶ er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
- ▶ ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- ▶ er alle für seine jeweiligen Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren (technischen) Normen für Erzeugnisse erfüllt und



- eine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Rezyklate werden somit zusammenfassend nach § 3 Abs. 7b KrWG als sekundäre Rohstoffe verstanden, welche durch Abfallverwertung gewonnen worden sind oder bei der Beseitigung von Abfällen anfallen und für die Herstellung von Erzeugnissen geeignet sind.

#### Rezyklate als Düngemittel: DüMV und EU-DüPV

Wird ein Phosphor-Rezyklat als Produkt angesehen, muss es zur Nutzung als Düngemittel in der Landwirtschaft als EU-Düngeprodukt oder nach nationalem Recht zugelassen sein. Ein Mindestgehalt an  $P_2O_5$  im Düngemittel muss nach DüMV und EU-DüPV geprüft werden. Zur Erteilung der Zulassung müssen Anforderungen an die Düngewirkung (vgl. § 3 DüMV; CE-Kennzeichnung und Konformitätsbewertung DüPV) und vorgeschriebene Grenzwerte bezüglich unerwünschter Begleitstoffe eingehalten werden. Des Weiteren liegen Regelungen bezüglich der Phosphorverbindungen und Phosphatlöslichkeiten vor (§ 3 Abs. 1 Satz 2 Nr. 2 Buchstabe d) i.V.m. Anlage 2 Tabelle 4 DüMV; Anhang 1, EU-DüPV). Die Anforderungen an Rezyklate zur Phosphatlöslichkeit sind für die DüMV sowie die EU-DüPV Tabelle 21 zu entnehmen.

#### Anforderungen gemäß DüMV:

- zugelassene Ausgangsstoffe Anlage 2 Tabelle 6, 7, 8 (Klärschlamm gelistet in Tabelle 7, 7.4.3; Klärschlammverbrennungaschen gelistet in Tabelle 7, 7.3.16)
- zugelassene Düngemitteltypen Anlage 1 Abschnitt 1-5
- Einhaltung der Mindestgehalte Anlage 2 Tabelle 1.1
- Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte Anlage 2 Tabelle 1.4 und der Salmonellenfreiheit gem. § 5 DüMV
- Unbedenklichkeit für Mensch, Tier, Boden

#### Anforderungen gemäß EU-DüPV:

- Anhang I für die betreffende Produktfunktionskategorie erfüllen
- Anhang II für die betreffende Komponentenmaterialkategorie erfüllen
- gemäß den Kennzeichnungsvorschriften in Anhang III gekennzeichnet sein
- kein Risiko für Mensch, Tier oder Pflanze, für die Sicherheit oder für die Umwelt bergen

**Tabelle 33: Anforderungen an Rezyklat-Düngemittel gemäß DüMV Anlage 2 Tabelle 5.7 bzw. EU-DüPV (EU) 2019/1009**

Phosphatlöslichkeit in	DüMV Anforderung an die Löslichkeit <sup>1</sup> [% $P_2O_5$ ]	EU-DüPV (EU) 2019/1009 [% des Gesamtgehalts an Phosphor] <sup>2</sup>
Wasser	mind. 2,5	mind. 40 <u>oder</u>
Neutralammoncitrat und Wasser	mind. 5	
Neutralammoncitrat		mind. 75 <u>oder</u>

Phosphatlöslichkeit in	DüMV Anforderung an die Löslichkeit <sup>1</sup> [% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	EU-DüPV (EU) 2019/1009 [% des Gesamtgehalts an Phosphor] <sup>2</sup>
Ausschließlich Mineralsäure	max. 2	
Ameisensäure		55 <u>oder</u> (nur weicherdigen Roh-P)

<sup>1</sup>Anlage 2 Tabelle 5.7

<sup>2</sup>muss mindestens eine der folgenden Löslichkeitskriterien erfüllen

Die Schadstoffgrenzwerte für Rezyklate sind gemäß AbfKlärV sowie DüMV oder EU-DüPV einzuhalten und Tabelle 22 zu entnehmen. Es gelten, falls kein strengerer Grenzwert in der AbfKlärV angegeben ist, die Grenzwerte der DüMV.

**Tabelle 34: Schadstoffgrenzwerte der AbfKlärV, DüMV und EU-DüPV (EU) 2019/1009**

Schadstoff	AbfKlärV Grenzwert <sup>1</sup> [mg/kg <sub>TM</sub> ]	DüMV Grenzwert <sup>2</sup> [mg/kg <sub>TM</sub> ]	EU-DüPV (EU) 2019/1009 Grenzwert <sup>3</sup> [mg/kg <sub>TM</sub> ]
Arsen		40	40
Blei		150	120
Cadmium		1,5	3
Cadmium (für Düngemittel ab 5 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OS))		50 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	60 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (<5 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 3 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Chrom VI		2	2
Nickel		80	100
Quecksilber		1	1
Thallium		1	-
Kupfer		900 (Kennzeichnungspflicht ab: 500 (Toleranz 20 %))	max. 600*
Zink	4.000	5.000 (Kennzeichnungspflicht ab: 1.000 (Toleranz 29 %))	max. 1.500*
Adsorbierbar organisch gebundene Halogene (AOX)	400		
Polychlorierte Biphenyle (PCB), jeweils für die Kongere 28, 52, 101, 138, 153, 180	0,1		

Schadstoff	AbfklärV Grenzwert <sup>1</sup> [mg/kg <sub>TM</sub> ]	DüMV Grenzwert <sup>2</sup> [mg/kg <sub>TM</sub> ]	EU-DüPV (EU) 2019/1009 Grenzwert <sup>3</sup> [mg/kg <sub>TM</sub> ]
Benzo(a)pyrene	1		
Perfluorierte Tenside		0,1	-
Summe Dioxine und dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB) (WHO-TEQ 2005)		30 ng/kg <sub>TM</sub>	-
Biuret			12 g/kg
Perchlorat (ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )			50

<sup>1</sup> AbfklärV: Anlage 1 zu § 8 Absatz 1 zusätzlich zu den Grenzwerten nach Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 4 und dem Höchstgehalt für Kupfer nach Anlage 1 Abschnitt 4.1 Nummer 4.1.1 Spalte 6 Absatz 2 der DüMV einzuhalten

<sup>2</sup> DüMV: Anhang 2 Tabelle 1.4

<sup>3</sup> EU-DüPV (EU) 2019/1009: Anhang 1: Teil II PFC 1(C) (I): Anorganische Makronährstoff-Düngemittel

\*gilt nur, wenn nicht aufgrund eines Spurenstoffmangels im Boden absichtlich zugesetzt wurde

Düngemittel können unabhängig von der Erfüllung der EU-DüPV auch zukünftig nach nationalem Recht in Verkehr gebracht werden.

#### Rezyklate und REACH:

Die rechtlichen Anforderungen müssen durch die jeweiligen Phosphorrückgewinnungsverfahren eingehalten werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass jedes Rezyklat, auch innerhalb des gleichen Verfahrens an verschiedenen Standorten, unterschiedlich zusammengesetzt ist. Somit muss die Erfüllung der rechtlichen Voraussetzungen für jedes einzelne Verfahren, ggfs. den Eingangsstoffstrom und auch für das Rezyklat einzeln betrachtet werden.

Gemäß dem REACH-System müssen Hersteller von chemischen Stoffen, Altstoffen und neuen Stoffen, gegenüber der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) darlegen, dass das hergestellte Produkt sicher verwendet werden kann und es die menschliche Gesundheit oder die Umwelt nicht nachteilig beeinflusst. Struvite können direkt als Düngemittel in Verkehr gebracht werden und müssen eine REACH-Zertifizierung erlangt haben. Das Rezyklat Phosphorsäure kann neben der Einspeisung in die Düngemittelindustrie auch in weiteren industriellen Prozessen Anwendung finden. Solange sie zum Zwecke der Düngemittelherstellung genutzt wird, fällt sie unter den Rechtsbereich der Düngemittelverordnungen (national sowie international). Außerdem muss sie nach den Anforderungen der REACH-Verordnung zugelassen sein. Die produzierte Phosphorsäure muss einer bereits REACH-zertifizierten Phosphorsäure zuzuordnen sein. Falls die Anforderungsprofile nicht genügen, muss eine entsprechende REACH-Zertifizierung neu beantragt werden. Bisweilen sind Struvite und Phosphorsäuren bereits gemäß REACH zertifiziert.

### 5.3 Rezyklat Produktgruppen

Je nach Phosphorrückgewinnungsverfahren werden unterschiedliche Produkte gewonnen. Diese unterscheiden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und damit ihren jeweiligen Verwertungsrouten und ihrem Marktpotential. Die mengenmäßigen Verfügbarkeiten der jeweiligen Rezyklate aus den verschiedenen Phosphorrückgewinnungsverfahren sind

Kapitel 2.2 zu entnehmen und werden hier unabhängig ihres Aufkommens betrachtet. In Tabelle 23 sind die Phosphor-Rezyklate der in Kapitel 2.2 angegebenen Verfahren dargestellt.

**Tabelle 35: Produktorientierte Verfahrenszusammenstellung der Phosphor-Rezyklate aus verschiedenen Phosphorrückgewinnungsverfahren**

Produktgruppe	Verfahrensart	Verfahrensbeispiel
<b>Struvit</b>	Kristallisation (SW, ÜSS. Bzw. RS, FS)	AirPrex <sup>1</sup> , EloPhos, Erw. PARFORCE-Ansatz <sup>1</sup> , Gifhorn <sup>1</sup> , MSE-Verfahren <sup>1</sup> , Multi-Solid <sup>2</sup> , NuReSys <sup>1</sup> , PhosForce <sup>2</sup> , PHOSPHAQ <sup>1</sup> , PS-fix <sup>2</sup> , Stuttgarter-Verfahren
<b>Calciumphosphate</b>	Kristallisation (SW, ÜSS. Bzw. RS, FS & KSA (nasschemisch))	Ash2Phos <sup>2</sup> , Gifhorn <sup>1</sup> , Leachphos, PhosForce <sup>2</sup>
<b>P-haltiges CSH</b>	Kristallisation (SW)	P-RoC <sup>2</sup> , SIMPhos <sup>2</sup>
<b>Vivianit (Eisen(II)Phosphat)</b>	Magnetische Abtrennung (FS)	ViviMag
<b>Phosphorsäure</b>	Nasschemisch, thermochemisch, metallurgisch (KS & KSA)	Grenzebach-Phosphor-Recycling-Verfahren <sup>2</sup> , PARFORCE-Technologie <sup>2</sup> , Phos4Life, TetraPhos <sup>1</sup>
<b>P-haltiges Ascheprodukt (nasschem. V.)</b>	Nasschemisch (KSA)	PHOS4Green <sup>(1)</sup> , pontes pabuli
<b>P-haltiges Aschenprodukt (thermochem. V.)</b>	Thermochemisch (KS & KSA)	AshDec, EuPhoRe <sup>2</sup> ; Drehrohrkessel (Werkstätten heating -systems GmbH) <sup>2</sup> , P-XTRACT
<b>P-haltige Schlacke</b>	Thermochemisch im Schmelzofen (KS)	KSMF-Prozess, KRN-Mephrec
<b>Weißer Phosphor</b>	Thermochemisch (KSA)	FlashPhos

SW: Schlammwasser, RS: Rohschlamm, ÜSS: Überschussschlamm, FS: Faulschlamm, KS: Klärschlamm, KSA: Klärschlammverbrennungsasche

<sup>1</sup>bereits großtechnisch umgesetzte Anlage (Stand 12/2022)

<sup>2</sup>in Bau befindliche großtechnische Anlage (Stand 12/2022)

ohne Hochzahl dargestellte Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung oder sind unwahrscheinlich zukünftig umgesetzt zu werden.

### 5.3.1 Struvit

Struvite bzw. Magnesium-Ammonium-Phosphate ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ) sind Magnesium-basierte Phosphate (Tabelle 24). Diese gelten seit jeher auch als Störstoff, wenn es zu unkontrollierten Inkrustationen kommt. Seit fast 20 Jahren werden diese auch im Zuge von Betriebsoptimierungen gezielt bei Bio-P Kläranlagen rückgewonnen und so die Ablagerungen in den Rohrleitungen verhindert.

**Tabelle 36: Produktsteckbrief Struvit**

<b>Name</b>	Struvit / Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)		
<b>Chemische Formel</b>	$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ (Mg: 9,9 M-%; N: 5,7 M-%; P: 12,6 M-%)		
<b>Ausgangsmaterial</b>	Faulschlamm und Zentrat aus der Entwässerung		
<b>Verfahrensart</b>	Fällung bzw. Kristallisation		
<b>P-Gehalt</b>	10 – 14 % P TM 25 – 30,5 % $\text{P}_2\text{O}_5$ TM		Spörri et al., 2020
<b>Art des Rezyklats</b>	Pulver, Kristalle, Granulate (nach Aufarbeitungsschritt)		Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Schadstoffe</b>	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	Organische Schadstoffe verbleiben größtenteils im P-abgereicherten Schlamm	Egle et al., 2014
	Anorganische Schadstoffe	Einhaltung der Grenzwerte der DüMV	Egle et al., 2014
<b>Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung</b>	Wasserlöslichkeit: < 7 % $\text{P}_{\text{ges}}$ <sup>1</sup> , 0,2 % $\text{P}_2\text{O}_5$ <sup>2</sup> NAC-Löslichkeit: 69-96 % $\text{P}_{\text{ges}}$ <sup>1</sup> , 24-27 % $\text{P}_2\text{O}_5$ <sup>2</sup> CA-Löslichkeit: 37-100 % $\text{P}_{\text{ges}}$ <sup>1</sup> , 24-26 % $\text{P}_2\text{O}_5$ <sup>2</sup>		<sup>1</sup> Kratz et al., 2019 <sup>2</sup> Jacobi et al., 2022
<b>Verfahrensbeispiele</b>	AirPrex, EloPhos, erw. PARFORCE-Ansatz, Gifhorn, MSE-Verfahren, Multi-Solid, NuReSys, Pearl, PhosForce, PHOSPHAQ, PS-fix, Stuttgarter Verfahren		
<b>Verwertungsweg</b>	Direkte Anwendung als Düngemittel		Mebarki et al., 2020
<b>Klassifizierung</b>	<u>Europa (internationales Recht):</u> EU-DüPV (EU) 2019/1009: <ul style="list-style-type: none"> <li>Anhang II Komponentenmaterialkategorie (CMC) 12: gefällte Phosphatsalze und deren Folgeprodukte</li> </ul> EU-Öko-VO (EU) 2018/848: <ul style="list-style-type: none"> <li>Anhang II (Durchführungsverordnung (EU) 2023/121)</li> </ul> <u>Deutschland (nationales Recht):</u> DüMV <ul style="list-style-type: none"> <li>Anlage I, Abschnitt 2: mineralischer Mehrenährstoffdünger (NP-Dünger)</li> </ul>		Mebarki et al., 2020
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	EU-DüPV (EU) 2019/1009  REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Registrierung in einem Dossier)  DüMV		

Struvite zeigen eine hohe NAC und CA-Löslichkeit. Die Rohprodukte müssen meistens noch eine Konfektionierung durchlaufen, bevor sie dann als Düngemittel in den Markt eintreten können. Die Produktpreise für diese Produktkategorie können großen Schwankungen unterliegen und liegen derzeit je nach Quelle bei 20-125 €/t Produkt, entspricht 80-500 €/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Andere Schätzungen gehen von Erlösen im Bereich von etwa 15–30 % des Marktpreises handelsüblicher P-Dünger aus (Spörri et al., 2017). Struvite gelten als schadstoffarme Produkte. (Egle et al. 2014; Kraus et al. 2019; Kraus und Conzelmann, 2021) Seit Anfang 2023 sind Struvite auch im Ökolandbau zugelassen (Durchführungsverordnung (EU) 2023/121 der Kommission vom 17. Januar 2023 zur Änderung und Berichtigung der Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 über die Zulassung bestimmter Erzeugnisse und Stoffe zur Verwendung in der ökologischen/biologischen Produktion und zur Erstellung entsprechender Verzeichnisse).

### 5.3.2 Calciumphosphate

Calciumphosphate (Tabelle 25) können aus dem Schlammwasser oder aus P-haltiger Lösung nach einem nasschemischen Ascheaufschluss gefällt werden. Beispiele für Calciumphosphate sind Dicalciumphosphat bzw. Brushit (CaHPO<sub>4</sub> x 2H<sub>2</sub>O) und Apatite (Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>X, X=OH, Cl, F). Auch für die Calciumphosphate ist ein Einsatz in der Düngemittelindustrie absehbar.

**Tabelle 37: Produktsteckbrief Calciumphosphat**

Name	Calciumphosphat (Ca-P)		
Chemische Formel	CaHPO <sub>4</sub> x 2H <sub>2</sub> O → Dicalciumphosphat bzw. Brushit Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH → Hydroxyapatit (PCP)		Kraus und Conzelmann, 2021
Ausgangsmaterial	Prozesswasser, Faulschlamm, Klärschlammverbrennungasche		
Verfahrensart	Fällung bzw. Kristallisation, Fällung nach nasschemischem KSA-Aufschluss		
P-Gehalt	8 – 20 % P TM 20 – 45 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM		Spörri et al., 2020
Art des Rezyklats	Pulver, Granulat (nach Aufarbeitungsschritt)		
Schadstoffe	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	Ca-P aus Fällung & Kristallisation: Organische Schadstoffe verbleiben größtenteils im P-abgereicherten Schlamm Ca-P aus nasschemischem KSA-Aufschluss: Frei von organischen Verunreinigungen und hygienisch unbedenklich	Egle et al., 2014
	Anorganische Schadstoffe	Ca-P aus Fällung & Kristallisation: sehr geringe Schwermetallgehalte (Einhaltung der Vorgaben der DüMV) Ca-P aus nasschemischem KSA-Aufschluss: Schwermetall-belastung ist abhängig vom Ausgangsmaterial und Verfahrensführung	Egle et al., 2014
Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung	Wasserlöslichkeit: < 5 % P <sub>ges</sub> (Brushit) NAC-Löslichkeit: 90 % P <sub>ges</sub> (Brushit), gering (Hydroxyapatit) CA-Löslichkeit: 99 % P <sub>ges</sub> (Brushit), moderat (Hydroxyapatit)		Kraus und Conzelmann, 2021

		Kratz et al., 2019 Spörri et al., 2020
<b>Verfahrensbeispiele</b>	Ash2Phos, Gifhorn, Leachphos, PhosForce	
<b>Verwertungsweg</b>	Direkte Anwendung als Düngemittel (gilt nicht für Hydroxyapatit) & Intermediat (Rohphosphat-Substitut) in der Düngemittelproduktion	Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Klassifizierung</b>	<u>Europa (internationales Recht):</u> EU-DüPV (EU) 2019/1009: Anhang II Komponentenmaterialkategorie (CMC) 12: gefällte Phosphatsalze und deren Folgeprodukte EU-Öko-VO (EU) 2018/848: wird geprüft <u>Deutschland (nationales Recht):</u> DüMV Anlage I, Abschnitt 1.2: Phosphatdünger	
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	EU-DüPV (EU) 2019/1009 REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Registrierung in einem Dossier) DüMV	

### 5.3.3 Eisen(II)Phosphat (Vivianit)

Vivianit ist ein Eisen(II)Phosphat (Tabelle 26) und bildet sich während des Faulungsprozesses in Kläranlagen, die Eisen als Fällmittel nutzen. Vivianit findet keinen direkten Einsatz in der Düngemittelindustrie; nach einer Nachbehandlung ist dies jedoch denkbar. (Kraus & Conzelmann, 2021)

**Tabelle 38: Produktsteckbrief Eisen(II)Phosphat (Vivianit)**

<b>Name</b>	Eisenphosphate (Fe-P)	
<b>Chemische Formel</b>	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \times 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Eisen(II)Phosphat bzw. Vivianit}$	Kratz et al., 2019
<b>Ausgangsmaterial</b>	Faulschlamm (vorausgegangene Chem-P Fällung)	Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Verfahrensart</b>	Magnetische Abtrennung	Kraus und Conzelmann, 2021
<b>P-Gehalt</b>	k.A.*	
<b>Art des Rezyklats</b>	Pulver	



<b>Schadstoffe</b>	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	k.A.* (allgemein schadstoffarm)	Kraus und Conzelmann, 2021
	Anorganische Schadstoffe	k.A.* (allgemein schadstoffarm)	Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung</b>	NAC-Löslichkeit: gut CA-Löslichkeit: gut		Kraus und Conzelmann, 2021 Kratz et al., 2019
<b>Verfahrensbeispiele</b>	ViviMag		Korving und Hansen, 2022
<b>Verwertungsweg</b>	Direkte Verwendung als Düngemittel ungeeignet nach Nachbehandlung denkbar; Testungen stehen noch aus		Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Klassifizierung</b>	k.A.		
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	EU-DüPV (EU) 2019/1009 REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Registrierung in einem Dossier) DüMV		

#### 5.3.4 P-haltiges Calcium-Silikat-Hydrate

P-haltiges CSH (Tabelle 27) kann aus dem Schlammwasser gefällt werden. Das eingesetzte CSH bietet eine reaktive Oberfläche an der die Phosphate adsorbieren. P-haltiges CSH kann als Düngemittel angewendet werden und gilt als gut pflanzenverfügbar (Montag et al. 2015; Kratz et al., 2019).

**Tabelle 39: Produktsteckbrief P-haltiges CSH**

<b>Name</b>	P-haltiges CSH (Hydroxyapatit ähnliche Komponenten)		
<b>Chemische Formel</b>	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH} \rightarrow \text{Hydroxyapatit ähnliche Komponente}$ $\text{CaHPO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Brushit}$		
<b>Ausgangsmaterial</b>	Zentrat aus der Schlammmentwässerung		
<b>Verfahrensart</b>	Kristallisation an CSH-Silikat		
<b>P-Gehalt</b>	2 – 5 % P TM 5 – 12 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM		DPP, 2018a
<b>Art des Rezyklats</b>	Granulat		
<b>Schadstoffe</b>	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	Unterschreitet die Grenzwerte der DüMV	LFU, 2015

	Anorganische Schadstoffe	Unterschreitet die Grenzwerte der DüMV	LFU, 2015
<b>Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung</b>	Wasserlöslichkeit: 0,14-4,1 % P <sub>ges</sub> NAC-Löslichkeit: 82 % P <sub>ges</sub> CA-Löslichkeit: 49-85 % P <sub>ges</sub>		Kratz et al., 2019
<b>Verfahrensbeispiele</b>	P-RoC, SIMPhos		
<b>Verwertungsweg</b>	P-Substitut		
<b>Klassifizierung</b>	<u>Europa (internationales Recht):</u> EU-DüPV (EU) 2019/1009: <i>Anhang II Komponentenmaterialkategorie (CMC) 12: gefällte Phosphatsalze und deren Folgeprodukte</i> <u>Deutschland (nationales Recht):</u> DüMV Anlage I, Abschnitt 2: mineralischer Nährstoffdünger		
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	EU-DüPV (EU) 2019/1009 REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Registrierung in einem Dossier) DüMV		

### 5.3.5 Phosphorsäure

Phosphorsäure (Tabelle 28) entsteht als Produkt der nasschemischen Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche. Die Schadstoffgehalte sind abhängig vom Verfahren und der möglichen technischen Abtrennung von Schadstoffen. Phosphorsäure findet ihren Einsatz im industriellen Bereich je nach Spezifikation und Reinheit, welche durch gezielte Aufarbeitungsschritte entsprechend eingestellt werden kann. Ebenso findet sie ihren Einsatz als Intermediat in der Düngemittelproduktion. Jedoch steht sie in direkter Konkurrenz zur von der Düngemittelindustrie selbst hergestellten Phosphorsäure aus Rohphosphat. (Kratz et al., 2021)

**Tabelle 40: Produktsteckbrief Phosphorsäure**

<b>Name</b>	Phosphorsäure	
<b>Chemische Formel</b>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	
<b>Ausgangsmaterial</b>	Klärschlamm, Klärschlammverbrennungsasche	
<b>Verfahrensart</b>	Nasschemisch, thermochemisch	
<b>P-Gehalt</b>	17 % P TM/ 39 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM → 54 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 24 % P / 54 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM → 75 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 27 % P / 62 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM → 85 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Bertau et al., 2018 Spörri et al., 2020 Wagner et al., 2020]

<b>Art des Rezyklats</b>	Flüssig		Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Schadstoffe</b>	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	Frei von organischen Schadstoffen und hygienisch unbedenklich	Spörri et al., 2020 Kraus und Conzelmann, 2021
	Anorganische Schadstoffe	Abhängig vom Verfahren und Ausgangsmaterial	Egle et al., 2014
<b>Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung</b>	-		
<b>Verfahrensbeispiele</b>	Grenzbach (thermochemisch); PARFORCE, Phos4Life, TetraPhos (nasschemisch)		
<b>Verwertungsweg</b>	Einsatz in der Düngemittelproduktion (MGA), andere industrielle bzw. technische Anwendungen (TGA) Einschränkung: Phosphorsäure, die aus Abfällen gewonnen wurde, ist nicht für die Lebensmittelindustrie zugelassen.		Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Klassifizierung</b>	z.B. Technical grade; Merchant grade (vgl. Tabelle 33)		
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (falls noch nicht registriert: Registrierung in einem Dossier) Für den Einsatz in der Düngemittelindustrie gelten ebenfalls: EU-DüPV (EU) 2019/1009 DüMV		Blöhse et al., 2020

### 5.3.6 P-haltiges Ascheprodukt aus nasschemischen Verfahren

P-haltige Aschen aus nasschemischen Verfahren (Tabelle 29) sind charakterisiert als eine Mischung aus Superphosphat und anderen noch in der Aschematrix befindlichen Bestandteilen, die sich innerhalb des nasschemischen Prozesses nicht lösen (bspw. Eisenoxide und Quarze). Die Schadstofffracht ist abhängig von der Inputasche. Eine Schadstoff-Ausschleusung kann im Prozess des nasschemischen Aufschlusses integriert werden. Das Asche-Rezyklat kann zudem um weitere Nährstoffkomponenten ergänzt werden und direkt als Düngemittel vermarktet werden.

**Tabelle 41: Produktsteckbrief P-haltiges Ascheprodukt aus nasschemischen Verfahren**

<b>Name</b>	P-haltiges Ascheprodukt aus nasschemischen Verfahren z.B. Standard- und Mehrnährstoffdünger P-/NP-/oder NPS-Dünger	
<b>Chemische Formel</b>	NPS-Dünger (N: 12 M-%, P: 27 M-%, S: 8 M-%)	
<b>Ausgangsmaterial</b>	Klärschlammverbrennungasche	
<b>Verfahrensart</b>	Nasschemischer Aufschluss	
<b>P-Gehalt</b>	ca. 20 % P TM (NPS-Rezyklat <sup>2</sup> PHOS4Green-Verfahren) ca. 46 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM (NPS-Rezyklat <sup>2</sup> PHOS4Green-Verfahren)	Seraplant, 2018

<b>Art des Rezyklats</b>	Granulat (nach Aufarbeitungsschritt)		
<b>Schadstoffe</b>	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	Frei von organischen Schadstoffen und hygienisch unbedenklich	Kraus und Conzelmann, 2021
	Anorganische Schadstoffe	Einhaltung der Grenzwerte abhängig von Ausgangsmaterial oder Schwermetallabscheidung (Eingangsstrom muss bereits die Grenzwerte der DüMV einhalten)	Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung</b>	Wasserlöslichkeit: 18,4 % $P_2O_5$ (NPS-Rezyklat PHOS4Green-Verfahren) NAC- und Wasserlöslichkeit: 27,4 % $P_2O_5$ (NPS-Rezyklat PHOS4Green-Verfahren) CA-Löslichkeit: k.A.		Seraplan, 2018
<b>Verfahrensbeispiele</b>	PHOS4Green, pontes pabuli		
<b>Verwertungsweg</b>	Direkter Einsatz als Düngemittel		Kraus und Conzelmann, 2021
<b>Klassifizierung</b>	<u>Europa (internationales Recht):</u> EU-DüPV (EU) 2019/1009: <u>Deutschland (nationales Recht):</u> DüMV Anlage I, Abschnitt 1: Mineralische Mehrnährstoffdünger		
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	EU-DüPV (EU) 2019/1009 REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Registrierung in einem Dossier) DüMV		

### 5.3.7 P-haltiges Ascheprodukt aus thermischen Verfahren

P-haltige Aschen aus thermischen Verfahren (Tabelle 30) werden mit Additiveinsatz aus Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungsasche erzeugt. Die Additive (z. B. Mg-, Na-, K-basiert) werden eingesetzt, um eine Schadstoffabreicherung im Asche-Rezyklat zu erreichen. Sie bestehen aus einer Mischung aus Rhenaniaphosphat ( $CaNaPO_4$ ) und weiteren Aschebestandteilen wie beispielsweise Eisenoxiden oder Quarz. Die Schadstofffracht im Rezyklat ist direkt abhängig von der Inputasche. Das Rezyklat kann direkt als Dünger eingesetzt werden.

**Tabelle 42: Produktsteckbrief P-haltiges Ascheprodukt aus thermischen Verfahren**

<b>Name</b>	P-haltiges Ascheprodukt aus thermochemischen Verfahren z.B. Rhenaniaphosphat	
<b>Chemische Formel</b>	$CaNaPO_4 \rightarrow$ Rhenaniaphosphat	
<b>Ausgangsmaterial</b>	Klärschlamm, Klärschlammverbrennungsasche	
<b>Verfahrensart</b>	Thermochemisch	

<b>P-Gehalt</b>	2 - 13 % P <sub>TM</sub> 5-30 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM		Klose et al., 2020
<b>Art des Rezyklats</b>	Asche, Granulat (nach Aufarbeitungsschritt)		Egle et al., 2014
<b>Schadstoffe</b>	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	weitestgehend frei von organischen Schadstoffen und hygienisch unbedenklich	DPP, 2018b DPP, 2019
	Anorganische Schadstoffe	Einhalten der Grenzwerte der DüMV Fe: 2 – 20 %	Klose et al., 2020
<b>Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung</b>	Wasserlöslichkeit: < 1 % P <sub>ges</sub> NAC-Löslichkeit: 28 % P <sub>ges</sub> (MgCl <sub>2</sub> ); > 70 % P <sub>ges</sub> (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> und Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) CA-Löslichkeit: > 65 % P <sub>ges</sub> (MgCl <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> und Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )		Kratz et al., 2019
<b>Verfahrensbeispiele</b>	AshDec, EuPhoRe, Drehrohrkessel (Werkstätten heating -systems GmbH), P-XTRACT		
<b>Verwertungsweg</b>	Direkte Anwendung als Düngemittel		Klose et al., 2020
<b>Klassifizierung</b>	<u>Europa (internationales Recht):</u> EU-DüPV (EU) 2019/1009: Anhang II Komponentenmaterialkategorie (CMC) 13: thermischer Oxidationsmaterialien und deren Folgeprodukte EU-Öko-VO (EU) 2018/848: wird geprüft <u>Deutschland (nationales Recht):</u> DüMV Anlage I, Abschnitt 1: Phosphatdünger		Arnold et al., 2021
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	EU-DüPV (EU) 2019/1009 REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Registrierung in einem Dossier gemäß) DüMV (EU) 2019/51		

### 5.3.8 P-haltige Schlacke

Eine P-haltige Schlacke (Tabelle 31) ist ein Calcium-Silicium-Mischphosphat, welches bei der Schmelze in einem thermochemischen Prozess entsteht (Spörri et al., 2017). Es ähnelt dem sogenannten „Thomasmehl“ welches als Nebenprodukt in der Eisen- und Stahlindustrie entsteht. Die organischen Verbindungen werden bei den hohen Verbrennungstemperaturen zerstört, Schwermetallgehalte sind als gering einzuschätzen (LFU, 2015; Hagspiel et al., 2018).

**Tabelle 43: Produktsteckbrief P-haltige Schlacke**

<b>Name</b>	P-haltige Schlacke		
<b>Chemische Formel</b>	Calcium-Silicium-Mischphosphat		
<b>Ausgangsmaterial</b>	Klärschlamm (Klärschlammverbrennungsasche)		
<b>Verfahrensart</b>	Thermochemisch (im Schmelzofen)		
<b>P-Gehalt</b>	8-14 % P <sub>TM</sub> 20-30 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM		
<b>Art des Rezyklats</b>	Schlackegranulat (für weitere Verwendung physikalische Aufbereitung notwendig)		
<b>Schadstoffe</b>	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	Frei von organischen Verbindungen und hygienisch unbedenklich	Scholz und Bilbao, 2018
	Anorganische Schadstoffe	Schwermetallgehalt unter Grenzwert der DüPV	Scholz und Bilbao, 2018
<b>Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung</b>	Wasserlöslichkeit: <1 % P <sub>ges</sub> NAC-Löslichkeit: 1,6 % P <sub>ges</sub> CA-Löslichkeit: > 23 - 54 % P <sub>ges</sub> (Mephrec) <sup>1</sup> ; 95 % P <sub>ges</sub> (KSMF-Prozess) <sup>2</sup>		<sup>1</sup> Kratz et al., 2019 <sup>2</sup> Scholz und Bilbao, 2018
<b>Verfahrensbeispiele</b>	KSMF-Prozess, KRN-Mephrec		
<b>Verwertungsweg</b>	Direkte Anwendung als Düngemittel, Intermediat in der Düngemittelproduktion		Scholz und Bilbao, 2018
<b>Klassifizierung</b>	<u>Europa (internationales Recht):</u> EU-DüPV (EU) 2019/1009: Anhang I: Produktfunktionskategorien (PFC) 1(C)(I)(a)(i): Festes anorganisches Einnährstoff-Makronährstoff 1b <u>Deutschland (nationales Recht):</u> DüMV		Iwakiri, 2023
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	EU-DüPV (EU) 2019/1009 REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 DüMV		

### 5.3.9 Weißer Phosphor

Weißer Phosphor (Tabelle 32) wird über eine thermische Behandlung des Klärschlammes (rück)gewonnen. P<sub>4</sub> kann einer Reihe von P-Derivaten verarbeitet werden, darunter Phosphorsäure, Phosphorchloride und -sulfide.

**Tabelle 44: Produktsteckbrief Weißer Phosphor**

<b>Name</b>	Weißer Phosphor (P <sub>4</sub> )		
<b>Chemische Formel</b>	P <sub>4</sub>		
<b>Ausgangsmaterial</b>	Klärschlamm		
<b>Verfahrensart</b>	Thermochemisch		
<b>P-Gehalt</b>	100 %		
<b>Art des Rezyklats</b>	fest		
<b>Schadstoffe</b>	Organische Schadstoffe und Hygieneparameter	Frei von organischen Schadstoffen und hygienisch unbedenklich	Spörri et al., 2020
	Anorganische Schadstoffe	k.A.	
<b>Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung</b>	-		
<b>Verfahrensbeispiele</b>	FlashPhos		
<b>Verwertungsweg</b>	Ausgangsstoff zur Herstellung hochwertiger Phosphorprodukte (u.a. Düngemittelindustrie)		Boer et al., 2019
<b>Klassifizierung</b>	-		
<b>Rechtliche Vorgaben</b>	-		

## 5.4 Charakterisierung der Rezyklate

Zentrale Bestandteile der Charakteristik der unterschiedlichen Rezyklate sind neben der Einhaltung rechtlicher Vorgaben auch die technischen Vorgaben, also die „Wirksamkeit“ bzw. Anwendbarkeit im jeweiligen Einsatzbereich.

### 5.4.1 Chemische Zusammensetzung der Rezyklate

Für den Einsatz von Phosphor-Rezyklaten ist es wichtig, die Zusammensetzung der Produkte (Phosphor-Bindungsform, Nebenbestandteile, Schadstoffe, etc.) und im Speziellen den Phosphorgehalt zu kennen. Dieser wird üblicherweise als Phosphorpentoxid-Gehalt (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) angegeben. Diese Angabe ist unter anderem relevant, da P-Recyclingdünger laut Düngemittelverordnung (DüMV) einen Mindestgehalt von 10 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aufweisen müssen (BMEL, 2020).

### 5.4.2 Physikalische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften sind relevant, wenn das Produkt direkt als Düngemittel angewendet werden soll. Dazu sollte es möglich sein, es mit den üblichen Geräten für die



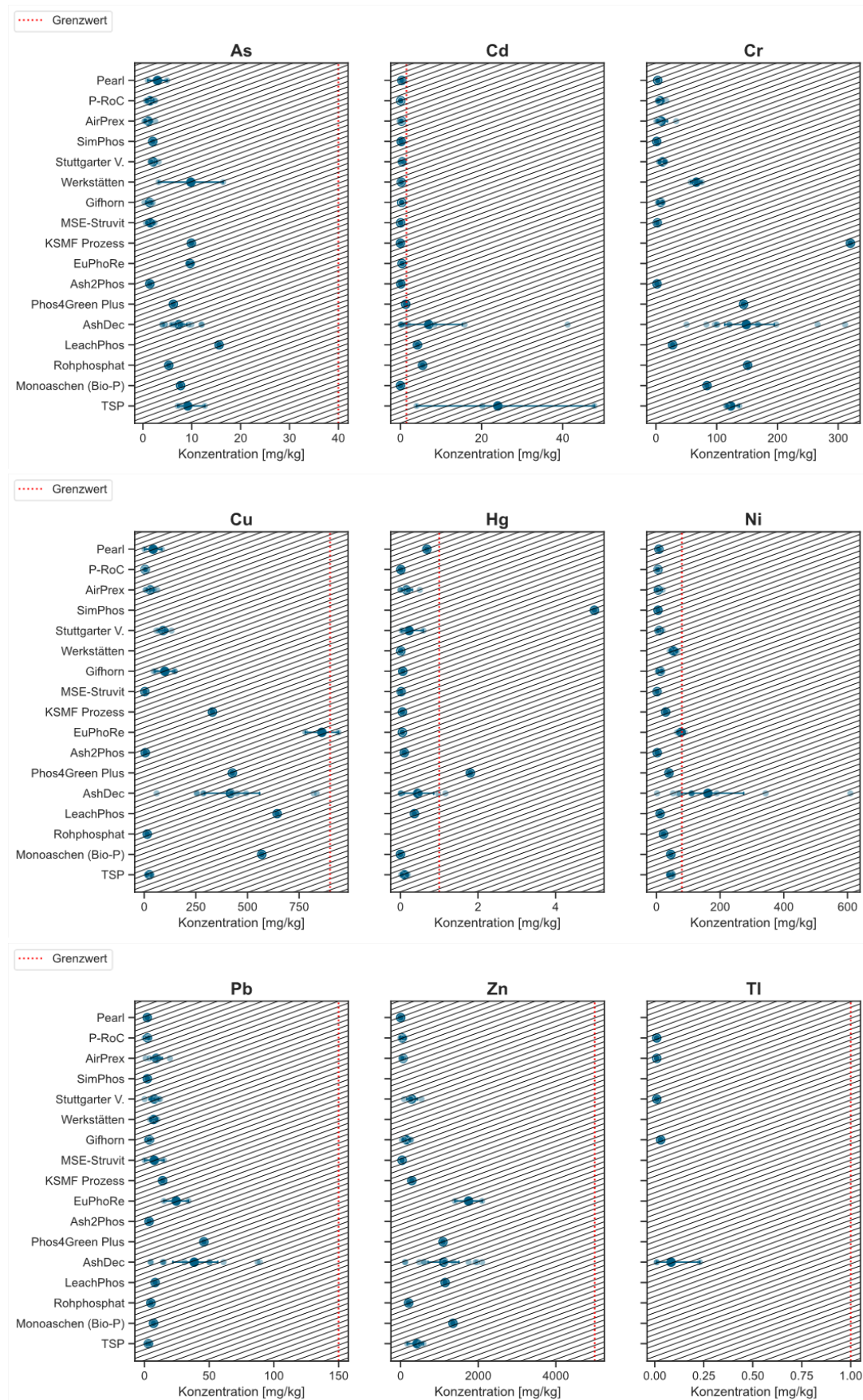
Anwendung von Düngemitteln in der Landwirtschaft auszubringen. Zudem ist die Lagerfähigkeit des Produkts wichtig. Die physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Rezyklate differieren. Phosphorsäure, die in einen herkömmlichen Produktionsprozess eingespeist werden soll, ist beispielsweise nicht direkt mit Struvit, welches direkt als Düngemittel ausgebracht werden soll, vergleichbar.

### 5.4.3 Schadstoffe

In der Abwasserreinigung ist der Klärschlamm die Senke für Schadstoffe, die nicht ins Gewässer eingetragen werden sollen, da sie die Umwelt potenziell belasten. Diese Schadstoffe können auch in den aus Klärschlamm gewonnenen Produkten enthalten sein. Es wird zwischen anorganischen Schadstoffen (Schwermetalle) und organischen Schadstoffen (Dioxine, dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Arzneimittelrückstände, etc.) unterschieden. Beim Einsatz der Rezyklate als Düngemittel werden schadstoffarme Produkte gefordert sowie Schadstoffgrenzwerte in der DüMV vorgeschrieben (vgl. Tabelle 22).

Viele Rezyklate werden in Verfahren erzeugt, die eine thermische Behandlung beinhalten. Bei der Verbrennung von Klärschlamm bei Temperaturen über 850 °C und einer Verweilzeit von mindestens zwei Sekunden ist davon auszugehen, dass ein Großteil der organischen Verbindungen zerstört und ein hygienisch unbedenkliches Produkt erzeugt wird. Hygienisch unbedenklich bedeutet, dass keine organischen Krankheitserreger, organische Toxine o. Ä. enthalten sind, die die Gesundheit von Menschen, Tieren oder Pflanzen gefährden. In einer Studie zur Untersuchung von Arzneimittelrückständen in Phosphor-Rezyklaten, wurden keine organischen Rückstände festgestellt, wenn der Klärschlamm bei Temperaturen oberhalb von 500 °C thermisch behandelt wurde (Stenzel et al., 2019). In Abbildung 59 sind die Schadstoffgehalte der Rezyklate einiger Verfahren dargestellt. Die Schadstoffgehalte der dargestellten Rezyklate sind direkt abhängig von der Zusammensetzung des Eingangsstoffes und den Prozessparametern des jeweiligen Verfahrens. Die Daten sind folgenden Quellen entnommen: Heinitz et al., 2013; Meyer und Steinmetz, 2013; Severin et al., 2013; Egle et al., 2014; LfU, 2015; Muskulus und Wilken, 2016; Seraplan, 2018; Jacobi et al., 2022; Moggert, 2022; Iwakiri 2023.

**Abbildung 59: Schadstoffgehalte der Rezyklate einiger Verfahren und Grenzwerte gemäß DüMV**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 5.4.4 Pflanzenverfügbarkeit

Der Düngemittelsektor stellt eines der Hauptanwendungsgebiete für Phosphate dar. Für die Wirksamkeit eines Düngers ist nicht die ausgebrachte Phosphatmenge entscheidend, sondern inwieweit das Phosphat für die Pflanze verfügbar ist und von ihr aufgenommen werden kann. Dies ist wiederum abhängig davon, wie das Phosphat gebunden vorliegt. Einen ersten Ansatzpunkt für die Beurteilung der Düngewirkung stellt daher die Löslichkeit nach den standardisierten Prüfverfahren nach VDLUFA Methodenbuch II dar. Die verschiedenen Extraktionsverfahren bilden die Löslichkeit unterschiedlicher P-Bindungsformen ab. Die Löslichkeit wird in einem einheitlichen Untersuchungsprogramm in den Standardextraktionsmitteln Wasser, Zitronensäure (CA) und Neutral-Ammoncitrat (NAC) bestimmt. Der P-Anteil eines Düngers, der im Boden als gelöstes Phosphat vorliegt und sofort pflanzenverfügbar ist, wird durch die Wasser-Löslichkeit ermittelt. Jedoch sind auch nicht wasserlösliche Düngemittel wirksam. Der gebundene P-Anteil ist nicht direkt pflanzenverfügbar, kann jedoch von Pflanzen durch eine Ansäuerung des Bodens im Wurzelraum gelöst und damit verfügbar gemacht werden. Um diesen Anteil darzustellen, können die CA- und die NAC-Löslichkeit ermittelt werden (Theilen et al., 2019). Untersuchungen nach VDLUFA stellen ein Verfahrenskonzept dar, welches ermöglicht, dass die verschiedenen Rezyklate vergleichbar charakterisiert werden können. Dennoch lassen sich diese Löslichkeiten nur eingeschränkt auf die Realität übertragen. Die Prozessschritte im Boden sind nicht nur abhängig von den drei abgebildeten Löslichkeiten, sondern einer umfassenderen Pflanzenphysiologie sowie dem Boden selbst. Auffällig ist, dass die wenigsten Rezyklate die nach DüMV geforderten Wasserlöslichkeit von mind. 2,5 %  $P_2O_5$  einhalten.

##### Phosphatlöslichkeit von Phosphor-Rezyklaten

Die Phosphatlöslichkeiten von Phosphor-Rezyklaten sind in den meisten Fällen sehr gering bis mittelstark. Aus diesem Grund können die Rezyklate, insbesondere Rezyklate aus thermischen Prozessen, die Anforderungen der Düngemittelverordnung nicht hinreichend erfüllen. Die sehr strengen Anforderungen an die P-Löslichkeit nach DüMV wird von einem Großteil der Stakeholder in Frage gestellt. Die Deutsche Phosphor Plattform (DPP) hat dazu im DPP-Memorandum die Empfehlung ausgesprochen, die Streichung der Mindestanforderung (nach Anlage 2 Tabelle 5.7 der DüMV) an die Wasserlöslichkeit, die kombinierte Neutralammoncitrat- und Wasserlöslichkeit sowie die Begrenzung der Mineralsäurelöslichkeit anzuvisieren. Diese These wird gestützt durch eine Reihe von Pflanzenversuchen, die zeigen, dass gering wasserlösliche Rezyklate eine mit Mineraldüngern vergleichbare Pflanzenverfügbarkeit aufweisen. Das BMEL erarbeitet dazu eine Empfehlung zur Änderung der düngemittelrechtlichen Vorschriften. (Knickel, 2020)

Ebenso gibt es die Möglichkeit, die Pflanzenverfügbarkeit anhand des Pflanzenwachstums nachzuweisen. Dazu sind in der Vergangenheit neben Topfversuchen auch Feldversuche mit Phosphor-Rezyklaten durchgeführt worden.

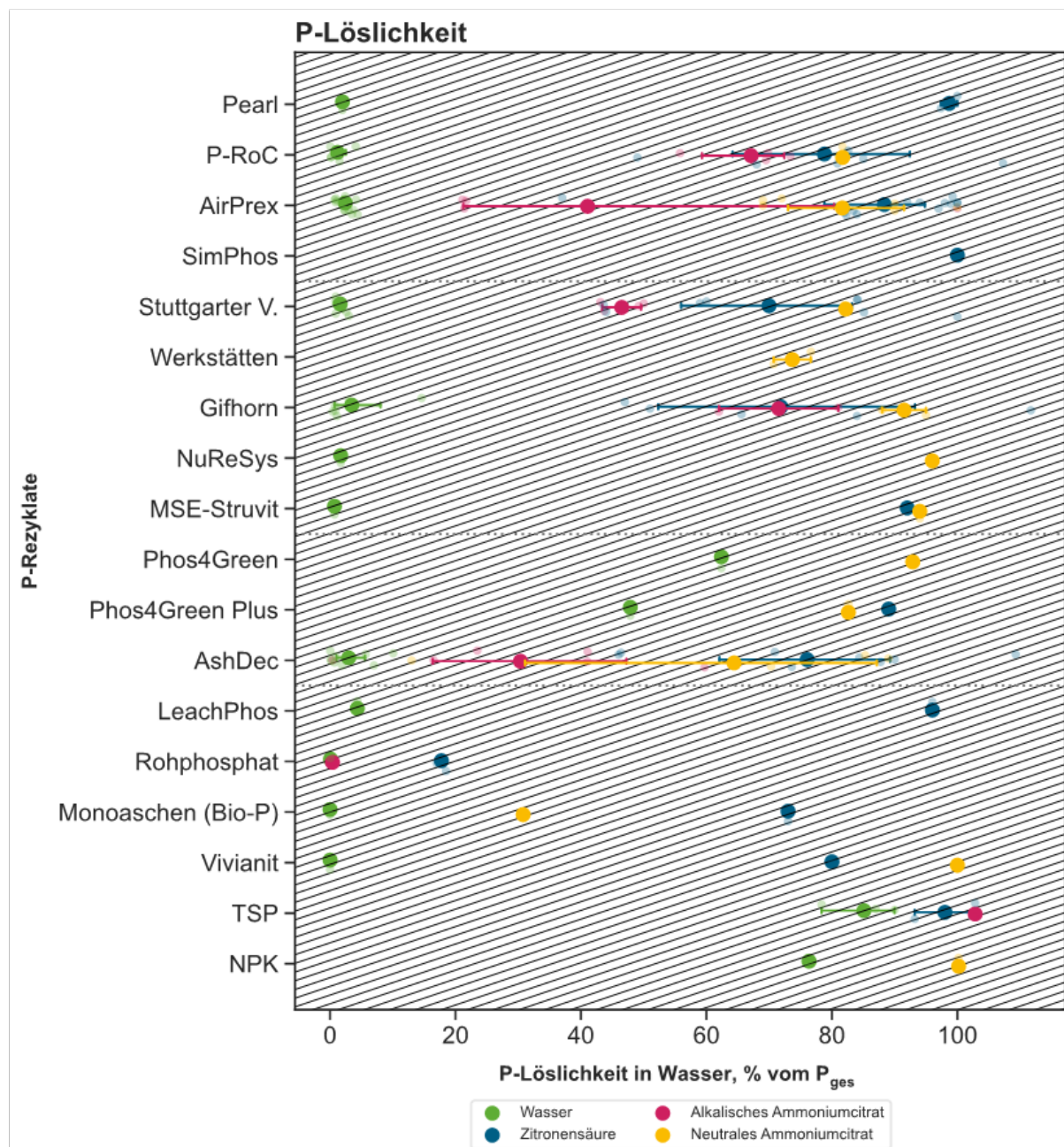
Dennoch sind die Aussagekraft und insbesondere die Vergleichbarkeit der Versuche untereinander umstritten. So lassen sich Rezyklate, die unter den gleichen Versuchsbedingungen getestet wurden, zwar untereinander vergleichen, aber nicht mit abweichend durchgeführten Versuchen. Die Faktoren, die eine Rolle für die Nährstoffaufnahme spielen sind sehr divers. So spielen beispielsweise die Eigenschaften des Versuchssubstrats eine ebenso wichtige Rolle wie die Versuchspflanze, die Versuchsdauer, Versuchsvolumina und verwendete Referenzdünger. Auch innerhalb der Rezyklate können Unterschiede bestehen. So lassen sich nicht immer alle produzierten Rezyklate eines Verfahrens einheitlich charakterisieren bzw. bewerten. Insbesondere ist dies abhängig vom Inputstrom des jeweiligen



Verfahrens, der P-Bindungsform im Ausgangsmaterial sowie den Verfahrensbedingungen und der Zusammensetzung und Beschaffenheit des Rezyklats. (Goldbach et al., 2021; BMEL, 2020).

Derzeit fehlende standardisierte Pflanzversuche machen eine fundierte Aussage schwierig. Aufgrund hoher Variabilität der Rezyklate ist es wichtig, dass die Düngemittelwirksamkeit und rechtliche Vorgaben überprüft und eingehalten werden. Die Rezyklate einiger Verfahren sind mit ihrer P-Löslichkeit in Abbildung 60 dargestellt. Die Daten wurden folgenden Quellen entnommen: Kern et al., 2008; Scheidig et al., 2009; Schick, 2010; Cabeza et al., 2011; Pinnekamp et al., 2011; Heinitz et al., 2013; Severin et al., 2013; Egle et al., 2014; LfU, 2015; Muskulus und Wilken, 2016; Moggert, 2022, Jacobi et al., 2022.

**Abbildung 60: P-Löslichkeit der Rezyklate einiger Phosphorrückgewinnungsverfahren**



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### 5.4.5 Rechtliche Bewertung

Die Aspekte zur Düngewirksamkeit und Unschädlichkeit hinsichtlich Schwermetalleintrags in die Umwelt, können anhand der Pflanzenverfügbarkeit und der chemischen Zusammensetzung bewertet werden. Dazu müssen die Rezyklate, die ein Düngemittel- bzw. Düngemittelzwischenprodukt darstellen, die Grenzwerte und Beschaffenheit nach nationalem Recht der DüMV bzw. auf EU-Ebene der EU-DüPV einhalten (Tabelle 22) und damit eine düngemittelrechtliche Zulassung erlangen. Auch der Ausgangsstoff zur Düngemittelherstellung muss die düngemittelrechtlichen Vorschriften einhalten.

Bei Phosphorsäure als Rezyklat sind andere Einstufungen, wie z. B. Merchant Grade Acid (MGA) und Technical Grade Acid (TGA) heranzuziehen, um Qualitäten und mögliche Verwertungswege einstufen zu können.

#### 5.4.6 Verwertungsrouten

Die Möglichkeiten des Rezyklat-Einsatzes sind angelehnt an die Prozesskette der Phosphatverarbeitung selbst. In Deutschland ist das Hauptanwendungsgebiet für Phosphate mit 83 % die Düngemittelindustrie, es folgen weitere industrielle Anwendungen (z. B. Reinigungs-, Korrosionsschutz- und Flammenschutzmittel) mit 11 % und die Nahrungs- und Futtermittelindustrie mit 6 % (BGR, 2014). Im Wirtschaftsjahr 2020/21 wurden 192.182 t  $P_2O_5$  im Düngemittelbereich eingesetzt (Statistischen Bundesamt 2021).

Die Basis für P-haltige Erzeugnisse stellt in der Regel Rohphosphat aus phosphathaltigem Erz dar. Rohphosphat kann granuliert und direkt als Dünger eingesetzt werden. In der konventionellen Düngemittelproduktion wird es zu verschiedenen Düngemitteln aufgeschlossen. Dies kann über drei mögliche Routen geschehen: Die Superphosphatrouten, den nasschemischen Aufschluss des Rohphosphats zu Phosphorsäure (Mixed-Acid-Route) oder die Nitro-Phosphat-Route. Bei der Superphosphatrouten (25–35 % der in Deutschland eingesetzten Düngemittel) wird das Rohphosphat entweder mit Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) zu Single Super Phosphat (SSP) oder mit Phosphorsäure zu Triple Super Phosphat (TSP) aufgeschlossen. Die Superphosphate können direkt eingesetzt oder zu Stickstoff Phosphat- (NP), Stickstoff Phosphat Kalium- (NPK) und Phosphat Kalium-Düngern (PK) aufbereitet werden (Kraus und Conzelmann 2021b). Über den nasschemischen Aufschluss des Rohphosphats kann Phosphorsäure hergestellt werden. Bei der Mixed-Acid-Route (50–60 % der in Deutschland eingesetzten Düngemittel) erfolgt dieser Aufschluss mittels Schwefelsäure. Aus der entstehenden Phosphorsäure wird anschließend durch Zugabe von Ammoniak ( $NH_3$ ) Mono- oder Diammoniumphosphat (MAP bzw. DAP) hergestellt. Dieses kann direkt als Dünger eingesetzt oder durch Zugabe von Kalisalzen zu NP- und NPK-Düngern aufbereitet werden. Bei der Nitro-Phosphat-Route (10–20 % der in Deutschland eingesetzten Düngemittel) wird das Rohphosphat mit Salpetersäure ( $HNO_3$ ) aufgeschlossen. Es entsteht Nitro-Phosphorsäure, die mit Ammoniak neutralisiert und zu NP-, NPK- oder PK-Düngemitteln aufbereitet wird. (Kraus et al., 2021)

Die bei der Mixed-Acid-Route entstandene Phosphorsäure wird hauptsächlich zur Herstellung von Düngemitteln eingesetzt. Alternativ wird sie veredelt und entsprechend in industriellen Bereichen genutzt. Darunter sind beispielsweise die Metall- und Wasserbehandlungsindustrie, Futtermittelindustrie und Lebensmittelindustrie zu nennen. (Boer et al., 2019) Die verschiedenen Phosphorsäure-Qualitätsstufen sind Tabelle 33 zu entnehmen.

**Tabelle 45: Qualitätsmerkmale verschiedener Phosphorsäureklassen**

Inhaltstoffe	Merchant Grade	Food Grade	Technical Grade	Electronic Grade	Pharma Grade
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> [%]	69-77	75-85	85 (mind.)	85-87	85-88-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	50-58	-	62,3	-	-
K <sub>2</sub> O [%]	0,01	-	-	-	-
CaO [%]	0,07	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	1,2	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,75	-	-	-	-
MgO [%]	0,75	-	-	-	-
Fe [ppm]	-	20	10 (max.)	6	50
As [ppm]	-	1	1 (max.)	0,2	1,5
Pb [ppm]	-	5,0	10 (max.)	-	1,5
Cl <sup>-</sup> [ppm]	-	5,0	15 (max.)	3	50
F <sup>-</sup> [ppm]	-	10	100 (max.)	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [ppm]	2,7	30	300 (max.)	20	100
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [ppm]	-	-		5	-
Ca/Mg [ppm]			50 (max.)	17	-
Anwendung	Düngemittel-industrie	Lebensmittel-industrie Metallverarbeit- ung Medizin	Metallverarbeit- ung	Metallverarbeit- ung (Mikro-) Elektronik	Pharma industrie
Quelle	Simplot Phosphoric acid MGA 0-52-0 Product Data Sheet 2022.	Commission Regulation (EU) No 231/2012 of 9 March 2012.	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> – technical grade, GACL, Product Data Sheet 2022.	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> – electronic grade, fisher scientific, Product Data Sheet 2022.	Ortho H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> – pharma grade, PanReac AppliChem, Product Data Sheet 2022.

Das mengenmäßig größte Anwendungsgebiet für primäre Phosphate ist der Düngemittelsektor. In diesem Bereich bietet sich auch das größte Marktpotenzial für Phosphor-Rezyklate an. Diese können direkt als Düngemittel in der konventionellen Landwirtschaft oder im Biolandbau vermarktet werden oder als Intermediate in die Düngemittelproduktion eingespeist werden. Im Falle von Phosphorsäure lassen sich zahlreiche industrielle Bereiche ausweisen wie beispielsweise die Chemieindustrie, Metallurgie, Automobilindustrie, Wasseraufbereitung, etc. Ausgehend von den Primärphosphaten lassen sich folgende Verwertungsrouten ableiten:

#### Direkte Anwendung als Düngemittel

Die Phosphor-Rezyklate können nach der Rückgewinnung direkt als Düngemittel vermarktet werden. Möglicherweise ist eine Konfektionierung für den Einsatz der üblichen Aufbringungstechnik nötig. Rechtliche Voraussetzungen für den direkten Einsatz als Düngemittel sind neben einer düngemittelrechtlichen Zulassung die Einhaltung

düngemittelrechtlicher Vorgaben bezüglich Schadstoffgehalten, Nährstoffgehalten, Löslichkeiten und physikalischen Eigenschaften sowie eine ausreichende Homogenität und nachgewiesene Düngewirkung. (Kraus und Conzelmann, 2021; BMEL, 2020)

Struvit und Brushit (Dicalciumphosphat (DCP)) können direkt als Düngemittel angewendet werden, entweder als Einnährstoffdünger oder als Mischkomponente für Mehrnährstoffdünger. Weitere Produkte, die sich für einen direkten Einsatz als Düngemittel eignen, sind P-haltiges CSH, Mehrnährstoffdünger aus nasschemischen Verfahren und P-haltige Aschen aus thermochemischen Verfahren.

Diese Rezyklate finden voraussichtlich eher regional eine Anwendung (geringere verfügbare Mengen). Ebenso ist die Anwendung für den Ökolandbau möglich. Die Marktetablierung und damit die Erlöse sind teils unsicher und abhängig von den verfügbaren Mengen.

### **Einspeisung in die konventionelle Düngemittelherstellung**

Bei der Einspeisung in den konventionellen Düngemittelherstellungsprozess können Phosphor-Rezyklate den Ausgangsstoff Rohphosphat oder ein Zwischenprodukt wie Phosphorsäure ersetzen. Rohphosphat kann durch Calciumphosphate (z. B. DCP oder Apatit) ersetzt werden. Auch Ammoniumphosphate können zum Teil in der Düngemittelindustrie verarbeitet werden. Auch unbehandelte Klärschlammverbrennungsaschen können als Substitut für Rohphosphat dienen.

Dagegen sind Eisenphosphate, magnesiumbasierte Phosphate wie Struvit und aschebasierte Produkte hierfür weniger geeignet. Sie verhalten sich bei den Aufschlüssen in der Düngemittelherstellung anders als die ursprünglich eingesetzten Rohstoffe. Die genannten Produkte können deshalb, wenn überhaupt, nur in geringem Maßstab das Rohphosphat substituieren oder am Ende des Prozesses in kleinen Mengen beigemischt werden (Kraus und Conzelmann, 2021).

Die in Rückgewinnungsverfahren erzeugte Phosphorsäure weist in der Regel MGA-Qualität auf, welche ausreichend für den Einsatz im Düngemittelsektor ist. Diese kann einen Teil der rohphosphatbasierten Phosphorsäure in der Düngemittelproduktion ersetzen und zu verschiedenen P-Einzeldüngern und Mehrnährstoffdüngern weiterverarbeitet werden. Es ist ebenso möglich, dass diese aufgrund einer weitgehenden Schwermetallabtrennung sogar schwermetallärmer ist als die rohphosphatbasierte Phosphorsäure. (Blöhse et al., 2020)

### **Weitere industrielle Anwendungen**

Die wichtigsten Zwischenprodukte für die Herstellung industrieller Phosphate sind weißer Phosphor ( $P_4$ ) und Phosphorsäure. Beide Produkte könnten durch entsprechende Rezyklate ersetzt werden. Weißer Phosphor aus thermischen Verfahren weist eine sehr geringe Schadstoffbelastung und eine hohe Reinheit auf. Damit ist er ein interessanter Ausgangsstoff für die Herstellung verschiedener Produkte für hochpreisige industrielle Anwendungen, z. B. für Brandschutzmittel oder die Lebensmittelindustrie. Die Anwendung abwasserbürtiger Rezyklate ist jedoch derzeit nur für die Verarbeitung zu Düngemitteln erlaubt. Für den Einsatz in Lebensmitteln und Tierfutter, Reinigungsmitteln, Lebensmittelzusätzen und Flammenschutzmitteln ist dieser rechtlich eingeschränkt. Die Akzeptanz für Rezyklate ist bei Tierfutter wahrscheinlich höher als im Lebensmittelbereich. Aktuell verbietet das europäische Futtermittelrecht jedoch den Einsatz von Stoffen, die über die Behandlung von Abwässern gewonnen wurden, unabhängig davon, wie sie weiterverarbeitet werden (Anhang 3 (EG) Nr. 767/2009). (Kraus und Conzelmann, 2020)



#### **5.4.7 Weitere Kriterien**

Es ist zu berücksichtigen, dass weitere Faktoren wie beispielsweise der Aufwand des Phosphorrückgewinnungsverfahrens, Rezyklat-Annahme und -Marketing, etc. eine wichtige Rolle für die wirtschaftliche Etablierung eines Phosphorrückgewinnungsverfahrens spielen. Auch die Preiskalkulation ist von zentraler Bedeutung. Angaben zu Herstellungskosten der jeweiligen Rezyklate lassen sich jedoch derzeit nur schwierig und ungenau abschätzen. Rezyklate sind bisher noch nicht in größeren Mengen verfügbar. Auch die 2022/2023 instabile Lage der Rohstoffmärkte und bei Baustoffen erschweren die Prognosen. Erlöse bzw. Preisschätzungen werden sich am Marktpreis für Rohphosphat orientieren, diese sind jedoch nur als grobe Orientierungswerte zu verstehen. Im Rahmen der Umfrage zu den großtechnisch umgesetzten Phosphorrückgewinnungsverfahren wurden kalkulierbare Mindestmarktpreise bzw. Ziel-Produkt Erlöse oder eine Bezugsgröße am Düngemittelmarkt angegeben. Die Verfahrensentwickler bzw. -betreiber ließen sich die Beantwortung der Frage offen oder verwiesen auf eine interne Geheimhaltung oder bisher unzureichende Studien zum Rezyklat. Es ist davon auszugehen, dass sich die Erlöse für Rezyklate nicht statisch beziffern lassen, sondern ähnlich wie in der chemischen Industrie an einen Index gekoppelt sind. In der chemischen Industrie ist es üblich, dass sich die Preise dem volatilen Markt anpassen.

### **5.5 Anforderungen der Düngemittelproduzenten an die Rezyklate der Phosphorrückgewinnung**

Um dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft Rechnung zu tragen, müssen die Produkte der Phosphorrückgewinnung wieder in den Kreislauf eingespeist werden. Die alleinige Rückgewinnung ist naturgemäß nicht hinreichend.

Betreiber von Düngemittelproduktionsanlagen wurden bzgl. der Anforderung an ein P-Rezyklat zur Weiterverarbeitung als marktfähiges Düngemittel angefragt. Insgesamt liegen nur wenige Informationen veröffentlichungsreif vor. Ein Hindernis stellen die Bedenken der Düngemittelproduzenten gegenüber der Veröffentlichung von Informationen dar, die mögliche strategische Schritte preisgeben und dadurch an Mitbewerber gelangen könnten.

Der Weg von Rezyklaten in die Düngemittelproduktion ist aufgrund des dort mengenmäßig hohen Einsatzes von Phosphatgestein das Naheliegendste. Damit konkurrieren die Produkte der Rückgewinnungsverfahren im weitesten Sinne mit den Primärprodukten, welche einen etablierten Prozess durchlaufen. Sie müssen am Markt Abnahme finden und anschließend einer sinnvollen Verwertung zugeführt werden. Der rückgewonnene Phosphor sollte möglichst vollständig genutzt werden und im besten Fall als Sekundärrohstoff weniger umweltfreundliche Primärrohstoffe ersetzen. Gesicherte Verwertungswege für die Produkte aus Phosphorrückgewinnungsverfahren lassen sich kaum angeben, da diese noch nicht am Markt verfügbar sind. Viele Verfahren sind noch in Entwicklung und aus diversen Gründen noch nicht im großtechnischen Maßstab umgesetzt. Daher sind bisweilen keine nennenswerten Produktmengen auf dem Markt bzw. hergestellt worden. Zudem gibt es kaum Angaben über voraussichtliche Produktionskapazitäten und verlässliche, konstante Produktzusammensetzungen bzw. -qualitäten. Viele potenzielle Abnehmerinnen und Abnehmer sind mit Aussagen bezüglich des Einsatzes oder der Abnahme von Phosphor-Rezyklaten zögerlich. Ein weiteres Hindernis stellt die rechtliche Situation dar. Da viele Phosphor-Rezyklate neuartige Produkte sind, ist der rechtliche Status bezüglich der Anwendung für bestimmte Zwecke (z. B. Zulassung als Zusatzstoff für die Lebensmittelindustrie) ungeklärt. Trotz dieser Unsicherheiten zeichnet sich ab, dass der Düngemittelsektor das Hauptanwendungsgebiet für Phosphor-Rezyklate darstellen wird.

Die Anforderungen der Düngemittelhersteller (hier am Beispiel von ICL Fertilizers) an ein P-Rezyklat umfassen folgende grundlegende Aspekte (Transmit, 2021):

- ▶ Erfüllung der rechtlichen Vorschriften (AbfKlärV, DüV, DüMV/EU-DüPV)
  - AbfKlärV: Einhaltung der Rückgewinnungseffizienz
  - DüV, DüMV/EU-DüPV: Einhaltung der Grenzwerte für Schadstoffe, hygienische Standards, Pflanzenverfügbarkeit
- ▶ Hoher Nährstoffgehalt
- ▶ Gleichmäßige Verfügbarkeit
- ▶ Gleichmäßige Zusammensetzung
- ▶ Materialien mit Produktstatus, bevorzugt REACH Registrierung
- ▶ Wettbewerbsfähiger Preis

Das Interesse von Düngemittelproduzenten an Phosphor-Rezyklaten ist vorhanden und einzelne Unternehmen analysieren Möglichkeiten, Phosphor-Rezyklate in ihre Produktionsprozesse zu integrieren. Das Unternehmen ICL Fertilizers hatte sich beispielsweise zum Ziel gesetzt, bis 2025 Rohphosphat vollständig durch alternative Rohstoffe zu ersetzen (Adam, 2018). Dazu wurden Versuche mit verschiedenen Phosphor-Rezyklaten durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass Di- und Tricalciumphosphat am besten für eine Einspeisung geeignet sind. Diese können mit bis zu 20 % dem Rohphosphat beigemischt werden, ohne negative Einflüsse auf den Aufschluss oder das erzeugte Produkt zu haben (Heene, 2019). Die Produkterlöse lassen sich schwer kalkulieren und sind abhängig vom unbeständigen Düngemittelmarkt, der gleichbleibenden Verfügbarkeit und Zusammensetzung. Im Vergleich zu sedimentärem Rohphosphat aus Marokko zeigen Phosphor-Rezyklate auch eine Reihe von Vorteilen:

- ▶ Geringere Konzentrationen an Uran und Cadmium
- ▶ Weitaus weniger umwelt- und sozialschädigend als der primäre Abbau
- ▶ Ökologisch und nachhaltig (Transportkosten entfallen)
- ▶ Importabhängigkeit kann zu Teilen entlastet werden
- ▶ Teils hohe Marktflexibilität
- ▶ Je nach Komplexität des Verfahrens: kontinuierlich hohe Qualität
- ▶ Vertrieb über lokale Firmen

## 6 Nebenprodukte und Reststoffe der Phosphorrückgewinnung

### 6.1 Nebenprodukte der Phosphorrückgewinnung

Nebenprodukte gemäß § 4 KrWG sind Stoffe, die bei einem Herstellungsverfahren anfallen, dessen hauptsächlicher Zweck jedoch nicht auf die Herstellung dieses Stoffes gerichtet ist. Abgegrenzt werden Nebenprodukte von Abfall, wenn folgende Kriterien erfüllt werden:

1. Eine weitere Verwendung kann sichergestellt werden,
2. eine weitere Vorbehandlung ist nicht nötig,
3. das Nebenprodukt ist als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses erzeugt worden,
4. eine rechtmäßige Weiterverwendung ist gewährleistet.

Letzteres Kriterium ist erfüllt, wenn das Nebenprodukt die Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllt und nicht Mensch und Umwelt schädigt.

Die Abfalleigenschaft eines Nebenprodukts entfällt gemäß § 5 Abs. 1 KrWG, wenn dieses aus einem Recycling- oder einem Verwertungsverfahren gewonnen wurde und folgende Kriterien erfüllt:

5. Verwendung für bestimmte Zwecke.
6. Bestehen eines Marktes oder einer Nachfrage.
7. Erfüllung zweckgebundener technischer Anforderungen sowie Rechtsvorschriften und Normen für Erzeugnisse.
8. Verwendung führt insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen.

In Tabelle 34 ist ein Überblick über die Nebenprodukte aus den Verfahren zur Phosphorrückgewinnung dargestellt. Nebenprodukte können ihrerseits wirtschaftliche Erlöse generieren oder prozessintern rezykliert werden, wodurch Betriebsmittel eingespart werden können.

Bei den Verfahren, die in der wässrigen Phase und im Faulschlamm ansetzen, fallen in der Regel keine Nebenprodukte an. Der P-abgereicherte Schlamm oder das P-abgereicherte Schlammwasser aus den Fällungs- bzw. Kristallisationsprozessen wird im Zuge der Abwasserbehandlung weiter behandelt.

Metallsalze und -lösungen fallen als Nebenprodukt in nasschemischen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche bei der Abtrennung von Störelementen an. Diese können als Fällsalze zur P-Fällung auf Kläranlagen mit chemischer P-Elimination genutzt werden (Kraus et al., 2020; Rak, 2018). Auch Calciumchlorid- sowie Natriumchloridlösungen können anfallen und beispielsweise zur Brushit-Fällung verwendet werden (Bertau et al., 2018; Rak, 2018).

Ein weiteres Nebenprodukt der nasschemischen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche kann der silikatreiche mineralische Rückstand darstellen. Dieser kann nach Aufbereitung in der Zementindustrie, Baustoffindustrie oder im Straßenbau eingesetzt werden (Kabbe und Rinick-Pfeiffer, 2019; Kraus et al. 2020); entsprechende Verwertungswege sind jedoch noch anhand weiterer Untersuchungen zu belegen.

Beim Einsatz von Schwefelsäure als Extraktions- oder Fällmittel in nasschemischen Klärschlammverbrennungsascheverfahren fällt als Nebenprodukt Calciumsulfat, also Gips, an.

Dieser ähnelt dem REA-Gips aus der Rauchgasentschwefelung und kann als Sekundär-Rohstoff weiterverwendet werden (RAK, 2018). Einsatz kann er in der Gips- bzw. Baustoffindustrie finden.

In einigen nasschemischen Verfahren kann die für den Aufschluss genutzte Säure rückgewonnen und damit rezykliert werden und so als Nebenprodukt fungieren. Auch die Säure, die für Solventextraktionen oder Ionenaustauscher genutzt wird, kann rückgewonnen werden. Die Säuren werden intern im Kreislauf geführt. (Kraus et al., 2019; Montag et al., 2016)

**Tabelle 46: Zusammenstellung der Nebenprodukte aus der Phosphorrückgewinnung**

Nebenproduktkategorie	Beispiele	Anwendung/Verwertung	Beispielverfahren
Metallsalze und -lösungen	Eisen- und Aluminiumchlorid	Fällmittel zur P-Elimination	TetraPhos
	Magnesium-, Calcium-, Natriumchlorid	Fällmittel für MAP/DCP-Fällung oder chem. Industrie	PARFORCE
mineralische Rückstände	silikatreiche Rückstände	Zementindustrie, Baustoffindustrie, Straßenbau oder Deponie	Ash2Phos
Aluminiumprodukt	Aluminiumhydroxide, bzw. Aluminat		Ash2Phos
Gips	Calciumsulfat (ähnlich zum REA Gips)	Gips- bzw. Baustoffindustrie	TetraPhos
(verdünnte) Säuren	verdünnte Salzsäure	Rezirkulierung im Prozess	PARFORCE

## 6.2 Reststoffe der Phosphorrückgewinnung

Die Verfahren, die dezentral auf der Kläranlage integriert sind, produzieren keine zusätzlichen Reststoffe, die außerhalb des Abwasserbehandlungsprozesses entsorgt werden müssen. Innerhalb der thermochemischen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm werden einige Schwermetalle über das Rauchgas ausgetrieben. Die Schwermetalle werden in der Regel mit den weiteren Rauchgasreinigungsrückständen zusammen ausgeschleust und anschließend deponiert. Bei den nasschemischen Prozessen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche kann eine Schadstoffsene beispielsweise der Ascherückstand bilden. Dieser wird, wie die Klärschlammverbrennungsasche, deponiert, sofern keine Verwendung beispielsweise in der Baustoffindustrie erfolgt. Innerhalb des nasschemischen Prozesses kann ein Teil der Schadstoffe auch im Filtrat verbleiben, welches über verschiedene Prozessstufen (Solventextraktion, Ionenaustauscher, o. ä.) abgereichert wird. Auch für diese Stoffströme gilt, dass sie als Reststoffe beseitigt werden müssen, sofern sie nicht als Nebenprodukte verwertet werden können.

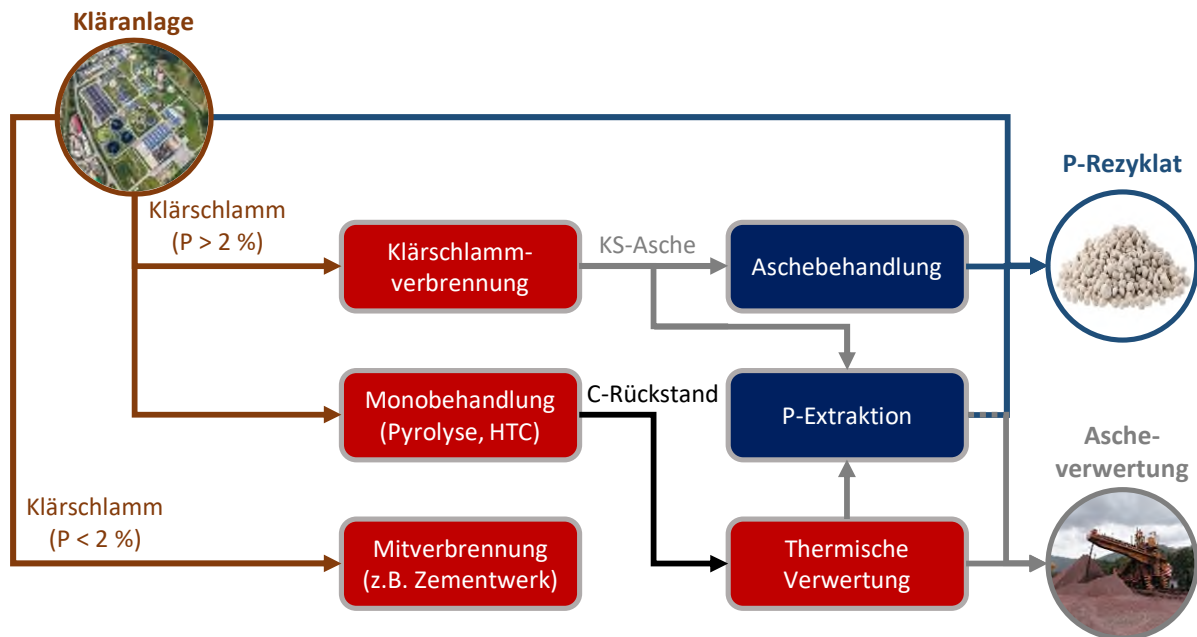
## 7 Technologiebewertung und Entsorgungsoptionen

Zur Bewertung möglicher künftiger Entsorgungsoptionen wurden unterschiedliche technologische Szenarien entwickelt. Die Untersuchungen erstreckten sich auf Massen- und Energiebilanzen, den kumulierten Energieaufwand (KEA) und vereinfachten CO<sub>2</sub>-Bilanzen sowie eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit. Um den Einfluss einzelner Positionen auf die Auswertung zu berücksichtigen, wurden Sensitivitätsanalysen für ausgewählte Parameter durchgeführt.

### 7.1 Vergleich und Bewertung möglicher Entsorgungsoptionen

Es wurden sechs unterschiedliche Szenarien der Klärschlamm Entsorgung definiert. In Abbildung 61 sind die grundsätzlich möglichen Behandlungspfade für Klärschlämme zusammenfassend dargestellt. Diese unterscheiden sich in erster Linie in der Einbindung der Phosphorrückgewinnung in die Prozesskette. So steht die Mitverbrennung (z. B. im Zementwerk) ausschließlich bei vorgeschalteter Phosphorrückgewinnung auf der Abwasserbehandlungsanlage zur Verfügung (Szenario A, Kapitel 7.1.1). Die Klärschlammverbrennung ermöglicht die nachgeschaltete Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammverbrennungsasche (Szenario B, Kapitel 7.1.2) ebenso wie die anschließende Aschebehandlung mit vollständiger bodenbezogener Verwertung zu Düngezwecken (Szenario C, Kapitel 7.1.3). In Szenario D (Kapitel 7.1.4) wird der Fall einer unzureichenden Phosphorrückgewinnungsmaßnahme auf der Abwasserbehandlungsanlage mit anschließender Klärschlammverbrennung und nachfolgender Phosphorrückgewinnung betrachtet. Die Klärschlammbehandlung mittels sonstiger thermischer Behandlungsverfahren erzeugt einen kohlenstoffhaltigen Rückstand, der nach aktuell geltendem Recht nicht als Phosphorrezyklat eingesetzt werden kann. Ferner existiert kein den Autoren bekanntes Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Rückständen dieser sonstigen thermischen Klärschlammbehandlungsverfahren. Daher ist eine thermische Verwertung der Rückstände, vorzugsweise in der bewährten Wirbelschichtfeuerung, erforderlich, die eine nachgeschaltete Phosphorrückgewinnung aus der Verbrennungsasche ermöglicht (Szenario E, Kapitel 7.1.5; Szenario F, Kapitel 7.1.6). Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Auswahl der betrachteten Szenarien nicht implizieren soll, dass für Klärschlämme mit einem Phosphorgehalt < 2 % lediglich die Mitverbrennung in einem Zementwerk als Entsorgungspfad zur Verfügung steht. Dies ist im Rahmen der Szenarien lediglich exemplarisch dargestellt.

**Abbildung 61: Übersicht möglicher Behandlungspfade für Klärschlamm mit Phosphorrückgewinnung**

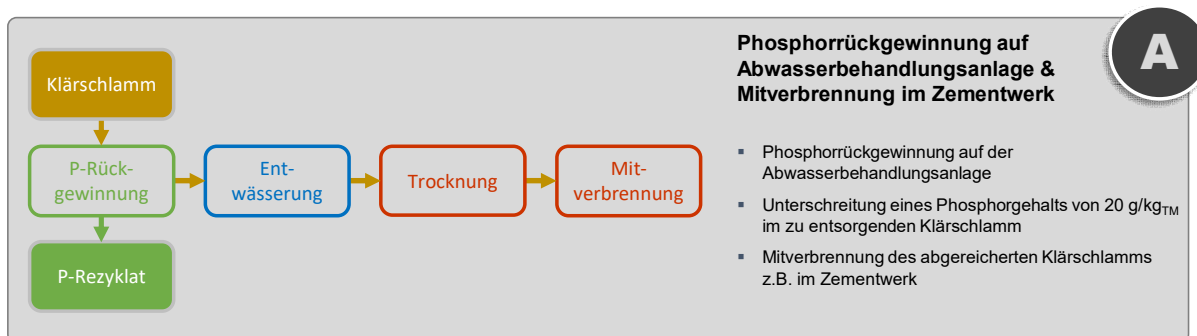


Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 7.1.1 Szenario A: Mitverbrennung im Zementwerk

In Szenario A (Abbildung 62) wird die vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung auf Abwasserbehandlungsanlagen und anschließende Mitverbrennung des abgereicherten Klärschlammes in einem Zementwerk betrachtet. Das Phosphorrückgewinnungsverfahren muss so betrieben werden, dass die Unterschreitung eines Phosphorgehalts von 20 g/kg<sub>TM</sub> im zu entsorgenden Klärschlamm gewährleistet wird. Die Nutzung des anfallenden Phosphorrezyklat wird vorausgesetzt. Nach Entwässerung und optionaler Trocknung kann der phosphorabgereicherte Klärschlamm der Mitverbrennung zugeführt werden.

**Abbildung 62: Behandlungspfad Szenario A**



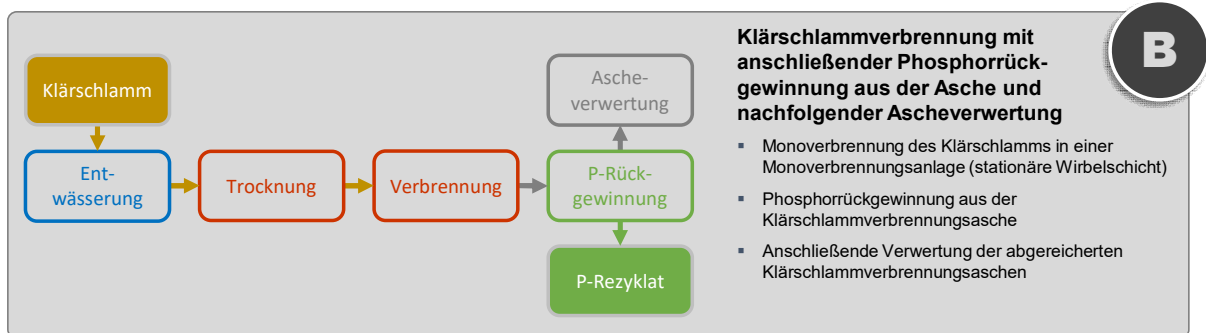
Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 7.1.2 Szenario B: Klärschlammverbrennung mit Phosphorextraktion aus der Klärschlammverbrennungsasche

Szenario B (Abbildung 63) beschreibt die Verbrennung des Klärschlammes in einer stationären Wirbelschichtfeuerung mit nachfolgender Phosphorrückgewinnung aus der Asche. Die

phosphorabgereicherte Verbrennungsasche wird in diesem Szenario einer weitergehenden Verwertung zugeführt.

**Abbildung 63: Behandlungspfad Szenario B**

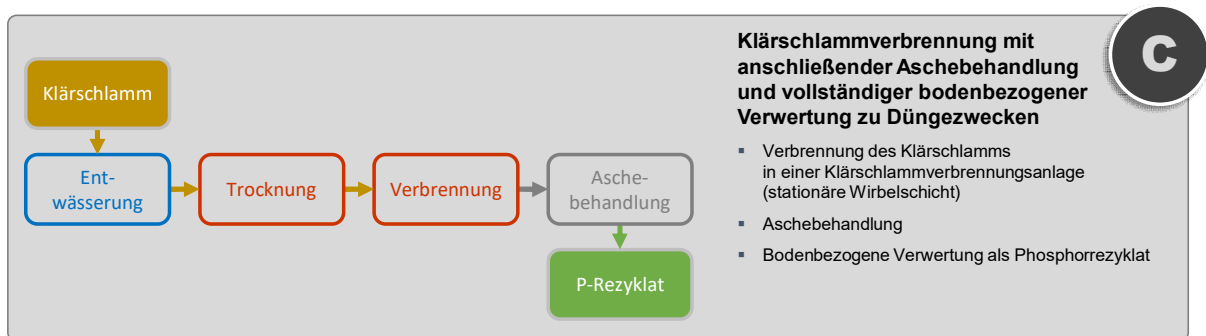


Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 7.1.3 Szenario C: Klärschlammverbrennung mit vollständiger Ascheverwertung

Szenario C (Abbildung 64) adressiert die Verbrennung des Klärschlammes in einer stationäre Wirbelschichtfeuerung mit anschließender Aschebehandlung und vollständiger bodenbezogener Verwertung der Klärschlammverbrennungsasche zu Düngezwecken. Für die Erfüllung dieses Szenarios müssen gemäß aktueller Fassung der DüMV (Anlage 2, Tabelle 7, 7.4.3) nicht nur die Klärschlammverbrennungsaschen die Grenzwerte und weiteren Anforderungen des Düngerechts einhalten, sondern auch die eingesetzten Klärschlämme die Grenzwerte der AbfKlärV und DüMV.

**Abbildung 64: Behandlungspfad Szenario C**



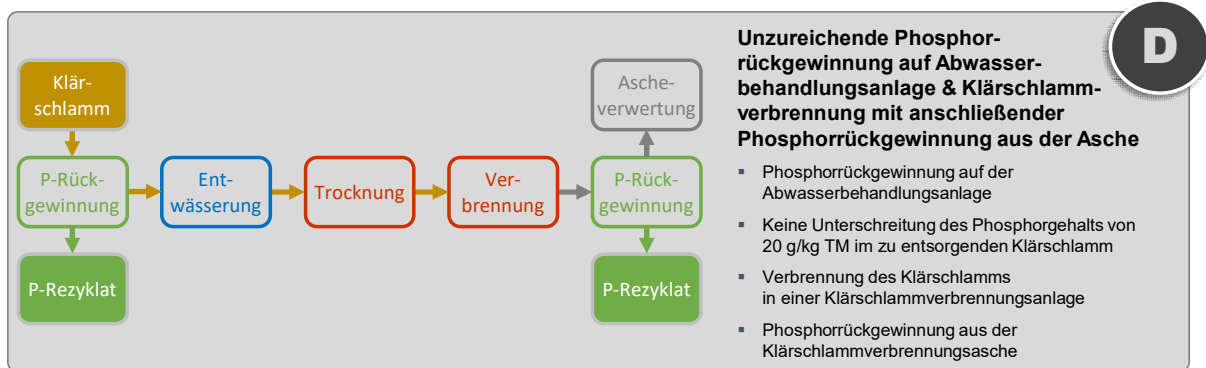
Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 7.1.4 Szenario D: Klärschlammverbrennung mit vollständiger Ascheverwertung und vorgeschalteter Phosphorrückgewinnung

Szenario D (Abbildung 65) umfasst die unzureichende Phosphorrückgewinnung auf der Abwasserbehandlungsanlage, bei der die Unterschreitung einer Konzentration von 20 g/kg<sub>TM</sub> im behandelten Klärschlamm nicht erreicht werden kann. In diesem Fall darf der Klärschlamm – abweichend von Szenario A – nicht der Mitverbrennung zugeführt werden, sondern muss anschließend in einer Klärschlammverbrennungsanlage (stationäre Wirbelschicht) verwertet werden. Nach einer anschließenden Phosphorextraktion aus der Verbrennungsasche findet eine weitergehende Ascheverwertung im Bergversatz statt.



**Abbildung 65: Behandlungspfad Szenario D**

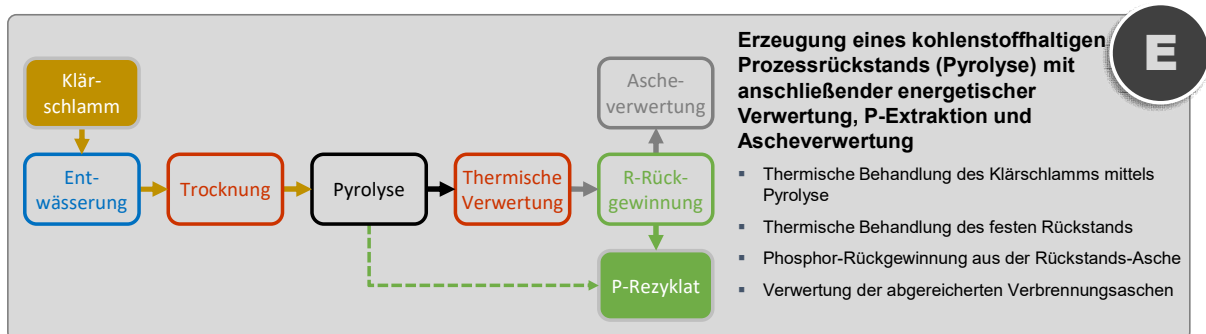


Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 7.1.5 Szenario E: Pyrolyse

In Szenario E (Abbildung 66) wird die Erzeugung eines kohlenstoffhaltigen Rückstandes mittels Pyrolyse zugrunde gelegt. Da der anfallende kohlenstoffhaltige Rückstand gemäß aktueller Fassung der DüMV nicht direkt als Düngemittel eingesetzt werden darf (gestrichelter Pfeil), muss dieser einer thermischen Verwertung in einer Klärschlammverbrennungsanlage zugeführt werden. Anschließend erfolgt die Phosphorrückgewinnung aus der Verbrennungsasche. Die phosphorabgereicherten Rückstände werden einer Ascheverwertung zugeführt.

**Abbildung 66: Behandlungspfad Szenario E**

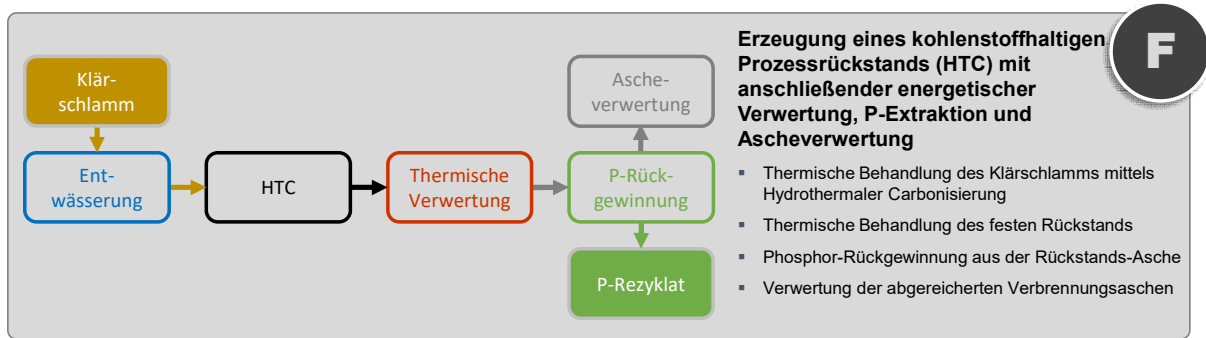


Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 7.1.6 Szenario F: HTC

In Szenario F (Abbildung 67) wird die Klärschlamm-trocknung durch eine hydrothermale Karbonisierung (HTC) ersetzt. Prinzipiell kann das HTC-Verfahren durch Additivzugaben auch so betrieben werden, dass eine Phosphoranreicherung in der Flüssigphase erfolgt. Dieser Fall wird hier aber nicht berücksichtigt. Der anfallende feste kohlenstoffhaltige Prozessrückstand wird analog zu Szenario B und E einer Klärschlammverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung behandelt. Die phosphorabgereicherte Verbrennungsasche wird einer geeigneten Verwertung zugeführt.

**Abbildung 67: Behandlungspfad Szenario F**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

## 7.2 Methodik

Um eine Vergleichbarkeit aller Szenarien untereinander gewährleisten zu können, wird jeweils die gesamte Prozesskette des Behandlungspfads vom Anfall des entwässerten Klärschlammes auf der Abwasserbehandlungsanlage bis zur Entsorgung aller entstehenden Reststoffe betrachtet. Somit werden neben dem eigentlichen thermischen Behandlungsverfahren und dem Phosphorrückgewinnungsverfahren auch Nebenprozesse, wie eine eventuell erforderliche Trocknung oder die Abgasreinigung, mitbetrachtet. Für die Vergleichbarkeit wurden hinsichtlich der Klärschlammigenschaften für alle Szenarien die gleichen Randbedingungen gewählt. Diese sind in Tabelle 35 zusammengefasst.

**Tabelle 47: Randbedingungen für Klärschlammigenschaften bei der Betrachtung der Szenarien**

Parameter	Bezugszustand	Einheit	Wert
TR-Gehalt	Entwässert	[%]	25,0
TR-Gehalt	Teilgetrocknet	[%]	47,0
Trockenrückstand	Vollgetrocknet	[%]	90,0
Aschegehalt	TM	[%]	42,7
Phosphorgehalt	TM	[g/kg]	31,0
Kohlenstoffgehalt	TM	[%]	29,5
Heizwert	TM	[MJ/kg]	12,4

Die Bewertung der Szenarien erfolgt durch vereinfachte Massen- und Energiebilanzen, des kumulierten Energieaufwands (KEA) und CO<sub>2</sub>-Bilanzen sowie mithilfe einer Abschätzung der Behandlungskosten. Im Folgenden werden die Grundlagen der Berechnungen und Annahmen dargestellt.

### 7.2.1 Massenbilanzierung

In den Szenarien A bis E werden die entwässerten Klärschlämme im ersten Prozessschritt einer Trocknung zugeführt. Die abzuschneidende Wasserfracht im Trockner ergibt sich aus der Differenz des Wassergehalts des getrockneten und entwässerten Klärschlammes. Für den Luftbedarf wurden am Beispiel eines Bandtrockners ca. 25 kg<sub>Luft</sub>/kg<sub>Wasser</sub> angenommen.

Alternativ zur Trocknung wird in Szenario F der HTC-Prozess betrachtet. Die Massenbilanzierung erfolgte anhand der Parameter aus Tabelle 36 (Blöhse, 2017). Eine mögliche Zugabe von Additiven wurde nicht berücksichtigt.

**Tabelle 48: Massen- und Kohlenstoffausbeute des HTC-Prozess (Blöhse, 2017)**

Parameter	Bezugszustand	Einheit	Massenausbeute	C-Ausbeute
Fester Rückstand	TM	%	70	65
Prozessgas	TM	%	6	5
Prozesswasser	TM	%	24	30
Phosphor	Fester Rückstand	kg <sub>P</sub> /kg <sub>P,KS</sub>	0,95	-

Die Bilanzierung der Verbrennung getrockneten Klärschlammes sowie von Prozessrückständen aus HTC- und Pyrolyseverfahren erfolgte durch eine Verbrennungsrechnung. Additive sowie Rückstände der Abgasreinigung wurden nicht berücksichtigt, da sie in jedem Szenario in der gleichen Größenordnung anfallen. In Tabelle 37 sind die berücksichtigten Luftzahlen zur Bestimmung der Verbrennungsluftmasse dargestellt.

**Tabelle 49: Luftzahlen für die Massenbilanzierung der Verbrennung**

Verbrennung	Feuerung	Einheit	Luftzahl
Klärschlammverbrennung	Stationäre Wirbelschicht	kg <sub>Luft</sub> /kg <sub>stöchiometrisch</sub>	1,2
Mitverbrennung	Drehrohr	kg <sub>Luft</sub> /kg <sub>stöchiometrisch</sub>	Annahme vollständiger Oxidation
Pyrolysegas	Brennkammer	kg <sub>Luft</sub> /kg <sub>stöchiometrisch</sub>	1,1
Pyrolyse-Rückstand	Stationäre Wirbelschicht	kg <sub>Luft</sub> /kg <sub>stöchiometrisch</sub>	1,2
HTC-Rückstand	Stationäre Wirbelschicht	kg <sub>Luft</sub> /kg <sub>stöchiometrisch</sub>	1,2

Für die Pyrolyse wurde eine Behandlungstemperatur von 600 °C zugrunde gelegt (Kapitel 2.1.4.1). Es wurde zudem angenommen, dass der Großteil der im Klärschlamm enthaltenen Mineralik (> 95 %) und ca. 50 % des Kohlenstoffs den festen Pyrolyse-Rückstand bilden. Hieraus resultiert eine auf den Feststoff bezogene Massenausbeute von ca. 50 %. Die verbleibenden 50 % der Ausgangsmasse bilden gemeinsam mit dem Inertgas, welches das Einströmen von Umgebungsluft in den Pyrolysereaktor verhindert, das Pyrolysegas. Das Inertgas nimmt nicht aktiv an den Pyrolysereaktionen teil, sondern unterbindet unerwünschte Oxidationsreaktionen. Daher wurde es bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Die Phosphorrückgewinnung aus der Verbrennungsasche wurde verfahrensoffen betrachtet. Existierende Technologien und Konzepte wurden lediglich zur Orientierung herangezogen. Dabei wurde zwischen der nachgeschalteten Phosphorrückgewinnung durch nasschemische und durch thermochemische Verfahren zur vollständigen Ascheverwertung unterschieden (siehe Kapitel 5.3.6 und 5.3.7). Bei den nasschemischen Verfahren findet unter Zugabe von Säuren (z. B. Salzsäure) sowie Hilfsstoffen (z. B. Sulfide und Ionenaustauscher) eine Extraktion

des angereicherten Phosphors aus der Verbrennungsasche statt. Als Zielprodukt entsteht z. B. Phosphorsäure. Nebenprodukte sind z. B. Eisen- und sonstige Metallchloride. Die thermochemische Phosphorrückgewinnung basiert auf einer Erhitzung der Verbrennungsasche unter reduzierenden Bedingungen auf ca. 1.000 °C, sodass flüchtige Schwermetalle ausgetrieben werden. Hierzu werden der Asche Additive (z. B. Natriumcarbonat) zugegeben. Ziel ist die Gewinnung eines phosphorreichen und schwermetallarmen festen Düngemittels aus der Asche. Gemäß aktueller Fassung der DüMV (Anlage 2, Tabelle 7, 7.4.3) müssen sowohl das Produkt als auch die eingesetzten Klärschlämme die Grenzwerte der AbfKlärV und DüMV einhalten. Die Parameter zur Massenbilanzierung sind in Tabelle 38 dargestellt.

**Tabelle 50: Parameter zur Massenbilanzierung der Phosphorrückgewinnung (Kraus et al., 2019)**

Parameter	Einheit	Nasschemisch	Thermochemisch
Additive	kg <sub>Additive</sub> /kg <sub>KSA</sub>	0,68	0,31
Reststoffe	kg <sub>Reststoffe</sub> /kg <sub>KSA</sub>	1,00	0,09
Phosphorsäure (70 %)	kg <sub>H3PO4</sub> /kg <sub>P,KSA</sub>	4,05	-
Düngemittel	kg <sub>Düngemittel</sub> /kg <sub>KSA</sub>	-	1,22
Nebenprodukte	kg <sub>Zusatzstoffe</sub> /kg <sub>KSA</sub>	= Input - Output	-

## 7.2.2 Energiebilanzierung

Analog zur Massenbilanzierung wurde eine Energiebilanzierung durchgeführt. In Tabelle 39 sind die Strom- und Wärmebedarfe der Prozesse aufgelistet, die der Energiebilanzierung zu Grunde liegen. Mit Ausnahme des Zementwerks wurde davon ausgegangen, dass die Abwärme der thermochemischen Prozesse zur Klärschlamm Trocknung verwendet wird, sofern Trocknung und Verbrennung an einem Standort erfolgen. Die Phosphorrückgewinnung befindet sich in jedem Szenario an einem von der Klärschlammverbrennung entkoppelten Standort, sodass keine Abwärmenutzung möglich ist. Zusätzliche Wärme, die nicht durch Abwärmenutzung bereitgestellt werden kann, wird durch Erdgasbrenner zur Verfügung gestellt. Nicht verwendete Abwärme aus der Klärschlammverbrennung wird mit einem Wirkungsgrad von 30 % in elektrische Energie umgewandelt. Diese wird zur Deckung des Eigenbedarfs verwendet. Überschüssiger Strom wird ins Netz eingespeist. Analog dazu wird der Strombedarf, der nicht durch Eigenerzeugung gedeckt wird, aus dem Stromnetz bezogen. Es wurde angenommen, dass jeder Standort in den Szenarien mit dem Stromnetz verbunden ist. Daher wurde überschüssiger Strom am Standort der Klärschlammverbrennungsanlagen mit Prozessen an anderen Standorten (z. B. der Phosphorrückgewinnung) verrechnet. Beim Pyrolyseprozess wurden außerdem prozessbedingte Wärmeverluste von 20 % angenommen.

**Tabelle 51: Strom- und Wärmebedarfe der Prozesse zur Schlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung**

	Einheit	Strombedarf	Wärmebedarf
Trocknung (Klärschlammverbrennung)	kWh/kg <sub>Wasserverdampfung</sub>	0,050 <sup>[1]</sup>	0,786 <sup>[2]</sup>
Trocknung (Zementwerk/Pyrolyse)	kWh/kg <sub>Wasserverdampfung</sub>	0,080 <sup>[1]</sup>	0,786 <sup>[2]</sup>
HTC (inkl. Prozesswasserbehandlung)	kWh/kg <sub>KS,25 % TR</sub>	0,070 <sup>[3]</sup>	0,165 <sup>[3]</sup>
Klärschlammverbrennung	kWh/MW <sub>thermisch</sub>	14 <sup>[4]</sup>	-
Mitverbrennung (Zementwerk)	kWh/kg <sub>KS,90 % TR</sub>	0,118 <sup>[5]</sup>	-
Abgasreinigung	kWh/(1000 · m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	15 <sup>[4]</sup>	-
Pyrolyse	kWh/kg <sub>KS,90 % TR</sub>	0,090 <sup>[6]</sup>	-
Phosphorrückgewinnung (nasschemisch)	kWh/kg <sub>KSA</sub>	0,045 <sup>[7]</sup>	0,475 <sup>[7]</sup>
Phosphorrückgewinnung (thermochemisch)	kWh/kg <sub>KSA</sub>	0,390 <sup>[7]</sup>	0,460 <sup>[8]</sup>
Vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung	kWh/kg <sub>KS,25 % TR</sub>	0,004 <sup>[9]</sup>	-

<sup>[1]</sup> (DWA, 2021), Mittelwert aus Betreiberumfrage

<sup>[2]</sup> (DWA, 2021)

<sup>[3]</sup> (Blöhse, 2017)

<sup>[4]</sup> (Beckmann, 2010)

<sup>[5]</sup> (Baier und Horix, 2014)

<sup>[6]</sup> (PYREG, 2022)

<sup>[7]</sup> (Kraus et al., 2019)

<sup>[8]</sup> (UBA, 2015)

<sup>[9]</sup> (Palmowski und Pinnekamp, 2018)

Der Transport des entwässerten Klärschlammes sowie der Verbrennungsaschen und festen Rückstände aus Pyrolyse-, HTC- und Phosphorrückgewinnungsprozessen erfolgt durch dieselbetriebene LKW. In Tabelle 40 sind die Annahmen und spezifischen Energieverbräuche zur Bilanzierung dargestellt. Beim HTC-Verfahren (Szenario F) entfällt der Transport des entwässerten Klärschlammes, da angenommen wurde, dass die HTC-Anlage auf dem Standort der Abwasserbehandlungsanlage integriert ist.

**Tabelle 52: Parameter zur Energiebilanzierung des Transports (Transmit GmbH; UBA, 2022)**

Parameter	Einheit	Wert
Transportdistanz	km	150 <sup>[1]</sup>
Transport KS <sub>25 % TR</sub>	kWh/(kg <sub>KS, 25 % TR</sub> · 150 km)	0,086 <sup>[2]</sup>
Transport Asche/feste Rückstände <sup>[2]</sup>	kWh/(kg <sub>Asche/Rückstände</sub> · 150 km)	0,096 <sup>[3]</sup>

<sup>[1]</sup> Annahme

<sup>[2]</sup> Annahme: Zulässiges Gesamtgewicht: 36 t, Zuladung KS<sub>25 % TR</sub>: 28 t

<sup>[3]</sup> Annahme: Zulässiges Gesamtgewicht: 36 t, Zuladung Asche/ feste Rückstände 25 t

### 7.2.3 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Ergänzend zur Energiebilanzierung wurde der kumulierte Energieaufwand berechnet. Es wurden ausschließlich die in der Bilanzierung errechneten Energieströme berücksichtigt. Der KEA beinhaltet den Primärenergieaufwand zur Herstellung von Phosphorprodukten, ausgehend von 1 t entwässertem Klärschlamm. Die Nutzung von Abwärme und Strom aus Eigenerzeugung wurde nicht als Primäraufwand betrachtet und dementsprechend nicht in den Berechnungen zum KEA berücksichtigt. Analog zur Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzierung wurden sonstige Betriebsmittel nicht berücksichtigt.

### 7.2.4 CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

Die in den Bilanzen betrachteten CO<sub>2</sub>-Emissionen stammen aus der Verbrennung der kohlenstoffhaltigen Brennstoffe sowie aus der Energiebereitstellung durch Erdgas, das Stromnetz oder Diesel. Für Verbrennungsprozesse wurde angenommen, dass der im Brennstoff enthaltene Kohlenstoff vollständig zu CO<sub>2</sub> reagiert. Beim HTC-Verfahren in Szenario F wurde durch die Prozessgas- und Prozesswasserbehandlung ebenfalls eine vollständige Oxidation des Kohlenstoffs zu CO<sub>2</sub> angenommen. In Tabelle 41 sind die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für die externe Energiebereitstellung (Strom, Wärme) und den Transport aufgeführt. Betriebsmittel und Additive wurden analog zur Massen- und Energiebilanzierung nicht berücksichtigt. Eine Unterscheidung zwischen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus biogenem oder fossilem Kohlenstoff erfolgte im Rahmen dieser Betrachtung nicht.

**Tabelle 53: Parameter zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung (Juhrich, 2016; Transmit, 2021; UBA, 2021)**

	Einheit	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen
Wärmebereitstellung (Erdgas)	kgCO <sub>2</sub> /kWh <sub>Wärmebereitstellung, Erdgas</sub>	0,201
Strombezug (deutsches Stromnetz)	kgCO <sub>2</sub> /kWh <sub>Strombezug</sub>	0,366
Transport (KS, 25 % <sub>TR</sub> ), 150 km	kgCO <sub>2</sub> /(kg <sub>KS, 25 %<sub>TR</sub></sub> · 150 km)	0,005
Transport (Asche/Rückstände), 150 km	kgCO <sub>2</sub> /(kg <sub>Asche/Rückstände</sub> · 150 km)	0,006

### 7.2.5 Behandlungskosten

Um einen ökonomischen Vergleich der betrachteten Szenarien zu ermöglichen, wurde eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung durchgeführt. Die Daten hierfür basieren auf Ergebnissen der Betreiberbefragung sowie Literatur- und Erfahrungswerten. Insbesondere die Behandlungskosten der sonstigen thermischen Behandlungsverfahren (Szenarien E und F) sowie der Phosphorrückgewinnungsverfahren unterliegen einer gewissen Unschärfe. Hier fehlt es an Erfahrungswerten und abgesicherten Literaturdaten. Die Abschätzung der Behandlungskosten erfolgte anhand der spezifischen Kosten aus Tabelle 42. Annahmepreise und Behandlungskosten beinhalten die vollständigen Betriebs- und Entsorgungskosten. Um die gesamte Prozesskette inklusive Phosphorrückgewinnung zu betrachten, wurden in der Bilanzierung die Entsorgungskosten für die Asche aus den Annahmepreisen herausgerechnet. Da die Höhe der Entsorgungskosten vom Aschegehalt im Klärschlamm abhängt, sind die Annahme- und Entsorgungskosten in der Tabelle separat aufgeführt.

**Tabelle 54: Spezifische Kosten der Prozesse zur Schlammbehandlung- und Phosphorrückgewinnung sowie der Reststoffentsorgung**

	Einheit	Kosten
Annahmepreis Zementwerk	€/t <sub>KS,25 % TR</sub>	40,00 <sup>[1]</sup>
Annahmepreis Klärschlammverbrennung	€/t <sub>KS,25 % TR</sub>	62,50 <sup>[2]</sup>
Pyrolyse	€/t <sub>KS,25 % TR</sub>	80,00 <sup>[3]</sup>
HTC-Verfahren	€/t <sub>KS, 25 % TR</sub>	78,50 <sup>[4]</sup>
Entsorgungskosten Asche	€/t <sub>Rückstand</sub>	60,00 <sup>[5]</sup>
Phosphorrückgewinnung (nasschemisch)	€/t <sub>Asche</sub>	180,00 <sup>[6]</sup>
Phosphorrückgewinnung (thermochemisch)	€/t <sub>Asche</sub>	130,00 <sup>[6]</sup>
Phosphorrückgewinnung (vorgesaltet)	€/kg <sub>P</sub>	10,72 <sup>[7]</sup>
Transport (KS, 25 % <sub>TR</sub> ), 150 km	€/(t <sub>KS,25 % TR</sub> · 150 km)	18,50 <sup>[8]</sup>
Transport (Asche/Rückstände), 150 km	€/(t <sub>Asche/Rückstände</sub> · 150 km)	24,00 <sup>[8]</sup>

<sup>[1]</sup> inkl. Trocknung, Betriebsmittel, Personal (Jacobs, 2013)

<sup>[2]</sup> inkl. Trocknung, Betriebsmittel, Personal, Entsorgung (Betreiberumfrage)

<sup>[3]</sup> inkl. Trocknung, Betriebsmittel, Personal (Siekman und Jakob, 2013)

<sup>[4]</sup> Annahme: Anlagendurchsatz 56.000 t/a (AVA, 2014)

<sup>[5]</sup> (Betreiberumfrage)

<sup>[6]</sup> (Kraus et al., 2019)

<sup>[7]</sup> (iat, 2014)

<sup>[8]</sup> (Transmit, 2021)

In Tabelle 43 sind die spezifischen Erlöse für die Produkte der Phosphorrückgewinnung zusammengestellt. Für Nebenprodukte wurden keine Erlöse angenommen. Mögliche zusätzliche Erlöse, z. B. aus der Vermarktung von Nebenprodukten, werden in der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 7.4 (Abbildung 82) berücksichtigt.

**Tabelle 55: Spezifische Erlöse für Produkte der Phosphorrückgewinnung**

	Einheit	Erlöse
Phosphorsäure (70 %)	€/t <sub>H3PO4 (70 %)</sub>	560,00 <sup>[1]</sup>
Düngemittel aus thermochemischer Phosphorrückgewinnung	€/t <sub>P2O5</sub>	700,00 <sup>[1]</sup>
Vorgesaltete Phosphorrückgewinnung	€/t <sub>P</sub>	341,60 <sup>[2]</sup>
Nebenprodukte	€/t	-

<sup>[1]</sup> (Kraus et al., 2019)

<sup>[2]</sup> 80 €/t<sub>MAP</sub> (iat, 2014)

### 7.3 Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen

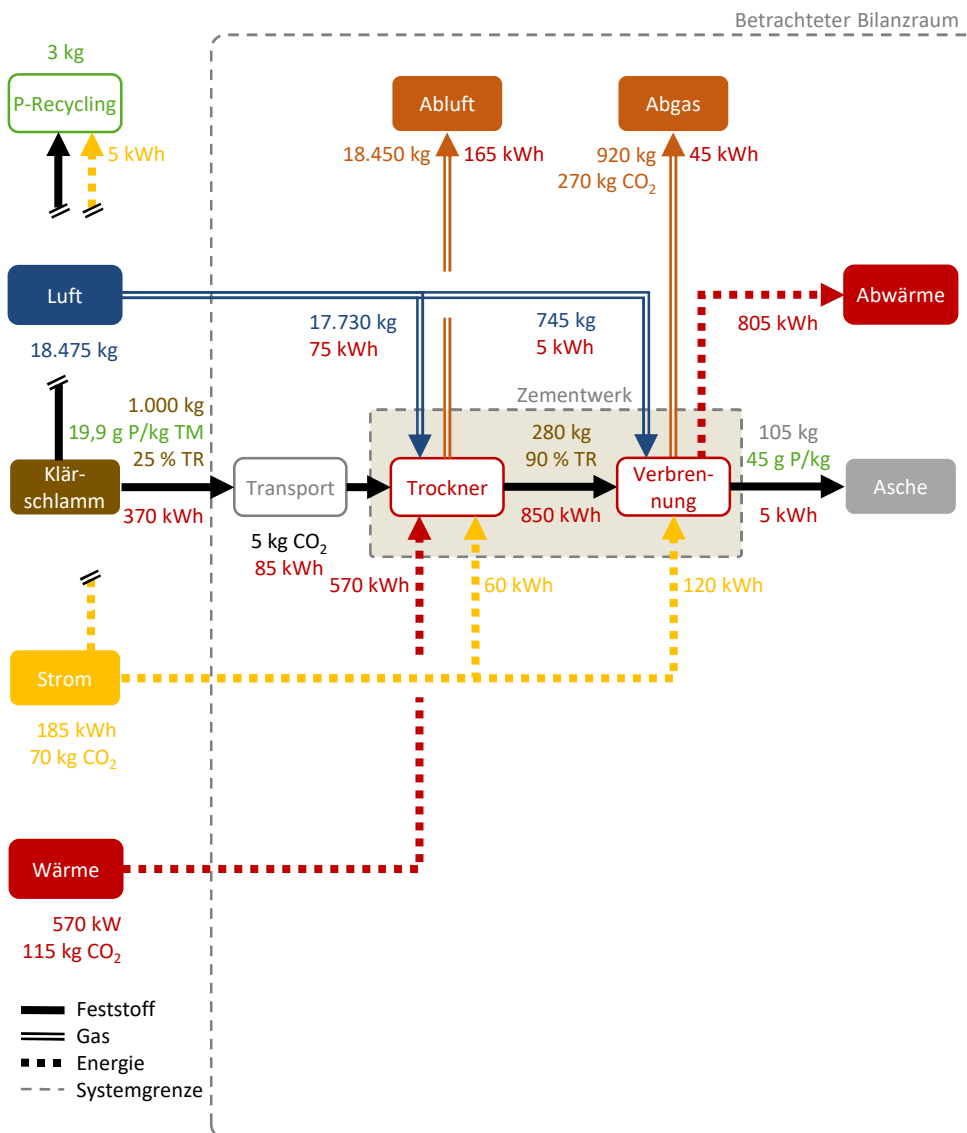
Grundlegend für die Bewertung der sechs verschiedenen Szenarien sind die Massen- und Energiebilanzen. Zur Vergleichbarkeit sind sie auf 1.000 kg entwässerten Klärschlamm normiert.



### 7.3.1 Szenario A

Die Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für Szenario A sind in Abbildung 68 dargestellt. Die Phosphorrückgewinnung erfolgt auf der Kläranlage und befindet sich außerhalb des Bilanzrahmens, muss zu Vergleichszwecken mit den weiteren Szenarien aber mitberücksichtigt werden. Durch die vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung wird der im Klärschlamm enthaltene Phosphor unter den Schwellenwert der AbfKlärV von 20 g P/kg<sub>TM</sub> reduziert, sodass eine Mitverbrennung im Zementwerk zulässig ist. Der entwässerte (25 % TR-Gehalt) und phosphorabgereicherte Klärschlamm wird per LKW zum Standort des Zementwerks transportiert. Der entwässerte (25 % TR-Gehalt) und phosphorabgereicherte Klärschlamm wird per LKW zum Standort des Zementwerks transportiert.

Abbildung 68: Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für Szenario A



Quelle: eigene Darstellung, TEER

Auf dem Gelände des Zementwerks wird der Klärschlamm vollständig auf einen TR-Gehalt von 90 % getrocknet. Als exemplarisches Trocknungsverfahren wird ein Bandtrockner eingesetzt, welcher zur Trocknung von 1.000 kg entwässertem Klärschlamm mit 17.730 kg Umgebungsluft versorgt wird. Aus dem Trocknungsprozess treten 18.450 kg mit Wasser beladene Abluft aus. Diese Abluft wird vor Ableitung in die Umwelt in Wäschern und Biofiltern gereinigt und

aufbereitet. Es verbleiben 280 kg vollgetrockneter Klärschlamm, der dem Klinkerbrennprozess über den Hauptbrenner zugeführt wird. Für eine vollständige Oxidation bei der Klärschlammverbrennung werden 745 kg Umgebungsluft benötigt. Es entstehen 920 kg Rauchgas. Bei einem Aschegehalt von 42,7 % bezogen auf die Trockenmasse verbleiben nach dem Verbrennungsprozess 105 kg Verbrennungsasche mit einem Phosphorgehalt von 45 g/kg. Dies entspricht dem angenommenen Phosphorverbleib von 95 % im Feststoff (basierend auf Erfahrungswerten für die Klärschlammverbrennung). Die Klärschlammverbrennungsasche wird vollständig in die Klinkermatrix eingebunden und stofflich verwertet. Eine anschließende Phosphorrückgewinnung ist nicht mehr möglich.

Für die vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage wird ein Strombedarf von 5 kWh berücksichtigt. Abwärme aus dem Verbrennungsprozess kann nicht zur Klärschlamm Trocknung oder Stromerzeugung eingesetzt werden, da die verfahrenstechnischen Gegebenheiten (z. B. ein Dampfkreisprozess) im Zementwerk nicht vorhanden sind. Daher erfolgt die Wärmebereitstellung durch Erdgas. Zur Trocknung sind 570 kWh erforderlich. Der Strombedarf (60 kWh) wird aus dem Netz bezogen. Über die zugeführte Umgebungsluft werden zusätzlich 75 kWh Wärme in den Trocknungsprozess eingetragen. Im Klärschlamm sind 370 kWh Energie in überwiegend chemischer Form gebunden. Durch die Trocknung wird der Heizwert des Klärschlammes von 1,3 MJ/kg auf 10,9 MJ/kg erhöht. Mit der Abluft werden 165 kWh Wärme an die Umgebung abgeführt. Dem Verbrennungsprozess wird mit dem Klärschlamm eine Feuerungswärme in Höhe von 850 kWh zugeführt. Das Abgas enthält 45 kWh Wärme. Weitere 5 kWh Wärme verlassen den Prozess über die Asche. Die verbleibenden 805 kWh werden als Abwärme angenommen. Für Feuerung und Abgasreinigung werden außerdem zusammen 120 kWh Strom benötigt. Der Energiebedarf für den Transport des entwässerten Klärschlammes beträgt 85 kWh.

Etwa 60 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen bei der Verbrennung des Klärschlammes, also der vollständigen Oxidation des im Klärschlamm gebundenen Kohlenstoffs zu Kohlenstoffdioxid. Dies entspricht 270 kg CO<sub>2</sub> im Rauchgas. Weiterhin fallen CO<sub>2</sub>-Emissionen beim LKW-Transport an. Diese betragen rund 5 kg. Aus dem Strombezug aus dem Netz resultieren 70 kg CO<sub>2</sub>. Die Erdgasbrenner setzen weitere 115 kg CO<sub>2</sub> frei.

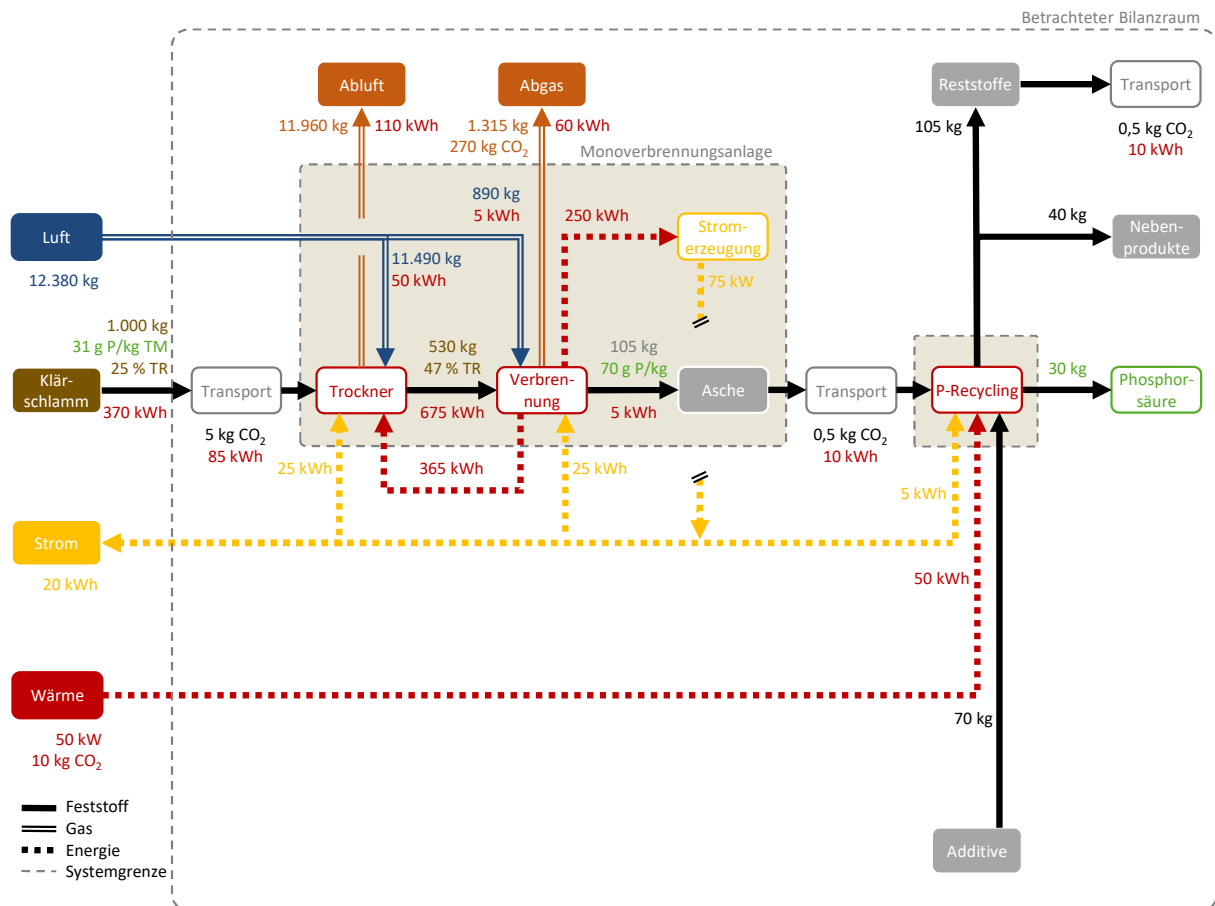
### 7.3.2 Szenario B

In Szenario B durchläuft der Klärschlamm kein vorgeschaltetes Phosphorrückgewinnungsverfahren auf der Kläranlage. Der Phosphorgehalt im Klärschlamm beträgt 31 g/kg<sub>TM</sub>, sodass der Schwellenwert der AbfKlärV von 20 g/kg<sub>TM</sub> überschritten wird. Der Klärschlamm wird nach vorheriger Trocknung einer Klärschlammverbrennungsanlage mit stationärer Wirbelschichtfeuerung zugeführt. Der Phosphor wird in einem nachgeschalteten Verfahren aus der Klärschlammverbrennungsasche extrahiert. Die Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen sind in Abbildung 69 dargestellt.

Die Klärschlamm Trocknung findet auf dem Gelände der Klärschlammverbrennungsanlage statt, zu dem der entwässerte Klärschlamm per LKW transportiert wird. Dem Trocknungsprozess werden 1.000 kg entwässerten Klärschlamm, welcher auf einen TR-Gehalt von 47 % getrocknet wird, sowie 11.490 kg Umgebungsluft zugeführt. Dadurch wird der Heizwert auf 4,5 MJ/kg erhöht, sodass eine autotherme Verbrennung in einer stationären Wirbelschichtfeuerung möglich ist. Aus dem Trocknungsprozess treten 530 kg teilgetrockneter Klärschlamm sowie 11.960 kg feuchte Abluft aus. Die stationäre Wirbelschicht wird mit einer Luftzahl von 1,2 betrieben. Damit werden dem Verbrennungsprozess 890 kg Umgebungsluft zugeführt. Durch die Klärschlammverbrennung entstehen 1.315 kg Abgas, die in eine Abgasreinigung geleitet werden. Es verbleiben 105 kg Klärschlammverbrennungsasche mit einem Phosphorgehalt von

70 g/kg<sub>Asche</sub>. Die Asche wird per LKW zu einem Phosphorrückgewinnungsstandort transportiert. Dort werden durch ein nasschemisches Extraktionsverfahren aus 105 kg Klärschlammverbrennungsasche 30 kg Phosphorsäure hergestellt. Dazu sind 70 kg Hilfsstoffe (z. B. Salzsäure, Sulfide, Ionenaustauscher) erforderlich. Neben dem Zielprodukt Phosphorsäure entstehen 40 kg Nebenprodukte (z. B. Eisen-, Metallchloride) sowie 105 kg Reststoffe (z. B. ausgelaugte Asche). Die Reststoffe werden einer stofflichen Verwertung im Bergversatz zugeführt.

Abbildung 69: Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für Szenario B



Quelle: eigene Darstellung, TEER

Der Trockner benötigt 365 kWh Wärme und 25 kWh Strom. Über die Umgebungsluft wird zusätzliche Wärme von 50 kWh in den Trockner eingebracht. Aus der trocknungsbedingten Heizwerterhöhung des Klärschlammes resultiert ein Anstieg der mit dem Klärschlamm der Verbrennung zugeführten Energie von 365 kWh auf 675 kWh. Mit der Abluft werden 110 kWh Abwärme aus dem Trockner abgeführt. Bei der Klärschlammverbrennung fällt eine nutzbare Wärmemenge von 615 kWh an. Verluste ergeben sich aus der mit dem Rauchgas (60 kWh) und der Verbrennungsasche (5 kWh) abgeführten Wärme. Der Wärmebedarf des Trockners kann vollständig durch die Wärme aus der Klärschlammverbrennung gedeckt werden. Die nicht zur Trocknung genutzte Wärme (250 kWh) wird zur Stromerzeugung (75 kWh) verwendet, um den Eigenbedarf der Klärschlammverbrennungsanlage, der Trocknung und der Phosphorrückgewinnung zu decken. Das nasschemische Phosphorrecyclingverfahren benötigt eine Wärmemenge von 50 kWh sowie eine elektrische Energie von 5 kWh. Die Wärmebereitstellung erfolgt durch Erdgas. Für den Transport des entwässerten Klärschlammes gelten dieselben Bedingungen wie in Szenario A. Zusätzlich kommen der Transport der

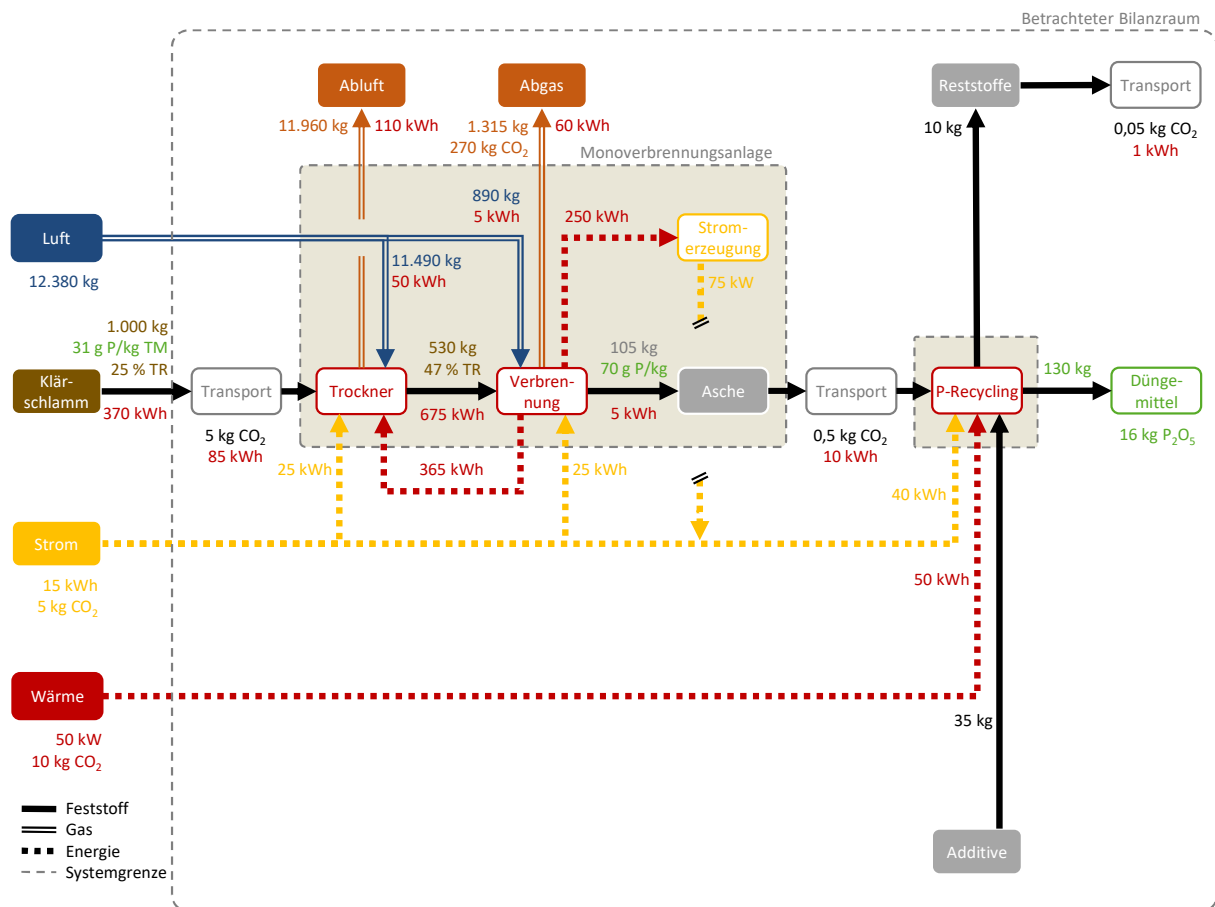
Klärschlammverbrennungsasche zur Phosphorrückgewinnungsanlage sowie der Reststoffe aus dem Phosphorrecyclingprozess zur Ascheverwertung mit jeweils 10 kWh hinzu.

Durch den Transport des entwässerten Klärschlammes sowie die Verbrennung, werden, wie in Szenario A, 5 bzw. 270 kg CO<sub>2</sub> emittiert. Der Trocknungsprozess verursacht keine zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen, da die Energiebereitstellung vollständig durch die Abwärme und Stromerzeugung der Klärschlammverbrennung gedeckt wird. Durch den Transport der Klärschlammverbrennungsasche zur Phosphorrückgewinnungsanlage entstehen weitere 0,5 kg CO<sub>2</sub>. Der Reststofftransport setzt 1 kg CO<sub>2</sub> frei. Die Wärmebereitstellung im Phosphorrecyclingprozess verursacht 45 kg CO<sub>2</sub>.

### 7.3.3 Szenario C

Das Szenario C unterscheidet sich vom Szenario B lediglich in der Art des Phosphorrückgewinnungsverfahrens. Daher sind die Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen (Abbildung 70) bis zu diesem Punkt identisch. Die Behandlung der Klärschlammverbrennungsasche erfolgt thermochemisch. Durch Zugabe von 35 kg Additiven (z. B. Natriumcarbonat) können aus 105 kg Klärschlammverbrennungsasche 130 kg Düngemittel (16 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) hergestellt werden. Zusätzlich fallen 10 kg Reststoffe (Filterstaub) an, die per LKW zur stofflichen Verwertung (z. B. Bergversatz) transportiert werden.

Abbildung 70: Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für Szenario C



Quelle: eigene Darstellung, TEER

Für das thermochemische Phosphorrecycling werden 50 kWh Wärme benötigt, die über einen Erdgasbrenner zur Verfügung gestellt werden. Der Strombedarf beträgt 40 kWh. Die

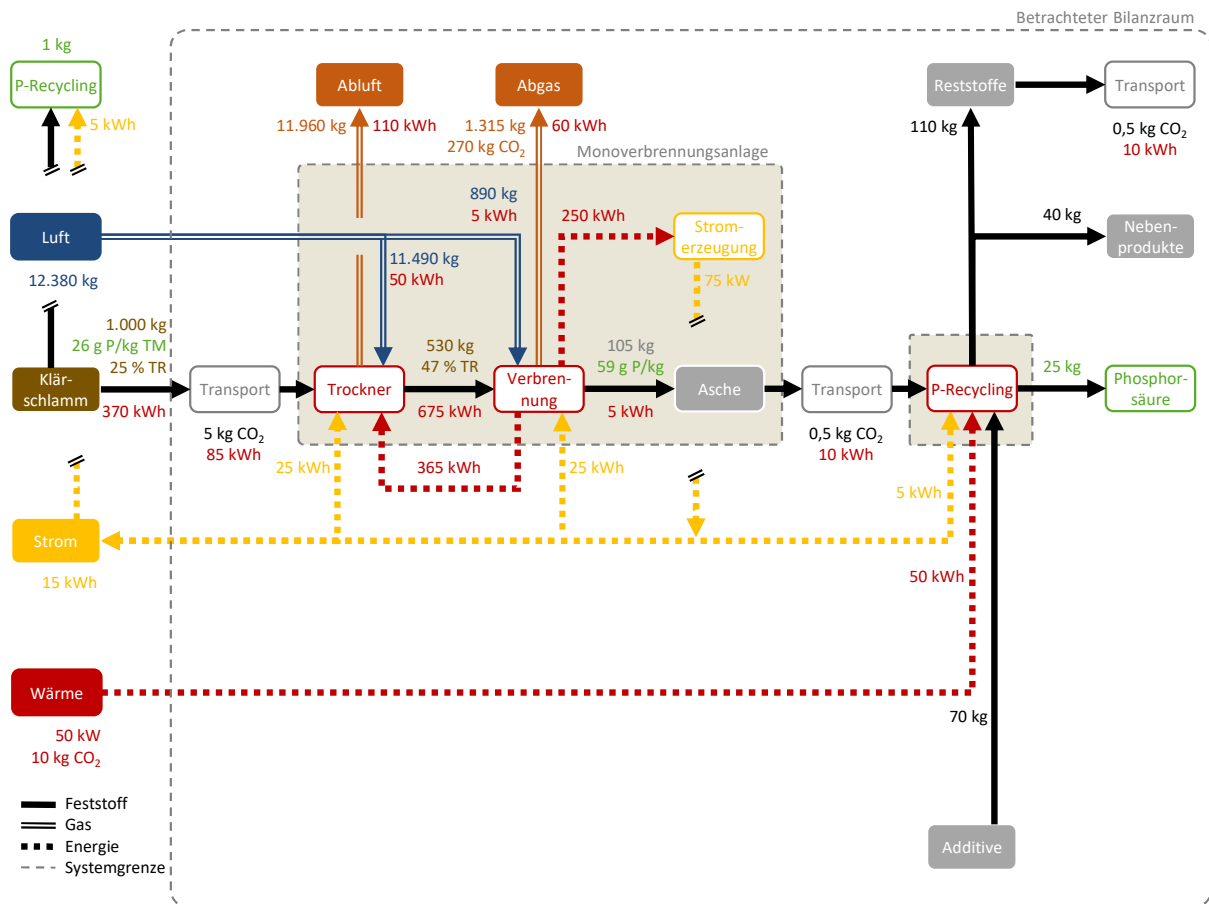
Klärschlammverbrennung erzeugt 75 kWh Strom, von denen 25 kWh für den Eigenbedarf aufgewendet werden. Die restlichen 50 kWh werden der Trocknung (20 kWh) und Phosphorrückgewinnung (30 kWh) anteilig gutgeschrieben. Insgesamt müssen so noch 15 kWh aus dem Stromnetz bezogen werden. Der Transport der Reststoffe zum Bergversatz benötigt 1 kWh Energie.

Bei der Aschebehandlung entstehen durch die Wärmebereitstellung CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 10 kg. Der Strombezug aus dem Netz verursacht 5 kg CO<sub>2</sub>. Durch den Transport der Reststoffe werden 0,05 kg CO<sub>2</sub> freigesetzt.

#### **7.3.4 Szenario D**

Das Szenario D unterscheidet sich nur in der Vorbehandlung des zugeführten Klärschlammes von Szenario B. Auf der Kläranlage wird bereits eine Phosphorrückgewinnung durchgeführt. Allerdings wird der Phosphorgehalt im entwässerten Klärschlamm nur auf 26 g/kg<sub>TM</sub> reduziert, indem auf der Kläranlage 1 kg Phosphor abgeschieden wird. Der Restgehalt überschreitet den Schwellenwert der AbfKlärV von 20 g/kg<sub>TM</sub>, sodass eine weitere Phosphorrückgewinnung erforderlich ist und der Klärschlamm entsprechend einer Klärschlammverbrennungsanlage zugeführt wird. Die Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz des Behandlungspfades ist in Abbildung 71 dargestellt. Aufgrund der vorgeschalteten Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage ist der Phosphorgehalt in der Klärschlammverbrennungsasche aus der Klärschlammverbrennung mit 59 g/kg niedriger als in den Szenarien B und C. Die Bilanzierung von Trocknung, Klärschlammverbrennung sowie der Transporte des entwässerten Klärschlammes und der Klärschlammverbrennungsasche unterscheidet sich nicht von den Szenarien B und C. Aufgrund des reduzierten Phosphorgehalts in der Asche wird in der Phosphorrückgewinnung mit 25 kg eine geringere Menge Phosphorsäure hergestellt als in Szenario B (30 kg) und die Reststoffmenge wird auf 110 kg erhöht. Die vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage wird mit einem Strombedarf von 5 kWh berücksichtigt.

Abbildung 71: Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für Szenario D



Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 7.3.5 Szenario E

In Szenario E ist eine thermische Behandlung des Klärschlammes in einem sonstigen thermischen Behandlungsverfahren, in diesem Fall der Pyrolyse, vorgesehen. Da die Nutzung des erzeugten kohlenstoffhaltigen Rückstandes als Düngemittel in Deutschland nach aktuell geltendem Recht nicht zulässig ist (vgl. Kapitel 2.1.4.1), wird eine zusätzliche thermische Behandlung zur Erfüllung der Phosphorrückgewinnungspflicht betrachtet. Hierzu wird der kohlenstoffhaltige Rückstand zunächst verbrannt und im Anschluss einer nasschemischen Phosphorrückgewinnung aus der Verbrennungsasche zugeführt.

In Abbildung 72 sind die Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen des Szenarios E dargestellt. Auf der Kläranlage erfolgt keine vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung. Der entwässerte Klärschlamm tritt mit einem Phosphorgehalt von 31 g/kg<sub>TM</sub> in den Bilanzraum ein. Die Bilanzierung des Transports des entwässerten Klärschlammes erfolgt analog zu den vorherigen Szenarien, die der Trocknung analog zu Szenario A. Für den Pyrolyseprozess ist eine Volltrocknung des Klärschlammes auf einen TR-Gehalt von 90 % erforderlich. Die im Klärschlamm enthaltene Mineralik sowie ca. 50 % des enthaltenen Kohlenstoffs bilden das Pyrolyseprodukt. Daraus ergeben sich eine Masse von 140 kg bzw. ein Anteil von 50 % als fester Rückstand, bezogen auf den Feststoffinput. Der Phosphor verbleibt zu 95 % (Annahme auf Basis von Erfahrungswerten) mit der Mineralik im Rückstand, sodass dieser einen Phosphorgehalt von 53 g/kg aufweist. Die flüchtigen Bestandteile des Klärschlammes bilden zusammen mit dem zur Reaktorspülung eingesetzten Stickstoff das Pyrolysegas. Dieses besteht außerdem hauptsächlich aus CO<sub>2</sub> und CO. Das Pyrolysegas wird zur Energiebereitstellung für den endothermen Pyrolyseprozess in einer

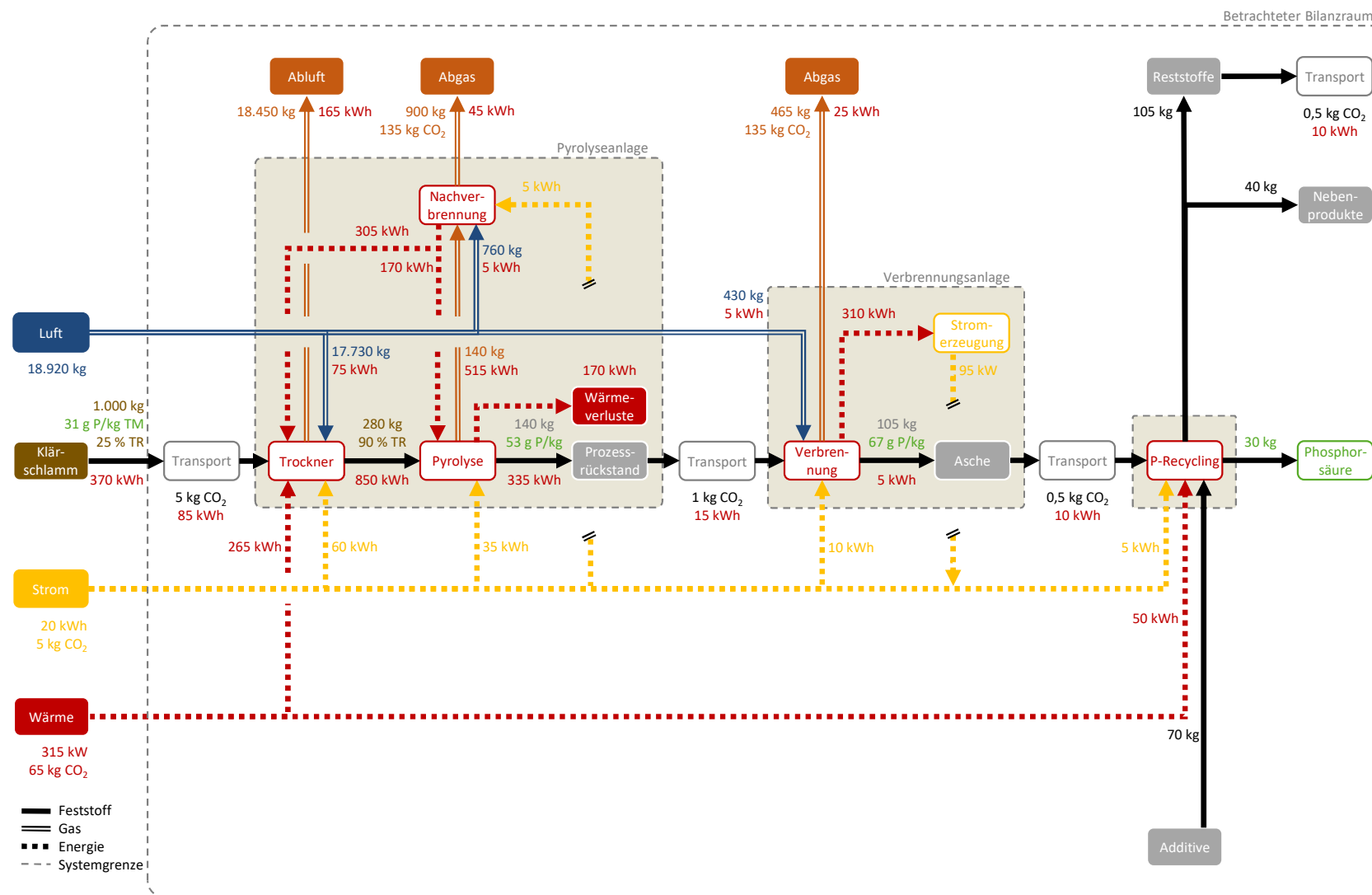


nachgeschalteten Brennkammer bei ca. 1.000 °C verbrannt. Durch die vollständige Oxidation der Gasphase und eine anschließenden Abgasreinigung werden schädliche Umweltauswirkungen durch die Pyrolysegase verhindert. Für die Nachverbrennung müssen 760 kg Luft zugeführt werden. Es resultiert eine Abgasmasse von 900 kg. Um der zukünftigen Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm nachzukommen, müssen die Rückstände der Pyrolyse in nachgeschalteten Prozessen weiterbehandelt werden. Nach Kenntnis der Autoren existiert jedoch kein Phosphorrückgewinnungsverfahren für Pyrolyserückstände. Daher wird das feste Pyrolyseprodukt per LKW zu einer Klärschlammverbrennungsanlage transportiert. Dort wird der kohlenstoffhaltige Rückstand verbrannt, sodass eine Phosphorrückgewinnung aus der Verbrennungsasche mit den bekannten Verfahren möglich wird. Die Verbrennung findet unter denselben Randbedingungen wie in den Szenarien B bis D statt. Für die vollständige Oxidation von 140 kg Pyrolyseprodukt werden bei einer Luftzahl von 1,2 etwa 430 kg Luft benötigt. Wie in den vorherigen Szenarien A bis D verbleiben nach der Verbrennung 105 kg Klärschlammverbrennungsasche, die mit 67 g/kg allerdings einen etwas geringeren Phosphorgehalt als in den Szenarien B und C aufweist, da mit der Pyrolyse zusätzlich zur Verbrennung ein geringer Anteil Phosphor in die Gasphase überführt wurde. Es entstehen insgesamt 465 kg Abgas. Die Bilanzierung des Transports der Verbrennungsasche und der nasschemischen Phosphorrückgewinnung erfolgt analog zu Szenario B.

Für den Pyrolyseprozess besteht ein Strombedarf in Höhe von 40 kWh. Hiervon entfallen 35 kWh auf den Reaktor und 5 kWh auf die Nachverbrennung. Die überwiegend endotherm ablaufenden Reaktionen der Pyrolyse führen dazu, dass die chemisch gebundene Energie im vollgetrockneten Klärschlamm (850 kWh) nur teilweise genutzt wird und externe Energie in den Prozess zugeführt werden muss. Das Pyrolyseprodukt weist einen Heizwert von 8,5 MJ/kg auf, sodass 335 kWh chemisch gebundene Energie im Feststoff verbleiben. Das Pyrolysegas hat einen Heizwert von 12,4 MJ/kg. Entsprechend werden mit dem Pyrolysegas 515 kWh aus dem Reaktor ausgetragen. Die Energie des Pyrolysegases wird in der Nachverbrennung in nutzbare Wärme umgewandelt. Mit der Verbrennungsluft werden zusätzliche 5 kWh Wärme in die Nachverbrennung eingetragen. Abzüglich der Wärmeverluste in Höhe von 45 kWh, die über das Abgas ausgetragen werden, beträgt die nutzbare Wärme 475 kWh. Ein Teil (170 kWh) wird für die autotherme Betriebsweise des Reaktors verwendet, die verbleibenden 305 kWh werden zur Trocknung des Klärschlammes genutzt. Diese reicht zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs der Trocknung (570 kWh) allerdings nicht aus. Der zusätzliche Wärmebedarf für die Trocknung in Höhe von 265 kWh wird über Erdgasbrenner bereitgestellt. Die Wärmeverluste des Pyrolyseprozesses betragen 170 kWh. Der Transport des Pyrolyse-Rückstands zur Verbrennungsanlage geht mit einem Energieaufwand von 15 kWh einher. Bei den exotherm verlaufenden Reaktionen in der Verbrennung wird der chemisch gebundene Energiegehalt des kohlenstoffhaltigen Rückstands umgewandelt und in Form von Wärme nutzbar gemacht. Ergänzend zur chemisch gebundenen Energie des Klärschlammes werden 5 kWh Wärme über die Verbrennungsluft in die Feuerung eingetragen. Abzüglich der Verluste durch Wärme im Abgas (25 kWh) und in der Verbrennungsasche (5 kWh) steht ein nutzbarer Wärmestrom in Höhe von 310 kWh zur Verfügung. An der Feuerungsanlage besteht kein Wärmebedarf, da die Klärschlamm-trocknung bereits vor der Pyrolyse an einem anderen Standort stattfindet. Daher wird die Abwärme zur Erzeugung von 95 kWh Strom verwendet. Dieser wird zur Deckung des Eigenbedarfs in Höhe von 10 kWh am Verbrennungsstandort verwendet sowie ins Stromnetz eingespeist. Der überschüssige Strom kann den Bedarf der Pyrolyseanlage (inkl. Trocknung und Nachverbrennung) und der Phosphorrückgewinnung rechnerisch zu ca. 80 % decken. Der zusätzliche Strombedarf (20 kWh) wird aus dem Netz bereitgestellt.



Abbildung 72: Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für Szenario E



Quelle: eigene Darstellung, TEER

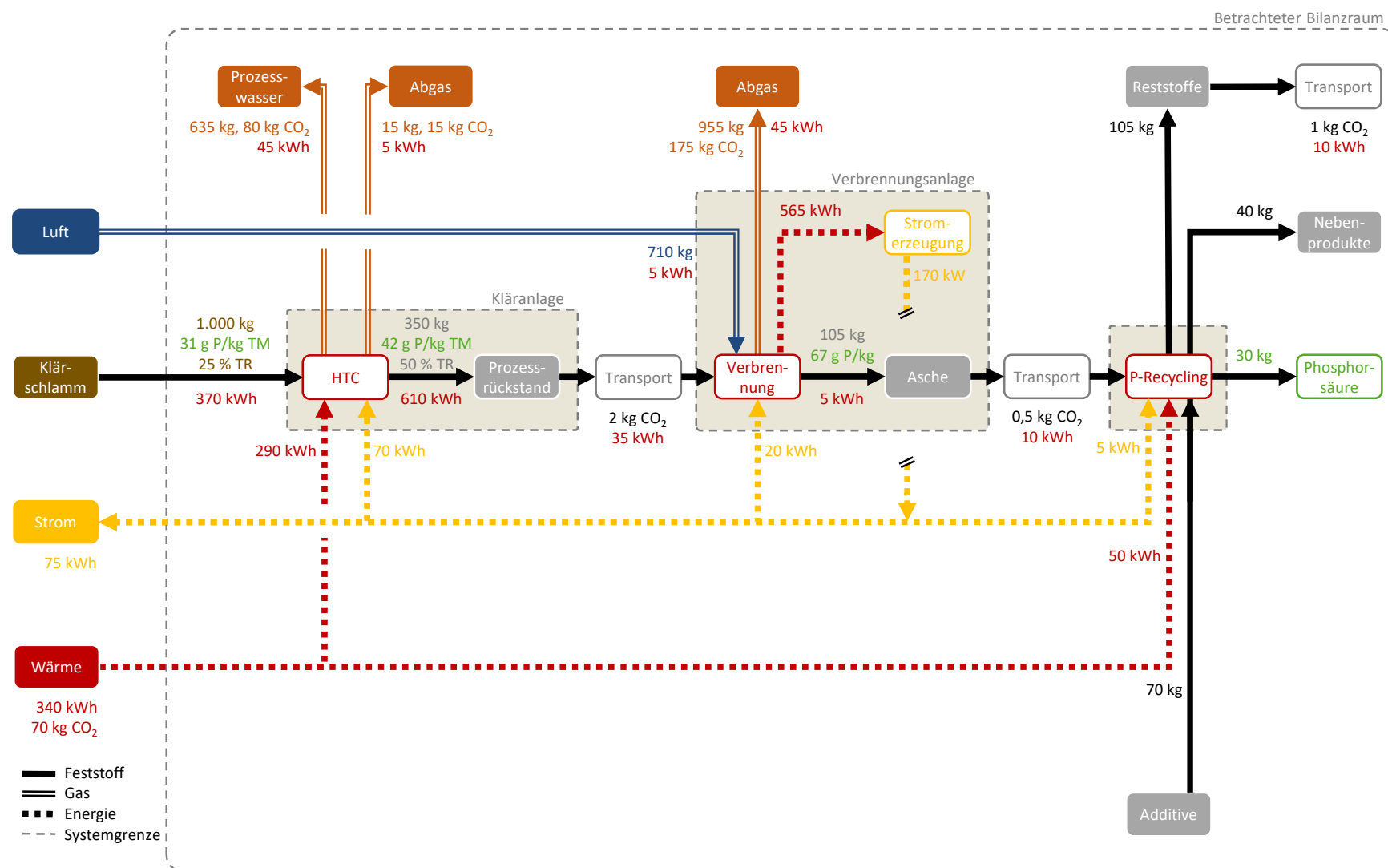
Durch die Wärmebereitstellung mit Erdgas für Trocknung und Phosphorrückgewinnung werden 65 kg CO<sub>2</sub> emittiert. Der Strombezug aus dem Netz verursacht 5 kg CO<sub>2</sub>. Im Abgas der Nachverbrennung sind 135 kg CO<sub>2</sub> enthalten, die in die Atmosphäre entweichen und den Großteil des anfallenden CO<sub>2</sub> ausmachen. Im kohlenstoffhaltigen Rückstand verbleiben 35 kg Kohlenstoff, sodass dort 135 kg potenzielles CO<sub>2</sub> gespeichert sind. Dieses wird bei der Verbrennung des kohlenstoffhaltigen Rückstands frei. Durch den Transport des Pyrolyse-Rückstands zur Feuerung werden 1 kg CO<sub>2</sub> freigesetzt.

### 7.3.6 Szenario F

Die Hydrothermale Karbonisierung (HTC) wird in Szenario F als Alternative zur klassischen Trocknung betrachtet. Die festen Produkte des HTC-Verfahrens dürfen wie die der Pyrolyse nicht als Düngemittel eingesetzt werden (vgl. Kapitel 2.1.4.3). Daher sind ebenfalls nachgeschaltete Behandlungsschritte durchzuführen, um der zukünftigen Pflicht zur Phosphorrückgewinnung nachzukommen. Da den Autoren kein Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus den festen Behandlungsrückständen des HTC-Prozesses bekannt ist, wird auch in diesem Szenario ein weiterer Verbrennungsschritt betrachtet. Anschließend findet eine nasschemische Phosphorextraktion aus der Verbrennungsasche und eine Verwertung der phosphorabgereicherten Asche statt. HTC-Verfahren können prinzipiell auch so ausgelegt werden, dass ein möglichst großer Phosphoranteil in die Flüssigphase überführt wird, sodass der Phosphor daraus zurückgewonnen werden kann. Dieser Fall wird in diesem Szenario nicht betrachtet.

In Abbildung 73 ist die Bilanzierung des Szenarios F gezeigt. Auf der Kläranlage erfolgt keine vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung, sodass der entwässerte Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 31 g/kg<sub>TM</sub> aufweist. Bei der hydrothermalen Karbonisierung verbleiben die Mineralien fast vollständig und ca. 65 % des Kohlenstoffs aus dem Klärschlamm im festen Rückstand. Auf die Trockenmasse bezogen ergibt sich insgesamt eine Feststoffausbeute von ca. 70 %. Das HTC-Produkt weist nach dem Prozess einen Wassergehalt von ca. 50 % auf, sodass eine Gesamtmasse von 350 kg anfällt. Der Phosphorgehalt beträgt 42 g/kg<sub>TM</sub>. Der restliche Kohlenstoff des Klärschlammes, der nicht im festen Rückstand verbleibt, geht zu ca. 30 % ins Prozesswasser und zu ca. 5 % ins Prozessgas über. Insgesamt resultieren eine Prozesswassermasse von 635 kg und eine Abgasmasse von 15 kg, die vor Einleitung in die Kläranlage bzw. Abgabe an die Umwelt aufbereitet werden müssen. Für die weitere Behandlung wird das HTC-Produkt zu einer Verbrennungsanlage transportiert. Die Randbedingungen der Verbrennung entsprechen denen der Szenarien B bis E. Der Brennkammer werden das HTC-Produkt sowie 710 kg Luft zugeführt (Luftzahl 1,2). Als Feststoffe verbleiben 105 kg Klärschlammverbrennungsasche. Der Phosphorgehalt der Klärschlammverbrennungsasche liegt mit 67 g/kg im Bereich des Szenarios E. Dies ist darin begründet, dass ein Teil des Phosphors im Prozesswasser verbleibt oder mit dem Abgas entweicht. Insgesamt verlassen 955 kg Abgas die Feuerung. Nach einer Rauchgasreinigung wird es über einen Kamin in die Atmosphäre abgegeben. Die Klärschlammverbrennungsasche wird zur nasschemischen Phosphorrückgewinnung transportiert. Die Bilanzierung des Transports zur Phosphorrückgewinnung sowie der nasschemischen Phosphorrückgewinnung erfolgt analog zu Szenario B und E.

Abbildung 73: Massen-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für Szenario F



Quelle: eigene Darstellung, TEER

Im entwässerten Klärschlamm sind 370 kWh chemisch gebundene Energie enthalten. Analog zur Pyrolyse wird diese beim HTC-Prozess kaum freigesetzt, sodass das HTC-Produkt einen Heizwert von 6,2 MJ/kg bei einem TR-Gehalt von 50 % aufweist. Daraus resultiert eine chemisch gebundene Energie im Feststoff von 610 kWh. Durch die abgeführte Wärme mit dem Prozesswasser und dem Abgas treten Energieverluste in Höhe von 45 kWh bzw. 5 kWh auf. Dem HTC-Prozess müssen 290 kWh thermische Energie zugeführt werden, die durch Erdgasbrenner bereitgestellt wird. Außerdem benötigt der Prozess 70 kWh elektrische Energie. Hiervon macht die Abwasserbehandlung ca. 50 % aus. Der Transport des HTC-Produkts zur Verbrennungsanlage erfordert einen Energieaufwand von 35 kWh. In der Feuerung wird die chemische Energie des HTC-Produkts vollständig in thermische Energie umgewandelt. Mit der Verbrennungsluft werden zusätzlich 5 kWh Wärme in die Feuerung eingetragen. Verluste entstehen durch die Wärme der Verbrennungsasche (5 kWh) und des Abgases (45 kWh). Die nutzbare Abwärme in Höhe von 565 kWh wird in Strom umgewandelt (170 kWh), da am Anlagenstandort kein Wärmebedarf besteht. Dieser ist ausreichend, um die gesamte Prozesskette vom HTC-Prozess bis zur Phosphorrückgewinnung zu versorgen. Die Wärmebereitstellung für die Phosphorrückgewinnung (50 kWh) erfolgt vollständig durch Erdgas, sodass in diesem Szenario insgesamt 340 kWh Wärme durch Erdgasbrenner zur Verfügung gestellt werden müssen.

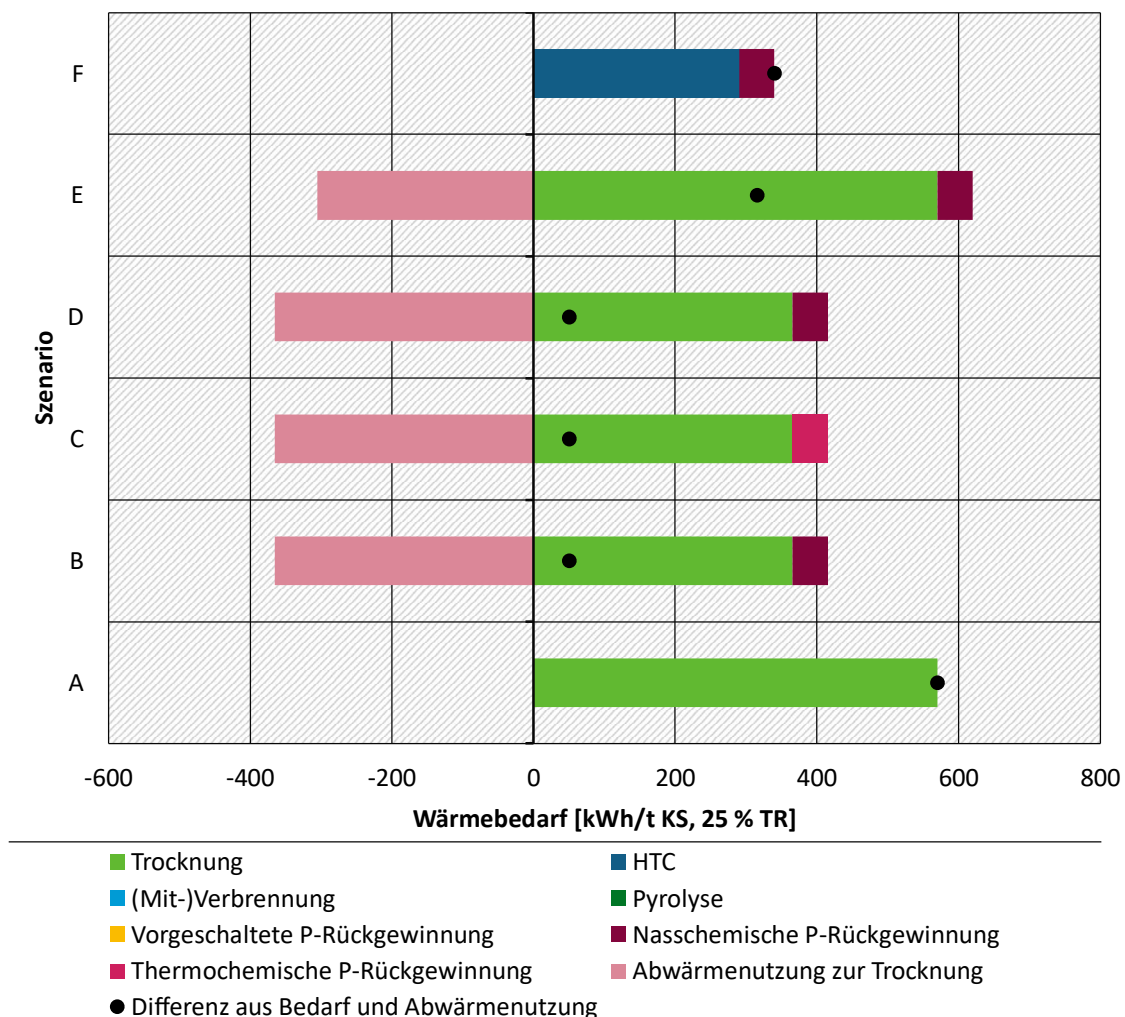
Beim HTC-Verfahren entstehen 95 kg CO<sub>2</sub>, davon werden 80 kg bei der Prozesswasserbehandlung frei. Die übrigen 15 kg werden beim Verbrennen des Prozessgases freigesetzt. Weitere 175 kg CO<sub>2</sub> entstehen bei der Verbrennung des festen HTC-Produkts. Die zusätzliche Wärmebereitstellung durch Erdgasbrenner für den HTC-Prozess sowie die nasschemische Phosphorrückgewinnung verursachen 70 kg CO<sub>2</sub>. Durch die Strombereitstellung fallen keine weiteren CO<sub>2</sub>-Emissionen an, da diese rechnerisch vollständig aus der Eigenerzeugung erfolgt. Der Transport des HTC-Rückstands emittiert 2 kg CO<sub>2</sub>.

### 7.3.7 Gegenüberstellung der Bilanzen

In Abbildung 74 sind die Wärmebilanzen der zuvor betrachteten Szenarien A bis F zusammengefasst. Den höchsten Bedarf weisen die Szenarien A (570 kWh) und E (620 kWh) auf. Die Trocknung bzw. das HTC-Verfahren machen in allen Szenarien den größten Anteil am Wärmebedarf aus (85 % bei Szenario F bis 100 % bei Szenario A). Hierbei unterscheiden sich die klassische Trocknung (365-570 kWh) und das HTC-Verfahren (290 kWh). Der Unterschied des Wärmebedarfs der Szenarien bei der Trocknung resultiert aus den verschiedenen zu verdampfenden Wassermassen. So benötigt die Trocknung auf einen TR-Gehalt von 90 % (Szenarien A und E) mit 570 kWh mehr Wärme als die Teiltrocknung auf einen TR-Gehalt von 47 % (Szenario B-D; 365 kWh). Das HTC-Verfahren (Szenario F) hat mit 290 kWh den geringsten Wärmebedarf. Aus den Wärmebedarfen der Trocknung wird die Bedeutung der Abwärmenutzung zur Einsparung externer Energieträger deutlich. Abwärme steht in allen Szenarien durch die exothermen Verbrennungsreaktionen zur Verfügung. Diese ist insbesondere von der Brennstoffmasse sowie dem Heizwert abhängig. In den Szenarien A bis D fällt die Abwärme in der Klärschlammverbrennung und in den Szenarien E und F in der Verbrennung der kohlenstoffhaltigen Rückstände an. Bei der Pyrolyse entsteht zusätzlich Abwärme durch die Verbrennung der Pyrolysegase. Um die Abwärme nutzbar zu machen, müssen an der Wärmequelle entsprechende verfahrenstechnische Aggregate (z. B. Wärmeübertrager) und Wärmenetze vorhanden sein. Daher erfolgt in Szenario A (Zementwerk) keine Abwärmenutzung zur Klärschlamm-trocknung. In den Szenarien mit Klärschlammmonoverbrennung (B-D) sind die Potenziale zur Abwärmenutzung ausreichend, um den Bedarf der Trocknung mit 365 kWh vollständig zu decken. Überschüssige Abwärme, die über den Trocknungsbedarf hinausgeht, wird in elektrische Energie umgewandelt. In Szenario E steht für die Trocknung nur die

Abwärme aus der Pyrolysegasverbrennung zur Verfügung (305 kWh), da die Verbrennung des kohlenstoffhaltigen Rückstands an einem anderen Standort stattfindet. Daher muss ein Teil des Wärmebedarfs durch den Energieträger Erdgas abgedeckt werden. Die nutzbare Wärme aus der Verbrennung der kohlenstoffhaltigen Rückstände wird vollständig in elektrische Energie umgewandelt, da am Anlagenstandort kein Wärmebedarf für die Trocknung besteht. Dies erfolgt in Szenario F analog. Die nachgeschalteten Phosphorrückgewinnungsverfahren unterscheiden sich in Bezug auf den Wärmebedarf nicht. Sowohl das nasschemische als auch das thermochemische Phosphorrückgewinnungsverfahren benötigen 50 kWh. Die vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung in den Szenarien A und D haben keinen Wärmebedarf. Durch die Nutzbarmachung der Abwärme müssen in den Szenarien mit Klärschlammverbrennung insgesamt 50 kWh (12 % des Gesamtbedarfs) extern bereitgestellt werden, während es bei der Mitverbrennung 570 kWh und beim HTC-Verfahren 340 kWh (jeweils 100 %) sind. Im Pyrolyse-Szenario müssen 315 kWh (50 %) zusätzlich bereitgestellt werden.

**Abbildung 74: Wärmebilanzen der Szenarien A bis F**



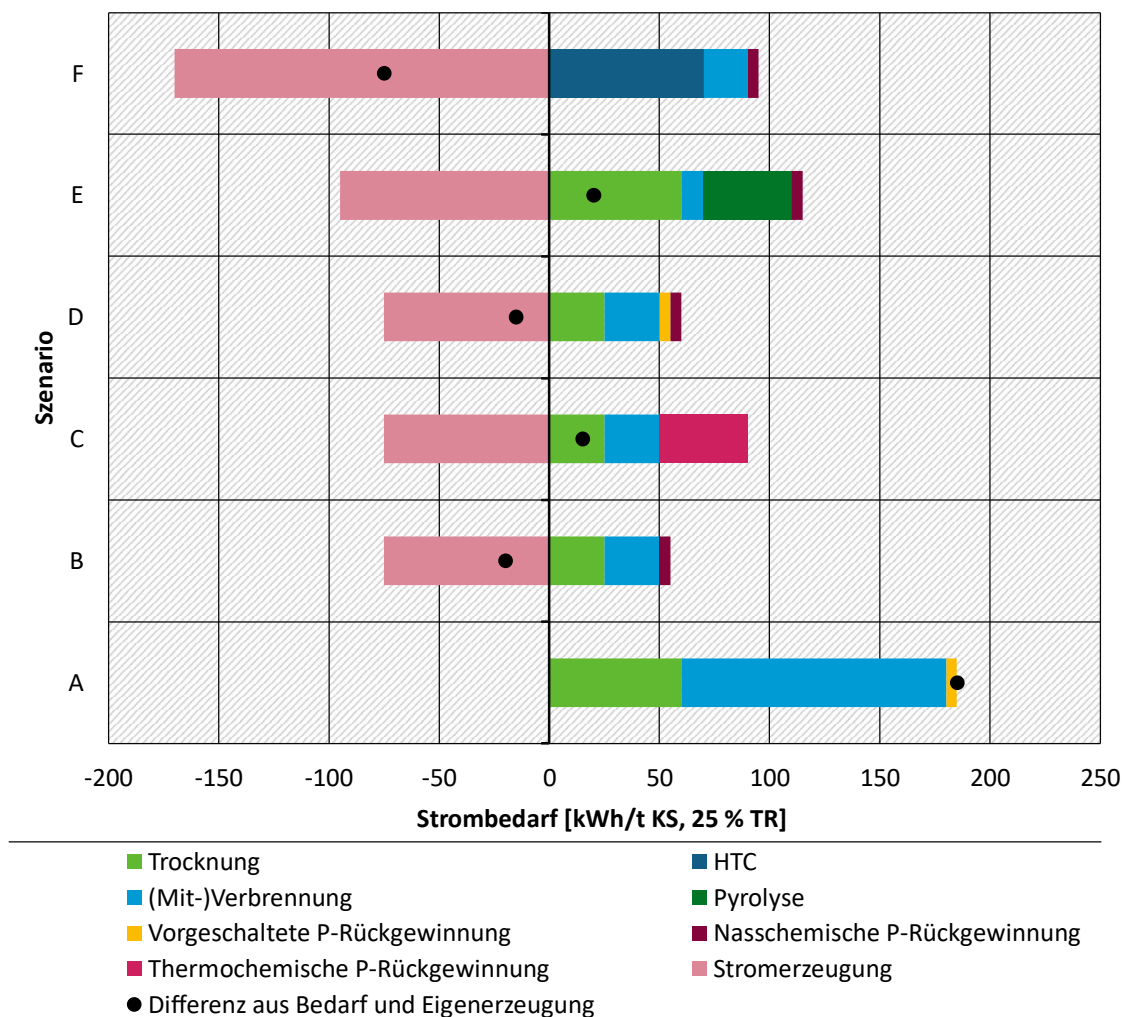
Quelle: eigene Darstellung, TEER

In Abbildung 75 sind die Strombilanzen der Szenarien A bis F dargestellt. Analog zum Wärmebedarf weisen die Szenarien A (185 kWh) und E (115 kWh) den größten Strombedarf auf. Die niedrigsten Bedarfe haben die Szenarien B (55 kWh) und D (60 kWh). Die Szenarien B, D und F können ihren Strombedarf vollständig durch Eigenerzeugung in den



Verbrennungsanlagen decken. In den übrigen Szenarien ist ein zusätzlicher Bezug aus dem Stromnetz erforderlich. Aufgrund der in Tabelle 39 getroffenen Annahmen weist die Mitverbrennung im Zementwerk (Szenario A; 120 kWh) den höchsten Stromverbrauch auf. Im Vergleich dazu ist der Verbrauch der Klärschlammverbrennung mit 25 kWh (Szenario B-D) erkennbar geringer. Der Strombedarf für die Feuerungen für die Pyrolyse- und HTC-Rückstände (Szenario E: 10 kWh; Szenario F: 20 kWh) ist noch geringer. Hier liegen die Unterschiede insbesondere in den geringeren Brennstoffmassen, die der Verbrennung zugeführt werden. Die Pyrolyse in Szenario E verbraucht 15 kWh mehr Strom als die Klärschlammverbrennung. Von den 40 kWh Gesamtverbrauch, entfallen 35 kWh auf den Betrieb des Reaktors und 5 kWh auf die Nachverbrennung der Pyrolysegase. Allgemein höhere Energieverbräuche bei der Pyrolyse sind durch das Verfahren selbst zu begründen. Der Pyrolyseprozess verläuft überwiegend endotherm, sodass im Gesamtprozess weniger Wärme freigesetzt wird und somit weniger überschüssige Wärme in Strom umgewandelt werden kann.

**Abbildung 75: Strombilanzen der Szenarien A bis F**



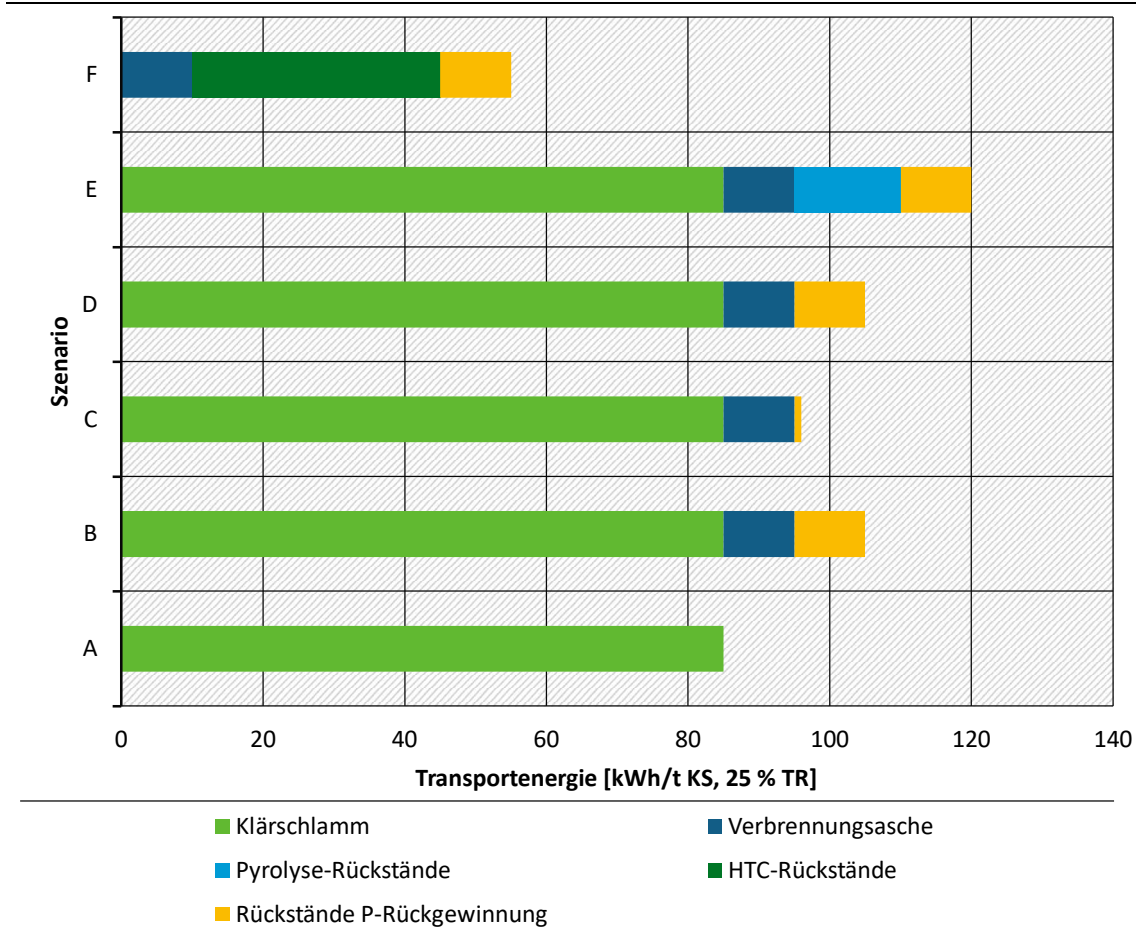
Quelle: eigene Darstellung, TEER

Analog zum Wärmebedarf weist die Volltrocknung mit 60 kWh einen höheren Stromverbrauch als die Teiltrocknung mit 35 kWh auf. Das HTC-Verfahren hat mit 70 kWh den höchsten Strombedarf. Ein Grund hierfür ist die Prozesswasserbehandlung, die ca. 50 % des Stromverbrauchs ausmacht (Blöhse, 2017). Für die Phosphorrückgewinnung bestehen in der

Strombilanz erkennbare Unterschiede zwischen dem nasschemischen und dem thermochemischen Verfahren. Unter den in Tabelle 39 getroffenen Annahmen weist das thermochemische Phosphorrückgewinnungsverfahren mit 40 kWh einen achtfach höheren Strombedarf auf als die nasschemischen Verfahren (5 kWh).

Den höchsten energetischen Transportaufwand (Abbildung 76) verursacht das Szenario E (120 kWh), da dort die meisten Transportwege (4) anfallen. Das Szenario F hat mit 55 kWh den geringsten Transportaufwand. Dies liegt daran, dass der Transport des entwässerten Klärschlammes entfällt. Dieser macht bei den Szenarien A-E mit 85 kWh den größten Transportaufwand aus (Szenario A: 100 %; Szenario E: 70 %). In Szenario A erfolgt nur der Transport des entwässerten Klärschlammes, da keine nachgeschaltete Phosphorrückgewinnung durchgeführt wird. Der Transport der Prozessrückstände aus der Pyrolyse erfordert einen Energieaufwand von 15 kWh. Mit 35 kWh liegt der Transportaufwand der HTC-Rückstände um 20 kWh höher. Dies liegt an der höheren Feststoffausbeute sowie dem höheren Wassergehalt des Rückstands. Aufgrund der größeren Reststoffmenge beträgt der Transportaufwand der Reststoffe beim nasschemischen Phosphorrückgewinnungsverfahren mit 10 kWh das zehnfache (1 kWh) vom thermochemischen Phosphorrückgewinnungsverfahren.

**Abbildung 76: Transportbezogene Energiebilanzen der Szenarien A bis F**



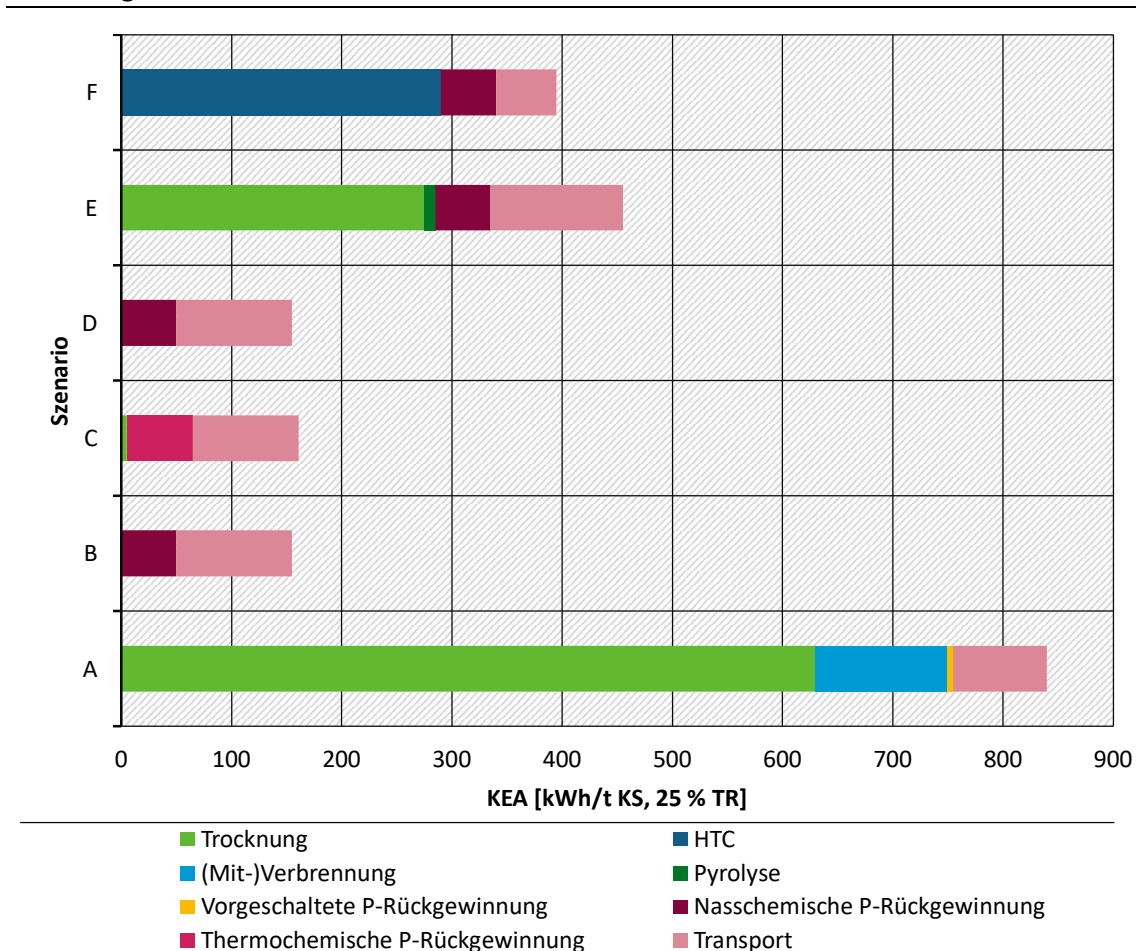
Quelle: eigene Darstellung, TEER

Um Aussagen über den Gesamtenergiebedarf zu treffen, wurde für jedes Szenario ein vereinfachter kumulierter Energieaufwand (KEA, vgl. Kapitel 7.2.3) berechnet. Abwärme und Strom aus Eigenerzeugung, die im Prozess selbst genutzt werden, entfallen als Primäraufwand. Die Eigennutzung von Strom- und Wärme hat entsprechend einen positiven (verringenden)



Einfluss auf den KEA. Die Ergebnisse sind in Abbildung 77 dargestellt und spiegeln die bisherigen Erkenntnisse wider. In den Szenarien B, D und F reicht die Abwärme der Verbrennung aus, um den Strombedarf durch Eigenerzeugung zu decken und den KEA zu senken. In den Szenarien B-E wird der KEA zudem durch die Abwärmenutzung bei der Trocknung reduziert. Den höchsten KEA hat das Szenario A mit 840 kWh. Die Szenarien B bis D weisen mit 155 bis 161 die niedrigsten KEA auf. Die Szenarien E (455 kWh) und F (320 kWh) liegen im mittleren Bereich zwischen Mono- und Mitverbrennung. Trocknungs- bzw. HTC-Verfahren machen den Hauptteil des KEA aus, sofern keine Abwärmenutzung erfolgen kann (Szenario A, E und F). In den Szenarien B-D (Klärschlammverbrennung), in denen keine Primärenergie zur Trocknung erforderlich ist, verursacht der Transport ca. 60 % (Szenario C) bis ca. 75 % (Szenario B und D) des KEA. Die Phosphorrückgewinnung macht in den Szenarien B bis D ca. 35 % des KEA aus.

**Abbildung 77: KEA der Szenarien A bis F**

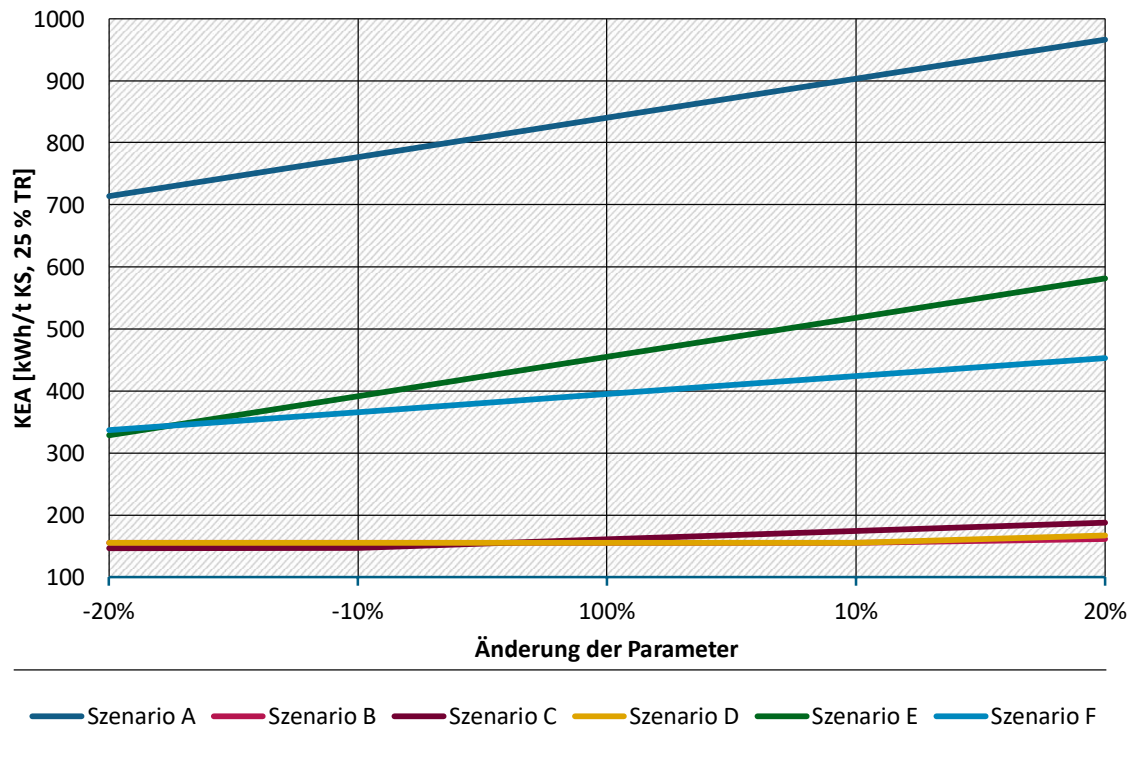


Quelle: eigene Darstellung, TEER

Zur Untersuchung der Beeinflussung des KEA durch die einzelnen Prozesskomponenten wurden Sensitivitätsanalysen erstellt. Es wurden Parametervariationen um  $\pm 10\%$  und  $\pm 20\%$ , bezogen auf den Basiswert betrachtet. In Abbildung 78 ist der KEA in Abhängigkeit des energetischen Primäraufwands der Trocknung dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Trocknung in den Szenarien B bis D nur einen geringen Einfluss auf den KEA hat. In Szenario B und C beeinflusst die Trocknung den KEA erst ab einer Erhöhung der eingesetzten Trocknungswärme von 20 %. Dies liegt daran, dass dann nicht mehr ausreichend Abwärme zur Eigenstromerzeugung vorliegt, um den Eigenbedarf vollständig zu decken. In Szenario A und E führt eine Veränderung des

primärenergetischen Trocknungsaufwands um 20 % zu einer Erhöhung bzw. Verringerung des KEA um 126 kWh. Die gleiche Veränderung führt in Szenario F zu einer Anpassung des KEA um 58 kWh. Im Anhang D.1.1 sind die Sensitivitätsanalysen für jedes Szenario vollständig dargestellt.

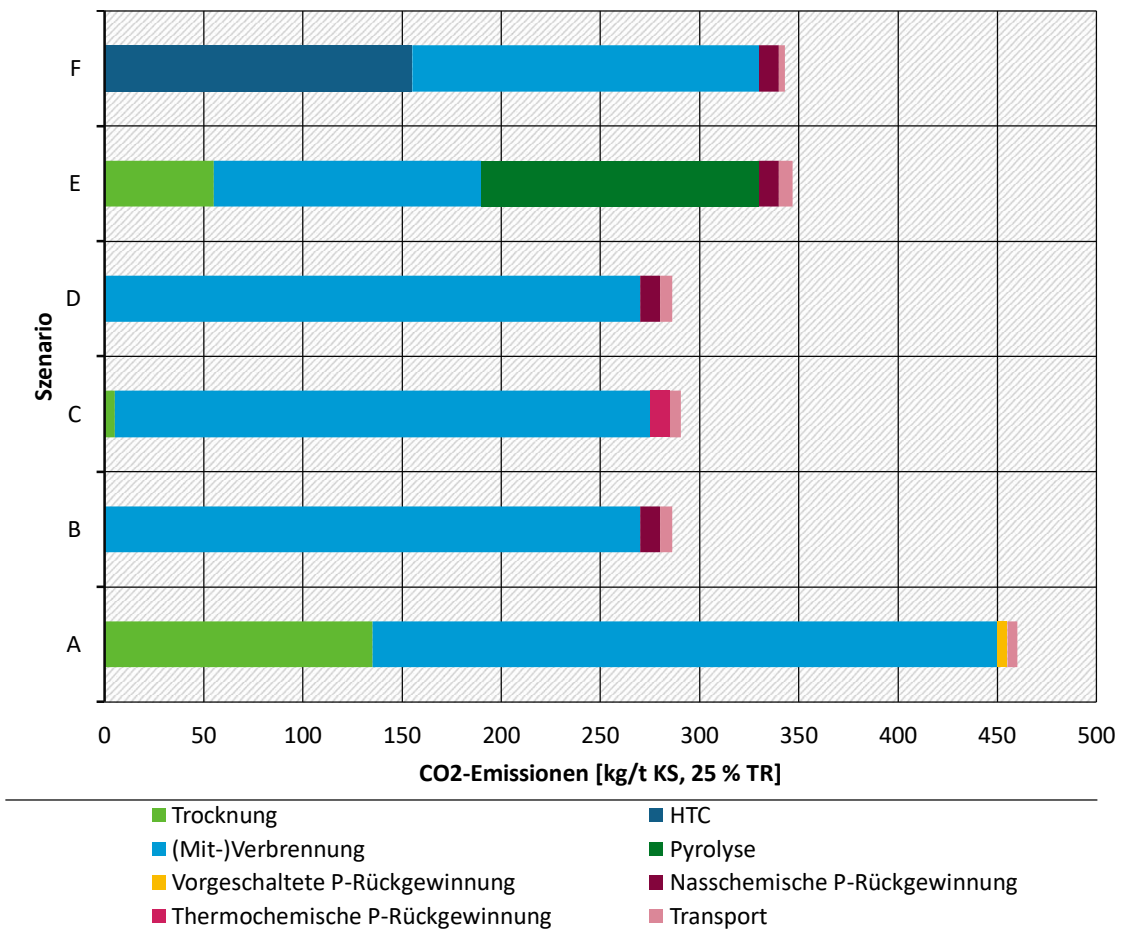
**Abbildung 78: KEA in Abhängigkeit von der eingesetzten Trocknungswärme**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

In Abbildung 79 sind die CO<sub>2</sub>-Bilanzen der untersuchten Szenarien zusammengefasst. Szenario B und D verursachen insgesamt die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen (286 kg). Im Szenario A werden mit 460 kg CO<sub>2</sub> die höchsten Emissionen erzeugt. Alle Szenarien haben gemeinsam, dass der im Klärschlamm gebundene Kohlenstoff der Hauptverursacher der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist (jeweils 270 kg). Dies entspricht je nach Szenario ca. 60 (Szenario A) bis 95 % (Szenario B und D). In Szenario A (30 %) und E (19 %) werden außerdem bedeutende Anteile des CO<sub>2</sub> durch die Verbrennung von Erdgas frei gesetzt. Die transportbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen in allen Szenarien mit 5 bis 7 kg im Vergleich zu den sonstigen Positionen gering aus. Mit Ausnahme von Szenario A (5 kg) verursacht die Phosphorrückgewinnung in allen Szenarien 10 kg CO<sub>2</sub>.

Abbildung 79: CO<sub>2</sub>-Bilanzen der Szenarien A bis F

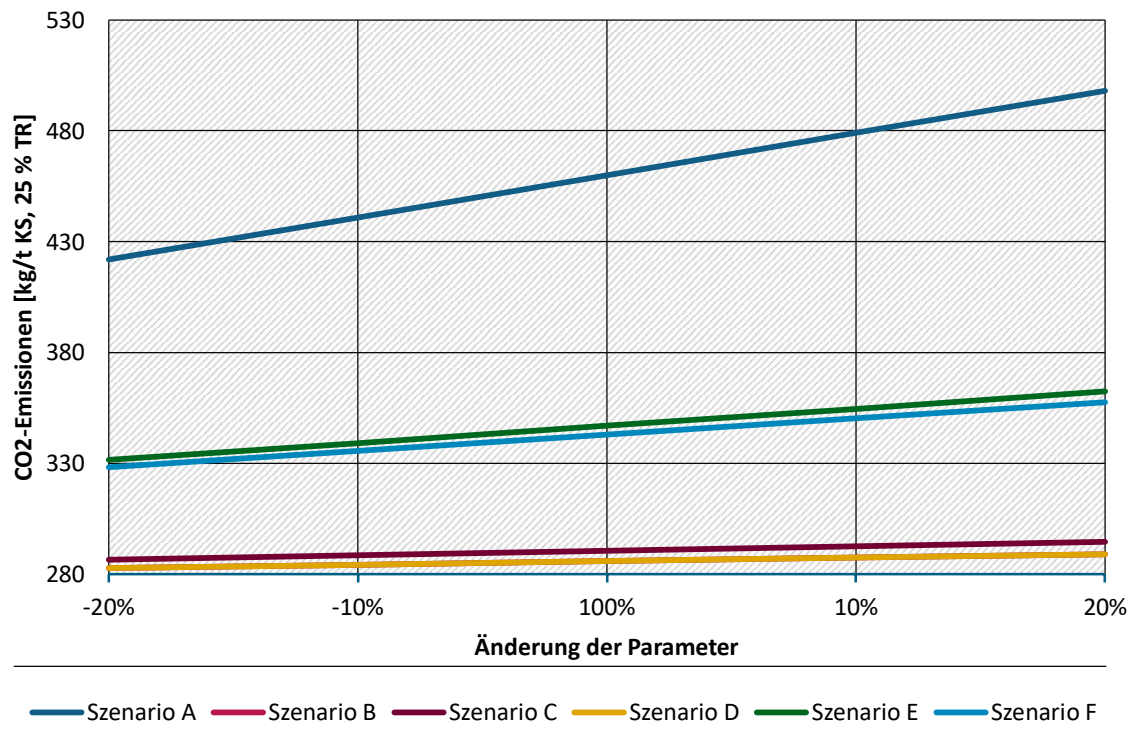


Quelle: eigene Darstellung, TEER

Abbildung 80 zeigt den Einfluss der Energiebereitstellung für Strom, Wärme und Transport, die nicht durch Eigenerzeugung oder Abwärmenutzung gedeckt werden, auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die größte Empfindlichkeit weist Szenario A auf. Eine Reduktion der externen Energiebereitstellung um 20 % führt zu einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 38 kg. In Szenario E und F ist eine CO<sub>2</sub>-Einsparung unter denselben Bedingungen um 15 kg möglich. In den Szenarien B bis D ist die Sensitivität der externen Energiebereitstellung auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen schwach ausgeprägt. Eine Reduktion um 20 % führt zu einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 4 kg.



**Abbildung 80: Einfluss der externen Energiebereitstellung (Strom, Wärme, Transport) auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen**



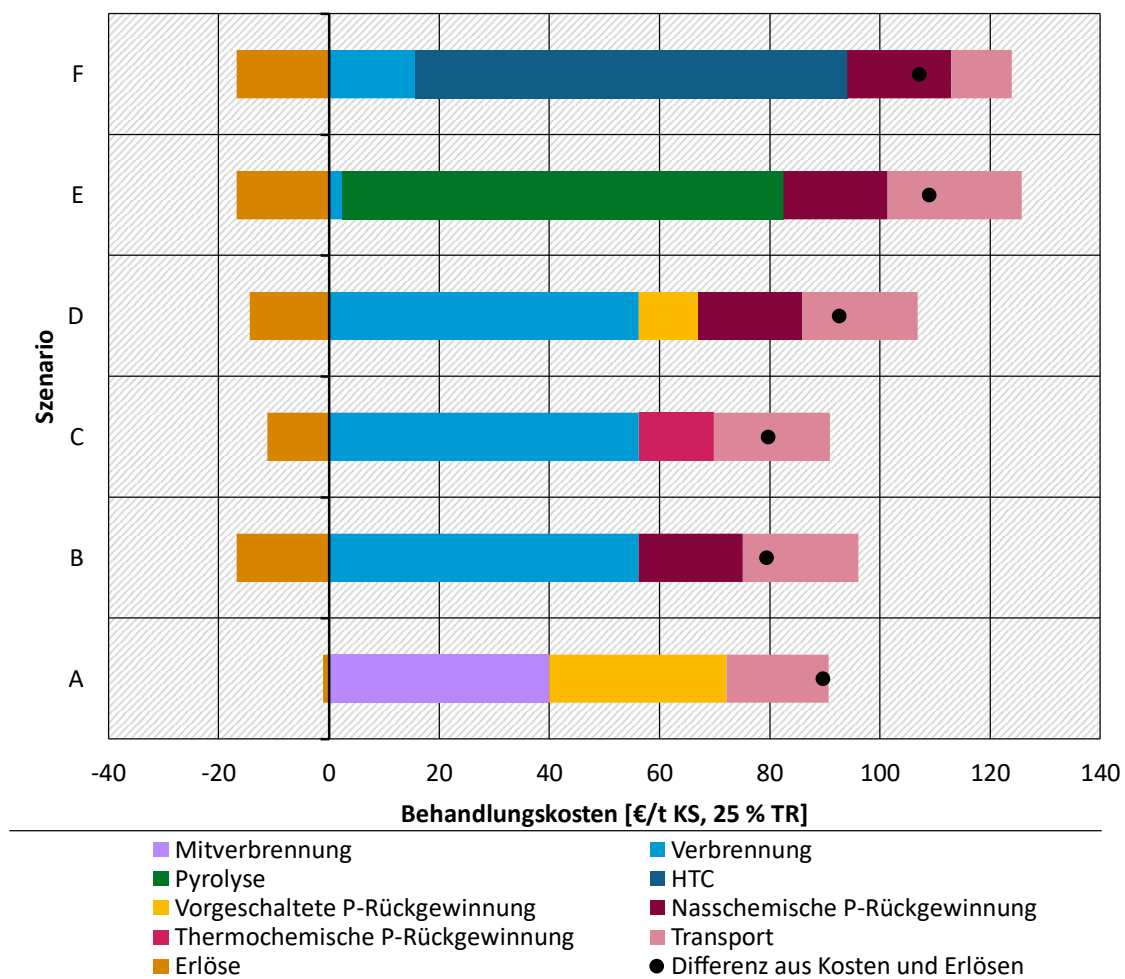
Quelle: eigene Darstellung, TEER

Analog zu den Energiebilanzen wurden für die CO<sub>2</sub>-Bilanzen Sensitivitätsanalysen erstellt. Diese sind vollständig in Anhang D.1.2 dargestellt.

## 7.4 Wirtschaftlichkeitsabschätzung der untersuchten Szenarien

In Abbildung 81 sind die Behandlungskosten und Phosphorprodukterlöse pro Tonne entwässerten Klärschlamm dargestellt. Die zugrunde liegenden spezifischen Kosten und Erlöse sind in Kapitel 7.2.5 (Tabelle 42, Tabelle 43) dargestellt. Szenario E weist mit knapp 125 € die höchsten Behandlungskosten auf. Mit einem Anteil von ca. 65 % machen die Behandlungskosten der Pyrolyse den Hauptkostenpunkt aus. Szenario A und C haben mit 91 € die geringsten Behandlungskosten. Der Produkterlös aus der vorgeschalteten Phosphorrückgewinnung in Szenario A beträgt 1 €. In den Szenarien B, E und F werden jeweils 30 kg Phosphorsäure hergestellt, für die ein Erlös von 17 € erzielt wird. In Szenario D werden aufgrund der Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage 5 kg weniger Phosphorsäure erzeugt. Hierdurch werden inklusive des Erlöses aus der vorgeschalteten Rückgewinnung 14 € erwirtschaftet. Das Düngemittel aus Szenario C erzielt einen Erlös von rund 11 €. Kein Szenario kann unter den angenommenen Bedingungen die Behandlungskosten durch den Verkauf der Phosphorprodukte decken. Die geringste Differenz aus Kosten und Erlösen weisen mit 79 bzw. 80 € die Szenarien B und C auf. Die Szenarien E und F liegen mit 109 bzw. 107 € deutlich darüber.

**Abbildung 81: Wirtschaftlichkeitsabschätzung der betrachteten Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

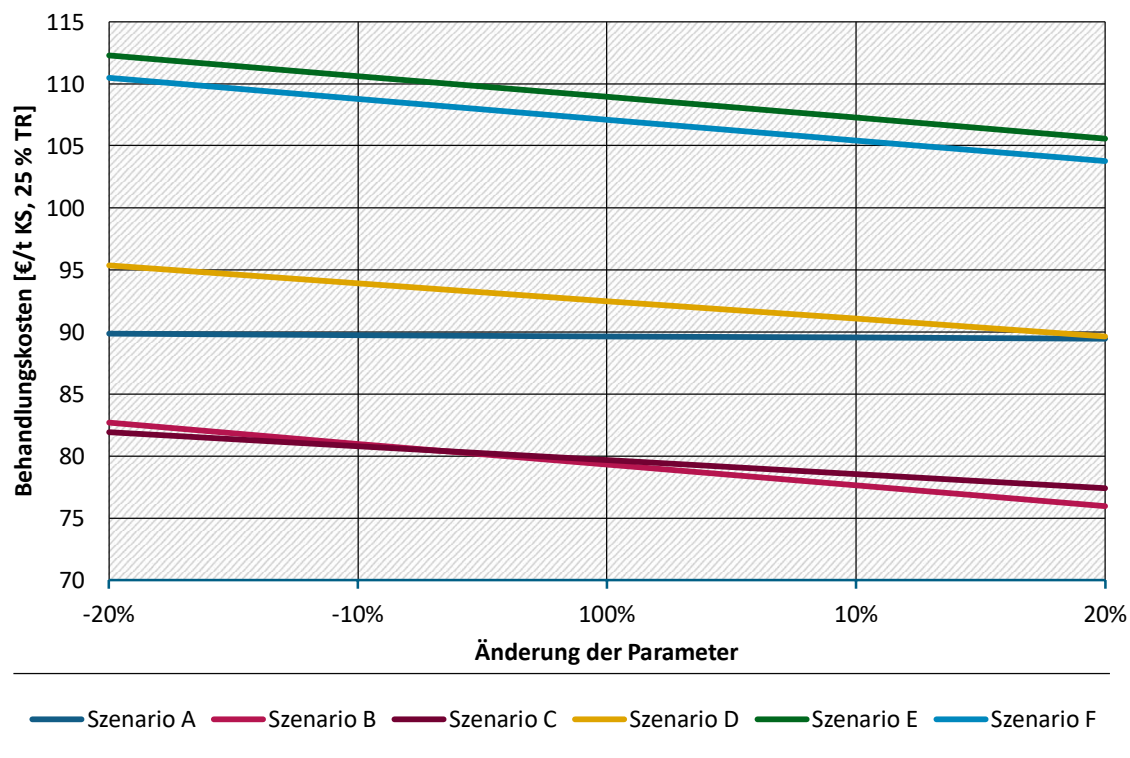
Die geringsten Verbrennungskosten bestehen in den Szenarien E und F, da dort lediglich der kohlenstoffhaltige Rückstand aus den vorgeschalteten Prozessen (Pyrolyse, HTC) thermisch verwertet wird. Die Behandlungskosten der Mitverbrennung im Zementwerk liegen mit 40 € unter denen der Klärschlammverbrennung (56 €). Mit 80 € sind die Kosten der Pyrolyse vergleichbar mit den Kosten des HTC-Verfahrens (79 €).

Durch die nasschemische Phosphorrückgewinnung in den Szenarien B, D, E und F fallen Kosten in Höhe von 19 € an. In Szenario D ergeben sich Zusatzkosten in Höhe von 11 € für die vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung. Die Behandlungskosten der thermochemischen Phosphorrückgewinnung aus Szenario C betragen 14 €. Das vorgeschaltete Phosphorrückgewinnungsverfahren auf der Kläranlage aus Szenario A verursacht Kosten in Höhe 32 €.

Die geringsten Transportkosten weist das Szenario mit HTC-Verfahren auf (11 €), da der Transportaufwand des HTC-Produkts aufgrund des niedrigeren Wassergehalts gegenüber entwässertem Klärschlamm geringer ausfällt. In den restlichen Szenarien betragen die Transportkosten für entwässerten Klärschlamm 19 €. Die höchsten Transportkosten entstehen in Szenario E (24 €) mit Pyrolyseverfahren und nachgeschalteter Phosphorrückgewinnung, da im Vergleich zu den Szenarien der Klärschlammverbrennung eine zusätzliche Transportdistanz zurückgelegt wird.

Abbildung 82 zeigt die Abhängigkeit der Behandlungskosten von den Erlösen der Phosphorprodukte. Eine Erhöhung der Produkterlöse um 20 % ist nicht ausreichend, damit ein Szenario kostendeckend umgesetzt werden kann. Aufgrund der geringen Produkterlöse, verglichen mit den Kosten, beträgt die Sensitivität in Szenario A nahezu null. Bei einer Veränderung der Erlöse um 20 % weisen die übrigen Szenarien eine geringe Sensitivität von maximal 3 € (Szenario B, D, E und F, nasschemische Phosphorrückgewinnung) Verringerung bzw. Erhöhung der Gesamtkosten auf. Die Szenarien mit nasschemischer Phosphorrückgewinnung reagieren insgesamt empfindlicher auf die Veränderungen der Produkterlöse als Szenario C (Thermochemische Phosphorrückgewinnung).

**Abbildung 82: Behandlungskosten (einschließlich Erlöse) der Szenarien A bis F in Abhängigkeit von den Erlösen der Phosphorprodukte**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

Die Sensitivitätsanalysen der Behandlungskosten der einzelnen Szenarien sind Anhang D.1.3 zu entnehmen.

## 8 Hindernisse, Schwierigkeiten und Ausblick bei der Umsetzung der AbfKlärV

### 8.1 Hemmnisse, Schwierigkeiten und Möglichkeiten

Nach der Einschränkung etablierter Entsorgungspfade stehen Klärschlammherzeuger aktuell vor der Aufgabe, die unterschiedlichen Verfahren bzw. Verfahrensketten zur zukünftigen Klärschlamm Entsorgung unter Berücksichtigung einer Phosphorrückgewinnung zu bewerten und auf dieser Basis langfristige Entscheidungen zu treffen, welche unter Umständen hohe Investitionen erforderlich machen. Es fehlen noch immer wichtige Entscheidungsgrundlagen, da zum jetzigen Zeitpunkt – abgesehen von einigen Struvit-Verfahren – keine Phosphorrückgewinnungstechnologien großtechnisch im kommerziellen Betrieb verfügbar sind, an denen sich Klärschlammherzeuger/Klärschlamm Entsorger orientieren könnten.

Neben Hemmnissen und Schwierigkeiten bezüglich technischer Rahmenbedingungen sind Aspekte zur Umsetzung, zur Rezyklat-Verwertung sowie allgemeingültige Punkte zu nennen, welche einer zeitnahen Umsetzung (bis spätestens 2029) der AbfKlärV entgegenstehen.

#### Technische Rahmenbedingungen

Die Technologiereife der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung ist zum Zeitpunkt dieser Studie bei vielen diskutierten Prozessen noch zu niedrig. Aufgrund des intellectual property (IP)-Schutzes sind nur wenige transparente übertragbare Veröffentlichungen (v. a. zu Pflanzenverfügbarkeit und Schadstoff-Ausschleusung) verfügbar, wodurch eine Entscheidung erschwert wird.

#### Umsetzung

Für die Umsetzung vor allem für Klärschlammverbrennungsanlagen, aber auch von Phosphorrückgewinnungsanlagen muss ein technisch und infrastrukturell geeigneter Standort auch von der Bevölkerung akzeptiert werden. Dabei ist die Erfordernis einer Öffentlichkeitsarbeit nicht zu unterschätzen. Im Zuge der Planung zum Bau der Klärschlammverbrennung in Straubing wurde eine ausgiebige Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt. Diese führte dazu, dass die Bürgerbefragung zum Bau der Anlage positiv ausfiel. Auch die Energiekrise und die Ressourcenknappheit führen zu umfangreichen Verzögerungen im Bau. Außerdem wirkt sich der Arbeitskräftemangel in Deutschland im Bereich der Anlagenplaner und -bauer aus.

#### Rezyklatverwertung

Rechtliche Barrieren, wie die Anforderungen an die Wasserlöslichkeit, stellen ein Ausschlusskriterium für den Markteintritt einiger Rezyklate dar, die in P-Pflanzenverfügbarkeitstests dennoch überzeugen. Es ist unabdingbar, den Weg für die Rezyklate in den bestehenden Markt zu ebnen und einen Markt für Rezyklate zu etablieren. Den Rezyklaten muss ein wettbewerbsfähiger Marktwert anerkannt werden, sodass diese mit den kommerziellen Produkten konkurrieren können und von der Industrie auch im vollen Umfang angenommen werden. Dies setzt voraus, dass die Prozessstabilität der Phosphorrückgewinnungsverfahren gewährleistet ist, um gleichbleibende, qualitativ hochwertige und rechtskonforme Rezyklate zu erzeugen. Dazu wäre zu prüfen, ob eine Subvention, geknüpft an die Annahme von Rezyklaten aus der Phosphorrückgewinnung zumindest übergangsweise zulässig wäre. Ebenfalls sollte über Anreize für die Landwirtschaft nachgedacht werden, die es ermöglichen, eventuelle Hemmschwellen der Anwendung zu senken. Dies könnte, ähnlich wie bereits in der Vergangenheit zur Förderung von Elektroautos, als flankierende Maßnahme eingeführt werden.



## Allgemein

Die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche ist an die Verfügbarkeit zur Klärschlammverbrennung gekoppelt. Aus der Sicht der Klärschlammherzeuger bzw. Klärschlamm Entsorger, die in der Verantwortung bzw. Pflicht zur Phosphorrückgewinnung stehen, muss eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, aus der hervorgeht, welche Verfahren sich für den eigenen Klärschlamm eignen. Um dies zu gewährleisten, müssen die Verfahrenstechnologien, übertragbar auf verschiedene Inputströme, transparent dargestellt sein. In diesem Bericht ist in Abbildung 85 ein Prüfschema dargestellt, die es ermöglicht, die Verfahrenstechnologien einzugrenzen.

Klärschlammverbrennungsanlagen-Betreiber sowie Phosphorrückgewinnungsverfahren-Anbieter benötigen Planungssicherheit, um zu geringe und damit unwirtschaftliche Inputmengen zu vermeiden. Dies erfordert, dass sich Klärschlammherzeuger bzw. -entsorger zeitnah für Technologien zur Phosphorrückgewinnung entscheiden. Dies liegt ebenfalls im Interesse des Klärschlammherzeugers, um die Entsorgungssicherheit ab 2029 zu gewährleisten. Nachdem die Entscheidung getroffen wird, kann agiert werden und entsprechende Kapazitäten können geschaffen werden. Die gegenseitige Abhängigkeit der Akteure erfordert, dass eine Entscheidung für ein Verfahren erfolgt. Allerdings sind die Phosphorrückgewinnungsverfahren, abgesehen von einigen Struvit-Verfahren, noch nicht ausreichend entwickelt und auch noch nicht großtechnisch erprobt.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist keine Phosphorrückgewinnungsanlage kommerziell auf dem Markt verfügbar. Die TetraPhos Anlage in Hamburg befindet sich noch in der Inbetriebnahme und die PHOS4Green/Seraplan Anlage in Haldensleben ist seit September 2022 stillgelegt. Mit Blick auf das Jahr 2029 sind dringend großtechnische Umsetzungen zur Phosphorrückgewinnung voranzutreiben, um die rechtlichen Vorgaben der AbfKlärV und die Ziele der Kreislaufwirtschaft zu erfüllen. Die Möglichkeit zur Langzeitlagerung ist dabei zunächst als weniger favorisierte Alternative zu sehen. Gemäß § 23 DepV ist sie auf fünf Jahre begrenzt, kann jedoch befristet verlängert werden. Eine Deponierung der Asche und deren zwingend erforderliche Rückholung zur zeitversetzten Phosphorrückgewinnung ist mit nicht unerheblichen Kosten sowie anderen Unwägbarkeiten wie logistischen und rechtlichen Problemen verbunden. Zum aktuellen Zeitpunkt lassen sich keine publizierten Beträge zu Rückholkosten ausweisen, nach Schätzungen der Autoren kann der Betrag je Tonne Asche jedoch nicht höher sein als deren Einbau.

Die zentralen Anlaufstellen, an denen Akteure aus Politik, Klärschlammherzeuger, Technologieanbieter, (Düngemittel-)Industrie und Landwirtschaft zum fachlichen Austausch zusammengebracht werden, müssen weiter bestärkt werden. Es ist wichtig, Aktionspläne aufzustellen oder zu Runden Tischen einzuladen, die Meilensteine in der Phosphorrückgewinnung bis 2029 vereinbaren. Auf Bundeslandebene ist es nötig, Klärschlamm-spezifische Abfallwirtschaftspläne zu erstellen. Darauf aufbauend können Entsorgungsengpässe für Klärschlamm sowie fehlende Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung identifiziert werden und im nächsten Schritt mit benachbarten Bundesländern abgeglichen werden. Auf dieser Grundlage lassen sich Optionen zur Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung evaluieren, und beispielsweise Klärschlamm-Kooperationen und interkommunale Zusammenarbeit können gefördert werden. Neben der Stärkung der kommunalen Zusammenarbeit ist es wichtig, dass die Verfahrenstechnologien hin zur großtechnischen Umsetzung gefördert werden. Zwar werden über die BMBF-RePhoR-Maßnahme Forschungs- und Entwicklungsprojekte gefördert, großtechnische Anlagen werden hieraus jedoch bis 2029 kaum erwachsen können. Die aktuell laufenden Pilotierungen werden wichtige Erkenntnisse liefern, allerdings ist mit belastbaren Daten aus diesen Projekten erst in den Jahren 2025/2026

zu rechnen. Im Umweltinnovationsprogramm (UIP) werden einige Umsetzungen zur Phosphorrückgewinnung gefördert. Dennoch ist der Förderbedarf, um erstmalige großtechnische Umsetzungen zu realisieren, weiterhin hoch, und die Anforderungen an den Zugang zu Fördermitteln sollten überdacht werden. Der Förderbedarf sollte explizit bei den Kommunen bzw. abwasserentsorgungspflichtigen Verbänden ansetzen.

Im Rahmen weiterer Studien sollten ebenfalls die Zwischenlagerungskapazitäten für Klärschlamm und Klärschlammverbrennungsasche in Deutschland evaluiert werden. In Hinblick auf die Erfüllung der AbfKlärV ab 2029 und den noch ungedeckten Kapazitäten, insbesondere für die Phosphorrückgewinnung, muss sichergestellt werden, dass die anfallenden Klärschlammverbrennungsaschen zur späteren Phosphorrückgewinnung sachgemäß gelagert und rückgeholt werden können. Die verfügbaren Kapazitäten zur Zwischenlagerung könnten zunächst die fehlenden Rückgewinnungs-Kapazitäten ausgleichen und dazu beitragen, fristgerecht die Vorgaben der AbfKlärV zu erfüllen. In der Kapazitätsbetrachtung zur Phosphorrückgewinnung müssten dann jedoch die Kapazitäten berücksichtigt werden, die erforderlich sind, um die zwischengelagerte Klärschlammverbrennungsasche gemeinsam mit der neu anfallenden Asche der Phosphorrückgewinnung anzudienen.

## **8.2 Multikriterielle Nutzwertanalyse Entsorgungswege**

### **8.2.1 Bewertungskriterien**

Um eine vergleichende Bewertung der sechs in Kapitel 7 betrachteten Szenarien zu ermöglichen und eine Handlungsempfehlung zu zukünftigen Entsorgungspfaden geben zu können, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Diese ermöglicht einen detaillierten multikriteriellen Vergleich der unterschiedlichen betrachteten Entsorgungswege für Klärschlamm. Gleichzeitig kann eine Gewichtung priorisierter Kriterien vorgenommen werden. Die Auswahl der Kriterien erfolgte unter der Zielsetzung, dass die Schnittmengen der Kriterien untereinander möglichst gering sind, um eine gegenseitige Beeinflussung und daraus resultierende Redundanzen zu vermeiden. In der Bewertung fanden die folgenden Kriterien Berücksichtigung:

- ▶ Behandlungskosten
- ▶ Arbeits- und Betriebssicherheit
- ▶ Anlagenverfügbarkeit
- ▶ Betriebsaufwand
- ▶ Energieaufwand

Jedem betrachteten Szenario wurde für jedes der ausgewählten Kriterien ein Wert zwischen 0 (Kriterium wird nicht erfüllt) und 3 (Kriterium wird voll erfüllt) zugewiesen. Sofern quantitative Parameter verfügbar waren, wurde der zugewiesene Wert durch Normierung ermittelt. Konnte keine quantitative Einordnung erfolgen, wurde eine qualitative Einschätzung vorgenommen. Die resultierende Bewertungsmatrix ist Tabelle 44 bzw. grafisch dargestellt Abbildung 83 zu entnehmen. Nachfolgend werden die Vorgehensweise bei der Auswahl der Bewertungskriterien sowie die Bewertungsgrundlagen beschrieben.

#### **Behandlungskosten**

Für Anlagenbetreiber sind die zu erwartenden Behandlungskosten eines Entsorgungspfades ein wichtiges Kriterium. Die zum Zeitpunkt der Berichterstellung vorliegenden Behandlungskosten wurden aufgrund der vorherrschenden Energiekrise als nicht repräsentativ eingestuft. Aus

diesem Grund wurde für die Bewertung auf Behandlungskosten aus dem Jahr 2020 zurückgegriffen. Eine detaillierte Darstellung und Berechnung der Betriebskosten ist Kapitel 7.2.5 zu entnehmen. Die Bewertung erfolgte durch Normierung der höchsten Behandlungskosten auf den Wert 0 (Kriterium wird nicht erfüllt) und der niedrigsten Behandlungskosten auf den Wert 3 (Kriterium wird voll erfüllt). Dazwischenliegende Werte wurden entsprechend linear skaliert. Die niedrigsten Kosten fallen mit 91 €/t<sub>05</sub> in Szenario A an, die höchsten Kosten mit 126 €/t<sub>05</sub> in Szenario E.

### **Arbeits- und Betriebssicherheit**

Die Arbeits- und Betriebssicherheit eines Verfahrens ist zum Schutz von Umwelt und Personen relevant, da sich Mängel direkt auf diese auswirken. Aufgrund der schwierigen Quantifizierbarkeit erfolgte die Bewertung dieses Kriteriums qualitativ. Die Hintergründe dazu sind Kapitel 2.1 sowie Kapitel 2.2.5 zu entnehmen. Um unterschiedliche relevante Aspekte der Arbeits- und Betriebssicherheit berücksichtigen zu können, wurde das Kriterium zunächst in Form gleich gewichteter Unterkriterien betrachtet und bewertet. Folgende Unterkriterien ergaben die Bewertung für jedes Szenario, die entsprechend gewichtet in die Gesamtbewertung eingeflossen sind:

- Erzeugung explosionsfähiger Gemische bzw. brennbarer Rückstände / Kombination von Betriebszuständen wechselnder Atmosphären
- Handling von Säuren und Laugen
- Ökologische gesundheitliche Relevanz von Produkten und Zwischenprodukten

Beim Einsatz von Säuren und Laugen wurde die Anzahl unterschiedlicher Einsatzorte als kritischer betrachtet als die absoluten Mengen, da eine Erhöhung der Einsatzorte eine Kontamination an den Anlagen arbeitender Personen oder eine Freisetzung in die Umwelt wahrscheinlicher machen. Ebenfalls in die Bewertung eingeflossen ist die Art der eingesetzten Säure oder Lauge. Die entsprechend höchste Arbeits- und Betriebssicherheit hat sich aus diesem Bewertungsschema heraus für Szenario C, die niedrigste Sicherheit für Szenario E ergeben.

### **Anlagenverfügbarkeit**

Eine hohe Anlagenverfügbarkeit ist ein relevantes Kriterium für die Entsorgungssicherheit eines Verfahrens. Gleichzeitig können von einer hohen Anlagenverfügbarkeit Rückschlüsse auf einen geringeren Wartungsaufwand gezogen werden, der mit einer Reduktion der Personalkosten einhergeht. Die Bewertung der Anlagenverfügbarkeit in h/a bzw. % erfolgte maßgeblich auf Basis der in der Betreiberbefragung erhobenen Daten (Kapitel 3.1.2) sowie ergänzenden Recherchen von Werten für Referenzanlagen. Dabei erfolgte eine Normierung der jeweils geringsten Anlagenverfügbarkeit auf den Wert 0 (Kriterium wird nicht erfüllt), während die höchste Anlagenverfügbarkeit auf den Wert 3 (Kriterium wird voll erfüllt) normiert wurde. Dazwischenliegende Anlagenverfügbarkeiten werden entsprechend auf den Wertebereich skaliert. Aufgrund fehlender Daten für die Anlagenverfügbarkeit großtechnischer Phosphorrückgewinnungsverfahren wurde bei diesem Kriterium lediglich das jeweilige thermische Verfahren (Mitverbrennung im Zementwerk, Klärschlammverbrennung, Pyrolyse, HTC) des Szenarios betrachtet. Für die Mitverbrennung im Zementwerk wurde eine aus der Betreiberbefragung entnommene Anlagenverfügbarkeit von 6.970 h/a (vgl. Kapitel 3.2.3.3) zugrunde gelegt. Die Anlagenverfügbarkeit von 7.477 h/a für Klärschlammverbrennungsanlagen wurde ebenfalls der Betreiberbefragung entnommen (vgl. Kapitel 3.2.1). Für die Klärschlammpyrolyse lagen aus der Betreiberbefragung nur unzureichende Daten vor. Daher wurde basierend auf Literaturangaben eine Anlagenverfügbarkeit von 5.928 h/a für ein

Pyrolyseverfahren kalkuliert (abc advanced biomass concepts GmbH, 2018). Für das HTC-Verfahren liegen keinerlei großtechnische Erfahrungswerte vor, sodass eine Anlagenverfügbarkeit von 2.000 h/a angenommen wurde. Daraus ergibt sich die höchste Anlagenverfügbarkeit für Verfahren der Klärschlammverbrennung (Szenarien B, C und D) und die niedrigste Anlagenverfügbarkeit für das HTC-Verfahren (Szenario F). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die HTC-Technologie eher für den kleinskaligen, dezentralen Einsatz auf Kläranlagen geeignet ist. Aufgrund der Mengenverhältnisse würde eine Klärschlammverbrennungsanlage somit nicht durch einen, sondern durch mehrere HTC-Reaktoren bedient, sodass eine geringe Anlagenverfügbarkeit keine weitreichenden Konsequenzen wie den Anlagenstillstand der nachfolgenden Prozessschritte zur Folge hätte.

### Betriebsaufwand

Die Bewertung des Betriebsaufwands erfolgte ebenfalls qualitativ. Analog zum Vorgehen bei der Arbeits- und Betriebssicherheit, wurden zwei Unterkriterien betrachtet und gemittelt in die gewichtete Gesamtbewertung einbezogen. Folgende Unterkriterien wurden berücksichtigt:

- Betriebsmittelverbrauch/-bedarf
- Wartung/Instandhaltung/Reparaturen

Beim Betriebsmittelverbrauch/-bedarf wurde insbesondere die Anzahl und Menge der benötigten Betriebsmittel betrachtet. Im Kriterium Wartung/Instandhaltung/Reparaturen wurde die betrachtete Verfahrenskette jedes Szenarios hinsichtlich der Anzahl der unterschiedlichen Verfahrensstufen und der Gesamtkomplexität betrachtet und qualitativ bewertet. Szenario A wurde für dieses Kriterium am besten bewertet, die Szenarien E und F am schlechtesten.

### Energieaufwand

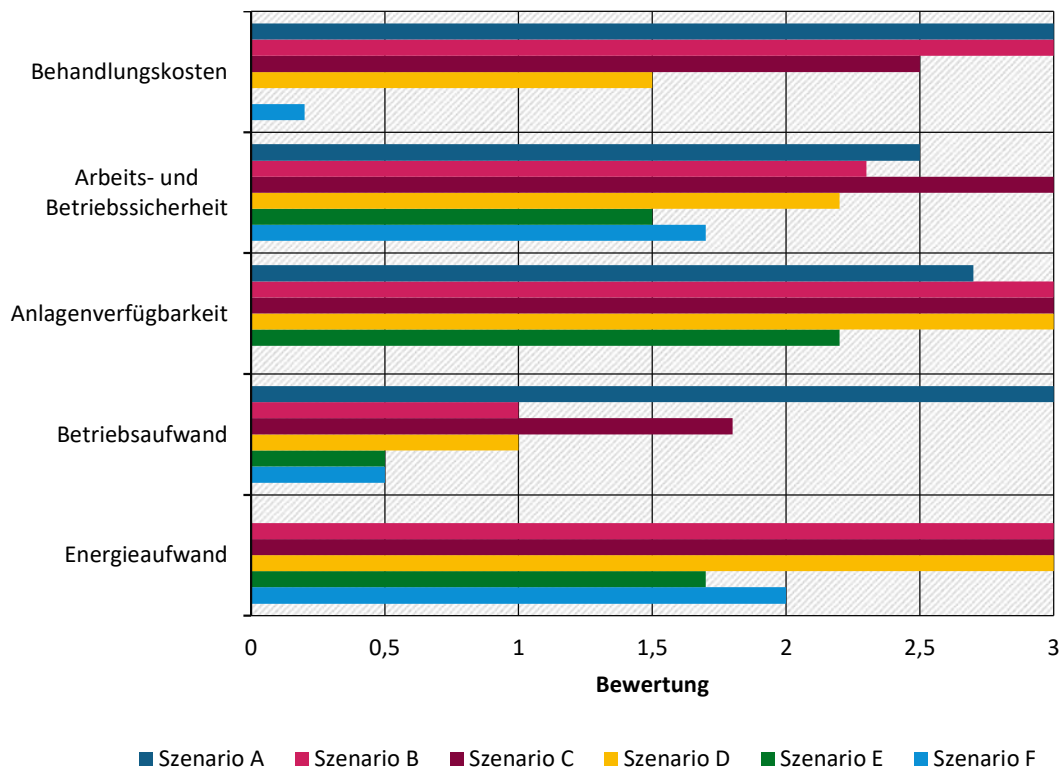
Für die Bewertung des Energieaufwands wurde der KEA herangezogen (vgl. Kapitel 7.3). Es wurde der Energieaufwand für das gesamte Szenario berücksichtigt, die Bilanzgrenzen sind Kapitel 7.3 zu entnehmen. Die Bewertung erfolgte quantitativ. Der höchste KEA wurde mit dem Wert 0 (Kriterium wird nicht erfüllt) normiert, während der geringste KEA mit dem Wert 3 (Kriterium wird voll erfüllt) bewertet wurde. Dazwischenliegende Werte wurden entsprechend interpoliert. Der niedrigste KEA ist mit 155 kWh/t<sub>05</sub> in Szenarien B und D aufzuwenden, der höchste mit 840 €/t<sub>05</sub> in Szenario A.

**Tabelle 56: Bewertung der Entsorgungsoptionen**

Bewertungskriterien	Szenarien					
	A	B	C	D	E	F
Behandlungskosten	3	3	2,5	1,5	0	0,2
Arbeits- und Betriebssicherheit	2,5	2,3	3	2,2	1,5	1,7
Anlagenverfügbarkeit	2,7	3	3	3	2,2	0
Betriebsaufwand	3	1	1,8	1	0,5	0,5
Energieaufwand	0	3	3	3	1,7	2

Bei qualitativer Bewertung: 0: Kriterium wird nicht erfüllt; 1: Kriterium wird wenig erfüllt; 2: Kriterium wird zum Teil erfüllt; 3: Kriterium wird voll erfüllt. Bei quantitativer Bewertung: Normierung der Parameter zwischen den sechs Entsorgungsoptionen auf den Wertebereich 0-3 durch Interpolation.

**Abbildung 83: Grafische Darstellung der Bewertung der Entsorgungsoptionen**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

### 8.2.2 Nutzwertberechnung

Die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien erfolgte durch paarweisen Vergleich. Für alle Kriterien wurde im direkten Vergleich bewertet, welches der beiden betrachteten Kriterien jeweils wichtiger ist und entsprechend höher gewichtet in die Gesamtbewertung einfließen soll. Davon ausgehend erfolgte eine Normierung der Gewichtung der Kriterien auf einen Wertebereich von 1 (weniger wichtig) bis 10 (sehr wichtig). Die der Bewertung zugrundeliegenden Ergebnisse des paarweisen Vergleichs sind Tabelle 45 zu entnehmen. Das demnach am stärksten zu gewichtende Kriterium bei der Bewertung der Entsorgungsoptionen ist die Arbeits- und Betriebssicherheit (40 %), gefolgt vom Energieaufwand (30 %). Als ebenfalls wichtiges Kriterium werden die Behandlungskosten (20 %) berücksichtigt, während der Betriebsaufwand und die Anlagenverfügbarkeit (jeweils 5 %) nur mit geringem Anteil in die Gesamtbewertung einfließen.

**Tabelle 57: Gewichtung der Bewertungskriterien**

	Bewertungskriterien	1	2	3	4	5	Summe	prozentual	normiert
1	Behandlungskosten	-	0	2	2	0	4	20 %	5
2	Arbeits- und Betriebssicherheit	2	-	2	2	2	8	40 %	10
3	Anlagenverfügbarkeit	0	0	-	1	0	1	5 %	1
4	Betriebsaufwand	0	0	1	-	0	1	5 %	1

	Bewertungskriterien	1	2	3	4	5	Summe	prozentual	normiert
5	Energieaufwand	2	0	2	2	-	6	30 %	7

0: Zeile weniger wichtig als Spalte; 1: Zeile gleich wichtig wie Spalte; 2: Zeile wichtiger als Spalte

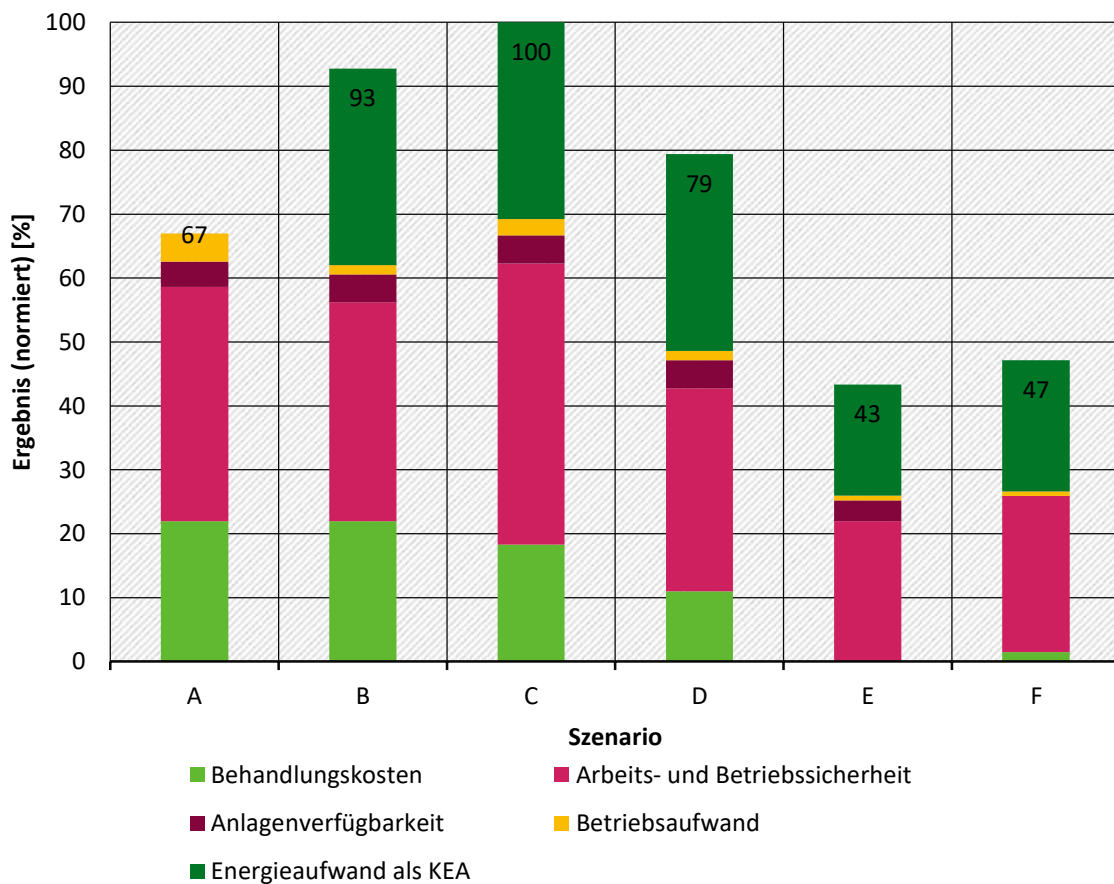
In Tabelle 46 ist die aus der Bewertung der Entsorgungsoptionen und der Gewichtung der Bewertungskriterien resultierende Nutzwertberechnung aufgeführt. Abbildung 84 stellt die Ergebnisse der Nutzwertanalyse grafisch dar.

**Tabelle 58: Bewertung der Entsorgungsoptionen**

Bewertungskriterien	Gewichtung	Bewertung					
		A	B	C	D	E	F
Behandlungskosten	5	3	3	2,5	1,5	0	0,2
Arbeits- und Betriebssicherheit	10	2,5	2,3	3	2,2	1,5	1,7
Anlagenverfügbarkeit	1	2,7	3	3	3	2,2	0
Betriebsaufwand	1	3	1	1,8	1	0,5	0,5
Energieaufwand	7	0	3	3	3	1,7	2
<b>Summe</b>		<b>46</b>	<b>63</b>	<b>68</b>	<b>54</b>	<b>30</b>	<b>32</b>
prozentual		15,6	21,1	23,3	18,8	10,1	11,0
normiert		67	92,8	100	79,4	43,4	47,1



**Abbildung 84: Ergebnis der Nutzwertanalyse**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

Gemäß der multikriteriellen Nutzwertanalyse wird Szenario C – die Klärschlammverbrennung mit anschließender Aschebehandlung und vollständiger bodenbezogener Verwertung zu Düngezwecken – am besten bewertet. Szenario B – die Klärschlammverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche und nachfolgender Ascheverwertung – wird ebenfalls sehr gut bewertet, ist gegenüber Szenario C jedoch insbesondere hinsichtlich Arbeits- und Betriebssicherheit sowie dem Betriebsaufwand im Nachteil. Die Szenarien E und F – Pyrolyse und HTC – werden am schlechtesten bewertet, da sie in allen betrachteten Kriterien nur wenige Punkte erzielen. Lediglich die Anlagenverfügbarkeit (Szenario E) bzw. der Energieaufwand (Szenario F) sind für diese Szenarien positiv zu bewerten.

Am besten bewertet werden die drei Szenarien, in denen Klärschlammverbrennungsverfahren zum Einsatz kommen. Diese sind, durch hohe Anlagenverfügbarkeit sowie Arbeits- und Betriebssicherheit und einen verhältnismäßig geringen KEA, den anderen Technologien gegenüber deutlich im Vorteil. Abstufungen innerhalb der drei Klärschlammverbrennungs-Szenarien ergeben sich vorwiegend durch die Einbindung des Phosphorrückgewinnungsverfahrens in die Prozesskette. Das am besten bewertete Szenario, in dem kein Klärschlammverbrennungsverfahren zum Einsatz kommt, ist die Mitverbrennung im Zementwerk nach vorheriger Phosphorrückgewinnung auf der Abwasserbehandlungsanlage. Dieses Szenario ist gegenüber den drei Klärschlammverbrennungs-Szenarien insbesondere hinsichtlich des Energieaufwands deutlich im Nachteil. Die schlechteste Bewertung erhalten die Szenarien E und F. Diese Szenarien, in denen die Pyrolyse bzw. das HTC-Verfahren betrachtet werden, erhalten insbesondere in den Kriterien Behandlungskosten und Energieaufwand im

Vergleich zu den anderen Szenarien signifikant schlechtere Bewertungen. Dies ist insbesondere auf die kleinen Maßstäbe der Verfahren sowie den zum derzeitigen Stand geringen Technologie-Reifegrad zurückzuführen.

## 9 Entscheidungshilfe zur Verfahrensauswahl zur Phosphorrückgewinnung

Die erste Entscheidung, die vor der Auswahl eines geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahrens getroffen werden muss, ist die Wahl der Einsatzstelle. In Kapitel 2.2.1 wurden bereits die verschiedenen Einsatzstellen zur Phosphorrückgewinnung vorgestellt. Diese werden im Folgenden mit ihren jeweiligen Anforderungen zur Umsetzung eines geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahrens einzeln betrachtet.

### 9.1 Phosphorrückgewinnung im Ablauf der Nachklärung

Die Phosphorrückgewinnung im Ablauf der Nachklärung ist aufgrund des Erfordernisses, die – tendenziell strenger werdenden – P-Einleitgrenzwerte einzuhalten und gleichzeitig die rechtlichen Vorgaben der AbfKlärV zu erfüllen, in der Regel nicht zielführend. Der Einsatz Magnesium-basierter Fällmittel führt nicht zu den geforderten Ablaufkonzentrationen und der Einsatz von Eisen- oder Aluminiumsalzen produziert Metallphosphat-Verbindungen, die nur schlecht oder gar nicht pflanzenverfügbar sind.

### 9.2 Phosphorrückgewinnung aus Schlammwasser

Die Betrachtung der Phosphorrückgewinnung für die Einsatzstellen im Schlammwasser unterliegt zunächst dem Wasserrecht. Dennoch ist das Ziel dieser Verfahren, Phosphor im Schlamm auf unter 20 g P/kg<sub>TM</sub> zu reduzieren. Damit müsste der aus der Abwasserbehandlung resultierende Klärschlamm keiner (weiteren) Phosphorrückgewinnung unterzogen werden. Dieser kann anschließend jeglicher Form der thermischen Entsorgung, ohne weitere Phosphorrückgewinnung, zugeführt werden. Die Etablierung dieser Verfahren umfasst folgende Aspekte:

Dezentrale Umsetzung: Integration in (bestehende) Betriebstechnik und -abläufe

- ▶ Betriebsweise der Kläranlage: i.d.R. Grad der Phosphat-Freisetzung stark erhöht durch vermehrte biologische P-Elimination (Bio-P) im Gegensatz zu chemischer P-Elimination (CHEM-P)
- ▶ (zusätzliches) Entwässerungsaggregat nötig
- ▶ Gezielte P-Rücklösung: Desintegration/Hydrolyse-Verfahren
- ▶ pH-Wert-Anhebung: CO<sub>2</sub>-Strippung, Einsatz einer Base (NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, MgO)
- ▶ Mg-Quelle: MgCl<sub>2</sub>, MgO
- ▶ Zur Kristallisation von Struvit ggfs. N-Quelle (bei Einsatzstelle vor der Faulung) erforderlich, beispielsweise durch Rückführung von Schlammwasser aus der Faulschlammentwässerung, da nicht genügend NH<sub>4</sub>-N im ÜSS vorhanden ist
- ▶ Reduzierung der Schlammwasserrückbelastung (N, P) zur Kläranlage
- ▶ Keine anfallenden Reststoffe

Weitere (Neben-)Effekte der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus dem Schlammwasser sind eine verbesserte Klärschlammentwässerung und/oder damit verbunden eine Reduktion des Verbrauchs an polymeren Flockungsmitteln. Die Verfahren wurden schon zu Beginn der 2000er

Jahre entwickelt und hatten das primäre Ziel, spontane Struvit-Inkrustationen zu verhindern. Als Vorteil kann somit ebenfalls eine gesteigerte Betriebssicherheit genannt werden. Durch eine Desintegration/Hydrolyse kann, neben den zuvor genannten Vorteilen bei der Struvit-Fällung, der Abbaugrad in der Faulung verbessert werden, was dazu führt, dass auch der Phosphorgehalt in der Flüssigphase erhöht ist und mehr Klärgas entsteht. Struvit zeigt in einer Reihe von Pflanzentests gute Ergebnisse und findet einen Absatzmarkt als Düngemittel. Die Einfachheit im Vergleich zu nasschemischen Verfahren stellt ebenfalls einen Vorteil dar.

### 9.3 Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm

Alternativ zur gemeinsamen kann auch eine getrennte Faulung von Primär- und Überschussschlamm vorgenommen werden. Auch diese Verfahren zielen darauf ab, Phosphor im Schlamm auf unter 20 g P/kg<sub>TM</sub> zu reduzieren. Der P-abgereicherte Schlamm kann anschließend mitverbrannt oder einer anderweitigen Abfallentsorgung zugeführt werden. Die Etablierung dieser Verfahren erfordert die Erfüllung folgender Kriterien:

- ▶ Dezentrale Umsetzung: Integration in (bestehende) Betriebstechnik und -abläufe
- ▶ Betriebsweise der Kläranlage: i.d.R. Grad der Phosphat-Freisetzung stark erhöht durch vermehrte biologische P-Elimination (Bio-P) im Gegensatz zu chemischer P-Elimination (CHEM-P)
- ▶ (zusätzliches) Entwässerungsaggregat nötig
- ▶ P-Rücklösung:
  - (thermische) Desintegration/Hydrolyse-Verfahren (Bio-P) vor der Faulung oder
  - Mineralsäureaufschluss (Bio-P oder CHEM-P möglich) nach der Faulung
- ▶ Phosphorgehalt ca. < 30 g/kg<sub>TM</sub> (max. ca. 30 % Phosphorrückgewinnung zu erwarten; je nach Verfahren muss an die erwartbare Rückgewinnung angepasst werden)
- ▶ pH-Wert-Anhebung: CO<sub>2</sub>-Strippung, Einsatz einer Base (NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, MgO)
- ▶ Mg-Quelle: MgCl<sub>2</sub>, MgO
- ▶ Nach der Faulung ist ausreichend NH<sub>4</sub>-N als Reaktionspartner zur Struvit-Kristallisation vorhanden
- ▶ Reduzierung der Schlammwasserrückbelastung (N, P) zur Kläranlage
- ▶ Keine anfallenden Reststoffe

Die bereits in Kapitel 9.2 genannten Vorteile finden auch hier Anwendung. Bei den Verfahren, die Säuren einsetzen, muss berücksichtigt werden, dass die angesäuerte Schlammmatrix zur weiteren Verwertung ggfs. neutralisiert werden muss. Ebenfalls könnte der saure Schlamm zu Komplikationen im Entwässerungs- und nachgeschalteten Trocknungsprozess führen.

#### Herausforderungen und Chancen der Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage

Im Folgenden wird die Bewertung der Einsatzstellen Schlammwasser und Faulschlamm zusammengefasst, da die rechtlichen sowie teils technischen Randbedingungen größtenteils übereinstimmen.

Im Allgemeinen steht bei den dezentral auf der Kläranlage etablierten Phosphorrückgewinnungsverfahren die Eigenorganisation der Phosphorrückgewinnung im Fokus. Dies verlangt die Bereitstellung qualifizierten Personals zum Betrieb der Technologie. Ebenso muss die Rezyklatverwertung von den Kläranlagenbetreibern organisiert werden. Darunter fällt eine Marktanalyse, um einen Abnehmer für die Phosphor-Rezyklate zu finden oder die Vermarktung ggfs. eigenständig aufzubauen. Regionale Absatzmöglichkeiten für zugelassene Düngemittel müssen evaluiert werden. So kann die gesamte Phosphorrückgewinnung eigenständig geschehen, muss aber auch von den Kläranlagenbetreibern dauerhaft betreut werden.

Jahreszeitliche Schwankungen innerhalb des Abwasserreinigungsprozesses sind zu evaluieren. Die Grenzwerte im Schlamm müssen durch die Maßnahme zur Phosphorrückgewinnung im Laufe des Jahres eingehalten werden, um zu gewährleisten, dass dieser keiner weiteren Phosphorrückgewinnung unterzogen werden muss. Dies erfordert, dass die Verfahren robust sind und sich durch verlässliche Prozesssteuerung verändernden Gegebenheiten anpassen können.

Für einige Struvit-Verfahren war bei Errichtung der Verfahrenstechnologie das primäre Ziel, die Betriebssicherheit zu gewährleisten und Struvit-Inkrustationen in den Rohrleitungen zu verhindern. Wenn die Struvitkristalle nicht aktiv separiert werden, verbleiben sie im Schlamm, welcher der weiteren Klärschlammverwertung zugeführt wird. Im Fall der Phosphor-Grenzwert-Unterschreitung des resultierenden Schlamms kann dieser der Mitverbrennung oder anderweitiger Abfallentsorgung zugeführt werden, und Phosphor ginge in diesem Fall verloren. Falls der Grenzwert überschritten wird, muss eine weitere nachfolgende Phosphorrückgewinnung erfolgen. Analog gilt dies auch, falls eine gezielte aber unzureichende Ausschleusung gebildeter Struvitkristalle erfolgt.

## 9.4 Phosphorrückgewinnung aus entwässertem Klärschlamm

Gemäß AbfKlärV gilt die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung nur für entwässerten Klärschlamm bzw. den Klärschlamm der nach dem Prozess der abwassertechnischen Behandlung zur Entsorgung anfällt. Um die Anforderungen der AbfKlärV zu erfüllen, muss der Gehalt an Phosphor nach der Rückgewinnung  $< 20 \text{ g P/kg}_{\text{TM}}$  liegen oder die Phosphorrückgewinnungseffizienz für Schlämme mit Ausgangsgehalten von  $> 40 \text{ g P/kg}_{\text{TM}}$  bei  $> 50 \%$  liegen.

Die Etablierung dieser Verfahren umfasst folgende Aspekte:

- ▶ Zur Erzeugung eines Düngemittels aus Klärschlamm muss der Klärschlamm selbst bereits die Grenzwerte der AbfKlärV und DüMV einhalten (vgl. Tabelle 22)
- ▶ Ggfs. Einsatz von (Erd-)Alkali-Additiven (gilt für thermische Verfahren)
- ▶ Dezentrale Lösung möglich (Phosphorrückgewinnung in Eigenverantwortung) oder zentrale Lösung (Abgabe an Dienstleister)

Die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm vereint die Verbrennung (Erfüllung der 17. BImSchV) und damit die Hygienisierung des Klärschlammes sowie gleichzeitig die Rückgewinnung von Phosphor (gemäß Vorgaben der AbfKlärV). Im Vergleich zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche muss aber der größere Massenstrom (inklusive Organik und Wasseranteil) behandelt werden.

## Herausforderungen und Chancen der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Im Folgenden wird zwischen Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm als zentrale externe Dienstleistung und Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm unter eigener Betriebsführung am dezentralen Standort unterschieden. Letzteres ist derzeit in Umsetzung (siehe EuPhoRe und Werkstätten Drehrohrofen-Technologie) und wird in naher Zukunft auch von weiteren Verfahrensanbietern (bspw. Grenzebach-Phosphor Recycling) angeboten. Die thermochemischen Ansätze zu Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm erfordern eine aufwendige Rauchgasreinigung. Ebenso wie für die Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser und Faulschlamm gelten die Anforderungen an die eigenverantwortlichen Aufgaben (Personalbereitstellung, Rezyklatverwertung, etc.) sowie die Pflichterfüllung zur Einhaltung der Phosphorrückgewinnungseffizienz gemäß AbfKlärV. Diese Aufgabenbereiche entfallen, sobald die Entscheidung getroffen wird, den Klärschlamm an einen Entsorger/Dienstleister abzugeben. Die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung obliegt daraufhin dem Entsorger, die Verantwortung zur ordnungsgemäßen Entsorgung des Klärschlammes gemäß § 22 KrWG verbleibt jedoch weiterhin beim Klärschlammherzeuger. Die Klärschlamm Entsorgung muss in regelmäßigen Abständen ausgeschrieben werden, woran auch die Entsorgungssicherheit geknüpft ist. Diese wird durch eine eigenständige dezentrale Phosphorrückgewinnungsanlage erfüllt, sofern die Anlage kapazitätsdeckend in Betrieb ist. Wird regelmäßig die Entsorgung ausgeschrieben, bleibt eine wiederkehrende Unsicherheit, ob und zu welchen Preisen dies angeboten werden wird.

## 9.5 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche

Die Verfahren aus Klärschlammverbrennungsasche setzen gemäß AbfKlärV eine thermische Vorbehandlung des Klärschlammes in Klärschlammverbrennungsanlagen voraus. Es muss eine Rückgewinnungseffizienz von > 80 % erreicht werden.

- ▶ Einsatz verschiedener Chemikalien, z. B. Säuren zum Aufschluss der Klärschlammverbrennungsasche-Matrix; Fällungsreagenz, um Schadstoffe oder Phosphor aus der flüssigen Phase auszufällen
- ▶ Zentrale Lösung: Abgabe des Klärschlammes an einen Dienstleister zur Klärschlammverbrennung und Phosphorrückgewinnung nach einem Ausschreibungsverfahren oder bei eigener Klärschlammverbrennungsanlage, ggf. als Zusammenschluss mehrerer Klärschlammherzeuger
- ▶ P-Rezyklat aus dem Phosphorrückgewinnungsverfahren muss die jeweiligen rechtlichen Grenzwerte einhalten; zusätzlich ist zu prüfen, ob der Klärschlamm die Voraussetzungen erfüllt, sodass die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zur Ausschleusung der kritischen Elemente ausreichend ist (siehe Kapitel 9.5)
- ▶ Nebenprodukte und Reststoffe fallen an

Vorteile der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche sind neben der Reduzierung des zu entsorgenden Rückstands auch die Hygienisierung des Klärschlammes. Ebenso sind die Ziel-Rezyklate diverser und somit auch für einen breiteren Markt zugänglich. Es fallen Nebenprodukte an, die im Rahmen der Abwasserbehandlung, der Baustoffindustrie oder in verarbeitenden Industrien Anwendung finden können.



## **Herausforderungen und Chancen der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche**

Da in den meisten Fällen die Klärschlammverbrennung die Abgabe des Klärschlamms an einen Dienstleister voraussetzt, übernimmt dieser damit die Pflicht, die resultierende Klärschlammverbrennungsasche einem geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahren zu unterziehen. Die Verantwortung und Sicherstellung dieser obliegt jedoch weiterhin dem Klärschlammherzeuger.

## **9.6 Bewertung und Verfahrensauswahl aus Sicht des Kläranlagenbetreibers**

Nach Einigung auf den Eingangsstrom, müssen die in Frage kommenden Verfahren evaluiert werden. Ein wichtiges Kriterium dazu stellt die Angabe der Technologiereife dar, welche die technische Machbarkeit der Phosphorrückgewinnungsverfahren bei gegebenen Randbedingungen beschreibt. Gemeinsam damit müssen die Eingangsströme zur Erfüllung der rechtlichen Vorschriften evaluiert werden.

Da sich derzeit kein großtechnisches Verfahren im kommerziellen Betrieb befindet, lassen sich keine Erfahrungswerte zur Verfahrensauswahl ableiten. Auch Ergebnisse aus der Betriebserfahrung der Verfahren lassen sich nicht immer übertragen. Um eine Entscheidungshilfe zu geben, sollten folgende Verfahrenseigenschaften, abgestimmt auf den eigenen Eingangsstrom, geprüft werden:

- ▶ Erfüllung rechtlicher Vorschriften
- ▶ Wirtschaftlichkeit
- ▶ Ökobilanz und Ressourcenschonung
- ▶ Betriebsmittelsicherheit
- ▶ generelle Umsetzungsmöglichkeit (für die Etablierung am dezentralen Standort)
- ▶ weitergehende Anforderungen an die Phosphor-Rezyklate (Sicherstellung zur Erzeugung eines marktfähigen Produktes, welches in den P-Kreislauf eingeschleust werden kann)

Derzeit ist noch unklar, welche der in dieser Studie abgebildeten Technologien zum geforderten Zeitpunkt technisch ausgereift und auch mit ausreichender Behandlungskapazität verfügbar sein werden. Um detaillierte verfahrensspezifische Angaben zu den jeweiligen Phosphorrückgewinnungsverfahren zu erhalten, ist es zwingend erforderlich, den genauen Einsatzstoff und seine chemische und physikalische Zusammensetzung zu kennen, um aufbauend darauf eine technische Prüfung und Bewertung zu erarbeiten. Aus diesem Grund erfordert die Festlegung auf ein Verfahren eine intensive Auseinandersetzung mit dem eigenen Eingangsstoff, um diesen anschließend einer verfahrensspezifischen Bewertungsmatrix und Machbarkeitsstudie zu unterziehen.

## **9.7 Prüfschema zur Entscheidung für ein Phosphorrückgewinnungsverfahren**

Um den Einsatz des eigenen Eingangsstoffstroms für eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. Klärschlammverbrennungsasche zu prüfen, wurde ein grobes Prüfschema entwickelt (vgl. Abbildung 85).

Dazu ist es zwingend erforderlich, dass die Zusammensetzung des Klärschlamms bzw. der Klärschlammverbrennungsasche bekannt ist. Dazu sollten verlässliche Elementanalysen der folgenden Elemente, im besten Fall Jahresmittelwerte mit Standardabweichungen, vorliegen:

Phosphor (P), Aluminium (Al), Calcium (Ca), Eisen (Fe), Schwefel (S), Stickstoff (N), Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Quecksilber (Hg), Thallium (Tl), Kupfer (Cu), Blei (Pb), Nickel (Ni), Zink (Zn) gemessen gemäß den in der AbfKlärV zulässigen DIN-Normen.

Die Analysen zu den Phosphorgehalten sowie den basisch wirksamen Stoffen sind ebenfalls für die Berichterstattung Ende 2023 sowie wiederholend für 2027 gemäß § 3a Abs. 2 AbfKlärV vorzulegen. Die Anzahl der Untersuchungen obliegt dem Klärschlammerzeuger, die AbfKlärV gibt dazu keine Vorgaben. Dennoch ist es zur Entscheidungsfindung förderlich, die Schwankungen, insbesondere der kritischen Elemente, valide einschätzen zu können.

Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die geforderte Analytik gemäß AbfKlärV nicht immer deckungsgleich mit der erforderlichen Analytik für die Klärschlammverbrennung ist. Die 17. BImSchV und ggf. der Anlagenbetrieb weisen Einschränkungen für einige Elemente, u.a. Schwermetalle auf, die gemäß AbfKlärV nicht mit Grenzwerten belegt sind. Der Klärschlamm muss sämtliche genehmigungsrechtlichen Spezifikationen der jeweiligen thermischen Behandlungsanlage einhalten. Entsprechend können nicht uneingeschränkt ohne zusätzliche Analytik alle Klärschlämme, die die Grenzwerte der AbfKlärV einhalten, der Klärschlammverbrennung zugeführt werden.

#### **Prüfschema für Schlammwasser/Faulschlamm**

Zur Eignung des Eingangsstoffes Schlammwasser oder Faulschlamm kann Abbildung 85 herangezogen werden. Voraussetzung ist, dass die Kläranlage über eine Bio-P verfügt (eine Ausnahme bilden Rückgewinnungsverfahren, die auf Vivianit als Produkt setzen). Zur Erfüllung der AbfKlärV sollte der Phosphorgehalt im Faulschlamm nicht mehr als ca. 30 g/kg<sub>TM</sub> betragen. Ziel ist es den Grenzwert gemäß AbfKlärV sicher zu unterschreiten.

#### **Prüfschema für Klärschlamm**

Um eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm durchzuführen, muss zunächst definiert werden, welches Rückgewinnungsverfahren mit welchem P-Rezyklat als Endprodukt im Interesse des Betreibers liegt. Anders als bei der Klärschlammverbrennung üblich, setzen einige Technologieanbieter thermischer Phosphorrückgewinnungsverfahren Additive innerhalb des Verbrennungsprozesses ein, die es ermöglichen, einige Elemente über die Gasphase auszuschleusen. In Abbildung 85 sind diese Verfahren in Gelb dargestellt. Da am Ende dieses Rückgewinnungsprozesses Phosphor-Dünger erzeugt wird, unterliegt die gesamte Rückgewinnungskette der AbfKlärV sowie der DüMV. Dies würde bedeuten, dass der Klärschlamm bereits vor dem thermischen Phosphorrückgewinnungsverfahren die Grenzwerte der AbfKlärV und DüMV (für den Einsatz als Düngemittel) einhalten muss. Die Additivzugabe und die damit einhergehende Schadstoff-Abscheidung in die Gasphase wirkt sich, trotz des hochwertigeren Produkts, nicht auf die Entscheidung aus, ob der Klärschlamm als Einsatzstoff eingesetzt werden darf.

Um die rechtskonforme Phosphorrückgewinnung durchzuführen, muss im Anschluss geprüft werden, ob die Phosphorrückgewinnungseffizienz gemäß AbfKlärV eingehalten wurde. Zuletzt ist es notwendig, dass das Produkt die seinem Zweck entsprechenden Grenzwerte und Anforderungen einhält.

Alternativ darf der Klärschlamm nach aktueller Rechtslage unabhängig von seiner Zusammensetzung den Rückgewinnungsverfahren zugeführt werden, wenn aus diesem Phosphor als Phosphorsäure oder P-Intermediat rückgewonnen wird. Dies würde nach aktueller Auslegung bedeuten, dass die Grenzwerte weder nach AbfKlärV noch nach DüMV berücksichtigt werden müssen. Diese Verfahrenstypen sind in Abbildung 85 in Rot dargestellt. Dazu zählen prinzipiell auch Verfahren aus Klärschlamm, die darauf abzielen, Phosphor in die Gasphase zu überführen.

So kann ggfs. auch Phosphorsäure als Rezyklat entstehen. Sollte der Klärschlamm die Grenzwerte der AbfKlärV und DüMV überschreiten, wären diese Verfahrensgruppe mit Phosphorsäure als Produkt aktuell eine zulässige Rückgewinnungsmöglichkeit.

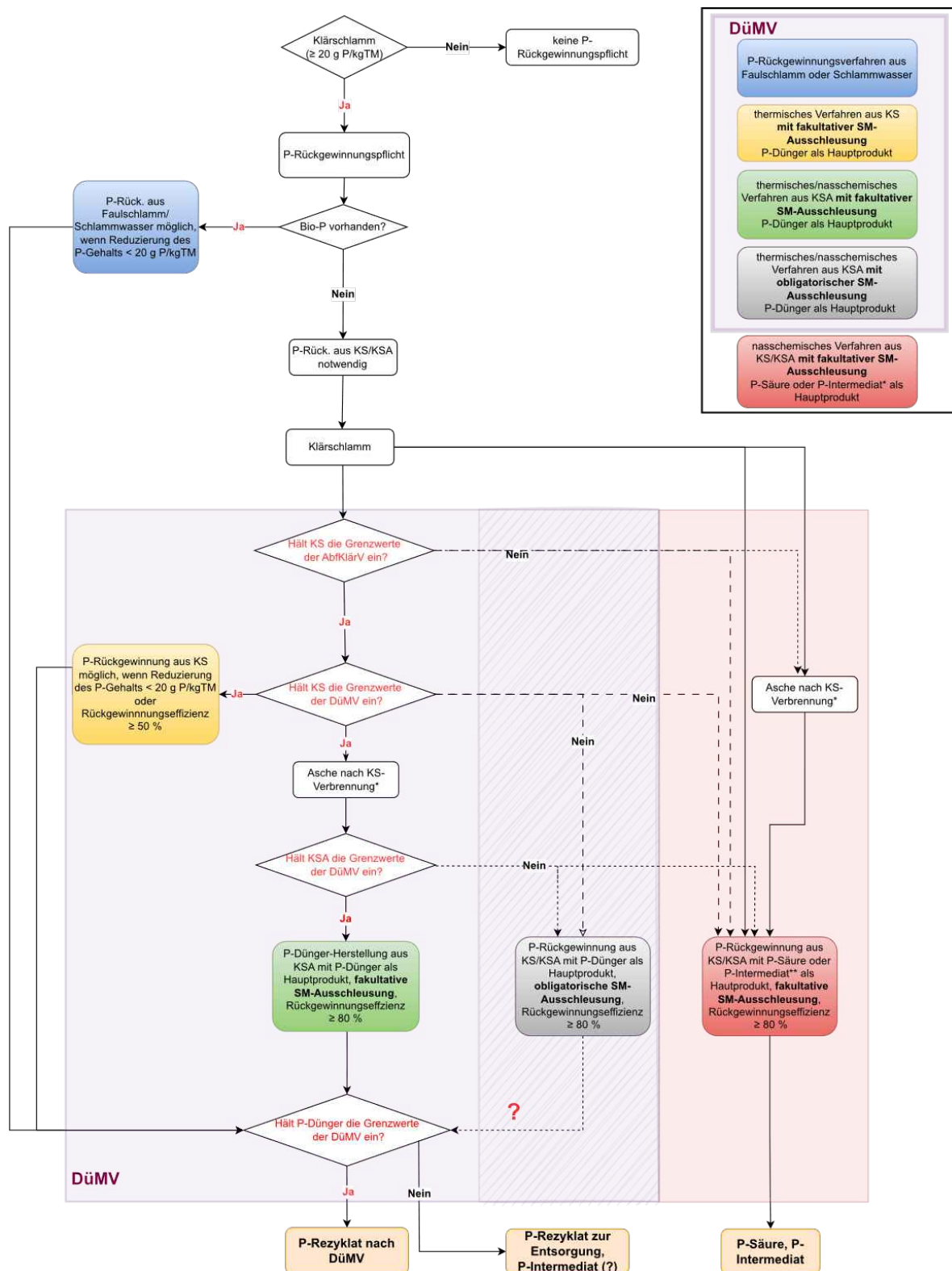
### **Prüfschema für Klärschlammverbrennungsasche**

Bei der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche, mit dem Ziel der Erzeugung eines P-Düngemittels, muss nach aktueller Auslegung der DüMV (§3 (1) Nr.3) der Klärschlamm als Ausgangsstoff bereits vor der Verbrennung die Grenzwerte der AbfKlärV und DüMV erfüllen. Gemäß vorherrschender Auslegung der DüMV müssen auch bei Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungsaschen, die einen Phosphor-Dünger herstellen, ebenfalls die Aschen die Grenzwerte der DüMV einhalten. Ebenso muss gewährleistet werden, dass das Verfahren die Rückgewinnungseffizienz von 80 % einhält.

Zur Prüfung der Eignung der Klärschlammverbrennungsasche für ein Phosphorrückgewinnungsverfahren zur Herstellung eines Phosphor-Düngers wird wie in Abbildung 85 vorgegangen. Anhand des Glühverlustes und der Zusammensetzung des Klärschlammes kann in erster Näherung die Aschezusammensetzung bestimmt werden. Dabei kommt es durch den Massenverlust zur Aufkonzentrierung der Schadstoffgehalte in der Klärschlammverbrennungsasche. Sollte die Klärschlammverbrennungsasche die Grenzwerte der DüMV einhalten, darf diese einem Rückgewinnungsverfahren zur Herstellung eines Phosphor-Düngers zugegeben werden. Allerdings dürfen Verfahren mit Schadstoff-Ausschleusung keine Klärschlammverbrennungsasche mit Grenzwertüberschreitungen annehmen, obwohl die Rezyklate als Hauptprodukt am Ende die Anforderungen der DüMV erfüllen. Diese Regelung würde dazu führen, dass thermische und nasschemische Verfahren mit aufwendiger Schadstoff-Ausschleusung (in Grau dargestellt) in ihrer Anwendung eingeschränkt sind und nur schadstoffarme Aschen trotz Schadstoff-Ausschleusung annehmen dürfen. Für schadstoffreiche Aschen wäre dann nur der Weg über ein nasschemisches Verfahren zur Erzeugung einer Phosphorsäure oder eines P-Intermediats (in Rot dargestellt) möglich. Dies hat zur Folge, dass die Verwertungswege schadstoffreicher Aschen einerseits eingeengt werden. Andererseits werden Verfahren mit Schadstoffausschleusung zur Herstellung eines Phosphor-Düngers keine Anwendung mehr in der Behandlung schadstoffreicher Aschen finden, für die sie eigentlich ausgelegt sind.

Für den Fall, dass das erzeugte P-Rezyklat im letzten Prüfschritt nicht den Anforderungen der DüMV entspricht, ist zu prüfen, ob dies als Intermediat deklariert und eingesetzt werden darf oder ob es der Entsorgung zugeführt werden muss. Aus juristischer Sicht ist die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung bei Einhaltung der Rückgewinnungseffizienz von 80 % gemäß AbfKlärV erfüllt; eine Rezyklierungsanforderung existiert nicht.

**Abbildung 85: Prüfschema für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. Klärschlammverbrennungsasche**



\*unter Beachtung der Grenzwerte für Klärschlamm gemäß 17. BImSchV

\*\*Intermediat wird als Zwischenprodukt verstanden, welches nicht direkt als Düngemittel eingesetzt, aber der Düngemittelherstellung zugeführt werden kann.

Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

## 10 Quellenverzeichnis

abc advanced biomass concepts GmbH (2018): Machbarkeitsstudie. Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (Hrsg.). Köln.

AbfKlärV (2017): Klärschlammverordnung – Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammmisch und Klärschlammkompost vom 27. September 2017 (BGBl. I Nr. 65 vom 02.10.2017 S. 3465)

Adam, C. (2018): Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. In: Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Kopp-Assenmacher (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm. TK Verlag, Neuruppin, S. 166–183. ISBN: 978-3-944310-43-5

Antakyalı, D.; Ante, S.; Herbst, H.; Nättorp, A.; Rastetter, N.; Mahler, M.; Sartorius, C.; Hillenbrand, T.; Frank, D.; Knickel, T.; Blümcke, P.; Grömping, M. (2022): Die Umsetzung der Anforderungen der Klärschlamm-Verordnung zur Phosphorrückgewinnung in Nordrhein-Westfalen – Schlussbericht; Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Online verfügbar unter: [https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/Ressourcenschutz/umsetzung\\_der\\_anforderung\\_der\\_klaerschlammvo.pdf](https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/Ressourcenschutz/umsetzung_der_anforderung_der_klaerschlammvo.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

Arnold, U.; Pihl, U.; König, H.-P.; Leimkötter D. (2021): Arbeitspapier zum Rechtlichen Status von Rezyklaten: Einsatz von AshDec als Düngemittel, Universität Bonn, FEHS, Sepura.

Arnout, S.; Messina, D.; Cryns, Y.; Nagels, E. (2022): Thermal behaviour of sewage sludge aiming at white phosphorus recovery. InsPyro, Leuven, Belgium, PERM5 Conference, Wien.

AVA (2014): AVA-CO2 Schweiz AG: Hydrothermale Carbonisierung. Klärschlamm nutzen – Energie gewinnen (Broschüre). Zug (Schweiz).

Baier, H., Horix, M. (2014): Moderne Zementwerke und strategische Ansätze zur Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen. Eine aktuelle Bestandsaufnahme. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall 11, TK Verlag, Neuruppin, S.859-869. ISBN: 978-3-944310-06-0

BodSchV (2021): Bundes-Bodenschutzverordnung (neue Fassung) – Diese Verordnung entspricht Teil 2 der Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und Gewerbeabfallverordnung (sogenannten Mantelverordnung, BGBl. I S.2598) vom 09. Juli 2021 (BGBl. I Nr. 43 vom 16.07.2021 S. 2598, 2716)

Beckmann, M. (2010): Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Klärschlamm. In: VDI Wissensforum (Hrsg.): Tagungsunterlagen Fachkonferenz Klärschlammbehandlung 27.-28.10.2010. Offenbach.

Bertau, M., Fröhlich, P., Eschment, J. (2018): Phosphatrecycling – Königsweg zu einer nachhaltigen Phosphorversorgung. In: Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Kopp-Assenmacher (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm. TK Verlag, Neuruppin, S. 519–533. ISBN: 978-3-944310-43-5

BGR (2014): Phosphat Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover.

Blöhse, D. (2017): Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe [online]. Online verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:464-20171218-111432-5>, Zugriff am: 24.11.2022

Blöhse, D., Ruijter, J., Sijstermans, A., Nättrop, A., Ploteau, M.-E. (2020): Produktsteckbrief Phosphorsäure (Phos4You). Online verfügbar unter: [https://www.nweurope.eu/media/12167/phos4you\\_p-acid\\_de\\_nov2020.pdf](https://www.nweurope.eu/media/12167/phos4you_p-acid_de_nov2020.pdf), Zugriff am: 12.12.2022



BMEL (2020): Recyclingphosphate in der Düngung – Nutzen und Grenzen. Standpunkt des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), Berlin. Online verfügbar unter: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/duengung/recyclingphosphate.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/duengung/recyclingphosphate.pdf?__blob=publicationFile&v=3), Zugriff am: 26.01.2022

Boer, M. A., Wolzak, L., Slootweg, J. C. (2019): Phosphorus: Reserves, Production, and Applications. In: Ohtake, H., Tsuneda, S. (Hrsg.): Phosphorus Recovery and Recycling. Springer, Singapur, S. 75–100. ISBN: 978-9811080302

Cabeza, R., Steingrobe, B.; Römer, W.; Claassen, N. (2013): Verbesserung der P-Effizienz im Pflanzenbau. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. 1. Auflage, Heft 9/2013. Online verfügbar unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/18670>, Zugriff am: 05.04.2022

Cohen, Y., Enfält, P., Kabbe, C. (2018): Ash2®Phos – Saubere Kommerzielle Phosphatprodukte aus Klärschlammasche. In: Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Kopp-Assenmacher, S. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm. TK Verlag, Neuruppin, S. 513–518. ISBN: 978-3-944310-43-5

Currenta (2022): Currenta GmbH & Co. OHG: Verbrennungsanlagen. Online verfügbar unter: [http://www.chempark.com/tl\\_files/currenta/medien/currenta/downloads/pdf/CUR\\_Verbrennung\\_d.pdf](http://www.chempark.com/tl_files/currenta/medien/currenta/downloads/pdf/CUR_Verbrennung_d.pdf), Zugriff am: 16.02.2022

Destatis: Statistisches Bundesamt (2022a): Öffentliche Abwasserbehandlung und -entsorgung – Fachserie 19 Reihe 2.1.2 – 2019. Online verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/\\_inhalt.html#\\_k96m52rym](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/_inhalt.html#_k96m52rym), Zugriff am: 06.10.2022

Destatis: Statistisches Bundesamt (2022b): Klärschlamm entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2021. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klarschlammverwertungsart.html#633398>, Zugriff am: 23.01.2023

DPP (2018a): Verfahrenskennblatt P-RoC. Deutsche Phosphor-Plattform. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/verfahrenskennblatt-p-roc/>, Zugriff am: 24.11.2022

DPP (2018b): Verfahrenskennblatt EuPhoRe. Deutsche Phosphor-Plattform. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/verfahrenskennblatt-euphore/>, Zugriff am: 24.11.2022

DPP (2019): Verfahrenskennblatt AshDec. Deutsche Phosphor-Plattform. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/verfahrenskennblatt-ashdec/>, Zugriff am: 24.11.2022

DüMV (2012): Düngemittelverordnung – Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I Nr. 58 vom 13.12.2012 S. 2482)

DWA (2011): DWA-Fachausschuss AK-3: Merkblatt DWA-M 386 Thermische Behandlung von Klärschlämmen. Monoverbrennung. (Reihe: DWA-Regelwerk, M 386). Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall. ISBN: 978-3-96862-383-2

DWA (2019): 32. DWA-Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen – Klärschlammanfall. Online verfügbar unter: [https://www.dwa-bw.de/files/\\_media/content/PDFs/LV\\_Baden-Wuerttemberg/Homepage/BW-Dokumente/Homepage%202013/Nachbarschaften/32.LN\\_2019\\_Endfassung\\_klein.pdf](https://www.dwa-bw.de/files/_media/content/PDFs/LV_Baden-Wuerttemberg/Homepage/BW-Dokumente/Homepage%202013/Nachbarschaften/32.LN_2019_Endfassung_klein.pdf), Zugriff am: 08.07.2022

DWA (2021): DWA-Arbeitsgruppe KEK-3.1: Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm trocknung. (Reihe: DWA-Regelwerk, M 379). 1. Auflage. Hennef, Deutschland: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V. ISBN: 978-3-96862-097-8



Egle, L.; Rechberger, H.; Zessner, M. (2014): Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser. Im Auftrag des Bundesministeriums für Forst- und Landwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. Wien. Online verfügbar unter: [https://info.bml.gv.at/dam/jcr:7527390a-a0c3-4c1a-98b2-3303aeb54e65/Phosphorr%C3%BCckgewinnung%20aus%20dem%20Abwasser\\_Endbericht\\_27%20%2014.pdf](https://info.bml.gv.at/dam/jcr:7527390a-a0c3-4c1a-98b2-3303aeb54e65/Phosphorr%C3%BCckgewinnung%20aus%20dem%20Abwasser_Endbericht_27%20%2014.pdf), Zugriff am: 25.05.2022

Engelhart, M. und Kuhn, P. (2022): Regionales Phosphorrecycling im Rhein-Main-Gebiet unter Berücksichtigung industrieller und agrarischer Stoffkreisläufe - RePhoRM. DPP FORUM - „Phosphor Recycling 2029 - Etappenziel erreicht?“, 13. Oktober 2022, Frankfurt am Main.

ESPP (2019): Phosphorus Fact Sheet. European Sustainable Phosphorus Platform. Brüssel. Online verfügbar unter: <https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP-Phosphorus-fact-sheet-v21-4-19.pdf>, Zugriff am: 12.12.2022

EU Öko-VO (2018): EU-Öko-Verordnung - Verordnung (EU) 2018/848 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates (ABl. L 150 vom 14.06.2018, S. 1-92)

EU-DüPV (2019): EU-Düngemittelproduktverordnung - Verordnung (EU) 2019/1009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 (ABl. EU vom 13.10.2022 Nr. L 266 S. 22)

Europäische Kommission (2020): Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474>, Zugriff am: 05.08.2022

Gantner, O., Schipper, W., Weigand, J. J. (2014): Technological Use of Phosphorus: The Non-fertilizer, Non-feed and Non-detergent Domain. In: Scholz, R. W., Roy, A. H., Brand, F. S., Hellums, D. T., Ulrich, A. E. (Hrsg.): Sustainable Phosphorus Management. A Global Transdisciplinary Roadmap. Springer, Dordrecht, S. 237–242. ISBN: 978-94-007-7249-6

Grönfors, O. und Cazalet, D. (2022): Experiences from phosphorus recovery trials with the ViviMag technology. 5. Berliner Klärschlammkonferenz, 14.-15.11.2022, Berlin.

Hagspiel, B., Schmidt, M., Schwarzmann, O. (2018): Klärschlamm zu Energie, Dünger und Eisen mit metallurgischem Phosphorrecycling in einem Verfahrensschritt (KRN-Mephrec). Abschlussbericht, Nürnberg. Online verfügbar unter: [https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/20180425\\_krn-mephrec\\_abschlussbericht\\_online.pdf](https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/20180425_krn-mephrec_abschlussbericht_online.pdf), Zugriff am: 20.01.2022

Heene, M. (2019): Verarbeitung von Klärschlammaschen im industriellen Maßstab. In: Holm, O., Thomé-Kozmiansky, E., Quicker, P., Kopp-Assenmacher, S. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm 2. TK Verlag, Neuruppin, S. 416–426. ISBN: 978-3-944310-49-7

Heinitz, F., Farack, K.; Albert, E. (2011): Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. Nutr Cycl Agroecosyst 91, S. 173. DOI: 10.1007/s10705-011-9454-0

Herzel, H., Adam, C., Emter, J., Leimkötter, D. (2022): Thermochemisches P-Recycling aus Klärschlamm - erste großtechnische Anlage am Standort Altenstadt (Bayern). VDI Wissensforum, 15.09.2022, Koblenz.

Hüer, L.; Siemen, S.; Kopp, J.; Buchmüller, M.; Knörle, U. (2018): Plus-Energie-Kläranlage mit Phosphorrückgewinnung. Abschlussbericht. Förderung des BMUB-Umweltinnovationsprogramm. Online verfügbar unter: [https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/kla\\_lingen\\_abschlussbericht\\_mit\\_anhang\\_181004.pdf](https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/kla_lingen_abschlussbericht_mit_anhang_181004.pdf), Zugriff am: 24.02.2023

iat (2014): iat - Ingenieurberatung GmbH und Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft (ISWA): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm - Machbarkeitsstudie. Online verfügbar unter:

[https://efre-bw.de/wp-content/uploads/Machbarkeitsstudie\\_Rueckgewinnung\\_von\\_Phosphor\\_aus\\_Klaerschlamm.pdf](https://efre-bw.de/wp-content/uploads/Machbarkeitsstudie_Rueckgewinnung_von_Phosphor_aus_Klaerschlamm.pdf), Zugriff am: 02.11.2022

Ivar Urdalen (2013): Phosphorus recovery from municipal wastewater - Literature Review. Online verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/260247863\\_Phosphorus\\_recovery\\_from\\_municipal\\_wastewater\\_-\\_Literature\\_Review#pf26](https://www.researchgate.net/publication/260247863_Phosphorus_recovery_from_municipal_wastewater_-_Literature_Review#pf26), Zugriff am: 02.02.2022

Iwakiri, Y. (2023): KSMF-Prozess von Kubota Corporation (persönliche Auskunft per Mail), Yutaka Iwakiri von Kubota Corporation Water & Environment R&D, E-Mail vom 12.11.2023

Jacobi, F.; Löber, J.; Koch D.; Schumann, C. (2022): P-Düngewirksamkeit von Klärschlamm-Rezyklaten, Abschlussbericht Landesbetrieb Hessisches Landeslabor und Landesbetrieb Landwirtschaft. Online verfügbar unter: [https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2022-10/abschlussbericht\\_p-duengewirksamkeit\\_von\\_klaerschlamm-rezyklaten\\_0.pdf](https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2022-10/abschlussbericht_p-duengewirksamkeit_von_klaerschlamm-rezyklaten_0.pdf), Zugriff am: 24.02.2023

Jacobs, U. (2013): Kosten und Wirtschaftlichkeit der Klärschlamm Trocknung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall 10. TK Verlag, Neuruppin, S. 961–974. ISBN: 978-3-944310-92-4

Juhrich, K. (2016): CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc\\_28-2022\\_emissionsfaktoren-brennstoffe\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_28-2022_emissionsfaktoren-brennstoffe_bf.pdf), Zugriff am: 01.04.2023

Kabbe, C., Rinck-Pfeiffer, S. (2019). Global compendium on phosphorus recovery from sewage/sludge/ash. Global Water Research Coalition. Online verfügbar unter: <https://www.vesiyhdistys.fi/wp-content/uploads/2019/12/GWRCPhosphorusCompendiumFinalReport2019-March-20.pdf>, Zugriff am: 03.11.2022

Kern, J.; Heinzmann, B.; Markus, B. (2008): Recycling and Assessment of Struvite Phosphorus from Sewage Sludge. In Agricultural Engineering Int. 10. Online verfügbar unter: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1071/1053>, Zugriff am: 03.05.2022

Klose, S; Klein, D; Schmelz, K.-G.; Ploteau, M.-E. (2020), Information sheet, Sewage sludge ashes, Interreg North-West Europe Phos4You. Online verfügbar unter: [https://vb.nweurope.eu/media/12157/phos4you\\_ssa\\_en\\_nov2020.pdf](https://vb.nweurope.eu/media/12157/phos4you_ssa_en_nov2020.pdf), Zugriff am: 05.05.2022

Knickel, T. (2021): Erfahrungen mit und Herausforderungen bei dem Vollzug der AbfKlärV aus Sicht der DPP. In: Holm, O. et al. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm 4. TK Verlag, Neuruppin, S. 10-24 – ISBN: 978-3-944310-56-5

Korving, L.; Hansen, B. (2022): ViviMag-Technology, 4th European Sustainable Phosphorus Conference (ESPC4), 20. - 22. 06.2022, Wien.

Kratz, S., Vogel, C. & Adam, C. Agronomic performance of P recycling fertilizers and methods to predict it: a review. Nutr Cycl Agroecosyst 115, 1–39. DOI: 10.1007/s10705-019-10010

Kraus, F., Zamzow, M., Conzelmann, L., Remy, C., Kleyböcker, A., Seis, W., Miehe, U., Hermann, L., Hermann, R., Kabbe, C. (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Texte 13/2019. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19\\_texte\\_13-2019\\_phorwaerts.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_13-2019_phorwaerts.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

Kraus, F.; Conzelmann, L. (2021): Welches Phosphorrecyclingprodukt findet den Weg in den Markt? – Welche Verfahren kommen in Frage? 12. Klärschlammstage. 16.-18.06.2021, Würzburg.

Krüger, O., Adam, C. (2014): Monitoring von Klärschlammmonverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von

Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. Texte 49/2014, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_49\\_2015\\_monitoring\\_von\\_klaerschlammbrennungsgaschen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_49_2015_monitoring_von_klaerschlammbrennungsgaschen.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

KrWG (2012): Kreislaufwirtschaftsgesetz - Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24. Februar 2012 (BGBl. I Nr. 10 vom 29.02.2012 S. 212)

Kurz, P. (2022): P-XTRACT: Regionales Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen – Erkenntnisse der wissenschaftlichen Begleitung, 8. Kongress Phosphor – ein kritischer Rohstoff mit Zukunft, 23. – 24.11.2022, Stuttgart.

LAGA (2012): Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall. Online verfügbar unter: [https://www.laga-online.de/documents/bericht-phosphorrueckgewinnung-1503989892\\_2\\_1656660255.pdf](https://www.laga-online.de/documents/bericht-phosphorrueckgewinnung-1503989892_2_1656660255.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

LAGA (2022): Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung. 3. Bericht an die UMK. LAGA Ad-hoc-AG Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall. Online verfügbar unter: [https://www.laga-online.de/documents/bericht-zur-ressourcenschonung-durch-phosphorrueckgewinnung-stand-januar-2022-1648476389\\_1656659891.pdf](https://www.laga-online.de/documents/bericht-zur-ressourcenschonung-durch-phosphorrueckgewinnung-stand-januar-2022-1648476389_1656659891.pdf), Zugriff am: 13.01.2023

LFU (2015): Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen – Abschlussbericht. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg. Online verfügbar unter: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop\\_app000008?SID=7257904&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu\\_abfall\\_00221%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000008?SID=7257904&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_abfall_00221%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)), Zugriff am: 04.10.2022

Maas, M.; Fiehn, T. (2011): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: Einsatz der alkalischen Thermodruckhydrolyse (TDH) zur Gewinnung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) aus Faulschlamm. Unter Mitarbeit von Abwasserbeseitigungsbetrieb der Stadt Pirmasens und Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz in Rheinland-Pfalz (Hrsg.), Pirmasens.

Mebarki, C.; Oudouh, B.; Ploteau, M.-E. (2020): Information Sheet, Phosphate Salts, Interreg North-West Europe Phos4You. Online verfügbar unter: [https://vb.nweurope.eu/media/12169/phos4you\\_p-salts\\_en\\_nov2020.pdf](https://vb.nweurope.eu/media/12169/phos4you_p-salts_en_nov2020.pdf), Zugriff am 04.10.2023

Mehr, J.; Hellweg, S. (2018): Studie zum ökologischen Vergleich der Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche mittels Phos4life-Verfahren mit der Primärproduktion von P-Säure aus Rohphosphat. Institut für Umweltingenieurwissenschaften der ETH Zürich. Zürich. Online verfügbar unter: [https://zar-ch.ch/fileadmin/user\\_upload/Contentdokumente/Oeffentliche\\_Dokumente/Bericht\\_Phos4Life\\_2018.pdf](https://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Oeffentliche_Dokumente/Bericht_Phos4Life_2018.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

Meyer, C.; Reinhardt, T.; Maier, W.; Poppe, B.; Zettl, U.; Balensiefen, G. (2020): Status Quo und Strukturkonzept der Klärschlamm Entsorgung und Phosphor-Rückgewinnung in Baden-Württemberg. 17.06.2020, Stuttgart.

Meyer, C.; Steinmetz, H. (2013): Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann (Hrsg.): Energie aus Abfall 10. TK Verlag, Neuruppin, S. 1015-1038. ISBN: 978-3-944310-92-4

Meyer, M. (2022): Phosphor Recycling. DPP-Forum 2022, 12.10.2022, Frankfurt am Main.

Moerman, W.; Carballa, M.; Vandekerckhove, A.; Derycke, D.; Verstraete, W. (2009): Phosphate removal in agro-industry: pilot- and full-scale operational considerations of struvite crystallization. In: Water research 43 (7), S. 1887–1892. DOI: 10.1016/j.watres.2009.02.007

Moggert, N.; Niers, T.; Jörgensen, P. E. (2021): Autarke Klärschlammverwertung an dezentralen Standorten mittels Drehrohrkessel - vom Entsorgungsproblem mit Phosphorrückgewinnungsverpflichtung zum regionalen

Wertstoff. In: Holm, O.; Quicker, P.; Kopp-Assenmacher, S. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm 4. TK Verlag, Neuruppin, S. 113-126. ISBN: 978-3-944310-56-5

Montag, D., Bastian, D., Gerth, U., Malms, S., Firk, J. (2016): Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammasche. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Online verfügbar unter: [https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2021-11/gutachten\\_der\\_rwth\\_aachen.pdf](https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2021-11/gutachten_der_rwth_aachen.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

Montag, D., Everding, W., Malms, S., Pinnekamp, J. (2015): Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz. Texte 98/2015, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_98\\_2015\\_bewertung\\_konkreter\\_massnahmen\\_einer\\_weitergehenden\\_phosphorrueckgewinnung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_98_2015_bewertung_konkreter_massnahmen_einer_weitergehenden_phosphorrueckgewinnung.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

Montag, D., Everding, W., Pinnekamp, J. (2010): Stand und Perspektiven der Rückgewinnung von Phosphat aus Abwasser und Klärschlamm. In: Pinnekamp, J. (Hrsg.): 43. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft "Perspektiven und Risiken", Messe Essen Ost, 17.-19.03 2010, Band 220, Essen. ISBN: 978-3-938996-26-3

Müller-Schaper, J.; Hermanussen, O.; Esement, T.; Dockhorn, T.; Dichtl, N.; Haun, E.; Weichgrebe, D.; Rosenwinkel, K.-H.; Bayerle, N. (2012): Seaborne-Verfahren in Gifhorn - Erfahrungen und Ergebnisse. In: Pinnekamp, J. (Hrsg.) Tagungsband der 45. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft "Wasserwirtschaft und Energiewende", Messe Essen Ost, Band 230, Essen, ISBN: 978-3-938996-36-2

Muskolus, A., Wilken, V. (2016): Recyclingdünger und deren Phosphorverfügbarkeiten. „Phosphor im Zierpflanzenbau, 10.11.2016, Dresden-Pillnitz.

Palmowski, L.; Pinnekamp, J. (2018): Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende – E-Klär. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, gefördert im Rahmen der BMBF- Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft – ERWAS“. Online verfügbar unter: [https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/abschlussbericht\\_e-klaer\\_geschuetzt.pdf](https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/abschlussbericht_e-klaer_geschuetzt.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

PAQUES (2022): PHOSPAQ - Sustainable phosphorus recovery. Online verfügbar unter: <https://en.paques.nl/mediadepot/4124db800971/WEBbrochurePHOSPAQ.pdf>, Zugriff am: 27.02.2022

PARFORCE Engineering & Consulting GmbH (2022): eigene Anfrage an Jürgen Eschment, E-Mail vom 14.10.2021

Pinnekamp, J., Baumann, P., Cornel, P., Everding, W., Göttlicher-Schmidle, U., Heinzmann, B., Jardin, N., Londong, J., Meyer, C., Mocker, M., Montag, D., Müller-Schaper, J., Petzet, S., Schaum, C. (2013): Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Teil 1. In: Korrespondenz Abwasser Abfall 10/13 (Hrsg.), S. 837-844, Hennef.

Pinnekamp, J., Weinfurter, K.; Sartorius, C.; Gäth, S. (2011): Phosphorrecycling - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: [https://phosphorrecycling.de/de/publikationen-mainmenu-59/schlussberichte/73-abschlussbericht-phobe/Abschlussbericht\\_Phobe.pdf](https://phosphorrecycling.de/de/publikationen-mainmenu-59/schlussberichte/73-abschlussbericht-phobe/Abschlussbericht_Phobe.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

PYREG (2023): Klärschlammrecycling. Sicher & sauber. Online verfügbar unter: [https://pyreg.com/wp-content/uploads/221026\\_flyer\\_sludge\\_DE.pdf](https://pyreg.com/wp-content/uploads/221026_flyer_sludge_DE.pdf), Zugriff am: 27.02.2023

Quicker, P. (2020): Waste, 7. Thermal Treatment. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Wiley, 2020, S. 1–54. DOI: 10.1002/14356007.w28\_w02

Rak, A. (2018): Das REMONDIS TetraPhos-Verfahren. In: Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Kopp-Assemacher (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm. TK Verlag, Neuruppin, S. 491–494. ISBN: 978-3-944310-43-5

REACH (2006): REACH-Verordnung - Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission (ABl. EU vom 27.08.2020 Nr. L 279 S. 23)

Ritterbusch, S. (2019): Dezentrale Klärschlammverwertung mit dem Klärschlammreformer. In: Holm, O. et al. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm 2. TK Verlag, Neuruppin, S. 264–281. ISBN: 978-3-944310-49-7

Schaum, C.; Hubert, C.; Steiniger, B.; Steinle, E.; Athanasiadis, K.; Mix-Spagl, K.; Bleisteiner, S. (2020): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung – Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU). Neubiberg: Universität der Bundeswehr München. Online verfügbar unter: <https://henry.baw.de/server/api/core/bitstreams/d85c4fc4-fa11-4257-ab87-5078adacf069/content>, Zugriff am: 04.10.2022

Scheidig, K. (2009): Metallurgisches Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen und Filterstäuben als Voraussetzung für die wirtschaftliche Erzeugung eines hochwertigen Phosphor-Düngemittels. Online verfügbar unter: [https://www.dbu.de/projekt\\_24557/01\\_db\\_2409.html](https://www.dbu.de/projekt_24557/01_db_2409.html), Zugriff am: 24.11.2023

Schick, Judith (2009): Untersuchungen zu P-Düngewirkung und Schwermetallgehalten thermochemisch behandelter Klärschlammaschen. Online verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:084-10042011134>, Zugriff am: 24.11.2023

Schmid, S. (2018): Zukünftige Klärschlammverbrennung der Stadtentwässerung Frankfurt am Main. In: Holm, O. et al. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm. TK Verlag, Neuruppin, S. 259–272. ISBN 978-3-944310-43-5

Schnell, M. und Quicker, P. (2020): Mitverbrennung von Klärschlamm in Braun- und Steinkohlekraftwerken. In: Czakainski, M. (Hrsg.): Energiewirtschaftliche Tagesfragen 70. Jg., Heft 9: VDE Verlag GmbH, S. 34–37

Schnell, M. und Quicker, P. (2021): Alternative Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung. In: Müll und Abfall, 2021, Nr. 2. DOI: 10.37307/j.1863-9763.2021.02.04

Schnell, M.; Horst, T.; Quicker, P. (2018): Thermische Verwertung von Klärschlamm. In: Quicker, P.; Schnurer, H.; Zeschmar-Lahl, B. (Hrsg.): Müllhandbuch. Sammlung und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, 2018  
Zweitveröffentlichung: Schnell, M.; Horst, T.; Quicker, P. (2018): Thermische Verwertung von Klärschlamm - Überblick und Einordnung bestehender Verfahren. In: Holm, O. et al. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm. TK Verlag, Neuruppin, S. 131–163. ISBN 978-3-944310-43-5

Schnell, M.; Stark, K. J.; Quicker, P. (2022): Ansätze zur alternativen thermischen Klärschlammbehandlung. In: Holm, O. et al. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm 5. TK Verlag, Neuruppin, S. 26–37. ISBN: 978-3-944310-66-4

Scholz, R. W.; Bilbao, J. (2018): Verwertbarer Phosphor aus Klärschlämmen - Leistungen des erprobten Kubota-KSFM-Verschmelzungsprozesses, Korrespondenz Abwasser, Abfall 65 (Nr. 6)

Schönberg, A.; Raupenstrauch, H.; Ponak, C. (2018): Verfahren und Produkte der Phosphor-Rückgewinnung. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hrsg.): Energie aus Abfall 15. TK Verlag, Neuruppin, S. 679–691. ISBN: 978-3-944310-39-8

Seraplant (2018): Datenplatt NPS Dünger. Online verfügbar unter: <https://seraplant.com/assets/nps.pdf>, Zugriff am: 12.12.2022

Severin, M., Ahl, C.; Kücke, M.; Van den Weghe, H.; Greef, J.-M. (2013): Phosphatlöslichkeiten und Phosphatdüngewirkung von Stoffen aus der Klärschlammbehandlung - Betrachtung unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren. Landbauforschung - journal of applied research in agriculture and forestry 63, 235-244. DOI: [https://doi.org/10.3220/LBF\\_2013\\_235-244](https://doi.org/10.3220/LBF_2013_235-244)

Shariff, Z.; Leleu, D.; Pfennig, A.; Léonard, A. (2021): Demonstrator I3: Acid leaching of P from partially/fully dried sewage sludge (PULSE): In Ploteau Marie-Edith, Althoff Anke, Nafo Issa, Teichgräber Burkhard (Hrsg.): Technical report of the Phos4You partnership on processes to recover phosphorus from wastewater. September 2021, DOI: 10.17185/dupublico/74788

Siekmann, K. und Jakob, J. (2013): Weitergehende thermische Klärschlammbehandlung auf Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe, Kaiserslautern.

Spörri, A., Erny, I., Hermann, L., Hermann, R. (2017): Beurteilung von Technologien zur Phosphorrückgewinnung. Gesamtheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit von Phosphorrückgewinnungstechnologien im Schweizer Kontext. Ernst Basler + Partner AG (Hrsg.), Zollikon.

Spörri, A.; O'Connor, I.; Hermann, L.; Hermann, R. (2020): Technologien zu Phosphorrückgewinnung. Bewertung von Technologien für die Schweiz bezogen auf den Entwicklungsstand April 2019. Bundesamt für Umwelt, EBP Schweiz AG, Zürich. Online verfügbar unter: [https://www.infothek-biomasse.ch/index.php?option=com\\_abook&view=book&id=1342:beurteilung-von-technologien-zur-phosphor-r%C3%BCckgewinnung&catid=5:alle&Itemid=170&lang=it](https://www.infothek-biomasse.ch/index.php?option=com_abook&view=book&id=1342:beurteilung-von-technologien-zur-phosphor-r%C3%BCckgewinnung&catid=5:alle&Itemid=170&lang=it), Zugriff am: 04.10.2022

Statistisches Bundesamt (2019): Klärschlammentsorgung nach Bundesländern. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klärschlammverwertungsart.html>, Zugriff am: 16.07.2021

Statistisches Bundesamt (2021): Produzierendes Gewerbe – Düngemittelversorgung. Wirtschaftsjahr 2020/2021 (Fachserie 4 Reihe 8.2). Online verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820217004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile#%5B%7B%22num%22%3A14%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22FitH%22%7D%2C1185%5D](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820217004.pdf?__blob=publicationFile#%5B%7B%22num%22%3A14%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22FitH%22%7D%2C1185%5D), Zugriff am: 12.12.2022

Stenzel F.; Jung, R.; Wiesgickl, S.; Dexheimer, K.; Eißing, M.; Mundt, M. (2019): Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämme. Texte 31/2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-29\\_texte\\_31-2019\\_arzneimittelrueckstaende-klärschlamm\\_v2.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-29_texte_31-2019_arzneimittelrueckstaende-klärschlamm_v2.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

Stöcklein, F.; Tebert, C.; Töfge, K. (2019): Evaluation und Minderung klimarelevanter Gase aus Abfallverbrennungsanlagen. Texte 102/2018, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-03\\_texte\\_102-2018\\_gase-abfallverbrennungsanlage.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-03_texte_102-2018_gase-abfallverbrennungsanlage.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

Transmit (2021): Machbarkeitsstudie Klärschlammverwertung und Phosphorrecycling für die Region Nord-Ost-Hessen (RePhoNOH) – Endbericht. Transmit GmbH (Hrsg.). Online verfügbar unter: <https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2021-08/endbericht-rephonoh-geschuetzt-.pdf>, Zugriff am: 04.10.2022

UBA (2015): Aufbereitung und Behandlung von Siedlungsabfällen. Phosphorrückgewinnung. Online verfügbar unter: [https://www.cleaner-production.de/images/BestPractice/data\\_de/PRC.pdf](https://www.cleaner-production.de/images/BestPractice/data_de/PRC.pdf), Zugriff am: 27.02.2023

UBA (2021): Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen im Strommix deutlich gesunken. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/spezifische-co2-emissionen-im-strommix-deutlich>, Zugriff am: 27.02.2023



UBA (2022): Emissionsdaten aus TREMOD (Transport Emission Model). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#tremod>, Zugriff am 24.10.2023

van de Velden, M.; Dewil, R.; Baeyens, J.; Josson, L.; Lanssens, P. (2008): The distribution of heavy metals during fluidized bed combustion of sludge (FBSC). In: Journal of hazardous materials. 151. Jg., 2008, Nr. 1, S. 96–102. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.056

Wagner, J.; Richter R.; Struck, K.; Dinslage, R. (2020): Statusbericht zur Klärschlamm Entsorgung aus der kommunalen Abwasserbehandlung im Freistaat Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Online verfügbar unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/36926>, Zugriff am 04.10.2022

Wollmann, I., Müller, T., Breuer, J., Möller, K. (2018): Standardisiertes Verfahren zur Bewertung des Phosphordüngewerts von Recyclingdüngemitteln. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (Hrsg.). Verfügbar unter: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3\\_Umwelt/Abfall-\\_und\\_Kreislaufwirtschaft/180201\\_Standardisiertes\\_Verfahren\\_zur\\_Bewertung\\_des\\_Phosphorduengewerts\\_von\\_Recyclingduengemitteln.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Abfall-_und_Kreislaufwirtschaft/180201_Standardisiertes_Verfahren_zur_Bewertung_des_Phosphorduengewerts_von_Recyclingduengemitteln.pdf), Zugriff am: 04.10.2022

Zettl, E., Kühnl, M., Aigner, J., Castellani, F., Strauss, F., Zunzer, U., Janz, S., Jacobs, U., Drochner, U. (2023): Überprüfung des nationalen Standes der Technik (SdT): Teilvorhaben 3: Untersuchungen zu Emissionen und Energieaufwand bei der Trocknung und Kompostierung von Klärschlamm zur Optimierung einer weiteren umweltverträglichen Verwertung. Texte 87/2023, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/87\\_2023\\_texte\\_ueberpruefung\\_des\\_nationalen\\_standes\\_der\\_technik\\_.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/87_2023_texte_ueberpruefung_des_nationalen_standes_der_technik_.pdf), Zugriff am: 02.10.2023

## A Anhang zu Kapitel 3.1

Nachfolgend wird der Inhalt der Umfrage in Form von Tabellen dargestellt. Die jeweiligen Abfragepunkte sind mit den entsprechenden Auswahlmöglichkeiten und kurzen Erläuterungen dargestellt. Dazu wurde auf Definitionen und Verfahrensbeschreibungen aus dem DWA-Merkblatt 368 (DWA-M 368) zurückgegriffen.

### A.1 Angaben zu den Stammdaten

**Tabelle 59: Angaben zu den Stammdaten**

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
1.1: Bezugsjahr der Daten	<i>Freitext</i>
1.2: Name der Kläranlage	<i>Freitext</i>
1.3: Bundesland	<i>Freitext</i>
1.4: Ausbaugröße (EW) der Kläranlage gemäß Bescheid	<i>Freitext</i>
1.4: Anschlussgröße (EW) der Kläranlage bezogen auf Phosphor	<i>Freitext</i>
1.5: Anteil industrieller Einleiter (EGW)	<i>Freitext</i>
1.6: Anteil industrieller Einleiter (EGW) bezogen auf Phosphor	<i>Freitext</i>

### A.2 Angaben zur Abwasserbehandlung

Anschließend an die Abfrage der allgemeinen Stammdaten werden die Details der Abwasserbehandlung auf den jeweiligen Kläranlagen abgefragt. Hierbei wird das Hauptaugenmerk auf die Phosphorrückgewinnung des inkorporierten P-Anteils und die Schlammbehandlung gelegt. Alle Fragen und Antwortmöglichkeiten sind in Tabelle 48 dargestellt.

**Tabelle 60: Angaben zur Abwasserbehandlung**

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
<b>P-Elimination</b>	
<b>2.1: Wie erfolgt die P-Elimination neben dem inkorporierten P-Anteil?</b>	
Vorwiegend chemisch-physikalisch	Vorwiegende P-Elimination mit Hilfe von Fällmitteln
Vorwiegend gezielte biologische P-Elimination (Bio-P)	Vorwiegend über das normale, wachstumsbedingte Maß hinausgehende P-Elimination durch belebten Schlamm (1)
Ausschließlich chemisch-physikalisch	P-Elimination mit Hilfe von Fällmitteln (1)
Ausschließlich gezielte biologische P-Elimination (Bio-P)	Einzig über das normale, wachstumsbedingte Maß hinausgehende P-Elimination durch belebten Schlamm (1)
Keine	
<b>2.2: Verwendete Fällmittel</b>	

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
Eisenhaltige	z. B. $\text{FeCl}_2$ , $\text{FeCl}_3$ , $\text{FeClSO}_4$ , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
Aluminiumhaltige	z. B. $\text{AlCl}_3$ , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
Kalkhaltige	z. B. $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Keine	
Sonstige:	<i>Freitext</i>

#### Stabilisierungsverfahren

##### 2.3: Welches Stabilisierungsverfahren wird auf der Kläranlage eingesetzt

Anaerobe Schlammstabilisierung	Abbau von organischen Schlamminhaltsstoffen unter Abwesenheit von Sauerstoff, Nitrat, Nitrit und Sulfat
Mesophil anaerobe Schlammstabilisierung	Temperaturbereich für Organismen, die üblicherweise bei Temperaturen zwischen 30 °C und 45 °C aktiv sind
Thermophil anaerobe Schlammstabilisierung	Temperaturbereich für Organismen, die üblicherweise bei Temperaturen über 45 °C aktiv sind
Zweistufige anaerobe Schlammstabilisierung	Abbau von organischen Schlamminhaltsstoffen unter Abwesenheit von Sauerstoff, Nitrat, Nitrit und Sulfat in zwei Stufen/Becken
Aerobe Schlammstabilisierung	Aerober Abbau organischer Schlamminhaltsstoffe
Simultan aerobe Schlammstabilisierung	Gesteigerter biologischer Abbau organischer Stoffe in Belebungsanlagen infolge von verlängerter Belüftungszeit und erhöhtem Schlammalter
Getrennte aerobe Schlammstabilisierung	Aerobe Schlammstabilisierung von Überschussschlamm aus einer Belebungsanlage, gegebenenfalls gemeinsam mit Primärschlamm, in einem getrennten Reaktor
Aerob thermophile Schlammstabilisierung (ATS)	Temperaturbereich für Organismen, die üblicherweise bei Temperaturen über 45 °C aktiv sind
Zugabe von Kalk bei der Schlammkonditionierung	Chemische Schlammstabilisierung mit der zugleich eine Desinfektion erreicht werden kann
Schlammkompostierung	Die Klärschlammkompostierung ist eine aerobthermophile Stabilisierung von entwässertem Klärschlamm.
Keine	
Sonstiges:	<i>Freitext</i>

#### Entwässerungsverfahren

##### 2.4: Wie wird der Klärschlamm auf der Kläranlage entwässert

Maschinelle Entwässerung	Mechanisches Trennverfahren für die Fest/Flüssig-Trennung
Bandfilterpressen	Kombination aus Anpress- und dem Filtrationsprinzip
Kammerfilterpressen	Ein diskontinuierlicher Pressfilter besonders geeignet für geringe Filtrationsgeschwindigkeiten und kompressiblen Filterkuchen

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
Zentrifugen	Nutzung der Massenträgheit zur Fest/Flüssig-Trennung
Statische Entwässerung (Eindicker)	Reduzierung des Wassergehalts durch die Gravitationskraft/Sedimentation von Schlammflocken
Keine	
Externe Entwässerung	<i>Nicht auf der eigenen Kläranlage</i>
Sonstiges:	<i>Freitext</i>

#### Trocknungsverfahren

#### 2.4: Welche Klärschlamm-Trocknungsverfahren werden auf der Kläranlage angewendet?

Bandtrockner	Aufgabevorrichtung/Formpresse zur Herstellung von Granulaten: das Granulat lässt sich zu einem gut durchlüftbaren Haufwerk verteilen
Solare Trocknung mit Abwärme	Trocknung durch flächige Ausbringung in Trockenhallen
Solare Trocknung ohne Abwärme	Trocknung durch flächige Ausbringung in Trockenhallen
Dünnschichttrockner	Horizontaler, beheizter Hohlzylinder
Hallentrockner	Trocknung in geschlossenen Hallen
Scheibentrockner	Trocknung durch Kontakt mit Heizflächen
Keine	
Sonstiges:	<i>Freitext</i>

#### Entsorgungsmöglichkeiten für Reststoffe

#### 2.5: Wie wird das Rechengut entsorgt

Verbrennung	
Thermische Behandlung in Monoverbrennungsanlagen	Verbrennung von nur Klärschlamm
Thermische Behandlung in Zementwerken	Verbrennung von Klärschlamm zur Betreibung eines Zementwerks
Thermische Behandlung in Abfallverbrennungsanlagen	Verbrennung von Klärschlamm in Abfallverbrennungsanlagen
Thermische Behandlung in Kraftwerken (Steinkohle)	Mitverbrennung von Klärschlamm in Steinkohlekraftwerken
Thermische Behandlung in Kraftwerken (Braunkohle)	Mitverbrennung von Klärschlamm in Braunkohlekraftwerken
Kompostierung	
Sonstige Entsorgung:	<i>Freitext</i>

#### 2.6: Wie wird der Sand aus dem Sandfang (ggfs. nach der Sandwäsche) entsorgt?

Baustoffindustrie	z. B. Betonbauteile
-------------------	---------------------

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
Deponierung	Entsorgung auf einer Deponie ohne weitere Verwertung des Sandes
Bergversatz	Ausfüllen untertägiger Hohlräume
Sonstige Entsorgung	<i>Freitext</i>

### A.3 Angaben zum Klärschlammanfall und der Klärschlammbehandlung

In Tabelle 49 wird der Klärschlamm genauer betrachtet. Es wurden Details zum Klärschlammanfall und der Klärschlammbehandlung abgefragt. Insgesamt konnten bei der Klärschlammverwertung drei verschiedene Behandlungswege angegeben werden. Hierbei durfte für jeden Behandlungsweg eine der vorgegeben Auswahlmöglichkeiten gewählt werden.

**Tabelle 61: Angaben zum Klärschlammanfall und der Klärschlammbehandlung**

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
<b>3.1: Angaben zum Klärschlammaufkommen und -zusammensetzung</b>	
Klärschlammmenge (Trockenmasse)	<i>Freitext</i> [t TM/a]
Trockenrückstand	<i>Freitext</i> [% TR]
Glühverlust	<i>Freitext</i> [% GV]
Phosphorgehalt	<i>Freitext</i> [g P/kg TM]
<b>Klärschlammbehandlung</b>	
<b>3.2: Ist ein Klärschlamm-Entsorgungsvertrag vorhanden?</b>	
...wenn ja, Angabe der Vertragslaufzeit (bis einschließlich)	
<b>3.3: Wie wird der Klärschlamm bisher bzw. gegenwärtig verwertet? Bitte geben Sie hier auch die mengenmäßig anfallenden Anteile, anteilig vom Gesamtanfall, jeden Behandlungsweg an.</b>	
Angaben in...	[t TM/a] oder [%]
Behandlungsweg 1	<i>Auswahlmöglichkeit</i>
Behandlungsweg 2	<i>Auswahlmöglichkeit</i>
Behandlungsweg 3	<i>Auswahlmöglichkeit</i>
thermische Entsorgung in Monoverbrennungsanlagen	Verbrennung von nur Klärschlamm
thermische Entsorgung in Zementwerken	Verbrennung von Klärschlamm zur Betreibung eines Zementwerks
thermische Entsorgung in Abfallverbrennungsanlagen	Verbrennung von Klärschlamm in Abfallverbrennungsanlagen
thermische Entsorgung in Kraftwerken (Steinkohle)	Mitverbrennung von Klärschlamm in Steinkohlekraftwerken

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
thermische Entsorgung in Kraftwerken (Braunkohle)	Mitverbrennung von Klärschlamm in Braunkohlekraftwerken
in der Landwirtschaft nach AbfklärV	Austragung des Klärschlammes auf Landwirtschaftlichen Flächen
landschaftsbaulichen Maßnahmen z. B. Rekultivierung	Nutzung des Klärschlamm im Landschaftsbau
Pyrolyse oder Vergasung	Thermochemische Spaltung organischer Verbindungen unter Sauerstoffausschluss
Abgabe an Trocknungsanlage	Abgabe an eine externe Trocknungsanlage
Unbekannt, Weitergabe an einen Dienstleister	
keine Angabe	
sonstige Verwertung	

**3.4: Bitte geben Sie die resultierenden Kosten des jeweiligen Behandlungsweges pro Jahr an.**

Behandlungsweg 1	Freitext [€/t TM]
Behandlungsweg 2	Freitext [€/t TM]
Behandlungsweg 3	Freitext [€/t TM]

**3.5: Wie groß ist die Transportentfernung zur Klärschlamm-Behandlung?**

Behandlungsweg 1	Auswahl [km]
Behandlungsweg 2	Auswahl [km]
Behandlungsweg 3	Auswahl [km]

**Lagerungsmöglichkeiten für Klärschlamm**

**3.6: Interne (Zwischen-)Lagerungsmöglichkeiten?**

Wenn ja, Angabe der Größe der Lagermöglichkeit	[t TM]
--	--------

**3.7: Externe (Zwischen-)Lagerungsmöglichkeiten (gemeint nicht auf der Verbrennungsanlage)?**

Wenn ja, Angabe der Entfernung zur eigenen Kläranlage	Freitext [km]
---	---------------

#### A.4 Angaben zur Phosphorrückgewinnung

Zuletzt sollten weitere Angaben zur Phosphorrückgewinnung getätigt werden (siehe Tabelle 50). Hierbei wurden aktuelle Verfahren genauer abgefragt und auch nach zukünftig geplanten oder präferierten Verfahren gefragt.



**Tabelle 62: Angaben zur Phosphorrückgewinnung**

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
<b>4.1: Gibt es aktuell eine eigene Phosphorrückgewinnung? Wenn ja welches Verfahren wird angewendet?</b>	
Externe Phosphorrückgewinnung	Phosphorrückgewinnung durch ein externes Unternehmen
Kooperative Phosphorrückgewinnung	Gemeinschaftliche Phosphorrückgewinnung mehrerer Kläranlagen
Eigene Phosphorrückgewinnung	Phosphorrückgewinnung auf der eigenen Kläranlage
Keine	
<b>Phosphorrückgewinnung aktuell</b>	
<b>4.2: Phosphorrückgewinnung erfolgt aus...</b>	
Wässriger Phase/ Schlammwasser/ Prozesswasser	Wasser, das bei der Entwässerung und Behandlung von Klärschlamm anfällt
Rückgewinnungsprodukt bei einem Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Wässriger Phase/ Schlammwasser/ Prozesswasser	<i>Freitext</i>
Klärschlamm	Schlamm, der in Kläranlagen durch die Reinigung der Abwässer anfällt
Rückgewinnungsprodukt bei einem Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm	<i>Freitext</i>
Asche (nasschemisches Verfahren mit Schwermetallabreicherung)	Senkung des pH-Werts zur Lösung von gebundenem Phosphor und anschließende Fällung des gelösten Phosphors mittels Kalk oder Natronlauge, zusätzliche Entfernung der Schwermetalle aus dem Produkt
Asche (nasschemisches Verfahren ohne Schwermetallabreicherung)	Senkung des pH-Werts zur Lösung von gebundenem Phosphor und anschließende Fällung des gelösten Phosphors mittels Kalk oder Natronlauge
Asche (thermochemisches Verfahren)	Aufbrechen von organischen Verbindungen zur Erhöhung der P-Konzentration in der Asche durch Erhitzen der Asche auf hohe Temperaturen
Rückgewinnungsprodukt bei einem Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche	<i>Freitext</i>
<b>Phosphorrückgewinnung zukünftig</b>	
<b>4.3: Welches Phosphorrückgewinnungsverfahren wird von Ihnen zukünftig präferiert?</b>	
Fällung mit Rücklösung in der wässrigen Phase	P-Fällung mit Hilfe von Fällmittel und anschließender Rücklösung in einer wässrigen Phase
Fällung ohne Rücklösung in der wässrigen Phase	P-Fällung mit Hilfe von Fällmittel

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
Fällung mit Rücklösung im Schlamm (Rohschlamm, Faulschlamm, Überschussschlamm, etc.)	P-Fällung mit Hilfe von Fällmittel und anschließender Rücklösung im Schlamm
Fällung ohne Rücklösung im Schlamm (Rohschlamm, Faulschlamm, Überschussschlamm, etc.)	P-Fällung mit Hilfe von Fällmittel
Nasschemischer Aufschluss des Klärschlammes	Senkung des pH-Werts zur Lösung von gebundenem Phosphor und anschließende Fällung des gelösten Phosphors mittels Kalk oder Natronlauge
Nasschemischer Aufschluss der Klärschlammmasche ohne Schadstoff-Ausschleusung	Senkung des pH-Werts zur Lösung von gebundenem Phosphor und anschließende Fällung des gelösten Phosphors mittels Kalk oder Natronlauge
Nasschemischer Aufschluss der Klärschlammmasche mit Schadstoff-Ausschleusung	Senkung des pH-Werts zur Lösung von gebundenem Phosphor und anschließende Fällung des gelösten Phosphors mittels Kalk oder Natronlauge, zusätzliche Entfernung der Schwermetalle aus dem Produkt
Thermochemischer Aufschluss der Klärschlammmasche mit Schwermetallabreicherung	Aufbrechen von organischen Verbindungen zur Erhöhung der P-Konzentration in der Asche durch Erhitzen der Asche auf hohe Temperaturen, zusätzliche Entfernung der Schwermetalle aus der Asche
Thermochemischer Aufschluss der Klärschlammmasche ohne Schwermetallabreicherung	Aufbrechen von organischen Verbindungen zur Erhöhung der P-Konzentration in der Asche durch Erhitzen der Asche auf hohe Temperaturen
Unterstöchiometrische Verfahren (z. B. Pyrolyse, Vergasung)	Verbrennung des Klärschlammes mit einer zu geringen Sauerstoffmenge wodurch eine unvollständige Verbrennung stattfindet
Sonstige	

#### 4.4: Welches Phosphorrückgewinnungsprodukt wird von Ihnen zukünftig präferiert?

MAP/Struvit	Phosphathaltiges Mineral
Brushit	Phosphathaltiges Mineral
Phosphorsäure	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Nasschemisch aufgeschlossene Klärschlammmasche/ Phosphoraschedünger	Verwendung des Produkts in gefällter oder kristallisierter Form
Thermochemisch aufgeschlossene Klärschlammmasche/ Phosphoraschedünger	Restliche Asche nach der Erhitzung des Klärschlamm auf hohe Temperaturen
Calciumphosphat	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
C-haltiger Rückstand	Kohlenstoffhaltiger Rückstand
Direkte Klärschlammmascheverwertung	Direkte Austragung von Klärschlammmasche als Düngemittel ohne weiter Aufbereitung
Sonstige	

#### 4.5: Wie erfolgt die Rezyklatverwertung bzw. soll sie erfolgen?

Antwortmöglichkeit	Kurzbeschreibung
Düngemittelindustrie	Abgabe an die Düngemittelindustrie
Direkter Einsatz als Düngemittel	Direkter Einsatz ohne weitere Verarbeitung
Futtermittel	Verwendung als Futtermittel
Metallindustrie	Verwendung in der Metallindustrie
Chemische Industrie	Verwendung in der Chemieindustrie
Sonstige	<i>Freitext</i>
<b>4.6: Wenn Sie mögen, können Sie hier für mögliche Rückfragen, ihre Kontaktdaten angeben</b>	
Name	<i>Freitext</i>
Mail	<i>Freitext</i>
Fon	<i>Freitext</i>
<b>4.7: Nach Abschluss des Forschungsprojektes möchte ich per E-Mail eine Information zum Download des Abschlussberichtes erhalten</b>	
Ja	
Nein	

## B Anhang zu Kapitel 3.1.2

**Tabelle 63: Müllverbrennungsanlagen zur Klärschlamm-Mitverbrennung in Deutschland**

Standort	Betreiber	Genehmigte Kapazität Klärschlamm-Mitverbrennung (2020) [t <sub>TM</sub> /a]	Tatsächlich behandelte Menge Klärschlamm-Mitverbrennung (2020) [t <sub>TM</sub> /a]	Anlagenverfügbarkeit 2020 [h/a]
Bielefeld	MVA Bielefeld-Herford GmbH	k. A.	6.690	8.018
Bitterfeld-Wolfen	PD energy GmbH	7.000	2.727	8.224
Helmstedt	EEW Energy from Waste Helmstedt GmbH	52.500	42.687	8.100
Eschbach (Breisgau)	EEW Energy from Waste Saarbrücken GmbH, TREA Breisgau	17.500	4.829	8.000
Essen	RWE	30.000	19.750	8.000
Geiselbullach	Gf A.d.ö.R. Abfallheizkraftwerk	k.A.	355	8.400
Großräschen	EEW Energy from Waste Großräschen GmbH	26.000	21.070	8.260
Hamburg	Müllverwertung Borsigstraße GmbH	20.000	101	8.000
Hameln	Enertec Hameln GmbH	6.250	3.952	7.884
Hannover	EEW Energy from Waste Hannover GmbH	28.000	22.304	8.300
Knapsack	EBKW Knapsack	20.000	6.087	8.784
Kamp-Lintfort	AEZ Asdonkshof	16.000	8.200	8.784
Köln	AVG Köln	keine Einschränkung	5.425	8.326
Lauta	Thermische Abfallbehandlung Lauta GmbH % CO. oHG	k. A.	6	7.887
Lützen	SUEZ Energie und Verwertung GmbH	5.000	74	8.269
Mainz	MHKW Mainz	k. A.	11.375	8.000

Standort	Betreiber	Genehmigte Kapazität Klärschlamm-Mitverbrennung (2020) [t <sub>TM</sub> /a]	Tatsächlich behandelte Menge Klärschlamm-Mitverbrennung (2020) [t <sub>TM</sub> /a]	Anlagenverfügbarkeit 2020 [h/a]
Neunkirchen	EEW Energy from Waste Saarbrücken GmbH, AHKW Neunkirchen	16.000	3.524	8.000
Oberhausen	GMVA Niederrhein GmbH	67.000	835	7.861
Offenbach	MHKW Offenbach	25.000	2.500	k. A.
Premnitz	EEW Energy from Waste Premnitz GmbH	27.000	7.217	8.000
Rosenheim	MHKW Rosenheim	2.100	225	8.200
Salzbergen	SRS EcoTherm GmbH	7.700	2.395	8.115
Schweinfurt	GKS Schweinfurt GmbH	13.500	519	8.301
Stapelfeld	EEW Energy from Waste GmbH	35.000	5.484	7.750
Stavenhagen	EEW Energy from Waste Stavenhagen GmbH & Co. KG	14.000	14.212	8.150
Stuttgart-Münster	EnBW	k. A.	2.800	k. A.
Würzburg	MHKW Würzburg	1.500	1.446	k. A.
Zella-Mehlis	RABA Südwestthüringen	10.000	4.632	7.385

## C Anhang zu Kapitel 3.3

Anbei sind die Steckbriefe der großtechnischen Phosphorrückgewinnungsanlagen dargestellt.

### C.1 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser

#### C.1.1 Multi-Solid

Tabelle 64: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Multi-Solid

<b>Verfahrensname</b>	Multi-Solid
<b>Verfahrensentwickler</b>	P.C.S. Pollution Control Service GmbH
<b>Verfahrensart</b>	Kristallisation
<b>Kurzbeschreibung des Verfahrens</b>	Der Rohschlamm wird zunächst einer vorgezogenen Hydrolyse unterzogen. Im Anschluss an die Faulung wird der ausgefaulte Schlamm einer Vakuumentgasung zugeführt (Entfernung noch vorhandener Methangasanteile), anschließend entwässert und teilgetrocknet. Im Multi Solid-Verfahren wird aus dem Zentrat gelöstes Phosphat auskristallisiert. Dafür wird Magnesiumoxid als pulverförmige Mg-Quelle zur pH-Anhebung und Struvit-Bildung zu dosiert.
<b>Verfahrensschema</b>	<pre> graph LR     RS[Rohschlamm] --&gt; H[Hydrolyse]     H --&gt; F[Faulung]     F --&gt; B[Biogas]     F --&gt; VE[Vakuumentgasung]     VE --&gt; ET[Entwässerung/Trocknung]     ET --&gt; EGS[entw./getr. Faulschlamm]     ET --&gt; KR[Kristallisationsreaktor]     MgO[MgO] --&gt; KR     KR --&gt; S[Struvit]     KR --&gt; P[Phosphorarme Flüssigphase] </pre>

Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

Firma/Betreiber	AZV Hagenow & Umlandgemeinden		
Standort	Kläranlage Hagenow (Ausbaugröße: 46.000 E)		
Betriebszeit	Ab 2023		
Anlagenbauer	n.n.		
Eingangsstrom	Schlammwasser (Bio-P) (Zentrat aus Schlammmentwässerung)		
	Phosphorgehalt	230 mg P/L (Mittelwert)	



	Trockenrückstand	0,1 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	110.000 m <sup>3</sup> /a (Vollstrom Zentrat)	
<b>Betriebsfähigkeit</b>	8.760 h/a	
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	MgO	
<b>Energiebedarf</b>	65.000 kWh/a	
<b>Rückgewinnungseffizienz</b>	90 % bezogen auf gelöstes PO <sub>4</sub> -P im behandelten Stoffstrom	
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 6-7	

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	Struvit	
<b>Art des Rezyklats</b>	Fest (Kristalle)	
<b>Rezyklataufkommen</b>	100 t/a (80 % TR)	
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	ca. 6,3 % P	
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>	
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DÜMV Rezyklat</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>	
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>	
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	P-arme Flüssigphase	
<b>Reststoffaufkommen</b>	110.000 m <sup>3</sup> /a (s. Durchsatzkapazität)	
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	Keine Angabe	
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Rücklauf in die Kläranlage	
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	Keine	
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt	
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt	
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Entfällt	

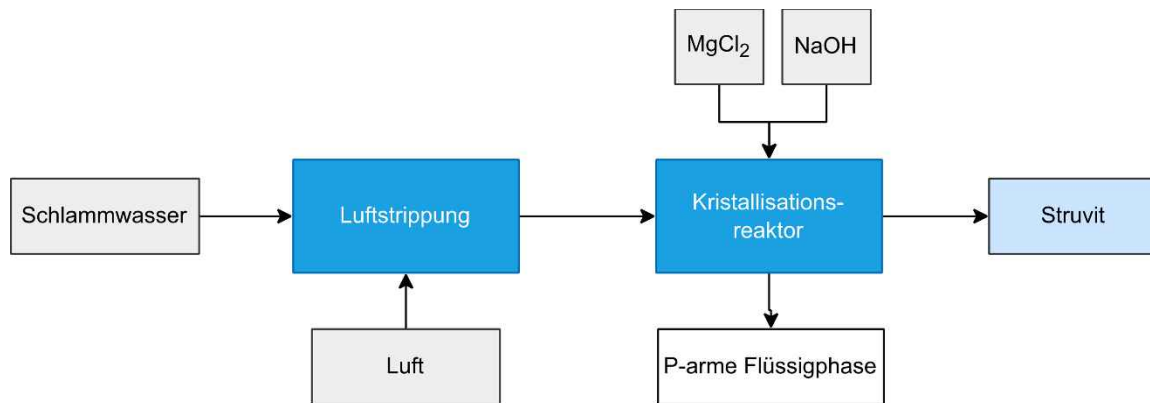
REZYKLATVERWERTUNG	
Abnehmer	Düngemittelindustrie (ggf. örtlicher Abnehmer)
Verwendungszweck	Düngemittel
Verwertungsvertrag vorhanden	LOI vorhanden
Vertragslaufzeit	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
Vertragskosten/-erlöse	<i>Unterliegen Geheimhaltung</i>
Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung	n.n.
Kontakt: Bernd Kalauch P.C.S. GmbH, Jens Flaig Zweckverband Hagenow E-Mail: b.kalauch@pcs-consult.de Telefonnummer: 040 6391705 0	

### C.1.2 NuReSys

Ziel der NuReSys-Anlage in Braunschweig ist nach Angaben der Betreiber die Entfrachtung der Abwasserreinigung, nicht die Einhaltung der AbfKlärV.

**Tabelle 65: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage NuReSys**

Verfahrensname	NuReSys
Verfahrensentwickler	NuReSys (Nutrients Recovery Systems)
Verfahrensart	Kristallisation
Kurzbeschreibung	Im ersten Schritt des NuReSys-Verfahrens wird durch Lufteintrag CO <sub>2</sub> ausgestrippt. Anschließend wird der hierdurch bereits gestiegene pH-Wert mittels Natronlauge weiter angehoben, eingestellt und Struvit durch Magnesiumchlorid-Dosierung ausgefällt. Im Absetzbehälter werden die Struvit-Kristalle abgetrennt.
Verfahrensschema	



Quelle: eigene Darstellung nach Moerman et al. 2009, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	Abwasserverband Braunschweig; Stadtentwässerung Braunschweig GmbH (techn. Betriebsführer)	
<b>Standort</b>	Klärwerk Steinhof, Braunschweig (Ausbaugröße: 275.000 E)	
<b>Betriebszeit</b>	Seit 2021	
<b>Anlagenbauer</b>	NuReSys, Bremer pro aqua	
<b>Eingangsstrom</b>	Schlammwasser (Bio-P) (Zentrat aus Schlammmentwässerung)	
	Phosphorgehalt	338 mg P/l (Mittelwert 2021); (400 mg P/l Auslegungswert)
	Trockenrückstand	< 0,1 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	33.814 m³/a für 2021; Auslegung 219.000 m³/a (Teilstrom ca. 1/3 des anfallenden Schlammwassers)	
<b>Betriebsfähigkeit</b>	8.000 h/a	
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	MgCl <sub>2</sub> (25%-ig) ca. 1,5 l/m³, NaOH (50%-ig) 0,5 l/m³	
<b>Energiebedarf</b>	10.000 kWh/a (für 2021)	
<b>Rückgewinnungseffizienz</b>	85 % bezogen auf gelöstes PO <sub>4</sub> -P im behandelten Stoffstrom	
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 8	

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	Struvit
<b>Art des Rezyklats</b>	Feinkörnig
<b>Rezyklataufkommen</b>	200 kg/d für 2021 (85-95 % TR); (350 t/a Auslegungswert (ganzjähriger Betrieb))

<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	Ca. 12,5 % P
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	<i>Es liegen noch keine belastbaren Ergebnisse vor</i>
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV Rezyklat</b>	<i>Bisher ja</i>
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	<i>Es liegen noch keine belastbaren Ergebnisse vor</i>
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	P-arme Flüssigphase
<b>Reststoffaufkommen</b>	33.814 m <sup>3</sup> /a (s. Durchsatzkapazität)
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	67,5 mg/l
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Rücklauf in die KA
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	Keine
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Entfällt

#### REZYKLATVERWERTUNG

<b>Abnehmer</b>	SF Soepenbergs Braunschweig GmbH
<b>Verwendungszweck</b>	Düngemittel
<b>Verwertungsvertrag vorhanden</b>	Ja
<b>Vertragslaufzeit</b>	In Verhandlung
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	Keine
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	Keine Angabe

Kontakt: Stefanie Meyer, SEBS  
E-Mail: stefanie.meyer@se-bs.de  
Telefonnummer: 01705535809

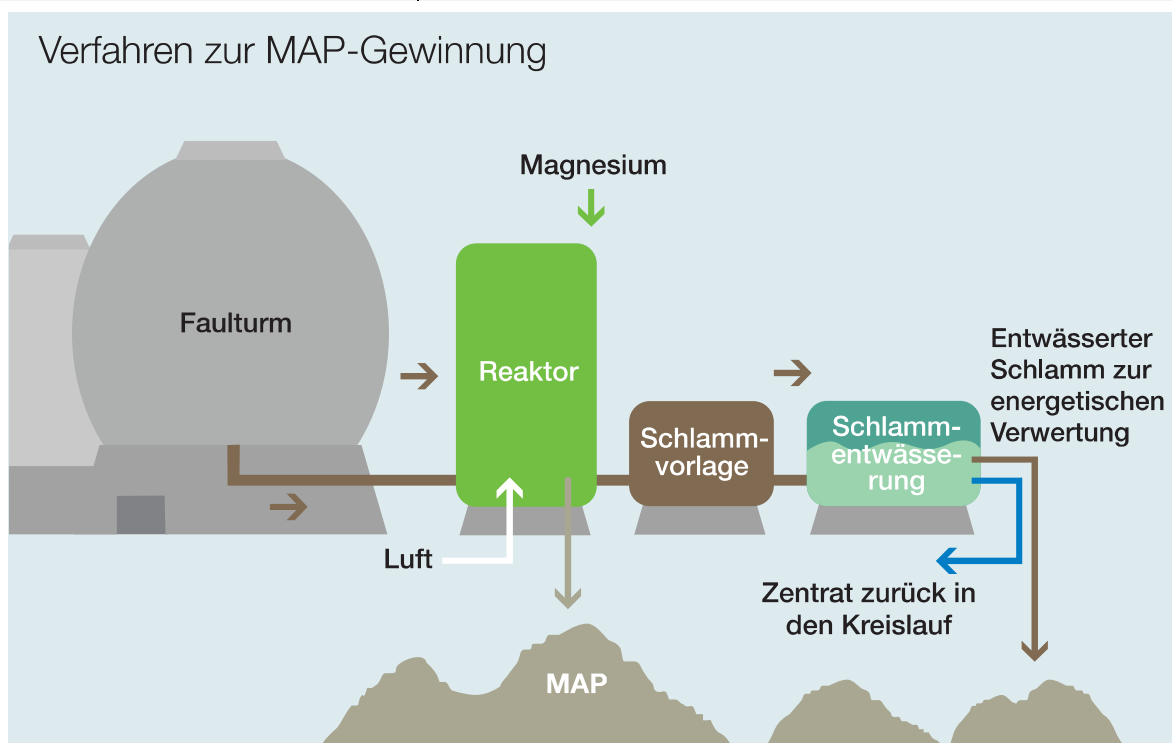
## C.2 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Faulschlamm

### C.2.1 Airprex: Berlin

Die Phosphorrückgewinnung im Klärwerk Waßmannsdorf erfolgte nach Angaben der Berliner Wasserbetriebe vor allem aus betrieblicher Sicht. Am Standort wird Phosphat zwar in gewissen Mengen im Schlamm reduziert, aber nicht ausreichend. Die Struvit-Erzeugung ist daher für den Standort im Klärwerk Waßmannsdorf kein Weg, um die Vorgaben der Klärschlammverordnung zur Phosphorrückgewinnung zu erfüllen.

**Tabelle 66: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Aiprex Berlin**

<b>Verfahrensname</b>	AirPrex
<b>Verfahrensentwickler</b>	Berliner Wasserbetriebe
<b>Verfahrensart</b>	Kristallisation
<b>Kurzbeschreibung</b>	Beim AirPrex-Verfahren wird der ausgefaulte Schlamm in ein Reaktorsystem geführt und einer Luftstrippung unterzogen, wobei durch das Ausgasen von CO <sub>2</sub> der pH-Wert deutlich ansteigt. Durch die Zugabe von Magnesium-Fäll-Salzen wird aus dem in der wässrigen Phase enthaltenen Phosphat und Ammonium schließlich Struvit ausgefällt.
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: Berliner Wasserbetriebe

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	Berliner Wasserbetriebe	
<b>Standort</b>	Klärwerk Berlin-Waßmannsdorf (Ausbaugröße: 1.000.000 E)	
<b>Betriebszeit</b>	Seit 2010	
<b>Anlagenbauer</b>	PCS GmbH	
<b>Eingangsstrom</b>	Faulschlamm (Bio-P)	
	Phosphorgehalt	Keine Angabe (fehlende Daten)
	Trockenrückstand	3,5 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	Ca. 20.000 t TM/a (Vollstrom)	
<b>Betriebsfähigkeit</b>	Ca. 8.000 h/a	
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	MgCl <sub>2</sub> (4-5 Liter pro m <sup>3</sup> Faulschlamm)	
<b>Energiebedarf</b>	Ca. 800.000 kWh/a	
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	< 5 % bezogen auf Phosphorgehalt im Schlamm	
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 9	

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	Struvit
<b>Art des Rezyklats</b>	Fest (Kristall)
<b>Rezyklataufkommen</b>	Ca. 400 t/a OS (TR (45 °C): ca.58 %; TR (105 °C:) ca. 92%
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	Ca. 10 % P
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	Keine Angabe
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV Rezyklat</b>	Schadstoffgrenzwerte nach DüMV bzw. Schwermetallgrenzwerte nach EU-Düngeprodukteverordnung werden eingehalten (weitergehende Kriterien der Verordnungen werden nicht vollständig eingehalten)
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	P <sub>NAC</sub> -Löslichkeit: 23 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	Entwässerter Faulschlamm



<b>Reststoffaufkommen</b>	Ca. 19.500 t TM/a
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	Ca. 37 g P/kg TM
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Thermische Verwertung
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	Keine
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Entfällt
<b>REZYKLATVERWERTUNG</b>	
<b>Abnehmer</b>	Abfallverwerter
<b>Verwertungszweck</b>	Düngemittel
<b>Verwertungsvertrag vorhanden</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
<b>Vertragslaufzeit</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	<i>Unterliegen Geheimhaltung</i>
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
Kontakt: Carola Niemann E-Mail: carola.niemann@bwb.de Telefonnummer: 030-8644 2892	

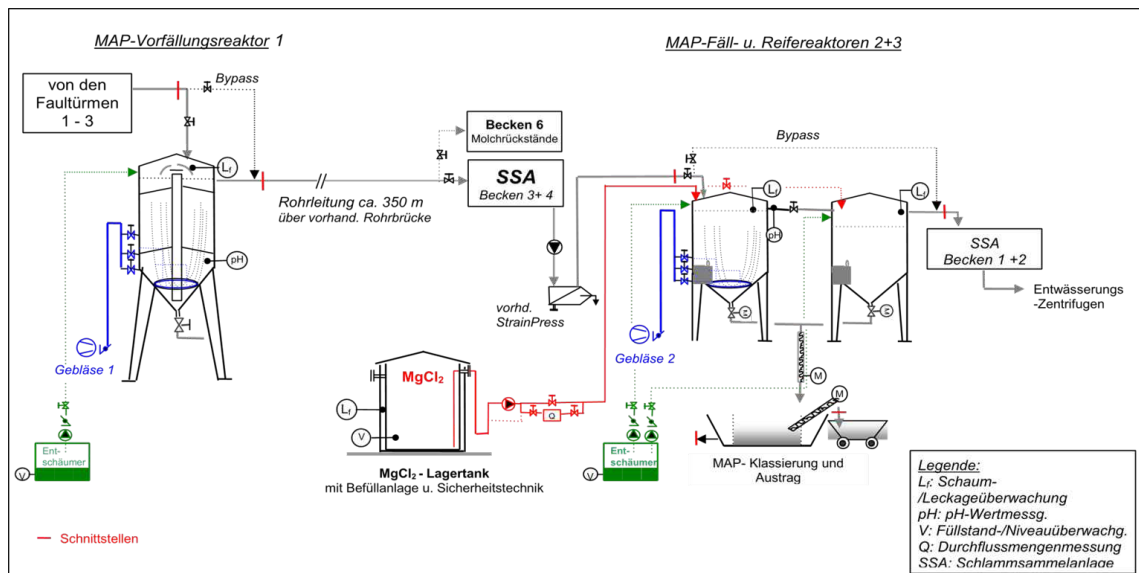
## C.2.2 AirPrex: Mönchengladbach-Neuwerk

Mit der Errichtung der AirPrex-Anlage am Standort MG-Neuwerk wurde in erster Linie das Ziel der Erhöhung der Betriebssicherheit verfolgt. Die Phosphorrückgewinnung war diesem untergeordnet.

**Tabelle 67: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Aiprex Mönchengladbach**

<b>Verfahrensname</b>	AirPrex
<b>Verfahrensentwickler</b>	CNP Cycles GmbH

<b>Verfahrensart</b>	Kristallisation
<b>Kurzbeschreibung</b>	<p>Beim AirPrex-Verfahren wird der ausgefaulte Schlamm in ein Reaktorsystem geführt und einer Luftstrippung unterzogen, wobei durch das Ausgasen von CO<sub>2</sub> der pH-Wert deutlich ansteigt. Durch die Zugabe von Magnesium-Fäll-Salzen wird unter diesen Bedingungen aus den im Schlamm enthaltenen Phosphaten und Ammonium schließlich Struvit (Magnesiumammoniumphosphat) ausgefällt</p> <p>Die Besonderheit in Mg-Neuwerk besteht aus einer ersten Fällung in unmittelbarer Nähe zur Faulung, um eine unkontrollierte Fällung in einer 350 m langen Rohrleitung zu verhindern. Hierbei findet die erste Fällung durch Belüftung, ohne zusätzliches Magnesium, statt und es bildet sich so Struvit nur durch die Reaktion von Phosphat mit bereits im Abwasser enthaltenem überschüssigem Magnesium. Die eigentliche Struvit-Fällung inklusive Ausschleusung findet in den Folgereaktoren 2 und 3 statt.</p>
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: Niersverband

## TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	Niersverband
<b>Standort</b>	Kläranlage Mönchengladbach-Neuwerk (Ausbaugröße: 995.000 E)
<b>Betriebszeit</b>	Seit 2009
<b>Anlagenbauer</b>	P.C.S. GmbH
<b>Eingangsstrom</b>	Faulschlamm (Bio-P)
Phosphorgehalt	118 mg/l P; 33 g P/kg TR
Trockenrückstand	3,59 %

<b>Durchsatzkapazität</b>	7.016 t TM/a (Vollstrom)
<b>Betriebsfähigkeit</b>	8.592 h/a
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	MgCl <sub>2</sub> (1,5 l MgCl <sub>2</sub> pro m <sup>3</sup> Faulschlamm)
<b>Energiebedarf</b>	Keine separate Erfassung (ca. 450.000 kWh/a)
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	11 %
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 9

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

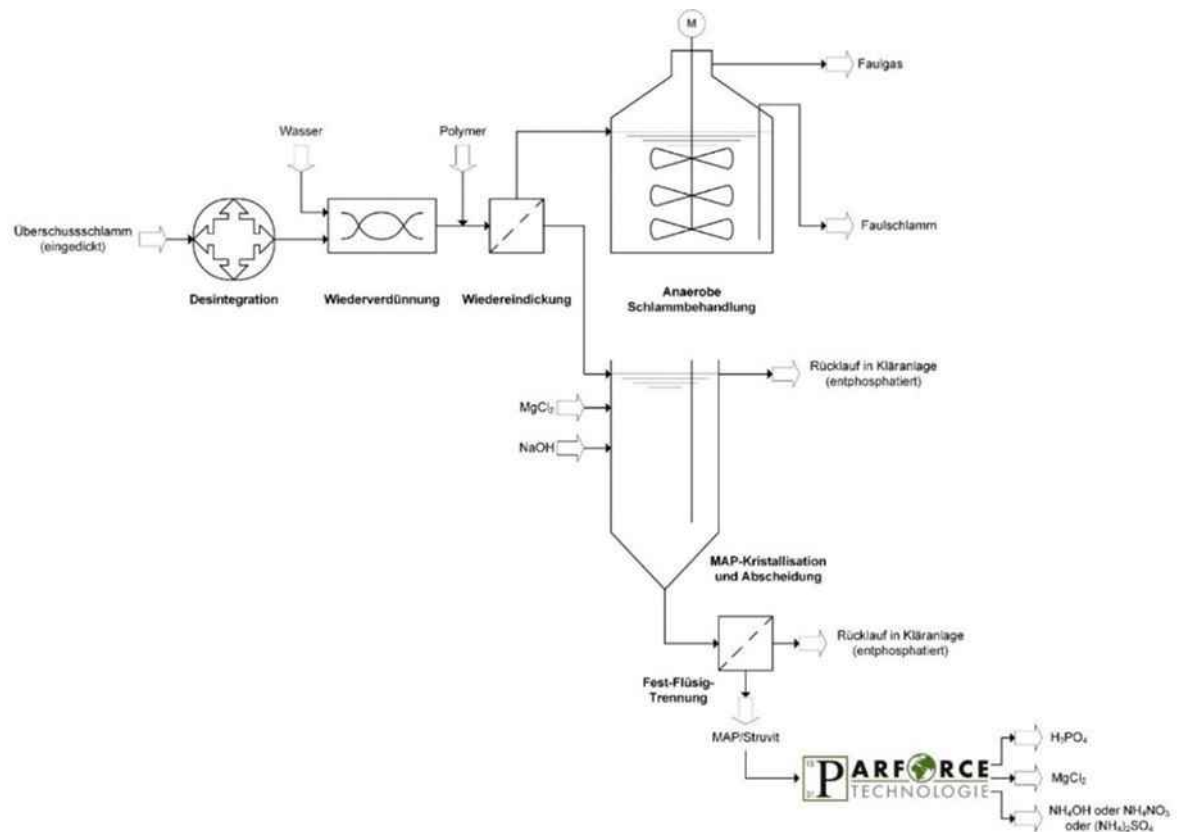
<b>Rezyklat</b>	Struvit
<b>Art des Rezyklats</b>	Fest (Kristall)
<b>Rezyklataufkommen</b>	56,31 t/a OS (TM unbekannt)
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	32.300 mg P/kg TM
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	Keine Angabe
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV Rezyklat</b>	Keine Angabe
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	Keine Angabe
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	Entwässerter Faulschlamm
<b>Reststoffaufkommen</b>	10.000 t TM/a
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	50 g P/kg TM
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Thermische Verwertung
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	Keine
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Entfällt

REZYKLATVERWERTUNG	
<b>Abnehmer</b>	Diverse Verwerter (Düngemittelhersteller/-veredler)
<b>Verwendungszweck</b>	Düngemittel
<b>Verwertungsvertrag vorhanden</b>	Nein
<b>Vertragslaufzeit</b>	Nicht zutreffend
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	Ca. 60 €/t (Abgabe gegen Höchstangebot)
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	Unterschiedlich, da diverse Verwerter
Kontakt: Herr Franz-Josef Hermans (Abwassermeister); Herr Jochen Kottmann (Betriebsleiter) E-Mail: hermans.josef@niersverband.de; kottmann.jochen@niersverband.de Telefonnummer: 02161/9704-217; 02161/9704-210	

### C.2.3 Erweiterter PARFORCE-Ansatz

**Tabelle 68: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage erw. PARFORCE-Ansatz**

<b>Verfahrensname</b>	Erweiterter PARFORCE-Ansatz
<b>Verfahrensentwickler</b>	PARFORCE Engineering & Consulting GmbH
<b>Verfahrensart</b>	Kristallisation von Struvit bzw. Fällung von Calciumphosphat
<b>Kurzbeschreibung</b>	<p>Im ersten Schritt wird im erweiterten PARFORCE-Ansatz der eingedickte Überschussschlamm einer Desintegration unterzogen. Der desintegrierte Schlamm wird im nächsten Schritt mit Zugabe von Brauchwasser verdünnt und mittels Polymereinsatz (PARFLOX) wieder eingedickt. Der desintegrierte Überschussschlamm wird in die Faulung geführt. Aus der separierten, P-angereicherten Flüssigphase des desintegrierten Überschussschlammes wird unter Magnesiumchlorid und Natronlauge Zugabe Struvit kristallisiert (alternativ kann auch Calciumphosphat gefällt werden). Struvit kann optional anschließend in die klassischen PARFORCE Technologie eingeschleust werden und zu Phosphorsäure, Magnesiumchlorid, Ammoniumhydroxyd, Ammoniumnitrat oder Ammoniumsulfat veredelt werden. Vor dem nasschemischen Aufschluss ist jedoch eine Kalzinierung des Struvites nötig, die sowohl Organikanhaftungen entfernt als auch Stickstoff als Ammoniakwasser austreibt</p>
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: PARFORCE Engineering & Consulting GmbH

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	Wolfsburger Entwässerungsbetriebe (WEB)	
<b>Standort</b>	Kläranlage Wolfsburg (Ausbaugröße: 175.000 E)	
<b>Betriebszeit</b>	ab 2023	
<b>Anlagenbauer</b>	Umbau Kristallisationsreaktor (aus zuvor realisierten Airprex-Verfahren) von Faulschlamm auf Faulschlamm-Zentratwasser: Planung: PARFORCE Engineering & Consulting GmbH und Werkstatt Wolfsburger Entwässerungsbetriebe; Veränderung Prozessführung Schlammbehandlung: Planung: Pondus Verfahrenstechnik GmbH, Teltow; Realisierung ISV Umwelt UG, Langelsheim	
<b>Eingangsstrom</b>	Desintegrierter (Bio-P-)Überschussschlamm (Ziel: weitgehende P-Ausschleusung) Faulschlamm-Zentrat (alternativ, wenn Ziel: Anlagenschutz und Senkung der Rückbelastung)	
	Phosphorgehalt	Ca. 800 mg P/l Flüssigphase desintegrierter Überschussschlamm (bei 4 m³/h) [ca. 250 mg P/l Flüssigphase nach Verdünnung (bei 20 m³/h)]
	Trockenrückstand	6-7 % (wiedereingedickter ÜSS)

<b>Durchsatzkapazität</b>	Interimslösung: 120.000 m³/a (15 m³/h) Faulschlamm-Zentrat; nach Fertigstellung Endausbau: 160.000 m³/a (20 m³/h) Flüssigphase (maximales Behandlungsvolumen 320.000 m³/a (40 m³/h), Vollstrom)
<b>Betriebsfähigkeit</b>	> 8.000 h/a
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	Polymerbedarf (PARFLOX): 113 kg Polymer/d (6,5 % TS ÜSS, 4 m³/h) MgCl₂: 387 kg MgCl₂/d (wf) NaOH: 240 L/d (wf)
<b>Energiebedarf</b>	0,5 kWh/m³ Flüssigphase (im Wesentlichen Pumpenergie und Energie zum Betrieb von Filtrationstechnik) inkl. thermischer Desintegration: elektr.: 144 kWh/d therm.: 5.011 kWh/d
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	< 67 % aus dem Schlamm; > 97 % aus der Flüssigphase
<b>Technology Readiness Level</b>	Derzeit 6-7; Fertigstellung TRL 9

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	Struvit oder nach optionaler Veredelung: H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (75 %)
<b>Art des Rezyklats</b>	Fest (Struvit) oder flüssig (bei Veredelung zur P-Säure)
<b>Rezyklataufkommen</b>	1.667 kg/d OS (45 % TR, 16 % P TR)
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	8,9 % OS; 19,5 % P TR
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	<i>Keine Analysen</i>
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV</b>	Grenzwerte werden eingehalten
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	<i>Keine eigenen Analysen</i>
<b>Reststoffe</b>	Desintegrierter Überschussschlamm (wiedereingedickt und P abgereichert)
<b>Reststoffaufkommen</b>	32.485 t/a Überschussschlamm wiedereingedickt und P abgereichert (7 % TS)
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	15 g P/kg TM
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Zuführung zur Faulung
<b>Nebenprodukte</b>	keine; bei Veredelung von Struvit zu P-Säure: MgCl <sub>2</sub> (Rückführung zu Kläranlage als Mg-Quelle für Struvit-Kristallisation), Ammoniakwasser

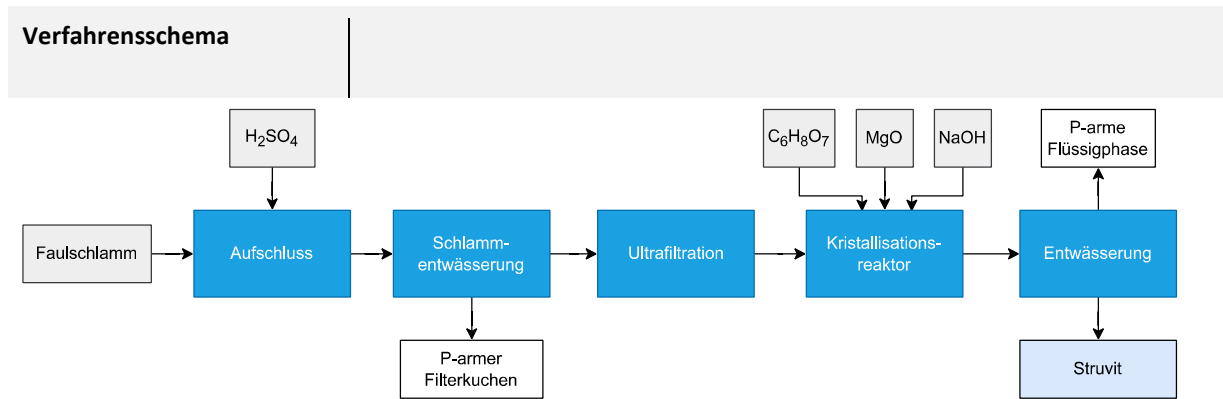


<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Entfällt
<b>REZYKLATVERWERTUNG</b>	
<b>Abnehmer</b>	Soeppenberg, ggfs. für Veredelung: Parforce
<b>Verwendungszweck</b>	Düngemittelindustrie (Struvit und P-Säure), technische Anwendungen Chemieindustrie (P-Säure)
<b>Verwertungsvertrag</b>	Nein
<b>Vertragslaufzeit</b>	Entfällt
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	Keine
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	Entfällt
Kontakt: Jürgen Eschment; Dr.-Ing. Reinhard Lohmeier; E-Mail: juergen.eschment@parforce-technologie.de; reinhard.lohmeier@parforce-technologie.de Telefonnummer: 0176 66 998 168; 0176 66 997 861	

## C.2.4 MSE-Verfahren

**Tabelle 69: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage MSE-Verfahren**

<b>Verfahrensname</b>	MSE Verfahren
<b>Verfahrensentwickler</b>	MSE (mobile Schlammmentwässerungs GmbH)
<b>Verfahrensart</b>	Saures Leaching mit Struvit-Kristallisation
<b>Kurzbeschreibung</b>	In der mobilen Phosphorrückgewinnungsanlage der MSE wird das „Stuttgarter Verfahren“ angewandt und damit Phosphor aus Faulschlamm nasschemisch rückgewonnen. Zuerst wird durch Zugabe von Schwefelsäure der pH-Wert des Faulschlammes abgesenkt, wodurch die Phosphor-Verbindungen in die wässrige Phase übergehen. Nach anschließender Entwässerung kann der Phosphor-abgereicherte Filterkuchen in der Mitverbrennung thermisch entsorgt werden. Das Filtrat wird mit einer Ultrafiltration gereinigt. Zur Vermeidung unerwünschter Nebenprodukte und zur Komplexierung von Schwermetallen wird das Permeat mit Zitronensäure versetzt. Durch die Zugabe von Magnesiumoxid und ggf. Natronlauge wird der pH-Wert angehoben sowie der Phosphor in Form von Struvit ausfällt.



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	MSE
<b>Standort</b>	Mobile Pilotanlage (Teilstrom)
<b>Betriebszeit</b>	Versuchskampagne 2015-2019; Anlage einsatzbereit
<b>Anlagenbauer</b>	Envirochemie GmbH
<b>Eingangsstrom</b>	Faulschlamm (Fe-Fällung, Al-Fällung, Bio-P)
	Phosphorgehalt   30 - 70 g P/kg TM
	Trockenrückstand   1,7 - 4,8 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	max. 5.000 t TM/a
<b>Betriebsfähigkeit</b>	max. 8.760 h/a (Anlage innerhalb von 5 AT einsatzbereit)
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> : 4,8 l/m <sup>3</sup> FS, MgO: 1,6 l/m <sup>3</sup> FS, NaOH: 2,1 l/m <sup>3</sup> FS
<b>Energiebedarf</b>	12 kWh/m <sup>3</sup> FS (1.714.285 kWh/a bei 5.000 t TM/a)
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	90 %
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 8

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	Struvit
<b>Art des Rezyklats</b>	Rundkornggranulat
<b>Rezyklataufkommen</b>	Keine Angabe (abhängig von der P-Fracht)

<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	11,6 % P
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	Vgl. Kapitel 5.4.3 Abbildung 59
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV</b>	Werden eingehalten
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	Vgl. Kapitel 5.4.4 Abbildung 60
<b>Reststoffe</b>	P-arme Filterkuchen
<b>Reststoffaufkommen</b>	Keine Angabe (abhängig von der Kläranlage)
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	< 20 g P/kg TM
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Co-Verbrennung
<b>Nebenprodukte</b>	Keine
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	entfällt

#### REZYKLATVERWERTUNG

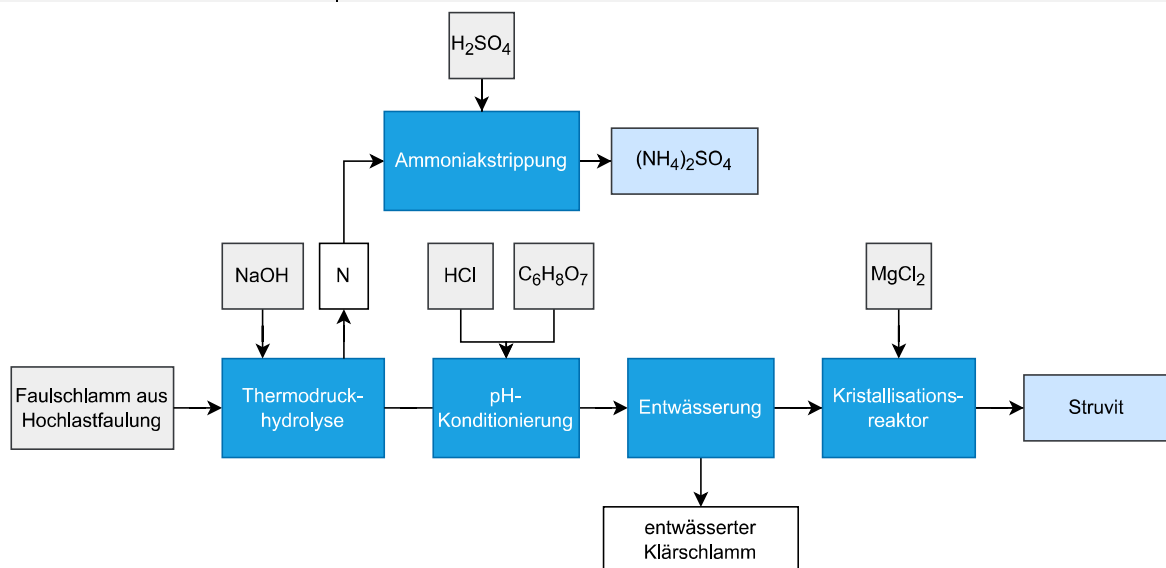
<b>Abnehmer</b>	Entfällt (bei Versuchskampagne Abgabe an den Auftraggeber)
<b>Verwendungszweck</b>	Düngemittel in der Landwirtschaft
<b>Verwertungsvertrag vorhanden</b>	Nein
<b>Vertragslaufzeit</b>	Entfällt
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	Kalkulation im Kampagnenzeitraum (2015-2019): Best case 300 EUR/t, im Worstcase von 40 EUR/t
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	Entfällt

Kontakt: Dr. Rudolf Turek  
E-Mail: r.turek@mse-mobile.de  
Telefonnummer: 0724/89270-15

## C.2.5 PS-fix

**Tabelle 70: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage PS-fix**

<b>Verfahrensname</b>	PS-fix
<b>Verfahrensentwickler</b>	Abwasserbeseitigungsbetrieb der Stadt Pirmasens (ABB)/PFI-Bioraffinerietechnik GmbH (PFI-BRT)
<b>Verfahrensart</b>	Kristallisation mit vorgeschaltetem thermisch-alkalischem Aufschluss des Faulschlamm
<b>Kurzbeschreibung</b>	Im ersten Schritt des PS-fix bzw. Pirmasenser Verfahrens, der alkalischen Thermodruckhydrolyse (TDH), wird Faulschlamm mit Natronlauge zur pH-Wert-Anhebung versetzt und bei 140 °C in einer Druckstufe für eine Inkubationsdauer von einer Stunde temperiert. Anschließend wird Zitronensäure als Komplexbildner dosiert, um einer Al-P Ausfällung entgegenzuwirken sowie HCl dosiert, um den pH-Wert für die Struvit-Fällung zu senken. Es folgt eine Entwässerung durch den Einsatz einer Zentrifuge. Anschließend wird Struvit ausgefällt. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> wird im Bereich der Ammoniakstrippung eingesetzt: Ammoniak gast aufgrund des hohen pH-Wertes während der TDH aus und wird als Ammoniumsulfat gefällt.
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: eigene Darstellung nach Maas und Fiehn, 2011, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	Abwasserbeseitigungsbetrieb der Stadt Pirmasens (ABB)/PFI-Bioraffinerietechnik GmbH (PFI-BRT)
<b>Standort</b>	Kläranlage Felsalbe, Pirmasens (Ausbaugröße: 37.9000 E)
<b>Betriebszeit</b>	Ab 2023
<b>Anlagenbauer</b>	Reiner Schmit GmbH (Weselberg), CNP CYCLES (Hanau)

<b>Eingangsstrom</b>	Faulschlamm aus Hochlastfaulung (Bio-P)	
	Phosphorgehalt	5 % P
	Trockenrückstand	3,5 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	350 t TM/a	
<b>Betriebsfähigkeit</b>	8.500 h/a	
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	NaOH, C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> , HCl, MgCl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
<b>Energiebedarf</b>	120.000 kWh/a (Auslegungswert)	
<b>Rückgewinnungseffizienz</b>	60 % bezogen auf Überschussschlamm (Auslegungswert)	
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 7	

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	Struvit
<b>Art des Rezyklats</b>	Fest (Kristalle)
<b>Rezyklataufkommen</b>	138 t/a (geplant) (OS)
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	5,2 % P; geplant 7,2 % P
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	<i>Repräsentative Werte erst Ende 2023 verfügbar</i>
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DöMV Rezyklat</b>	<i>Repräsentative Werte erst Ende 2023 verfügbar</i>
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	<i>Repräsentative Werte erst Ende 2023 verfügbar</i>
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	Entwässerter Klärschlamm
<b>Reststoffaufkommen</b>	2.000 t OS/a inkl. Klärschlamm aus der Faulung von Primärschlamm
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	< 2 % P
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>Nebenprodukt-aufkommen</b>	37 t/a
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	0 % P

<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Landwirtschaft
<b>REZYKLATVERWERTUNG</b>	
<b>Abnehmer</b>	Landwirtschaft
<b>Verwendungszweck</b>	Düngemittel
<b>Verwertungsvertrag vorhanden</b>	In Vorbereitung
<b>Vertragslaufzeit</b>	Keine Angabe
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	Keine Angabe
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	Keine Angabe
Kontakt: Hr. Pacan (PFI-BRT); Hr. Metzger-Jung (ABB) E-Mail: benjamin.pacan@pfi-germany.de Telefonnummer: 06331 / 6888-901	

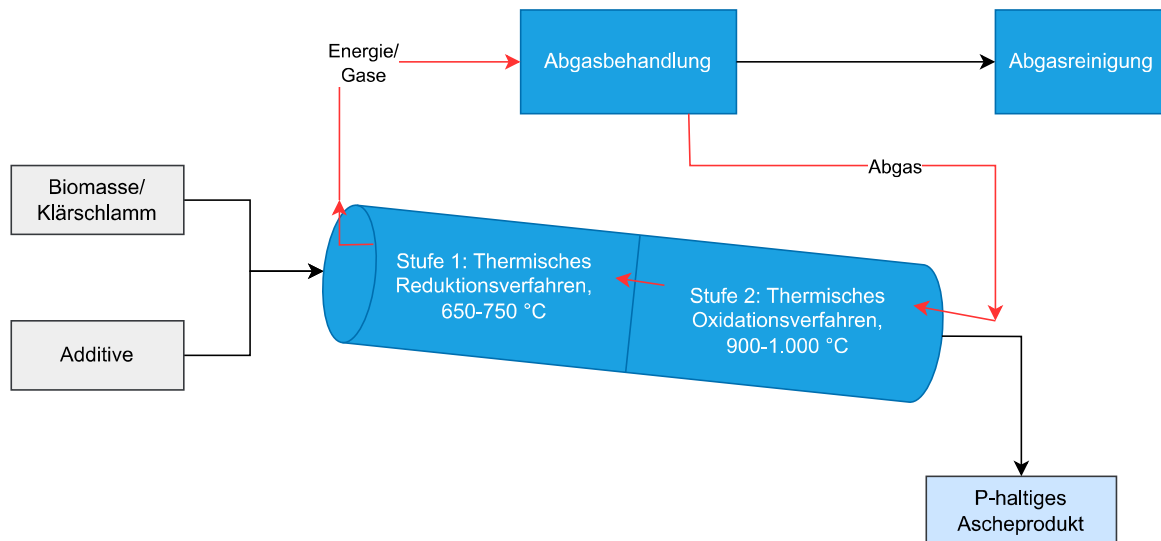


## C.3 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm

### C.3.1 EuPhoRe

Tabelle 71: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage EuPhoRe

<b>Verfahrensname</b>	EuPhoRe
<b>Verfahrensentwickler</b>	EuPhoRe GmbH
<b>Verfahrensart</b>	Thermochemische Behandlung im Drehrohrofen
<b>Kurzbeschreibung</b>	Im EuPhoRe-Verfahren wird der Klärschlamm zu Beginn mittels Zugabe von Alkali- und/oder Erdalkalichloriden oder -sulfaten additiviert. Mit der Klärschlamm-Additivierung wird der Schwermetallaustrag aus der Schlammatrix vorbereitet und die Phosphorlöslichkeit im Ascheprodukt verbessert. Im ersten thermischen Behandlungsschritt werden die entwässerten Schlämme getrocknet und es folgt der Übergang in die Reduktionsphase der Pyrolyse. In dieser findet die chemische Reduktion von Metallen und die Chlorid-Ausschleusung in die Gasphase statt. Die abschließende Oxidationsstufe bei 900 bis 1.000 °C gewährleistet beim Übergang der Pyrolyse- in die Verbrennungsphase eine Umkristallisation der ursprünglichen Mineralsubstanzen hin zu pflanzenverfügbaren Phosphaten.
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	MVV Umwelt Asset GmbH
<b>Standort</b>	HKW Mannheim
<b>Betriebszeit</b>	Ab 2023

<b>Anlagenbauer</b>	Verschiedene	
<b>Eingangsstrom</b>	Entwässerter Klärschlamm	
	Phosphorgehalt	30 % P
	Trockenrückstand	27,5 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	37.125 t TM/a	
<b>Betriebsfähigkeit</b>	7.800 h/a	
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	MgCl <sub>2</sub> (31 %); zzgl. Betriebsmittel für die Rauchgasreinigung	
<b>Energiebedarf</b>	< 6.000.000 kWh/a (Erwartungswert)	
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	> 80 % (Erwartungswert)	
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 7-8	

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

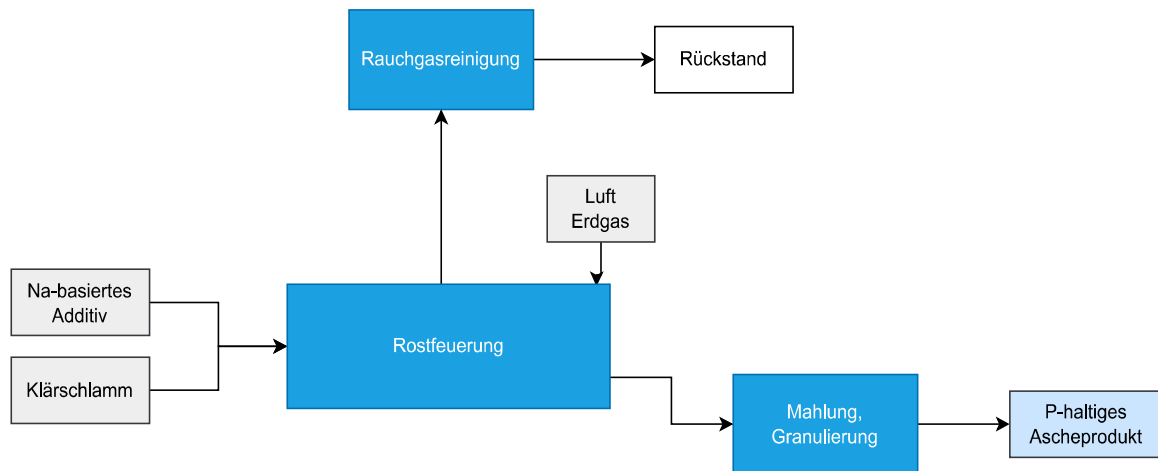
<b>Rezyklat</b>	P-haltiges Ascheprodukt (Phosphoraschedünger)
<b>Art des Rezyklats</b>	Unvermahlene P-Asche
<b>Rezyklataufkommen</b>	14.000 t/a (Erwartungswert)
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	7-10 % (erwartet)
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	Gem. EuPhoRe®-Verfahren; Standortbezogene Daten noch nicht vorhanden
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV</b>	Gem. EuPhoRe®-Verfahren erfüllt, sofern bei Klärschlamminput auf Eignung geachtet wird
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	Gem. EuPhoRe®-Verfahren; Standortbezogene Daten noch nicht vorhanden
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	Schwermetallhaltiger Rauchgasreinigungsrückstand (als Gemisch mit MVA-Rauchgasreinigungsrückstand)
<b>Reststoffaufkommen</b>	Ca. 200 t/a erwartet
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	Sehr gering (Vermischung mit/ Verdünnung durch Rauchgasreinigungsreststoff aus Müllverbrennungsprozess aufgrund gemeinsamer Rauchgasreinigung)
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Untertageversatz (als Gemisch mit MVA-Filterstaub; ASN 19 01 13*)
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	Keine

<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Entfällt
<b>REZYKLATVERWERTUNG</b>	
<b>Abnehmer</b>	Unterliegt Geheimhaltung
<b>Verwendungszweck</b>	Unterliegt Geheimhaltung
<b>Verwertungsvertrag</b>	Unterliegt Geheimhaltung
<b>Vertragslaufzeit</b>	Unterliegt Geheimhaltung
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	Unterliegen Geheimhaltung
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	Unterliegt Geheimhaltung
Kontakt: Martin Spohr E-Mail: martin.spohr@mvv.de Telefonnummer: 0621-2904178	

### C.3.2 Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec Variante B)

**Tabelle 72: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage AshDec Variante B**

<b>Verfahrensname</b>	Na-Direktdosierung in die Verbrennung (AshDec Variante B)
<b>Verfahrensentwickler</b>	BAM, Emter GmbH
<b>Verfahrensart</b>	Thermochemischer Aufschluss
<b>Kurzbeschreibung</b>	Für die AshDec „Variante B“ (Na-Direktdosierung in die Verbrennung) wurde das AshDec Verfahren hinsichtlich des Eingangsstoffstroms und der Verbrennungstechnologie abgewandelt. Anstatt des Einsatzes von Klärschlammverbrennungssasche im Drehrohrofen, wird Klärschlamm in einer Rostfeuerung verbrannt. Dabei wird der Klärschlamm nach der Zudosierung von Additiven (z. B. $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) in die Rostfeuerung gegeben. Durch den hohen Feststoff-Feststoff-Kontakt in der Rostfeuerung und die hohe Verweilzeit (ca. 20 min) reagieren die Na/K-Additive mit den P-Phasen des Klärschlammes. Es entsteht ein P-haltiges Ascheprodukt, welches $\text{CaNaPO}_4$ - $\text{CaKPO}_4$ -Phasen enthält.
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: eigene Darstellung nach Herzel et al., 2022, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	Emter GmbH	
<b>Standort</b>	Altenstadt	
<b>Betriebszeit</b>	Ab Mitte 2024	
<b>Anlagenbauer</b>	Keinen (Umbau durch Einzelaufträge, koordiniert durch Emter GmbH)	
<b>Eingangsstrom</b>	Klärschlamm	
	Phosphorgehalt	3 - 4 % P
	Trockenrückstand	75 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	55.000 t TM/a (genehmigt)	
<b>Betriebsfähigkeit</b>	8.000 h/a	
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	Na-basierte Additive ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , $\text{NaHCO}_3$ ); zzgl. Betriebsmittel für die Rauchgasreinigung	
<b>Energiebedarf</b>	Es wird von einem energieautarkem Prozess ausgegangen	
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	99 %	
<b>Technology Readiness Level</b>	Derzeit TRL 6	

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	P-haltiges Ascheprodukt (Calciumnatriumphosphat basierter Dünger enthält $\text{CaNaPO}_4$ - $\text{CaKPO}_4$ )
<b>Art des Rezyklats</b>	Feinkörniger Feststoff

<b>Rezyklataufkommen</b>	15.000 t/a
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	8 – 9 % P
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	Vgl. Kapitel 5.4.3 Abbildung 59
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV</b>	Grenzwerte werden eingehalten sofern bei Klärschlamminput auf Eignung geachtet wird
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	P <sub>NAC</sub> -Löslichkeit: > 80 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> vgl. Kapitel 5.4.4 Abbildung 60
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	Schwermetallhaltiger Filterstaub
<b>Reststoffaufkommen</b>	300 t/a
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	Keine Angabe (fehlende Daten)
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Untertagedeponie
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	Keine
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Entfällt

#### REZYKLATVERWERTUNG

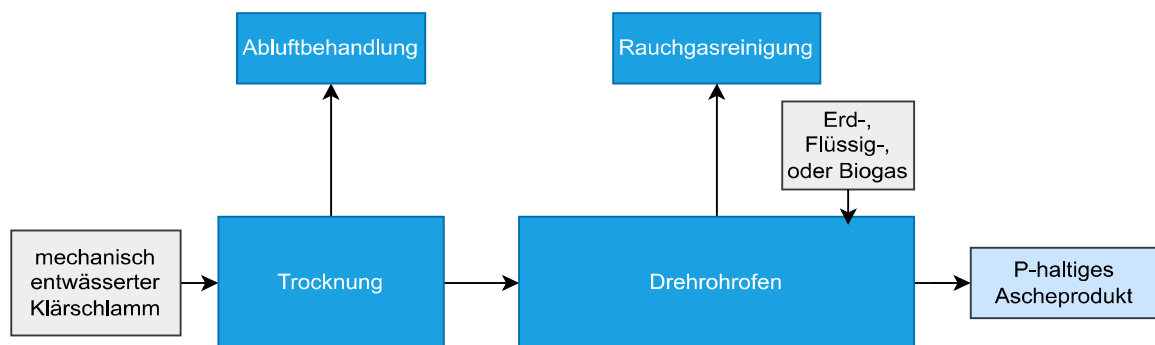
<b>Abnehmer</b>	sePura GmbH
<b>Verwendungszweck</b>	Düngemittel
<b>Verwertungsvertrag</b>	Keine Angabe (fehlende Daten)
<b>Vertragslaufzeit</b>	Keine Angabe (fehlende Daten)
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	Keine Angabe (fehlende Daten)
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	Keine Angabe (fehlende Daten)

Kontakt: Johann Emter; Hannes Herzel  
E-Mail: info@emter-gmbh.de; hannes.herzel@bam.de  
Telefonnummer: 08861 2344 – 0; 030 8104-5680

### C.3.3 Drehrohrkessel (Werkstätten heating-systems GmbH)

**Tabelle 73: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Drehrohrkessel**

<b>Verfahrensname</b>	Drehrohrkessel (Werkstätten heating-systems GmbH)
<b>Verfahrensentwickler</b>	Werkstätten heating-systems GmbH
<b>Verfahrensart</b>	Vollstromvolltrocknung mit anschließender Verbrennung im Drehrohrkessel
<b>Kurzbeschreibung</b>	Im ersten Schritt des Drehrohrkessel-Verfahrens erfolgt eine Vollstromvolltrocknung des mechanisch entwässerten Klärschlamm im Paddeltrockner bis 86 % TM. Die Trocknerabluft wird entstaubt, über einen Abluftwäscher gereinigt und über einen Biofilter in die Atmosphäre entlassen. Der getrocknete Klärschlamm wird im wassergekühlten Drehrohrkessel verbrannt. Die Rauchgase werden mittels SNCR und Grobpartikelabscheidung gereinigt, bevor sie in die Rauchgasreinigungsanlage überführt werden. Aktuell wird an einer additivbasierten Schwermetall-Abtrennung gearbeitet, sodass ein integriertes Phosphorrückgewinnungsverfahren vorliegt.
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	Ems-Vechte-Klärschlammverwertung GmbH	
<b>Standort</b>	Schüttorf	
<b>Betriebszeit</b>	Seit 2020	
<b>Anlagenbauer</b>	Werkstätten heating-systems GmbH	
<b>Eingangsstrom</b>	Mechanisch entwässerter Klärschlamm	
	Phosphorgehalt	3-4 % P
	Trockenrückstand	18-35 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	Ca. 1.400 t TM/a, 4.200 t TM/a(genehmigt)	

<b>Betriebsfähigkeit</b>	> 8.000 h (24/7 (automatisiert))
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	Startbrennstoff; Rauchgasreinigung: H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Abluftwäsche), CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O 40%ig (SNCR), Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + AK Gemisch (Trockensorption), Messgase (Kontinuierliche Messtechnik)
<b>Energiebedarf</b>	320 MWh
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	> 98 %
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 8-9

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	P-haltiges Ascheprodukt
<b>Art des Rezyklats</b>	Asche
<b>Rezyklataufkommen</b>	600 t/a
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	3,5-8,7 %
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	Vgl. Kapitel 5.4.3 Abbildung 59
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV</b>	Abhängig vom Klärschlamm
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	Vgl. Kapitel 5.4.4 Abbildung 60
<b>Reststoffe</b>	Filterstaub
<b>Reststoffaufkommen</b>	60 t/a
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	< 2 % P
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Deponierung
<b>Nebenprodukte</b>	Ammoniumsulfat-Lösung (Nebenprodukt der Abluftwäsche hinter dem Trockner)
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	30 m <sup>3</sup> /a
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	0
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Landwirtschaft; Kläranlage



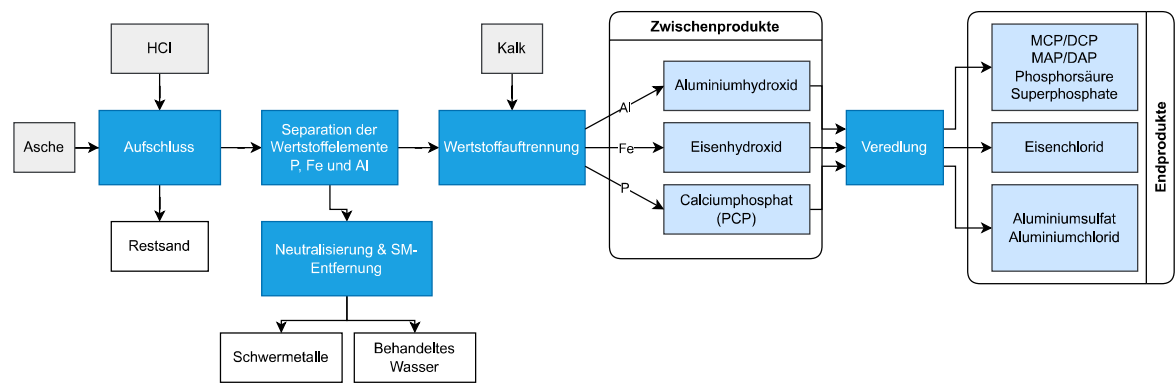
REZYKLATVERWERTUNG	
Abnehmer	Anton Knoll
Verwendungszweck	Landwirtschaftliche Düngung
Verwertungsvertrag	Ja
Vertragslaufzeit	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
Vertragskosten/-erlöse	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung	Ca. 25 km - Aufgabe des Abnehmers
Kontakt: Mario Luchtenborg E-Mail: m.luechtenborg@werkstaetten-gmbh.de Telefonnummer: 05921-807695	

## C.4 Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammverbrennungssasche

### C.4.1 Ash2Phos

Tabelle 74: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage Ash2Phos

Verfahrensname	Ash2®Phos
Verfahrensentwickler	EasyMining
Verfahrensart	Nasschemischer Aufschluss
Kurzbeschreibung	Im Ash2Phos-Verfahren wird die Klärschlammverbrennungssasche mit Salzsäure aufgeschlossen und anschließend die Wertstoffelemente Phosphor, Eisen und Aluminium separiert. Die Restasche wird gewaschen und kann beispielsweise als Einsatzstoff in der Baustoffindustrie Anwendung finden. Im nächsten Schritt werden Aluminium, Eisen und Phosphor durch eine Abfolge von Lösungs- und Fällungsschritten aus dem Filtrat gewonnen, dies erfolgt durch Zugabe von Kalk in die Zwischenprodukte Aluminiumhydroxid, Eisenhydroxid und Calciumphosphat (PCP). Zuletzt können die Zwischenprodukte der Veredlung zugeführt werden.
Verfahrensschema	



Quelle: eigene Darstellung nach Cohen et al., 2018, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

Firma/Betreiber	EasyMining und Gelsenwasser AG	
Standort	Schkopau	
Betriebszeit	Ab 2024 IBN (2025 Regelbetrieb)	
Anlagenbauer	Unterliegen Geheimhaltung	
Eingangsstrom	Klärschlammverbrennungsasche	
	Phosphorgehalt	Keine Limitierung (optimal: zwischen 6-12 % P)
	Trockenrückstand	Trockene Asche (Silo Lagerung)
Durchsatzkapazität	30.000 t TM/a (Ausbaustufe 1) + 30-60.000 t TM/a (Ausbaustufe 2 nach 2026)	
Betriebsfähigkeit	> 8.000 h/a	
Verwendete Betriebsmittel	HCl, NaOH, Kalkmilch	
Energiebedarf	Unterliegt Geheimhaltung	
Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom	> 80 % (90-95 %)	
Technology Readiness Level	Derzeit TRL 6	

TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

Rezyklat	Gefälltes Calciumphosphat (PCP): MCP/DCP, MAP/DAP (Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH mit 17% P, 35% Ca)
Art des Rezyklats	CAS 12167-74-7; REACH Dossier für Pentacalciumhydroxid(tris)orthophosphat
Rezyklataufkommen	15.000 t/a

<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	17 % P (38-39 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	<i>Analysen unterliegen Geheimhaltung</i> vgl. Kapitel 5.4.3 Abbildung 59
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV</b>	Grenzwerte werden eingehalten
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	<i>Analysen unterliegen Geheimhaltung</i>
<b>Reststoffe</b>	Sand; Schwermetall-Konzentrat; Abwasser
<b>Reststoffaufkommen</b>	<i>Analysen unterliegen Geheimhaltung</i> (Abfallreduktion von mindestens 95 %)
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	<i>Analysen unterliegen Geheimhaltung</i>
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Sandfraktion (SM-abgereicherte Restasche) (ASN 19 02 06): Baustoffe (partieller Zementersatz in Beton erprobt), Glas SM-Konzentrat (ASN 19 02 05*): Deponie (ggf. Metallschmelzer)
<b>Nebenprodukte</b>	Eisen(III)chlorid, Natriumaluminat
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Können direkt verwendet werden (marktgängigen Qualitäten)

#### REZYKLATVERWERTUNG

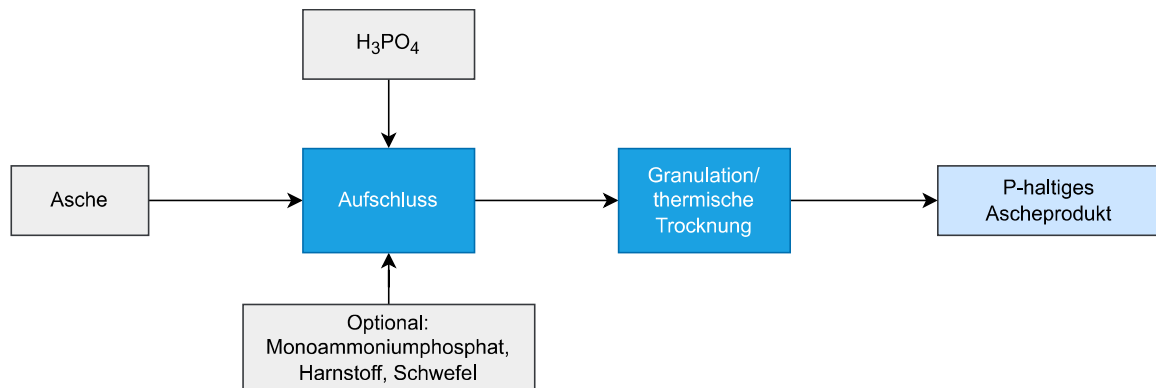
<b>Abnehmer</b>	Unterliegen Geheimhaltung
<b>Verwendungszweck</b>	Rohstoff zur Düngemittel-Herstellung/Konfektionierung, Rohstoff für sämtliche P-Applikationsrouten
<b>Verwertungsvertrag</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
<b>Vertragslaufzeit</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	<i>Unterliegen Geheimhaltung</i>
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>

Kontakt: Dr. Christian Kabbe  
E-Mail: christian.kabbe@easymining.se  
Telefonnummer: 030-61647943

## C.4.2 PHOS4Green

Tabelle 75: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage PHOS4Green

<b>Verfahrensname</b>	PHOS4Green
<b>Verfahrensentwickler</b>	Glatt Ingenieurtechnik GmbH
<b>Verfahrensart</b>	Nasschemischer Aufschluss
<b>Kurzbeschreibung</b>	Im PHOS4Green Verfahren wird eine Suspension aus der Klärschlammverbrennungasche, Phosphorsäure und ggf. weiterer Nährstoffkomponenten erzeugt. Dabei wird das Phosphat in der Asche durch die Säure aufgeschlossen. Die erzeugte Suspension wird anschließend in einem Wirbelschichtapparat gleichzeitig getrocknet und granuliert.
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	SERAPLANT GmbH	
<b>Standort</b>	Haldensleben	
<b>Betriebszeit</b>	seit 2021	
<b>Anlagenbauer</b>	Glatt Ingenieurtechnik GmbH	
<b>Eingangsstrom</b>	Klärschlammverbrennungasche	
	Phosphorgehalt	Ideal > 7,9 % P (flexibel, je nach Endprodukt und zugehöriger Rezeptur)
	Trockenrückstand	100 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	ca. 40.000 t	
<b>Betriebsfähigkeit</b>	7.920 h/a (330 Arbeitstage/a in 3 Schichten)	

<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	Phosphorsäure (40 %-ig)
<b>Energiebedarf</b>	ca. 1.200 kWh/t Endprodukt (entspricht 1.800 kWh/t Asche)
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	> 80 %
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 9

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	P-haltiges Ascheprodukt (P-/NP-/oder NPS-Dünger)
<b>Art des Rezyklats</b>	Granulat (Kornhärte und Korngrößenverteilung gemäß Anforderungen des Düngemittelmarkts)
<b>Rezyklataufkommen</b>	60.000 t/a
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	Bei P38 dementsprechend 38 % $P_2O_5$ (16,6 % P)
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	In Abhängigkeit von der Asche, Verwendung <u>ausschließlich</u> düngemittelkonformer Aschen vgl. Kapitel 5.4.3 Abbildung 59
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV</b>	Ja, da Eingangsaschen bereits konform mit DüMV
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	Vgl. Kapitel 5.4.4 Abbildung 60
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	Keine prozessbedingten Reststoffe
<b>Reststoffaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Entfällt
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	Keine
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	Entfällt
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	Entfällt
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Entfällt

#### REZYKLATVERWERTUNG

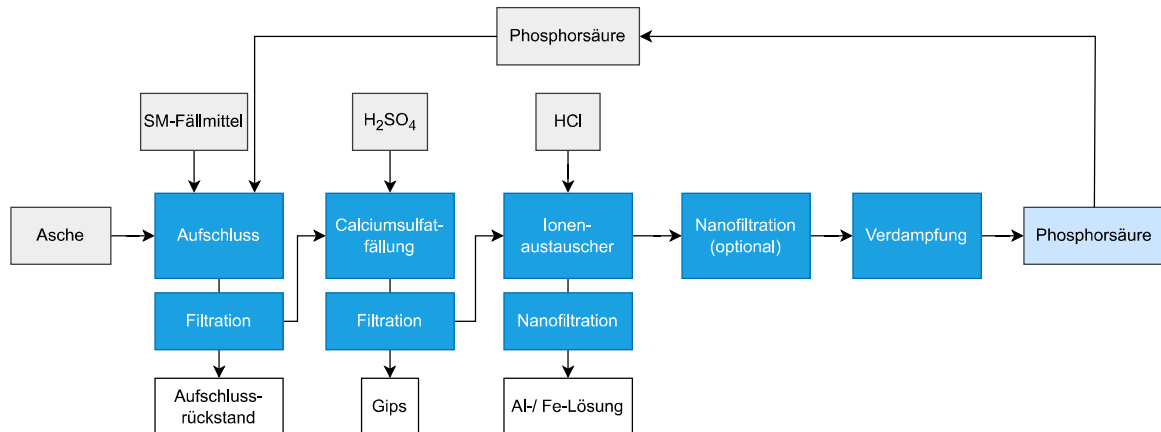
<b>Abnehmer</b>	Möglichkeit des Vertriebs direkt auf dem Düngemittelmarkt, auch über diverse Händler, lokale Abnehmer
<b>Verwendungszweck</b>	Düngemittel
<b>Verwertungsvertrag</b>	Keine Angabe
<b>Vertragslaufzeit</b>	Keine Angabe
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	Erlöse werden entsprechend des jeweiligen Preises am Düngemittelmarkt erzielt
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	Keine Angabe

Kontakt: Jan Kirchhof (Glatt Ingenieurtechnik GmbH)  
E-Mail: jan.kirchhof@glatt.com  
Telefonnummer: 03643-47 1600

### C.4.3 TetraPhos

**Tabelle 76: Steckbrief großtechnische Phosphorrückgewinnungsanlage TetraPhos**

<b>Verfahrensname</b>	TetraPhos
<b>Verfahrensentwickler</b>	REMONDIS Aqua Industrie GmbH & Co. KG
<b>Verfahrensart</b>	Nasschemischer Aufschluss
<b>Kurzbeschreibung</b>	Im ersten Schritt des TetraPhos-Verfahrens wird die Klärschlammverbrennungsasche in einem Reaktor mit verdünnter Phosphorsäure unter Zugabe eines Schwermetall-Fällmittels aufgeschlossen. Anschließend wird das Filtrat vom Ascherückstand abfiltriert, das Filtrat stellt die Roh-Phosphorsäure dar. Im zweiten Schritt wird das aus der Asche gelöste Calcium durch Zugabe von Schwefelsäure aus der Roh-Phosphorsäure als Calciumsulfat ausgefällt, welches als Gips abfiltriert wird. Nachfolgend werden die restlichen Metalle wie Magnesium, Aluminium und Eisen mittels Ionenaustauscher abgetrennt. Zuletzt wird die Rohphosphorsäure mittels optionaler Nanofiltration gereinigt und durch Vakuumverdampfung konzentriert.
<b>Verfahrensschema</b>	



Quelle: eigene Darstellung, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

#### TECHNISCHE DETAILS – ANLAGENSPEZIFISCHE DATEN

<b>Firma/Betreiber</b>	Hamburger Phosphorrecyclinggesellschaft mbH	
<b>Standort</b>	Hamburg, Klärwerk Köhlbrandhöft	
<b>Betriebszeit</b>	2021 IBN (Regelbetrieb für Mitte 2023 erwartet)	
<b>Anlagenbauer</b>	Hamburger Phosphorrecyclinggesellschaft mbH (Einzelosvergabe)	
<b>Eingangsstrom</b>	Klärschlammverbrennungsasche (der VERA Hamburg)	
	Phosphorgehalt	Ca. 11 % P (Asche Hamburg)
	Trockenrückstand	99,8 %
<b>Durchsatzkapazität</b>	20.000 t/a	
<b>Betriebsfähigkeit</b>	8.000 h/a	
<b>Verwendete Betriebsmittel</b>	(rezyklierte) Phosphorsäure, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , SM-Fällmittel, HCl	
<b>Energiebedarf</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>	
<b>Rückgewinnungseffizienz bezogen auf den Eingangsstrom</b>	> 80 % - 90 %	
<b>Technology Readiness Level</b>	TRL 8	

#### TECHNISCHE DETAILS – PRODUKTE; RESTSTOFFE UND NEBENPRODUKTE

<b>Rezyklat</b>	Phosphorsäure (75 %-ig)
<b>Art des Rezyklats</b>	Flüssig



<b>Rezyklataufkommen</b>	7.000 t/a
<b>Phosphorgehalt Rezyklat</b>	75 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
<b>Schadstoffgehalt Rezyklat</b>	Gemäß der mit den Abnehmern vereinbarten RePacid® Produktspezifikation
<b>Einhaltung der Grenzwerte der DüMV</b>	Nicht anwendbar
<b>Pflanzenverfügbarkeit Rezyklat</b>	Nicht anwendbar
<b>Reststoffe des Prozesses</b>	Mineralik (Aschereste)
<b>Reststoffaufkommen</b>	17.000 t/a
<b>Phosphorgehalt Reststoff</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
<b>Entsorgungsweg Reststoff(e)</b>	Deponierung
<b>Nebenprodukte des Prozesses</b>	Eisen- und Aluminiumsalz-Lösung, Gips
<b>Nebenproduktaufkommen</b>	36.000 t/a Eisen- und Aluminiumsalz-Lösung 12.000 t/a Gips
<b>Phosphorgehalt Nebenprodukt</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>
<b>Entsorgungsweg Nebenprodukt(e)</b>	Einsatz in der Kläranlage zur Phosphatelimination (Metallsalze) Baustoffindustrie (Gips)

#### REZYKLATVERWERTUNG

<b>Abnehmer</b>	Sekundärrohstoff in der Industrie
<b>Verwendungszweck</b>	Substitution konventioneller technischer Phosphorsäure
<b>Verwertungsvertrag</b>	Ja
<b>Vertragslaufzeit</b>	Jährlich, mehrjährig
<b>Vertragskosten/-erlöse</b>	<i>Unterliegen Geheimhaltung</i>
<b>Transportentfernung zur Verwertung/Behandlung</b>	<i>Unterliegt Geheimhaltung</i>

Kontakt: Dr. Eckart Döpfens, Nils Post, Andreas Rak  
E-Mail: info@phosphorrecycling-hh.de  
Telefonnummer: 02306 106-8607

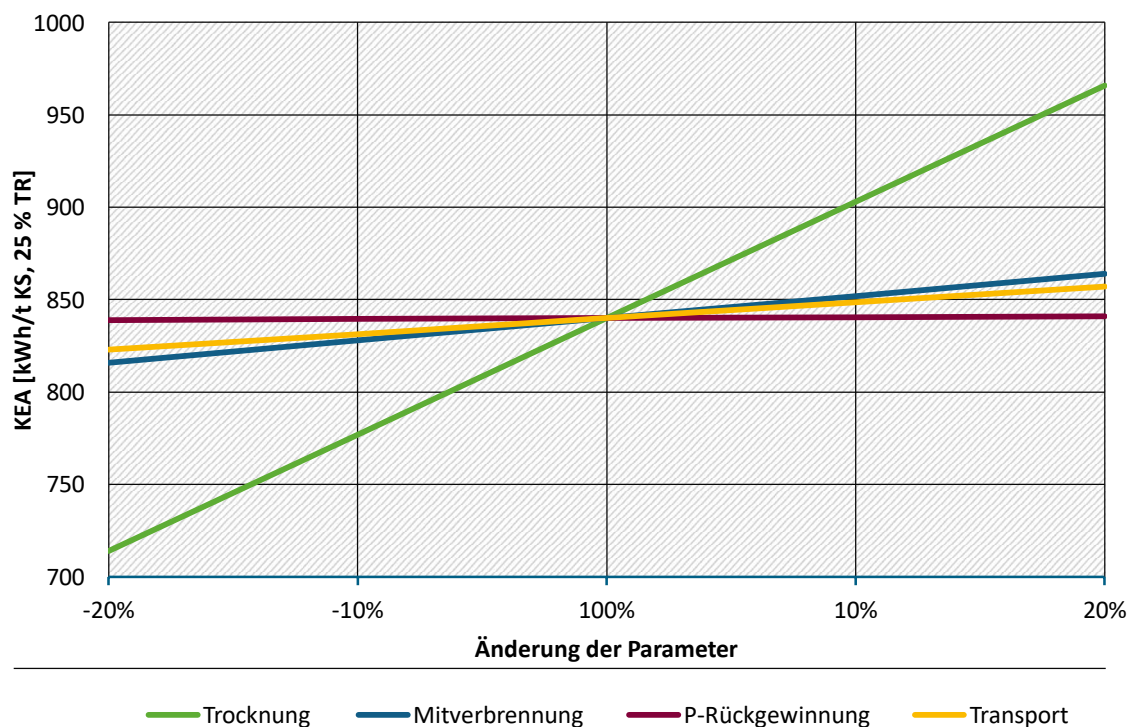
## D Anhang zu Kapitel 7

### D.1 Sensitivitätsanalysen

#### D.1.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

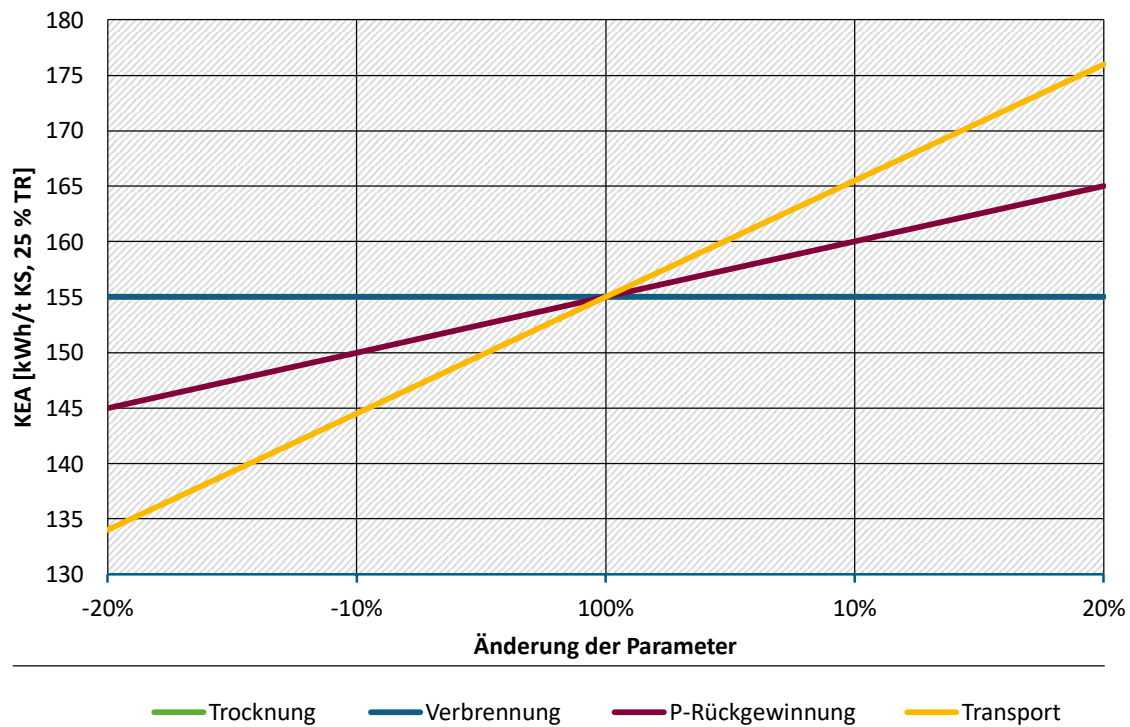
Die größte Sensitivität in den Klärschlammverbrennungs-Szenarien ist auf den Transport zurückzuführen, da dieser den größten Anteil am KEA ausmacht. So führt beispielsweise die Variation des Transportaufwands um 20 % in Szenario B und C zu einer Erhöhung bzw. Verringerung des KEA um etwa 20 kWh. Eine Variation des Energieaufwands der Phosphorrückgewinnung um 20 % hat einen moderaten Einfluss auf den KEA (ca. 10 kWh). Im Vergleich zum Trocknungsaufwand in Szenario A weisen der Strombedarf der Verbrennung sowie der Energiebedarf des Transports bei einer Veränderung des Primärenergieaufwands um 20 % mit 24 bzw. 17 kWh eine erkennbar geringere Sensitivität auf den KEA auf. Im Szenario E wirkt sich die gleiche Variation des Aufwands der Phosphorrückgewinnung mit einer Verringerung bzw. Erhöhung des KEA von 10 kWh aus. Der Transportaufwand hat mit 24 kWh nach der Trocknung den deutlichsten Einfluss auf den KEA. Dies liegt darin begründet, dass der kohlenstoffhaltige Rückstand für die nachgeschaltete Klärschlammverbrennung und Phosphorrückgewinnung transportiert wird. Der Einfluss des Aufwandes für die Pyrolyse auf den KEA ist gering. Die Sensitivitätsanalyse des Szenario F spiegelt im Wesentlichen die bisherigen Ergebnisse wider. Das HTC-Verfahren weist die größte Sensitivität auf. Transport und Phosphorrückgewinnung weisen mit 5 kWh eine geringe Empfindlichkeit gegenüber dem KEA auf.

Abbildung 86: Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario A



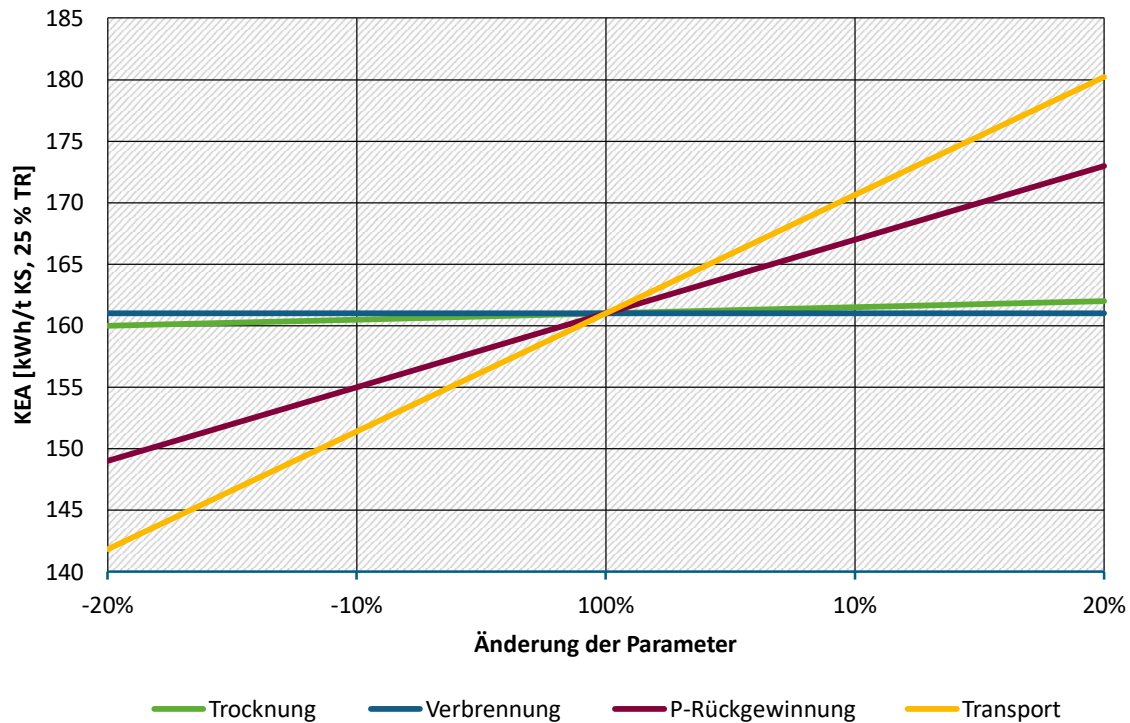
Quelle: eigene Darstellung, TEER

**Abbildung 87: Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario B**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

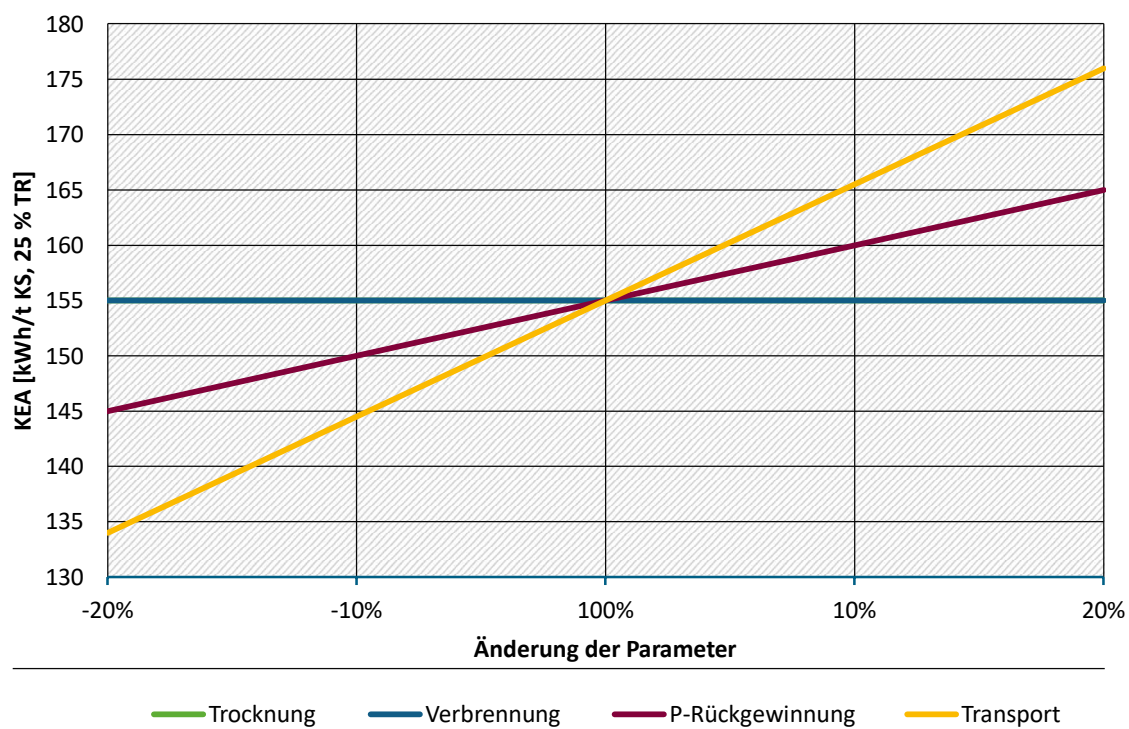
**Abbildung 88: Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario C**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

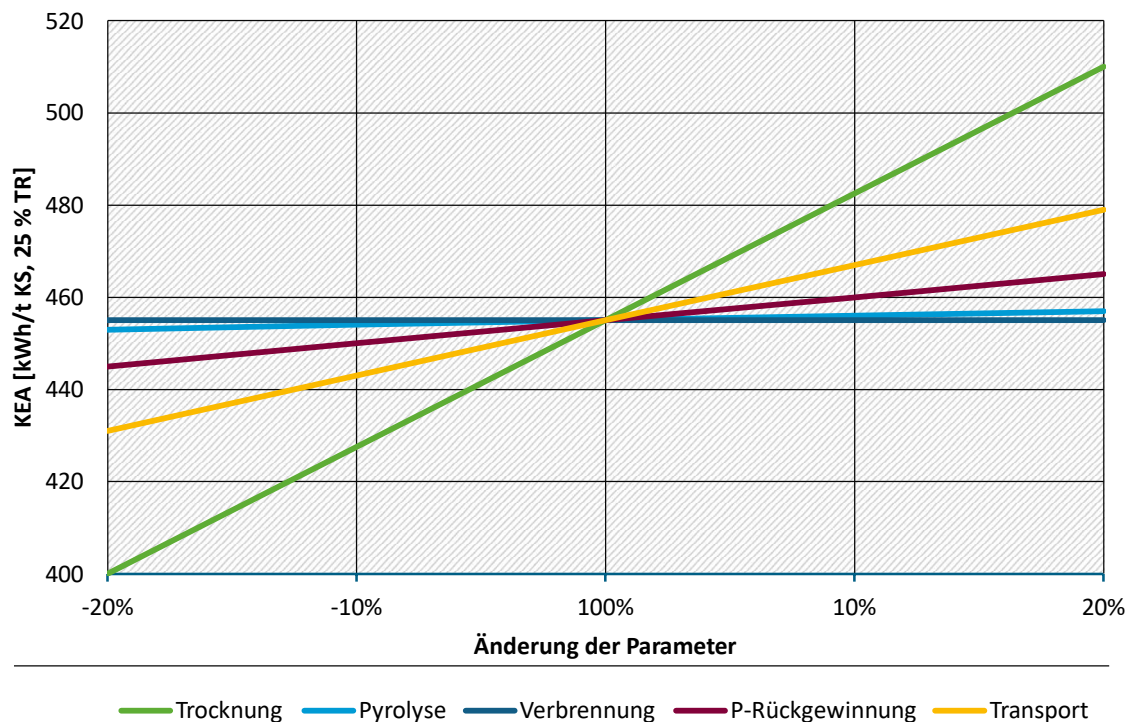


**Abbildung 89: Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario D**



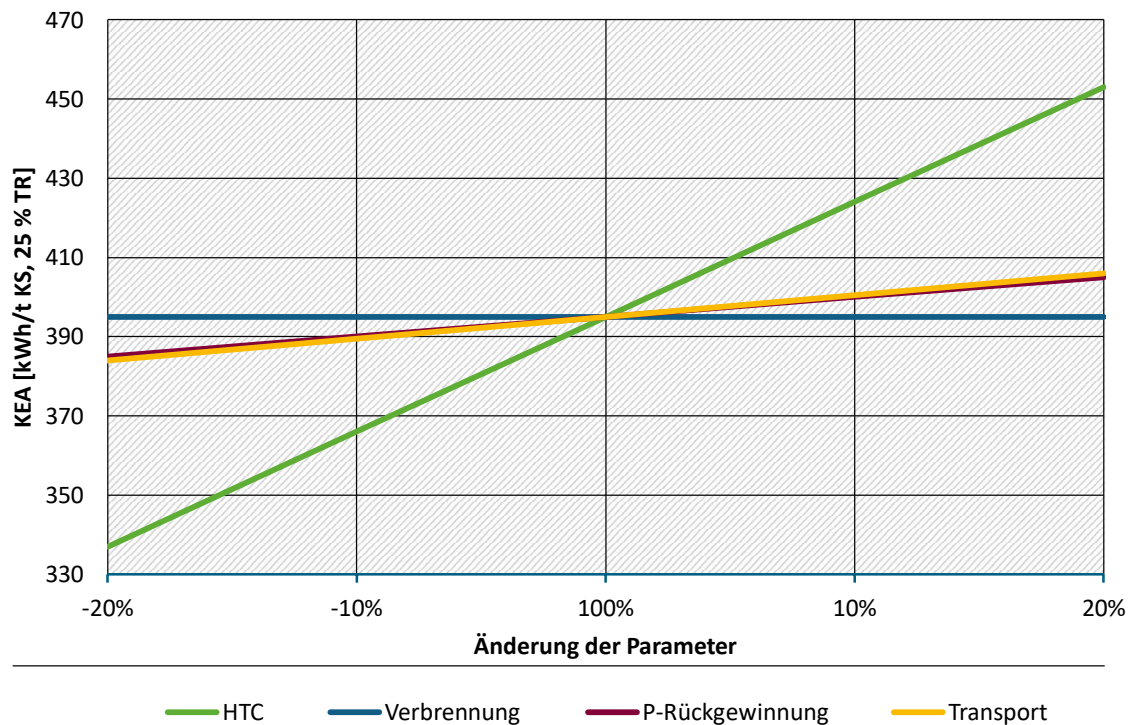
Quelle: eigene Darstellung, TEER

**Abbildung 90: Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario E**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

**Abbildung 91: Sensitivitätsanalyse des KEA für Szenario F**



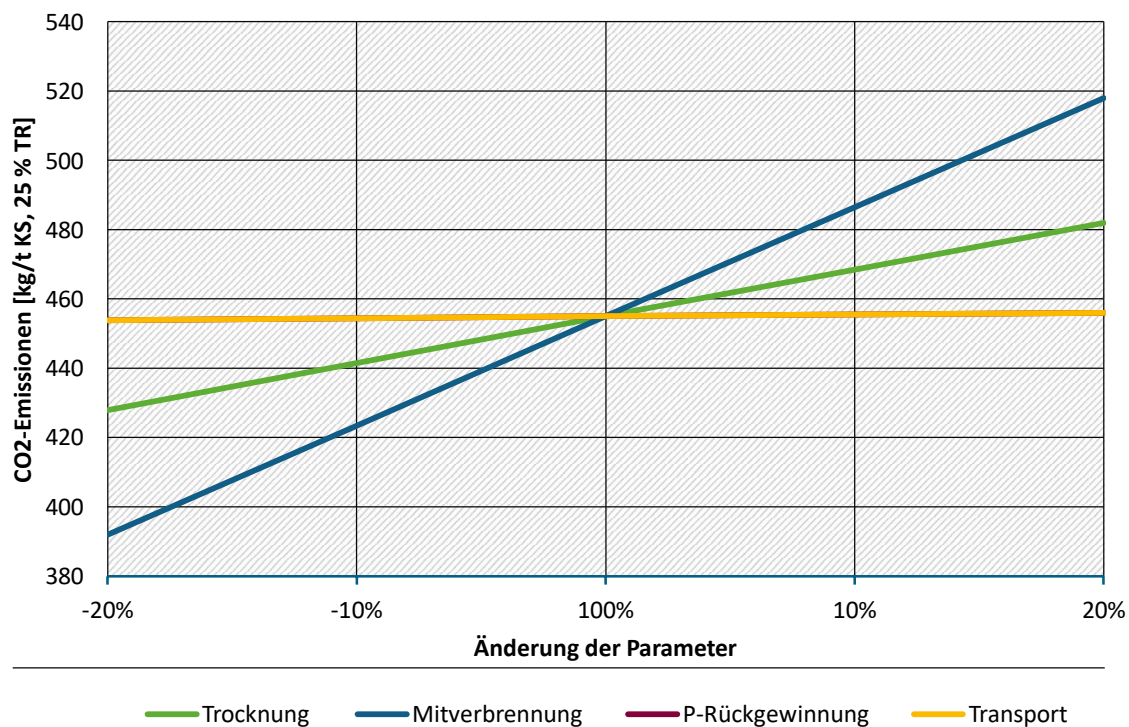
Quelle: eigene Darstellung, TEER

### D.1.2 CO<sub>2</sub>-Bilanzen

In allen Szenarien weist der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Abgase aus der Klärschlammbehandlung und der Nachverbrennung der Pyrolysegase die größte Sensitivität gegenüber den Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Im Vergleich dazu sind die Emissionsschwankungen bei Variation der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Phosphorrückgewinnung sowie durch den Transport der Klärschlämme und anfallenden Rückstände vernachlässigbar gering. Dadurch, dass in den Szenarien B-E ein bedeutender Anteil des Wärmebedarfs für die Trocknung sowie in den Szenarien B-F ein bedeutender Anteil des Strombedarfs aus der Abwärme der Verbrennung abgedeckt werden, wurden CO<sub>2</sub>-Emissionen durch externe Wärme- und Strombereitstellung eingespart. Phosphorrückgewinnung und Transport weisen eine geringe Sensitivität auf.

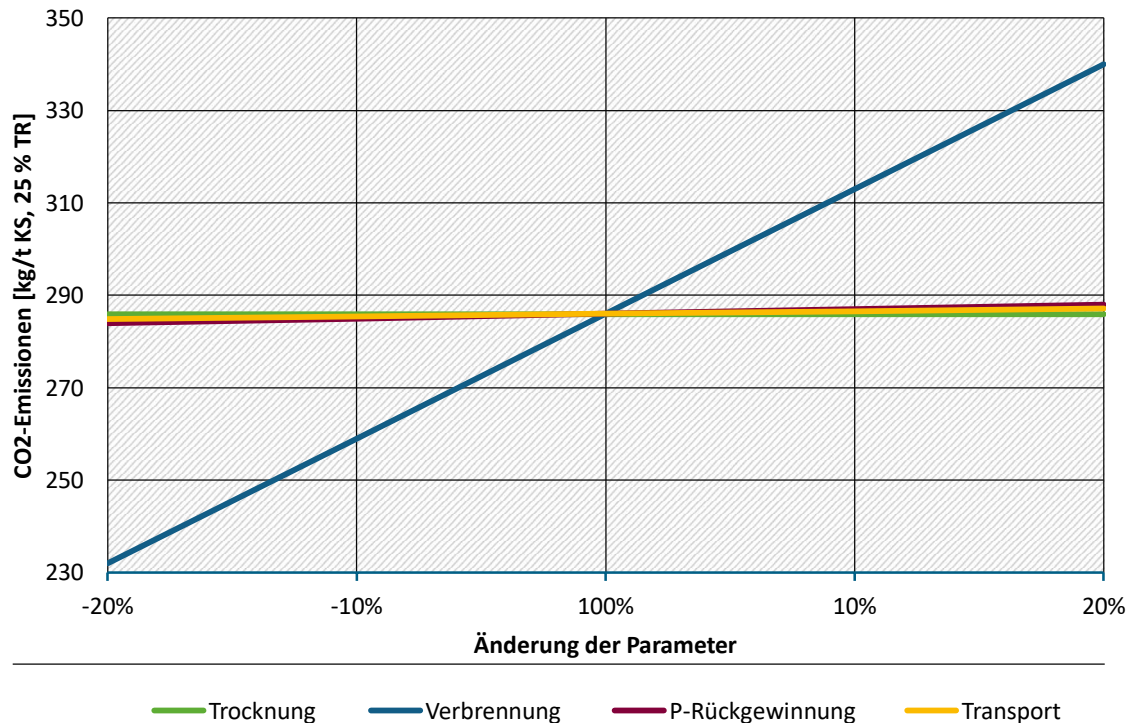


**Abbildung 92: Sensitivitätsanalyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Szenario A**



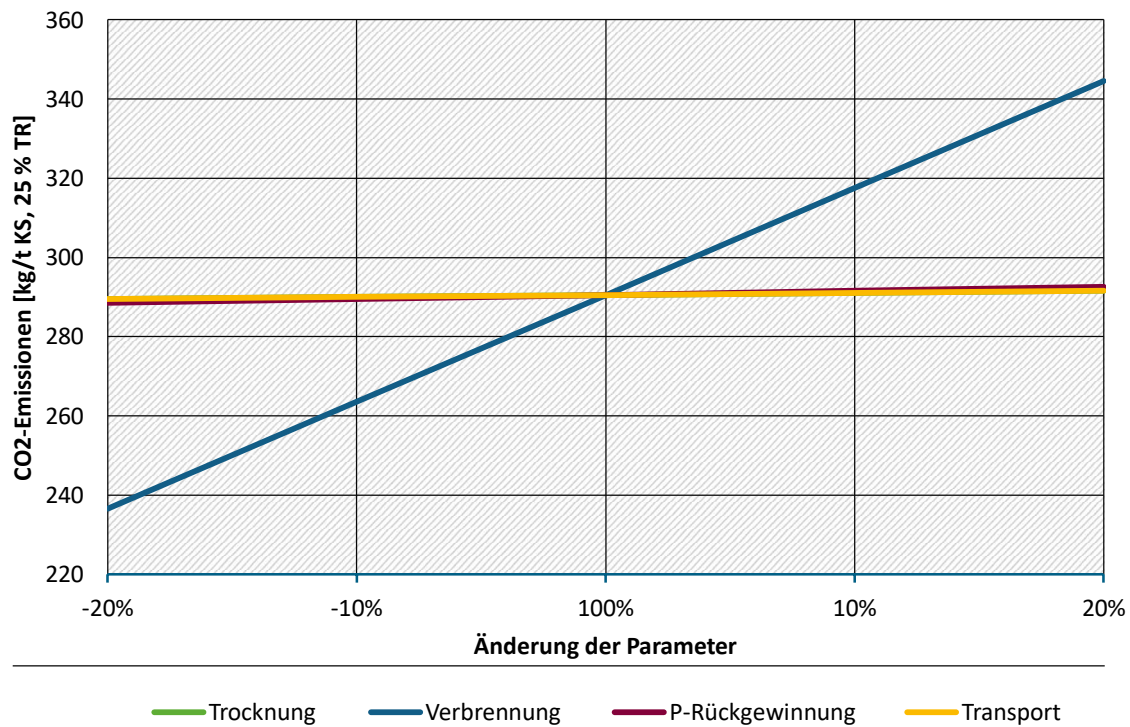
Quelle: eigene Darstellung, TEER

**Abbildung 93: Sensitivitätsanalyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Szenario B**



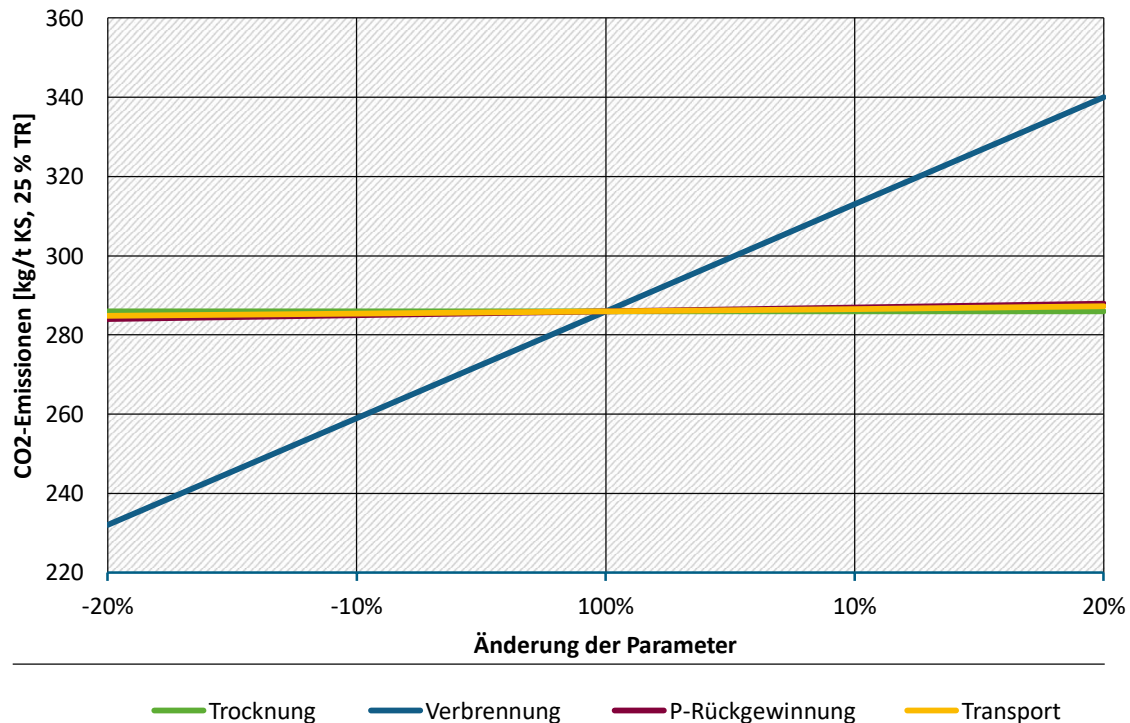
Quelle: eigene Darstellung, TEER

**Abbildung 94: Sensitivitätsanalyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Szenario C**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

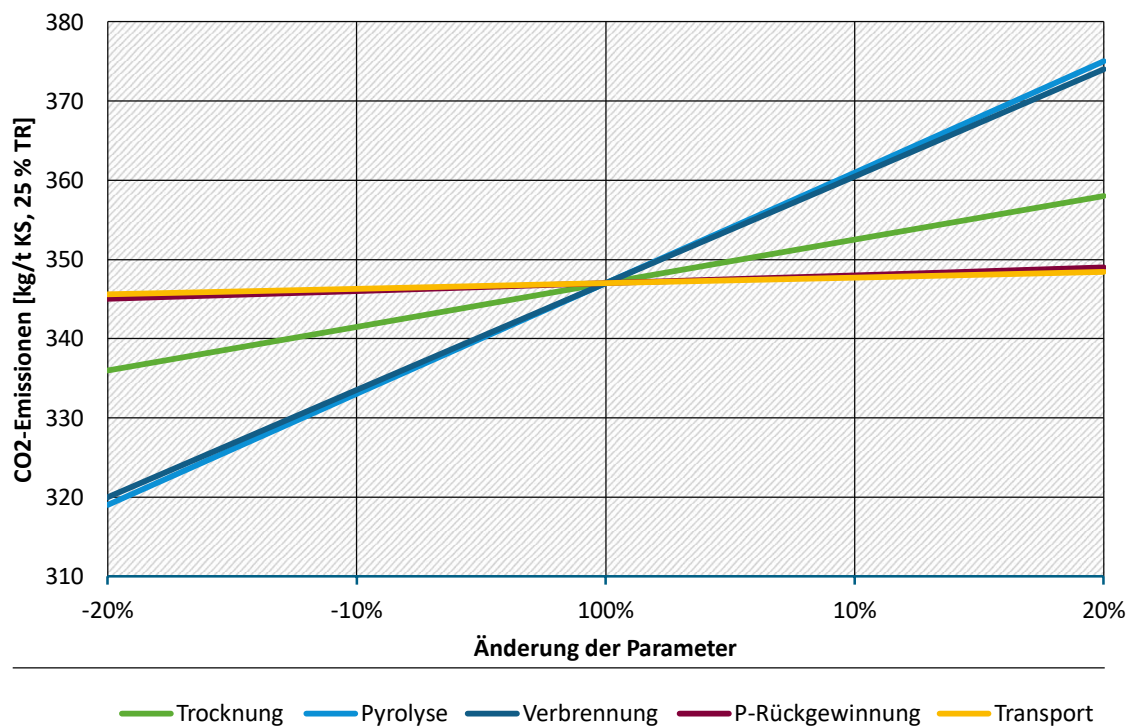
**Abbildung 95: Sensitivitätsanalyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Szenario D**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

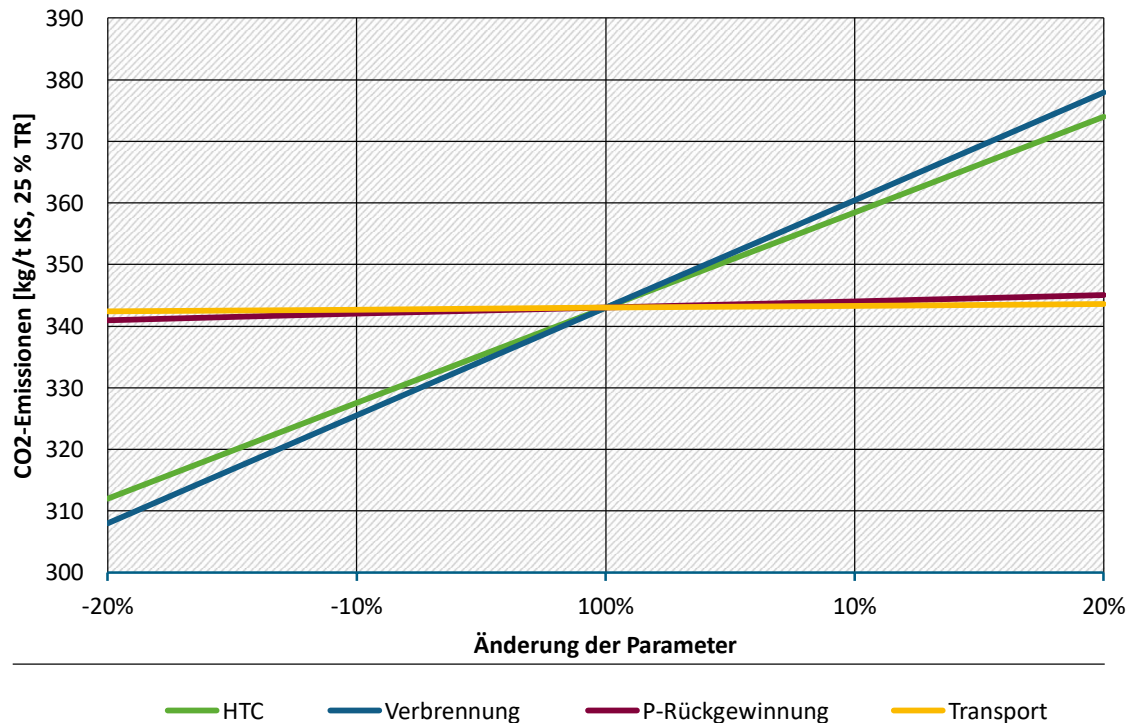


**Abbildung 96: Sensitivitätsanalyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Szenario E**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

**Abbildung 97: Sensitivitätsanalyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Szenario F**



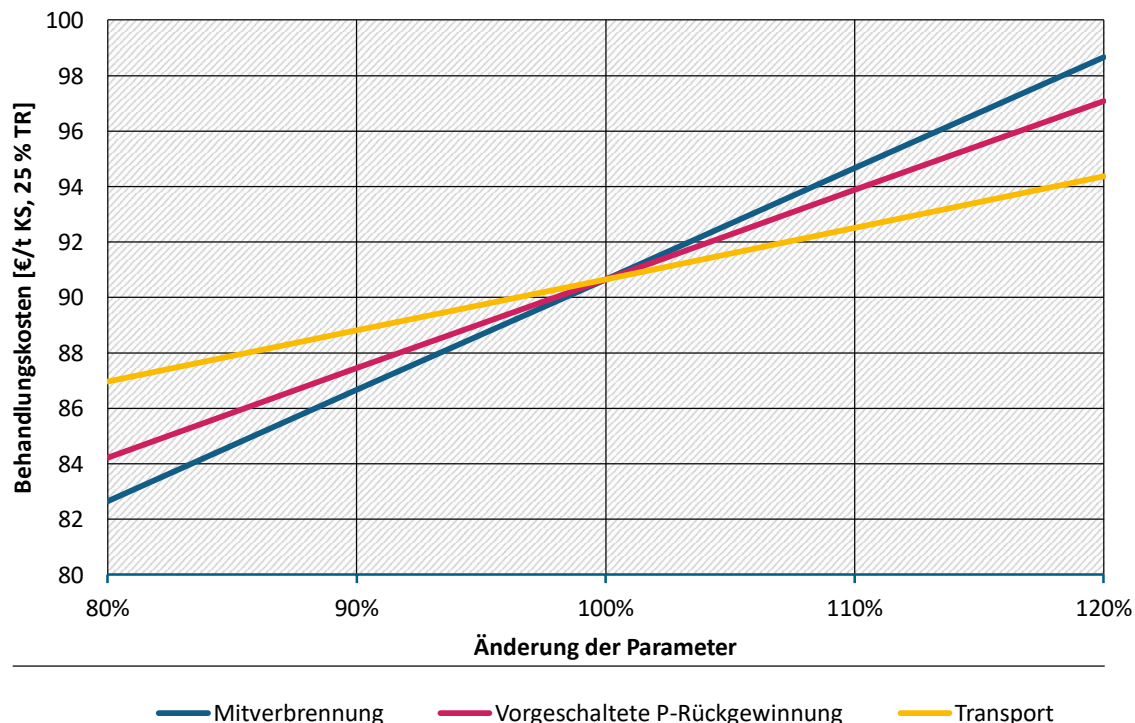
Quelle: eigene Darstellung, TEER

### D.1.3 Behandlungskosten

Alle Szenarien zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Gesamtbehandlungskosten von den Kosten der entsprechenden thermochemischen Konversionsverfahren. In Szenario B führt eine Reduktion der Annahmekosten an der Verbrennungsanlage um 20 % zu einer Senkung der Gesamtkosten um 11 €. Im Vergleich hierzu führt eine Senkung der Phosphorrückgewinnungskosten und der Transportkosten um 20 % jeweils zu einer Reduktion der Gesamtkosten um 4 €. In Szenario E führt dieselbe Parametervariation der Pyrolysekosten zu einer Gesamtkostenveränderung von 16 €. Bei einer Parametervariation um 20 % weist das HTC-Verfahren aus Szenario F mit 16 € die höchste Sensitivität auf.

Im Szenario B verlaufen die Sensitivitätsgeraden der Phosphorrückgewinnungskosten und der Transportkosten nahezu deckungsgleich auf einem ähnlich moderaten Niveau. Eine Kostenschwankung von 20 % führt zu einer Veränderung der Gesamtkosten um 4 €. Die nasschemischen Phosphorrückgewinnungskosten sind in jedem Szenario identisch, daher gilt diese Kostenschwankung ebenfalls für Szenario D, E und F. In Szenario C mit thermochemischer Phosphorrückgewinnung beträgt die Kostenschwankung durch das Phosphorrückgewinnungsverfahren unter identischer Parametervariation 3 €. Allgemein bringen die Kosten für eine nasschemische Phosphorrückgewinnung im Vergleich zur thermochemischen Phosphorrückgewinnung eine höhere Sensitivität mit sich, da die Verfahrenskosten generell höher sind. Szenario F ist das einzige Szenario, in dem die Sensitivität der Transportkosten unterhalb der der Phosphorrückgewinnung liegt. Dies liegt daran, dass der Klärschlammtransport entfällt, sodass die Transportkosten insgesamt geringer ausfallen als in den anderen Szenarien.

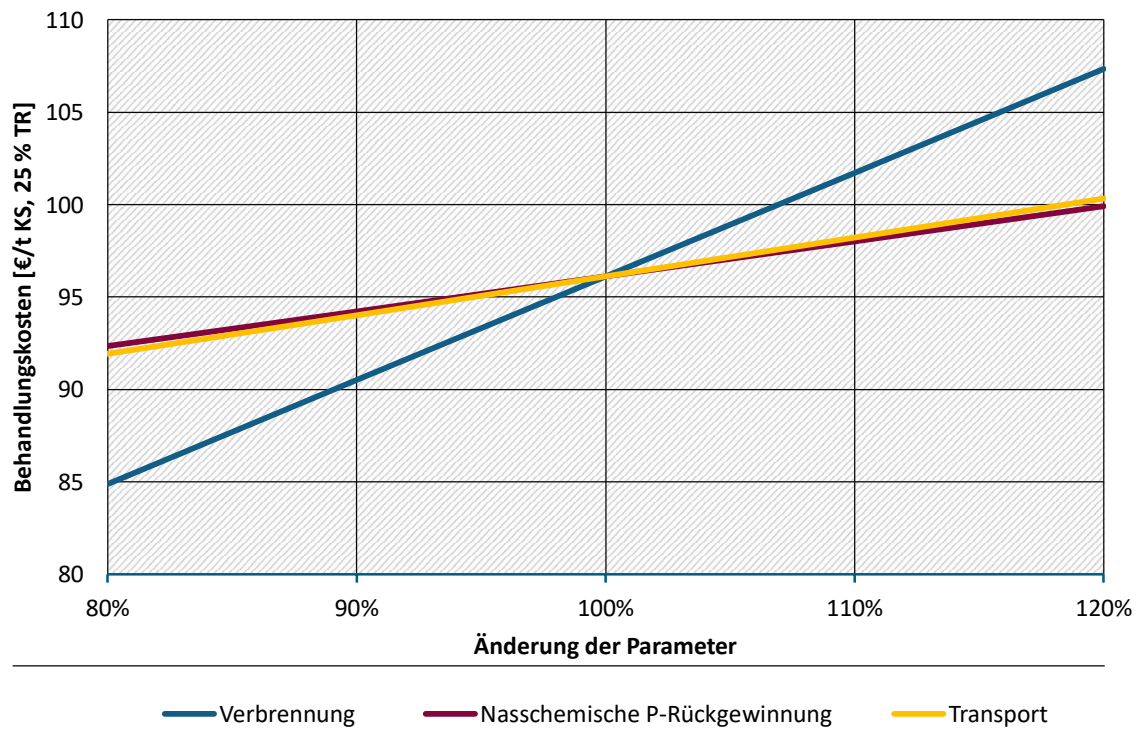
**Abbildung 98: Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario A**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

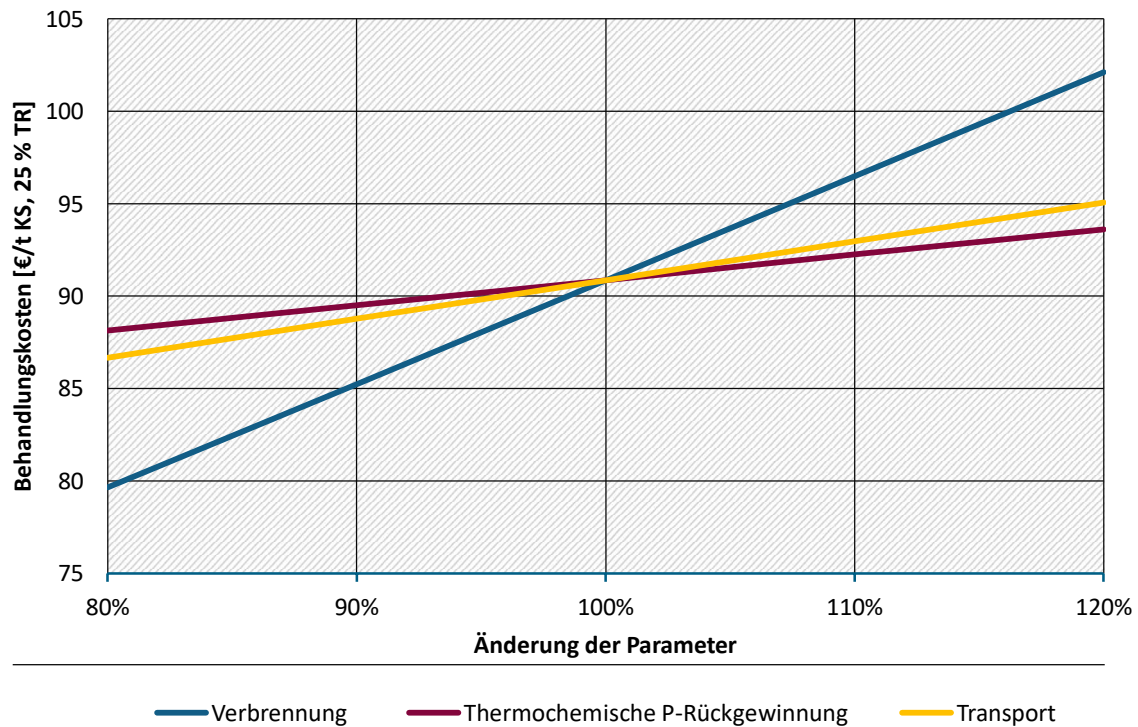


**Abbildung 99: Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario B**



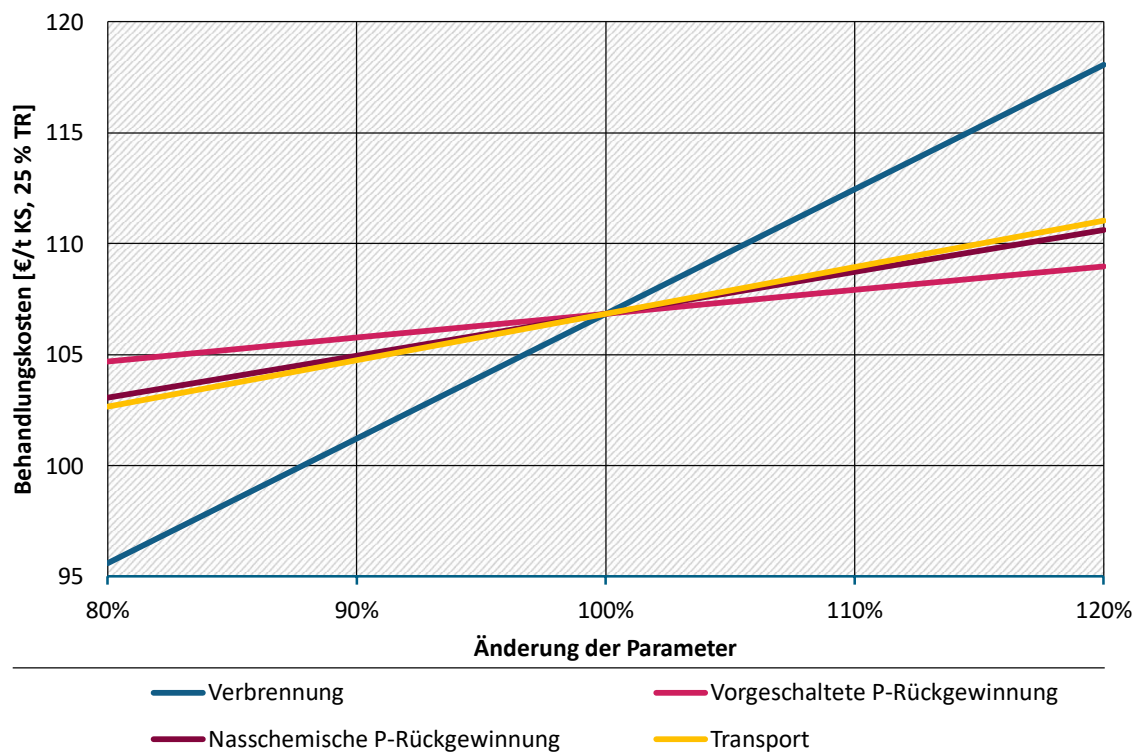
Quelle: eigene Darstellung, TEER

**Abbildung 100: Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario C**



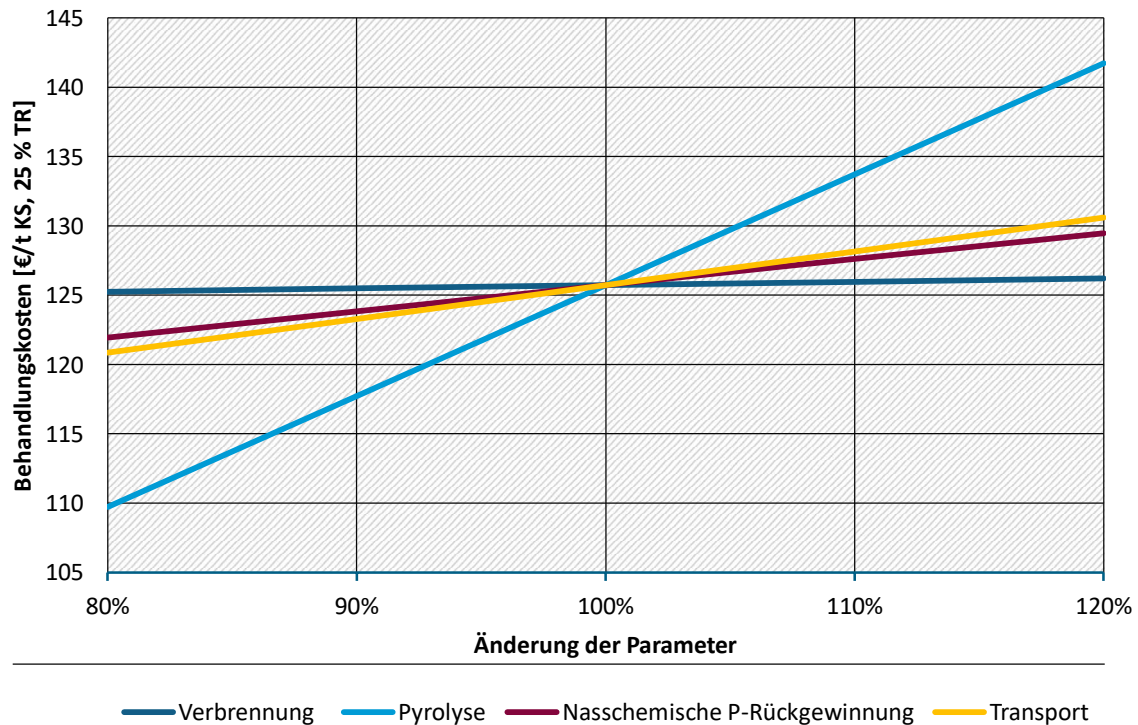
Quelle: eigene Darstellung, TEER

**Abbildung 101: Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario D**



Quelle: eigene Darstellung, TEER

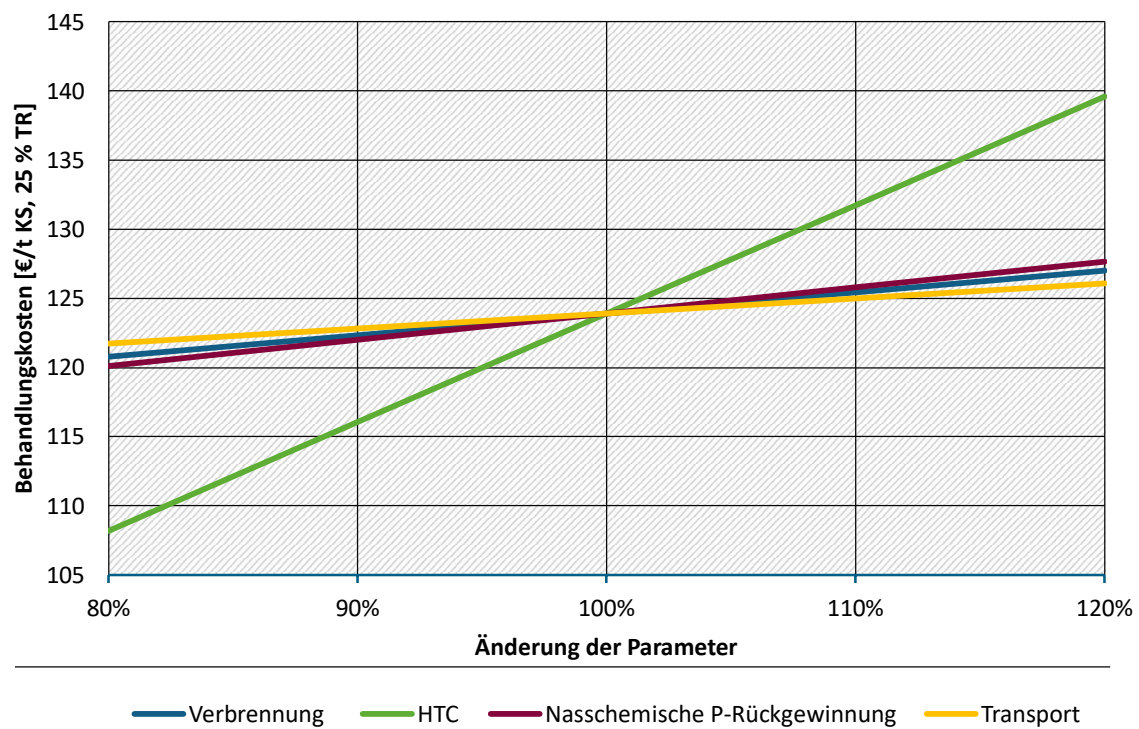
**Abbildung 102: Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario E**



Quelle: eigene Darstellung, TEER



**Abbildung 103: Sensitivitätsanalyse der Behandlungskosten für Szenario F**



Quelle: eigene Darstellung, TEER