

# PHOSPHOR UND PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG AUS DEM ABWASSER

Fachrecherche 2015

## Stadt Graz Umweltamt

Schmiedgasse 26/IV | 8011 Graz  
Tel.: +43 316 872-4301  
Fax: +43 316 872-4309  
E-Mail: [umweltamt@stadt.graz.at](mailto:umweltamt@stadt.graz.at)

Internet: [www.graz.at](http://www.graz.at)

# **PHOSPHOR UND PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG AUS DEM ABWASSER**

## **Bearbeitung**

Hannah Pollak

Gerald Greschonig

Dieser Artikel wurde mit größter Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit erstellt.

Wir möchten jedoch darauf hinweisen, dass kein Anspruch auf Vollständigkeit oder Richtigkeit der angeführten Informationen besteht. In keinem Fall kann der Herausgeber oder der Bearbeiter für die Verwendung der darin gegebenen Information verantwortlich gemacht werden.

Stand: 21. August 2015

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen .....	3
Verwendung .....	3
Vorkommen, Produktion und Verbrauch weltweit.....	4
Phosphorstoffströme in Österreich.....	5
Umweltbelastungen durch Phosphor .....	7
Phosphorelimination in Abwasserreinigungsanlagen .....	7
Biologische Phosphorelimination .....	8
Chemisch-physikalische Phosphorelimination .....	8
Verfahren zur Phosphorrückgewinnung .....	8
Verfahren aus Schlammwasser und Ablauf.....	14
Verfahren aus Klär- und Faulschlamm .....	18
Verfahren aus Klärschlammasche .....	24
Einzelne Verfahren im Detail.....	29
Zusammenfassung und Ausblick .....	33
Ergänzung .....	34
Literaturverzeichnis.....	34

## Abkürzungen

AIP	Aluminiumphosphat
Bio-P/BioP	Biologische Phosphorelimination
CaP	Calciumphosphat(-verbindung) (z.B. $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , $\text{CaHPO}_4$ )
CSH	Calciumsilikathydrat
EW	Einwohnerwert
FeP	Eisenphosphat
GV	Glühverlust
FFT	fest-flüssig-Trennung
MAP	Magnesiumammoniumphosphat/Struvit
P	Phosphor
$\text{PO}_4$	Phosphat
TS/TR	Trockensubstanz/Trockenrückstand
SCWO	Superkritische Wasseroxidation (supercritical water oxidation)
SM	Schwermetall/e
SSP/TSP	Singlesuperphosphat/Triplesuperphosphat

## Verwendung

„In Westeuropa werden mehr als 80 Prozent der Rohphosphate in der Düngemittelindustrie genutzt. Weitere nennenswerte Einsatzgebiete für Phosphor sind die Lebensmittelindustrie (Wurstherstellung, Erfrischungsgetränke, Milchindustrie und Käseherstellung), die Pharmaindustrie und die Schwerin-

dustrie (Zuschlag bei der Stahlherstellung). Außerdem ist Phosphor in Flammschutzmitteln, Trockenmitteln und Weichmachern enthalten.“ [1]

## Vorkommen, Produktion und Verbrauch weltweit

Die bekannten, bauwürdigen<sup>1</sup> Phosphatvorräte weltweit belaufen sich (Stand 2015) auf 67,0 Mrd. t. Die drei größten Vorkommen finden sich dabei in Marokko und der westlichen Sahara (77%), China (6%) und Algerien (3%). Bei gleichbleibendem Verbrauch wären diese Reserven für ca. 300 Jahre ausreichend. Neben den bekannten Lagerstätten wird vor allem von großen Phosphatbeständen in der Tiefsee ausgegangen. Die größten Phosphatproduzenten (2013) waren China (48%), die USA (14%) und Marokko mit der westlichen Sahara (12%). Insgesamt wurden 2013 225 Mio. t Phosphat-erze gefördert. [2] [3]

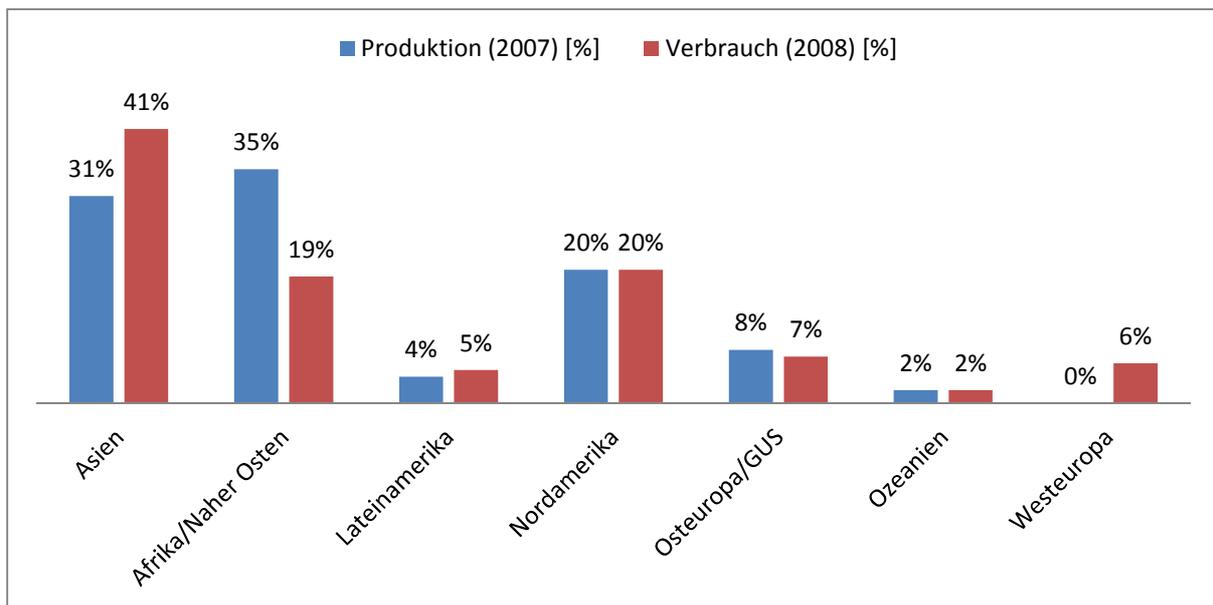


Abbildung 1: Anteile an Phosphatproduktion und -verbrauch weltweit [2]

Lange Zeit wurde von weitaus geringeren Phosphatreserven in Marokko ausgegangen, was ein Ende des preiswerten Phosphors in greifbare Nähe gerückt hätte („Peak Phosphorus“). Nun werden die Vorkommen zwar nicht in nächster Zukunft erschöpft sein, jedoch besteht noch immer das gleiche Problem: Phosphor ist ein essentieller Nährstoff, dessen mineralische Reserven früher oder später zu Ende gehen werden. Es ist zu beachten, dass vor allem in den Entwicklungsländern der Bedarf an Phosphatdünger weiter steigen wird, was eventuell schon früher als erwartet zu Knappheit führen kann. [4]

<sup>1</sup> rentabler Abbau möglich [61]

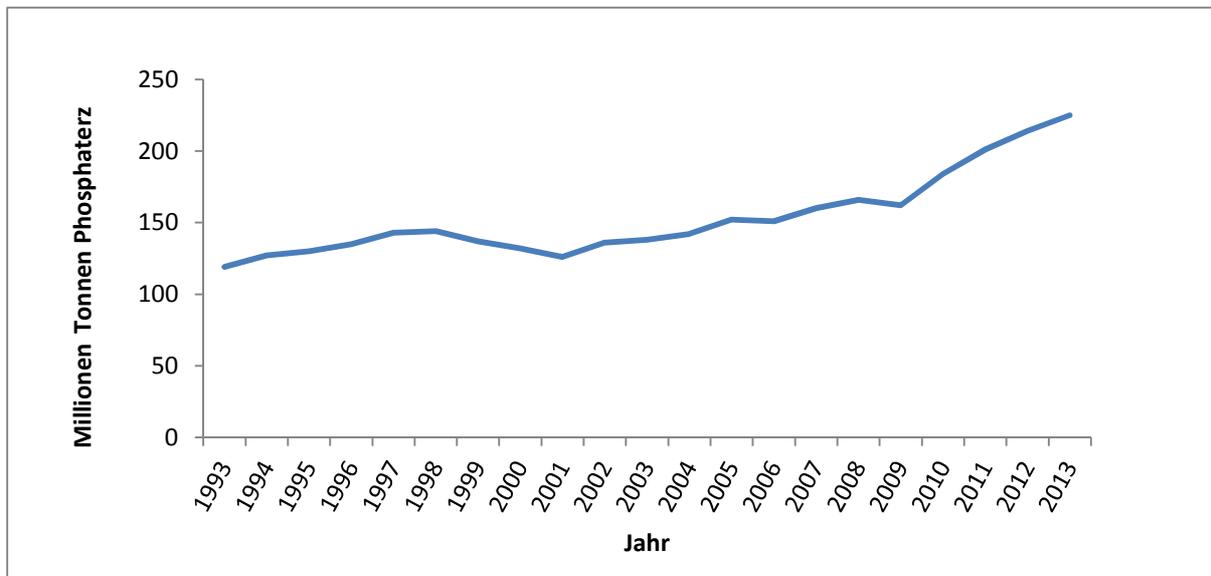


Abbildung 2: Phosphaterzproduktion weltweit von 1993-2013 [5]

## Phosphorstoffströme in Österreich

Österreich importierte durchschnittlich – über einem Beobachtungszeitraum von 2004-2008 – 48.000 t P/a in Form von Rohphosphaten bzw. Mineraldüngern. Der importierte Phosphor wurde zur Herstellung von rund 1,4 Mio. t Mineraldünger verwendet, wovon allerdings 1,0 Mio. t Dünger wieder exportiert wurde [6] [7] [8] (2013: 1,4 Mio. t Mineraldüngerproduktion, 80 % Export). 2013 wurden 30.000 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 13.000 t P in Österreich aufgebracht [9]. Der Anstieg im Mineraldüngerabsatz in im Jahr 2007/08 ist dadurch zu erklären, dass mehr intensive Kulturen angebaut wurden, die Stilllegungsverpflichtung auslief und vor allem wurde aufgrund der stark steigenden Rohstoffpreise (Rohphosphat: Preisversiebenfachung in weniger als 20 Monaten) wohl mehr Dünger gekauft als aufgebracht, was auch die niedrigen Absätze in den folgenden Jahren erklärt. [8] Mittlerweile haben sich die Mineraldüngereinkäufe wieder deutlich erholt. [9] Der generelle Rückgang im Düngerverbrauch ist darauf zurückzuführen, dass erstens lange Zeit überdüngt wurde und noch Nährstoffreserven in den Böden vorhanden sind und zweitens der Düngemiteleinsatz heute bedarfsgerechter als früher erfolgt.

Tabelle 1: Düngemittelabsatz im Zeitvergleich (in 1.000 t Reinnährstoffen) [9]

Düngemittel	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	Veränderung zum Vorjahr
	Wirtschaftsjahr (1)												
Stickstoff (N)	127,6	94,4	100,8	99,7	103,7	103,3	134,4	86,3	90,6	116,8	97,7	112,0	14,6
Phosphor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	47,2	45,2	39,4	36,3	35,0	37,9	44,7	17,5	22,1	29,3	26,2	29,7	13,2
Phosphor (P) <sup>2</sup>	20,6	20,6	19,7	17,2	15,8	15,3	16,5	19,5	7,6	9,6	12,8	11,4	12,9
Kali (K <sub>2</sub> O)	50,1	50,0	49,5	45,8	40,7	46,0	49,8	14,5	23,4	34,4	32,5	35,6	9,5
<b>Summe</b>	<b>224,9</b>	<b>189,6</b>	<b>189,7</b>	<b>181,8</b>	<b>179,4</b>	<b>187,2</b>	<b>228,9</b>	<b>118,3</b>	<b>136,1</b>	<b>180,5</b>	<b>156,4</b>	<b>177,2</b>	<b>13,3</b>

<sup>2</sup> M(P)=30,974 g/mol; M(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)=141,945 g/mol; 2 mol P in 1 mol P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> → m(P) = m(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) \* 0,436

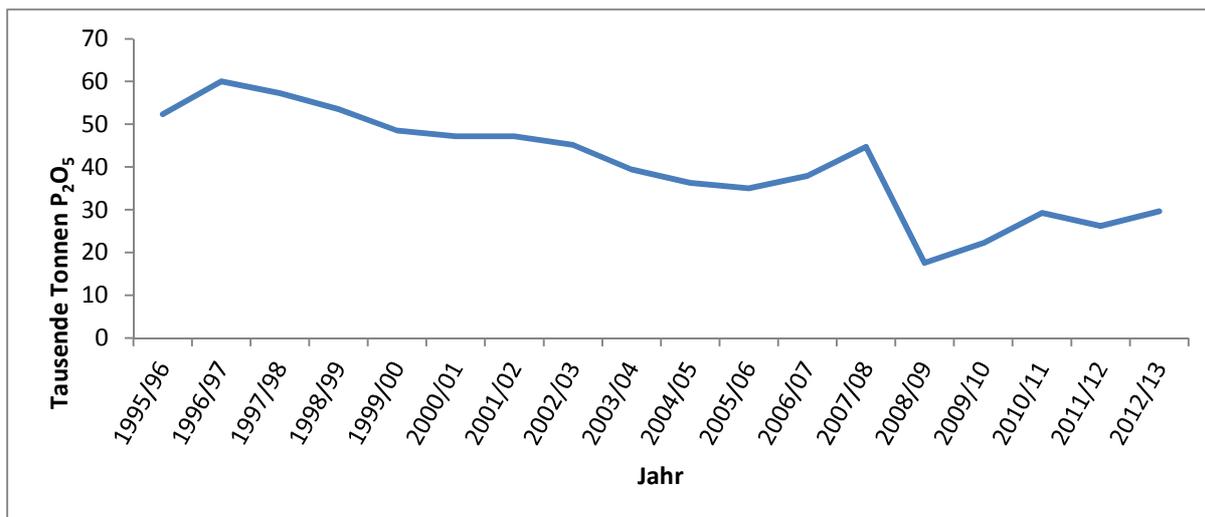


Abbildung 3: Düngemittelabsatz im Zeitvergleich in 1.000 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Tabelle 2: Düngemittelabsatz nach Bundesländern 2012/13 [9]

Düngemittel	Burgenland	Kärnten	NÖ und Wien	Oberösterreich	Salzburg	Steiermark	Tirol	Vorarlberg	Österreich
	in 1.000 Tonnen Reinnährstoffen								
Stickstoff (N)	9,3	3,5	40,9	26,5	0,7	30,6	0,16	0,25	112,0
Phosphor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2,9	1,3	13,1	7,6	0,4	4,2	0,08	0,03	29,7
Phosphor (p)	1,3	0,6	5,7	3,3	0,2	1,8	0,03	0,01	12,9
Kali (K <sub>2</sub> O)	3,7	1,9	15,9	8,9	0,2	4,9	0,09	0,02	35,6
Düngemittel	15,9	6,8	70,0	43,0	1,3	39,6	0,3	0,3	177,2

„Rund 7.800 t P gelangen jährlich über das kommunale Abwassersystem zu den über 1.800 Kläranlagen >50 EW in Österreich. Unter Berücksichtigung des Regenüberlaufs und einer 90 %igen P-Elimination ist im kommunalen Klärschlamm mit einer P-Fracht von 6.600 t Phosphor zu rechnen. Mit rund 400 t P/a im industriellen Abwasser ist der Stellenwert im Vergleich zum kommunalen Abwasser sehr gering. Nichtsdestotrotz liegt im industriellen Klärschlamm ein P-Potential von 370 t vor.“ [...] „Zusammen mit den tierischen Abfällen (5.500 t P/a) entspricht dies einem theoretischen Substitutionspotential von 75% bezogen auf die eingesetzte Mineraldüngermenge. Tatsächlich gelangt nur ein kleiner Anteil der P-Fracht aus dem Klärschlamm über direkte landwirtschaftliche Verwertung zurück in die Landwirtschaft (16%). Transformiert als Kompost gelangt zusätzlich ein Teil des Klärschlammes in die Landwirtschaft. Ein Szenario mit Verbrennung von 100% des Klärschlammes und des Tiermehles und anschließendes Rückgewinnungsverfahren zur Sekundärdüngerherstellung zeigt, dass der Import von Mineraldüngern bei unverändertem P-Einsatz in der Landwirtschaft auf 6.000 t P reduziert werden könnte (- 60%).“

„Es ist zu beachten, dass 56% des Klärschlammes in Österreich in nur 30 Kläranlagen mit einer Ausbaugröße >100.000 EW anfällt. Werden alle Anlagen mit einer Belastung >2.000 EW berücksichtigt, kann auf 96% des anfallenden Klärschlammes zurückgegriffen werden. Dieses große Potential kann bei Berücksichtigung von nur 1/3 der österreichweit vorhandenen 1.838 Kläranlagen genutzt werden.“

„Aus einem Großteil der tierischen Abfälle wird in den Tierkörperbehandlungsbetrieben Tiermehl mit einer jährlichen P-Fracht von rund 4.500 t/a erzeugt. Allerdings wird der Phosphor mit den derzeitigen Behandlungsverfahren stofflich kaum genutzt. [...] Der Hauptanteil wird entweder in der Industrie

aufgrund des hohen Heizwerts als Sekundärbrennstoff genutzt (2.600 t P/a) oder gar exportiert (1.800 t P/a).“ [6]

## Umweltbelastungen durch Phosphor

Nachdem Phosphor einer der wichtigsten Nährstoffe für Lebewesen ist, kommt es bei Unterversorgung zu verringertem Pflanzenwachstum und daraus zu einer Unterversorgung mit Nahrungs- und Futtermitteln. [10]

Eine gegenteilige Situation ist jedoch ebenso unerwünscht:

„Ein Überangebot der Nährstoffe Stickstoff und Phosphor gelangt als Einträge aus der Landwirtschaft, aus kommunalen Kläranlagen, aus der Industrie und aus dem Verkehr über die Flüsse und die Atmosphäre in die Meere und führt dort zu einem erhöhten Wachstum der einzelligen Algen, dem Phytoplankton. Diese halten sich vorzugsweise im belichteten Teil der Wassersäule auf, da sie nur dort Sonnenlicht für die für sie essentielle Photosynthese umsetzen können. Die hohe Algenbiomasse lässt weniger Licht zu den auf dem Sediment wachsenden Großalgen (Makrophyten) und Seegräsern durchdringen. Wegen der Beschattung können diese Pflanzen allmählich absterben, oder weniger sensible Arten setzen sich gegen sie durch. Die erhöhte Nährstoffzufuhr fördert auch Organismen, die die Blätter des Seegrases bewachsen und damit negativ beeinflussen können. Es kann zu einer Abnahme der Biodiversität kommen.

Das Phytoplankton sinkt zudem allmählich zum Meeresboden. Bakterien bauen es unter Sauerstoffverbrauch ab. Wegen der starken Sauerstoffzehrung stirbt die am Boden lebende Fauna - wie Seeesterne, Seeigel und Muscheln. Fischsterben kann eine weitere Folge sein.

Eutrophierung hat zahlreiche weitere ökologische und ökonomische Auswirkungen: Großflächige Algenblüten – zum Teil bestehend aus Arten, die Giftstoffe produzieren – können auftreten. Außerdem kann sich die Wasserqualität verschlechtern: Mit der Zersetzung der Algen und deren mechanischer Zerstörung durch Wellenschlag - wobei Zelleiweiße freigesetzt und zu Schaum „geschlagen“ werden - können im Strandbereich Schaumberge und Schleim entstehen.“ [11]

Auch der Abbau von Phosphaterzen hat starke Auswirkungen auf die Umwelt. Es werden riesige Landflächen benötigt und große Mengen an gefährlichen Abfällen produziert. [12]

## Phosphorelimination in Abwasserreinigungsanlagen

Um übermäßigen Phosphoreintrag in die Umwelt zu vermeiden gelten in Österreich für Kläranlagen ab einer Kapazität von 500 Einwohnerwerten<sup>3</sup> (EW) bestimmte einzuhaltende Grenzwerte für Phosphorkonzentrationen im Ablaufwasser (Tabelle 3).

Tabelle 3: Maximale P-Ablaufkonzentration in Abhängigkeit der Größenklasse der ARA [13]

Größenklasse	I	II	III	IV
EW <sub>60</sub>	>50 EW <sub>60</sub>	>500 EW <sub>60</sub>	>5.000 EW <sub>60</sub>	>50.000 EW <sub>60</sub>
P <sub>tot</sub>	-	2 mg/L	1 mg/L	1 mg/L

Um diese Grenzwerte einzuhalten, muss Phosphor aus dem Abwasser entfernt werden. Es wird von einer Phosphorfracht von 1,8 g P/(EW\*d) ausgegangen. [13]

<sup>3</sup> EW (Einwohnerwert) ist ein Maß für BSB<sub>5</sub> (biologischer Sauerstoffbedarf)-Frachten in Abwässern und setzt sich zusammen aus Einwohnerequivalenten + Einwohnerzahl. Über den Einwohnerequivalent (EGW) kann angegeben werden wie vielen Einwohnerabwässern das Abwasser eines Betriebes entspricht. 1EGW=60 g BSB<sub>5</sub>/d [66]

### Biologische Phosphorelimination

Bestimmte Mikroorganismen nehmen während der biologischen Phosphorelimination große Mengen an Phosphat auf. Diese Bakterien werden anschließend abgetrennt. In der anschließenden Faulung geht ein hoher Anteil des von den Bakterien gebundenen Phosphors wieder in Lösung. Dieses Schlammwasser kann Phosphatkonzentrationen von über einigen 100 mg  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{l}$  aufweisen. Eine biologische Phosphoreliminierung ist die Voraussetzung für die meisten der Rückgewinnungsverfahren aus Prozesswasser, allerdings wird sie in Österreich nur in den wenigsten Kläranlagen verwendet. Aufgrund von z.B. Temperaturschwankungen variiert die Entfrachtungsleistung der Mikroorganismen, wodurch Grenzwerte nicht eingehalten werden könnten. Deshalb wird Phosphat oft zusätzlich gefällt. Ein weiteres häufiges Problem von Anlagen mit biologischer Phosphoreliminierung sind Struvitablagerungen, die durch das aus dem Klärschlamm gelöste Phosphat entstehen können. Abhilfe kann hier der Einsatz eines Rückgewinnungsverfahrens aus dem Schlammwasser bringen. [13] [14]

### Chemisch-physikalische Phosphorelimination

Bei der chemisch-physikalischen Phosphorelimination wird im Abwasser gelöstes  $\text{PO}_4^{3-}$  mit Salzen von dreiwertigen Metallen wie  $\text{Al}^{3+}$  oder  $\text{Fe}^{3+}$  ausgefällt. Das gefällte Phosphat bleibt als solches bestehen. Aus der Biomasse der Mikroorganismen (z.B. aus Belebungsbecken) findet zwar eine Freisetzung statt, aber durch überschüssiges Fällungsmittel gelangen fast kein gelöstes Phosphat ins Schlammwasser (<20 mg  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{l}$ ). Um eine Rücklösung zu erreichen müsste ein unverhältnismäßiger Aufwand betrieben werden, der jedes Verfahren unwirtschaftlich machen würde. [13] [14]

### Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

Die Phosphorrückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung erfolgt entweder aus Prozesswasser (Schlammwasser oder Ablaufwasser), Klärschlamm oder Klärschlammmasche. In Abbildung 5 und Abbildung 4 Abbildung 4: Ansatzpunkte für Phosphatausschleusung bei Kläranlagen (2010) wird grafisch ersichtlich wo im Prozess der Abwasserklärung eine Rückgewinnung möglich ist.

Tabelle 5 und Abbildung 6 zeigen eine Auflistung von Rückgewinnungsverfahren. Aus Tabelle 5 können die Phosphorkonzentrationen und –frachten in den verschiedenen Kläranlagenstoffströmen entnommen werden.

Tabelle 4: Entnahmestellen und zugehörige Phosphorfrachten, -konzentrationen und –formen [14]

Entnahmestelle	Phosphorfracht (relativ zu Zulauf-fracht)	Phosphor-konzentration	Form
1 Ablauf	10 %	< 0.8 mg P/l	gelöst und partikulär
2 Schlamm-wasser	Bei Fällung: < 5 % BioP: bis 50 %	< 20 mg P/l bis 400 mg P/l	gelöst und partikulär
3 Faulschlamm (bei 30 % TR)	90 %	um 10 g P/kg	biologisch / chemisch gebunden
4 Asche	90 %	um 60 g P/kg	chemisch gebunden

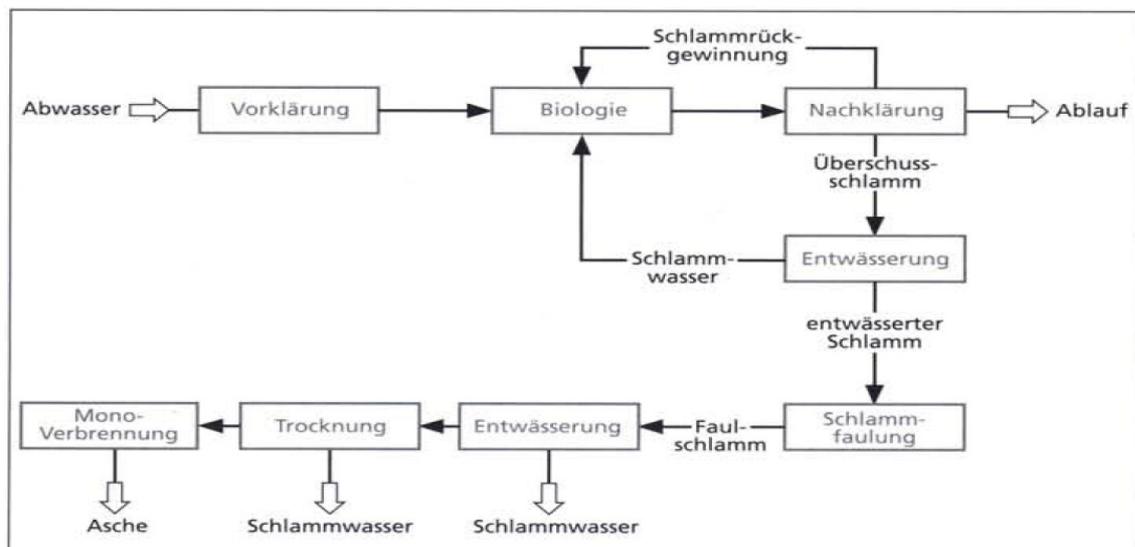


Abbildung 4: Ansatzpunkte für Phosphatausschleusung bei Kläranlagen (2010) [15]

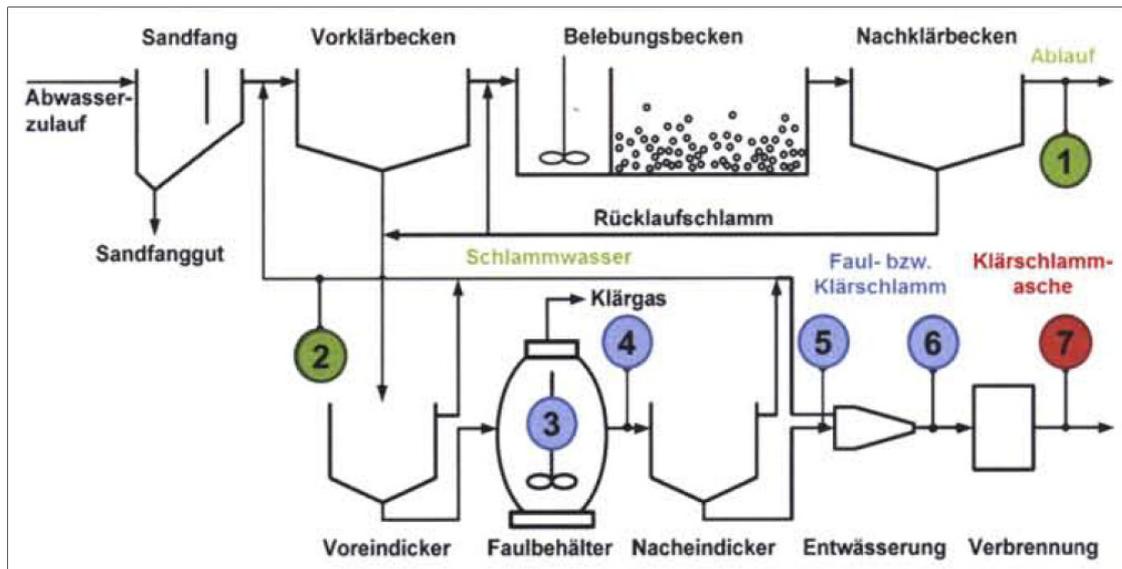


Abbildung 5: Ansatzpunkte zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser (2013) [58]

Tabelle 5: Verfahren zur Wiedergewinnung von Phosphor

Ansatz des Verfahrens		
aus Prozesswasser	aus Klärschlamm	während oder nach thermischer Verwertung
Adsorptionsverfahren [13] [16]	Air-Prex® [13] [17] ③ F	ASH DEC (früher u.a. SUSAN) [18] ⑦ F
	AquaReci® <sup>4</sup> [19] [13] [20] ⑤-⑥ ?	
CSIR <sup>5</sup> [13] [20] ② L	ATZ Eisenbadreaktor [13] [21] P	BioCon™ <sup>6</sup> [13] [20] [22] F
DHV CRYSTALACTOR® [23] [13] ② F	AVA cleanphos [14] [24] P	CleanMAP® [25] [13] ⑦ F
	Budenheimer Verfahren <sup>7</sup> [13] [14] L	Eberhard-Verfahren <sup>13</sup> [13] [14] ⑦ L
Elektrochem. Verfahren <sup>8</sup> [13] L		Ecophos [26] ⑦ F
HeatPhos <sup>9</sup> [13] P	CAMBI® <sup>10</sup> [13] [20] ⑥ F	EPHOS [13] [27] ⑦ L
Kläranlage Treviso [13] [20] ② F	FIXPhos <sup>11</sup> [28] [13] [14] ③ P	LEACHPHOS® [13] [29] ⑦ P
Kurita Festbettreaktor <sup>5</sup> [13] [20] ② P	Ekobalans <sup>12</sup> [14] [30] [31] F	LOTUS Project [32] ⑦ P
	KemiCond® [13] [20] ⑥ F	MEPHREC® [13] [14] ⑦ F
Magnetseparator <sup>13</sup> [13] [20] [14] ① P	KREPRO® [13] [20] P	PASCH [13] [28] ⑦ P
	LysoGest® <sup>14</sup> [13] [33] F	P-bac® (inocre®) [13] [34] ⑦ F
Nishihara Reaktor [13] [20] ② P	MEPHREC® [13] [14] ⑤ F	Reco-Phos® [13] ⑦ F
NuReSys® <sup>15</sup> [13] [35] ② F	PHOXNAN (LOPROX®) [14] [13] ⑤-⑥ L	RecoPhos/Inducarb [13] ⑦ L
Ostara PEARL® [13] [28] ② F		SEPHOS [13] [28] ⑦ L
PECO [13] [14] ② L	Seaborne modifiziert (=Gifhorn Prozess) [14] [13] [20] ④ F	SESAL-Phos <sup>16</sup> [28] [13] ⑦
PHOSIEDI [14] [36] ② P		TetraPhos® <sup>17</sup> [37] [38] [39] ⑦ P
Phosnix Unitika [13] [40] ② F	Seaborne ursprünglich (=Seaborne®) [14] [13] [20] ④	Therm. Aufschluss Konverterschlacke [13] ⑦ L
PHOSPAQ™ <sup>18</sup> [41] [42] ② F		Thermphos® [13] ⑦ F
Phostrip [43] [13] [14] ② F	Stuttgarter Verfahren [13] [14] ④ P	Düngemittelproduktion/-industrie ICL [13] ⑦ F
PRISA [13] [28] ② P	TerraNova® Ultra [14] [44] ⑥ P	
P-RoC [13] [45] [1] ② P		
Recyphos <sup>19</sup> [28] [46] ① P		
REPHOS® <sup>20</sup> [47] [48] F		
REM NUT® <sup>21</sup> [49] [13] ① F		
Sydney Waterboard <sup>22</sup> [13] [20] ② ?		

F = großtechnische Umsetzung (nur Größe, nicht Entwicklungsstand beurteilt) P = halbertechnischer-/Pilotmaßstab  
L=Labormaßstab  
① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ = Zuordnungen auf Abbildung 5 – grün = Prozesswasser; blau = Klärschlamm; rot = Klärschlammasche (u.a. [13])

<sup>4</sup> Aus den unterschiedlichen Quellen, teilweise von den gleichen Autoren ergeben sich unterschiedliche Angaben zur derzeit umgesetzten Anlagengröße ( [20], [19]: Pilotanlage oder [13]: großtechnische Umsetzung)

<sup>5</sup> Unklar, ob weiter an diesem Verfahren geforscht wird

<sup>6</sup> BioCon™ wird auf der Anbieterseite im Internet als Klärschlamm-trocknungsverfahren beworben, von Phosphorrecycling ist nicht die Rede

<sup>7</sup> Noch 2015 soll eine Pilotanlage in der Kläranlage Mainz in Betrieb genommen werden [14]

<sup>8</sup> Keine weiteren Quellen vorhanden, da Verfahren nicht näher spezifiziert wurde.

<sup>9</sup> Nur japanische Publikationen verfügbar

<sup>10</sup> Wird eigentlich nicht mit dem Ziel der Phosphorrückgewinnung eingesetzt

<sup>11</sup> Aus neuester Quelle [14] geht hervor, dass eine Pilotanlage in Betrieb ist

<sup>12</sup> Keine näheren Angaben zum Verfahren bekannt

<sup>13</sup> laut [20] wurde die Entwicklung am Eberhard-Verfahren, am Waterboard-Verfahren und am Magnetseparator-Verfahren eingestellt

<sup>14</sup> Einsatz des Verfahrens in der Kläranlage Lingen ab Ende 2015 [33]

<sup>15</sup> Es gibt keine Hinweise darauf, dass NuReSys® noch existiert. In einem Bericht, der auf der Europäischen Phosphorplattform ([www.phosphorusplatform.eu](http://www.phosphorusplatform.eu)) verfügbar ist finden sich Referenzen zu bereits gebauten Großtechnischen Anlagen. Die durch mehrere Quellen (Europäischen Phosphorplattform; Google) gefundenen Internetadressen der Anbieterfirma ([www.nuresys.com](http://www.nuresys.com); [www.nuresys.org](http://www.nuresys.org)) scheinen nicht mehr vorhanden zu sein.

<sup>16</sup> Weiterentwicklung von SEPHOS-Verfahren

<sup>17</sup> ReAlPhos® [65] (ebenfalls von REMONDIS® Aqua GmbH & Co. Kg angeboten) kann verwendet werden, um das als Fällungsmittel verwendete Aluminium zu rezyklieren

<sup>18</sup> Laut [14] zur Behandlung phosphatreicher Industrieabwässer

<sup>19</sup> Für Kleinstkläranlagen entwickelt

<sup>20</sup> Das REPHOS®-Verfahren wird seit 2007 großtechnisch zur Behandlung von Molkereiabwasser eingesetzt. Laut Hersteller ist eine Phosphorrückgewinnung aus Schlammwasser (kommunal?) damit ebenfalls vorstellbar.

<sup>21</sup> Großtechnisch unwirtschaftliches Verfahren [49]

<sup>22</sup> Die zitierten Quellen liefern gegensätzliche Angaben zu Wirtschaftlichkeit und umgesetztem Maßstab des Verfahrens ( [13]: großtechnischer wirtschaftlich lohnender Einsatz; [20]: Verfahren aufgrund zu starken Betriebskostenanstiegs beim Scale-up zur Pilotanlage eingestellt.)

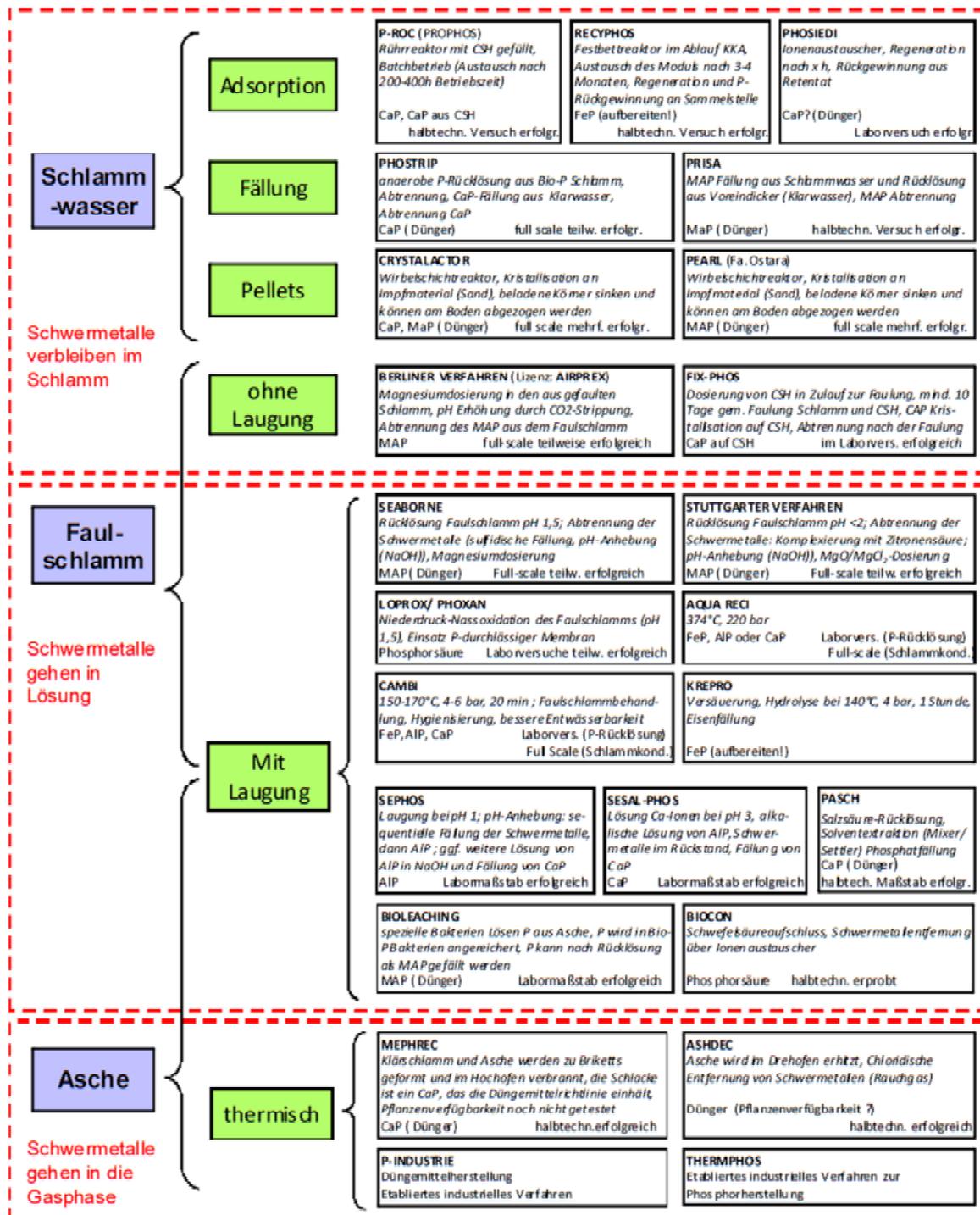


Abbildung 6: Systematische Darstellung bekannter Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser oder Klärschlamm (2011) [50]

## Bewertungskriterien

Im „Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser, 2014“ ( [13]) erfolgte eine detaillierte Evaluierung, der in (S.32) aufgelisteten Verfahren folgenden Kriterien bewertet:

1. Technologie (Umsetzung, Komplexität, Implementierung, Wartungsaufwand, Effekte auf Abwasserreinigung, Effekte auf Schlammbehandlung, qualitativer Ressourcenbedarf, Abfallstoffe und Leistungsfähigkeit des Verfahrens bzw. Leistungsfähigkeit bezogen auf den Kläranlagenzulauf)
2. Ökologische Bewertung (Ressourcenbedarf und direkte und indirekte Emissionen in Atmosphäre, Hydrosphäre und Boden auch im Vergleich mit einer Referenzkläranlage)
3. Charakterisierung und Bewertung des Endprodukts (Abbildung 7) (Nährstoffgehalte und Verfügbarkeit, anorganische- und organische Verunreinigungen, Hygiene und Handhabung (Eignung als Sekundärdünger))
4. Ökonomische Bewertung (Kapitalkosten, Betriebskosten, Einsparungen, Erlöse, einwohner- bzw. produktspezifische Kosten, Amortisationszeit und Sensitivitätsanalyse.



Abbildung 7: Charakterisierung und Bewertung Sekundärdünger [13]

Neben dem erwähnten Endbericht wurden als Quellen zur Evaluierung v.a. noch „Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung – Eine Bestandesaufnahme, 2009“, „Studie Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Gesamtbericht, 2015“ und „Phosphorrecycling - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren zur Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland – Abschlussbericht, 2011“ verwendet.

## Verfahren aus Schlammwasser und Ablauf

Der Ansatz der Rückgewinnung aus dem Schlammwasser kommt daher, dass die Mikroorganismen in der Biologie einer Kläranlage Phosphor als Nährstoff aufnehmen. Während der Klärschlammfäulung kommt es zu einer Rücklösung des in der Schlammbiomasse gebundenen Phosphors. Das hier entstehende Schlammwasser ist reicher an Phosphat als die übrigen flüssigen Stoffströme in der Abwasserreinigung und somit ein geeigneter Ansatzpunkt zur Phosphorrückgewinnung. Für die meisten Rückgewinnungsverfahren ist also eine möglichst vollständige Phosphatentfernung durch die Mikroorganismen notwendig. Die Phosphatkonzentration im Abwasser ist der wichtigste Erfolgsfaktor (neben pH-Wert und Temperatur.) Ebenso ist, wie auf S. 8 erwähnt, ist fast immer eine biologische Phosphoreliminierung erforderlich. Die Verfahren basieren entweder auf der Fällung oder der Kristallisation des gelösten Phosphors – zumeist als Magnesiumammoniumphosphat (Struvit) (MAP), CaP (Calciumphosphat) oder phosphatbeladenes Calciumsilikathydrat (CSH). Eisen- oder Aluminiumphosphate können ebenfalls erhalten werden, haben jedoch eine schlechte Pflanzenverfügbarkeit. Um vorhandene Schwermetalle auszufällen und geeignete Bedingungen für die Endproduktfällung oder -kristallisation zu schaffen muss ein geeigneter pH-Wert vorherrschen. Dieser wird in der Regel mit Hilfe von Natronlaugenzugabe erreicht. Die Endprodukte eines Kristallisationsverfahrens sind aufgrund ihrer Pelletform direkt maschinell auf landwirtschaftliche Flächen aufbringbar. Die Fällungsprodukte müssten dafür noch weiter verarbeitet werden. Die Pflanzenverfügbarkeit von MAP-Produkten ist nicht anders als die von konventionellem Mineraldünger. CaP-Produkte weisen auf sauren Böden eine mäßig bis gute Düngewirkung auf, sind für alkalische Böden jedoch nicht geeignet. Das im P-Roc erhaltene phosphatbeladene CSH-Substrat weist eine etwas schlechtere Verfügbarkeit als die CaP-Produkte auf. Der Ressourcenbedarf der Schlammwasser bzw. Ablaufverfahren ist meist gering. Es werden Basen zur pH-Werteinstellung ein geeignetes Fällungsmittel und elektrische Energie benötigt. Beim P-RoC-Verfahren reguliert das CSH-Substrat, an dem sich der Phosphor anlagert den pH-Wert ohne weitere Chemikaliengabe. Für das Crystalactor®-Verfahren (s. S 29) sind weitere Chemikalien nötig, was es zu einer deutlich unwirtschaftlicheren Option (für kommunale Kläranlagen) macht. Ähnlich ist die Lage bei REM NUT®, dem Ionenaustauscherverfahren aus dem Ablaufwasser: das ressourcenintensive Verfahren kann nicht wirtschaftlich betrieben werden und ist auch sonst nicht empfehlenswert (s. S. 31).

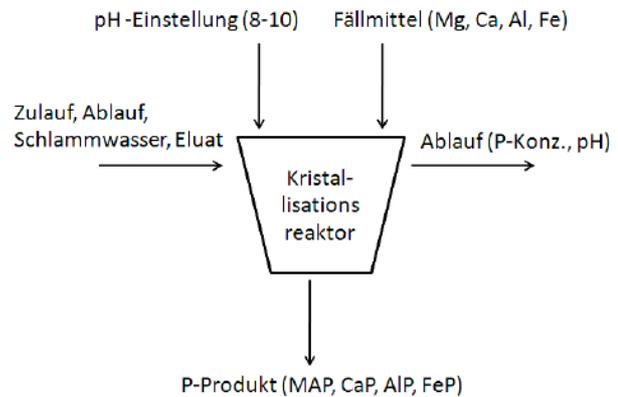


Abbildung 8: Fällung von Phosphat aus dem Abwasser (flüssige Phase) [28]

Wenn eine möglichst vollständige Rückgewinnung das Ziel ist können die Verfahren aus dem Prozesswasser nicht mit jenen aus dem Klär- und Faulschlamm und der Klärschlammmasche mithalten. Für Kläranlagen mit biologischer Phosphatelimination bieten sie dennoch vor allem die Vorteile, dass Struvitablagerungen minimiert und damit Wartungsarbeiten vermieden werden können und die Entwässerbarkeit des Schlammes verbessert werden kann. Nachdem MAP bessere Düngeeigenschaften aufweist sollten die entsprechenden Verfahren bevorzugt werden. Ebenso können die durch Kristallisation hergestellten Endprodukte – im Gegensatz zu den Fällungsprodukten – direkt in der Landwirt-

schaft verwendet werden. Attraktiv ist besonders das Ostara® PEARL®-Verfahren (s. S. 30), da der Hersteller hier für den Kläranlagenbetreiber risikofreie Finanzierung anbietet. Nachdem alle Verfahren erst ab einer Kläranlagengröße von über 100.000 EW wirtschaftlich betrieben werden kann, kommen in Österreich nur 30 Kläranlagen für eine solche Installation in Frage. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der im erwähnten Endbericht bewerteten Verfahren zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 6: Zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Bewertungskriterien Rückgewinnungsverfahren aus dem Schlammwasser und Ablauf [13]**

Kriterien	DHV Crystalactor®	Ostara®	PRISA	P-RoC	REM-NUT®
Komplexität Anlagentechnik	mäßig	einfach	einfach	einfach	mäßig
Anforderung an Abwasserreinigung	BioP	BioP	BioP	BioP	BioP
Rückgewinnungspotential bezogen auf Kläranlagenzulauf [%]	max. 40	~20	~25	~20	~50
SM-Entfrachtung	Nicht erforderlich				
Abfallstoffe	nein	nein	nein	nein	Ja, beladene Ionentauscherharze
Verfahrenskosten [€/kg P] auf 100.000 EW Anlage	~12	~10	~8-11	~6	10-32
Zusätzliche Kosten zu Referenzsystem [%]	25-45	-2-10	-2-15	-2-12	-3-82
Pflanzenverfügbarkeit/-Wirksamkeit	mäßig	sehr gut	sehr gut	mäßig	sehr gut
Schwermetallbelastung in Relation zu Handelsdünger	signifikant besser				

Im „Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser“ (2014) werden folgende Verfahren aus Prozesswasser als „Rückgewinnungsverfahren ohne erkennbares zukünftiges Potential“ angegeben:

- Adsorptionsverfahren
- Elektrochem. Verfahren
- HeatPhos
- Magnetseparator
- PHOSIDIE

Würden Rückgewinnungsverfahren aus dem Schlammwasser in jeder österreichischen Kläranlage >100.000 EW eingesetzt werden, könnte mit Rückgewinnungsraten von 15% bis 40%, durchschnittlich ca. 16 %, des im Abwasser vorhandenen Phosphors rückgewonnen werden. Wenn man von den Daten für 2011/12 aus („Grüner Bericht“, 2013) ausgeht, können 11 % des in der Landwirtschaft eingesetzten Mineraldüngers ersetzt werden.

[13] [14] [20] [28] [51]

Tabelle 7: Übersicht Rückgewinnungsverfahren flüssige Phase [13] (abweichende Angaben aus anderen Quellen kenntlich gemacht)

Verfahren	Technologie				Endprodukt				Wirkungsgrad			Besonderheit
	Kristallisation	Fällung	Iontauscher	sonstige	MAP	CaP	Al- bzw. FeP	sonstige	bezogen auf Kläranlagenzulauf			
Adsorptionsverfahren		x				x			unbekannt			
CSIR	x				x				bis 25 %	max. 45 % <sup>23</sup>		
DHV CRYSTALACTOR®	x				x <sup>24</sup>	x			bis 40 %	max. 50 % <sup>23</sup>		Anaerobbecken, Essigsäurezugabe
Elektrochem. Verfahren	x			x <sup>25</sup>					unbekannt			
HeatPhos		x		x <sup>26</sup>					unbekannt			
Kläranlage Treviso	x				x				20-30 %	unbekannt <sup>23</sup>		
Kurita Festbettreaktor	x				x				20-30 %	max. 45 % <sup>23</sup>		
Magnetseparator		x					x		unbekannt			
Nishihara Reaktor	x				x				20-30 %	35 % <sup>23</sup>		
NuReSys®	x				x				20-30 %			
Ostara PEARL®	x				x				20-30 %	22-29 % <sup>23</sup>		Optional Anaerobbecken
PECO	x				x				20-30 %	35 % <sup>23</sup>		Biolog. Remobilisierung, Meerwasserfällung
PHOSIEDI		x	x <sup>27</sup>	x	x				20-30 %			
Phosnix Unitika	x				x				20-30 %	max. 50% <sup>23</sup>		
PHOSPAQ™ [41] [42]	x				x				unbekannt <sup>28</sup>			
Phostrip		x				x			unbekannt <sup>29</sup>	60 % <sup>30</sup>		Anaerobbecken
PRISA		x			x				40 %	max. 45 % <sup>23</sup>	30 % <sup>31</sup>	Längere Aufenthaltszeit Rohschlamm
P-RoC	x					x <sup>32</sup>			15-25 %	max. 45 % <sup>23</sup>		
Recyphos [28] [46] [28]			x				x		unbekannt			
REPHOS® [47] [48]		x			x				unbekannt <sup>23</sup>			
REM NUT®		x	x		x				50 %	max. 50 % <sup>23</sup>		
Sydney Waterboard	x					x			20-30 %	max. 45 % <sup>23</sup>		

<sup>23</sup> [20]

<sup>24</sup> [14]

<sup>25</sup> Zur Kristallisation an spezieller Magnesiumkathode

<sup>26</sup> Erhitzen

<sup>27</sup> Elektrodialyse

<sup>28</sup> Bezogen auf P in Reaktor: 70-95 %

<sup>29</sup> Laut [14] keine P-Rückgewinnung, nur -Eliminierung beabsichtigt

<sup>30</sup> [14]

<sup>31</sup> [14]

<sup>32</sup> Phosphatbeladenes CSH-Substrat [1]

Tabelle 8: Zusammenfassung der Grundlagen von Rückgewinnungsverfahren aus Schlammwasser/Ablauf [13]

Verfahren	DHV Crystalactor®	Ostara®	PRISA	P-RoC	REM-NUT®
Einsatzort	Schlammwasser	Schlammwasser	Schlammwasser	Schlammwasser	Ablauf
technologischer Ansatz	Phostrip, Kristallisation (CaP)	Kristallisation (MAP)	Modifikation Eindicker, MAP-Fällung	Kristallisation (CSH-CaP)	Ionentauscher, MAP-Fällung
P-Elimination Abwasserreinigung	Bio-P	Bio-P	Bio-P	Bio-P	Keine gezielte P-Entfernung
erforderliche Prozesse Schlammbehandlung	Eindicker, Entwässerung, Anaerobbecken, Kaskade, Filtration	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Modifizierter Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung
Effekt auf Schlammbehandlung	Ja, fehlende Faulung, anaerobes Becken, Schlammanfall steigt	nein	nein	nein	nein
Effekte auf Abwasserreinigungsprozess	nein	verringerte Nährstoffrückbelastung, Vermeidung von Inkrustationen	verringerte Nährstoffrückbelastung, Vermeidung von Inkrustationen	verringerte Nährstoffrückbelastung, Vermeidung von Inkrustationen	keine gezielte P-Entfernung notwendig
Erforderliche Anlagenteile zur P-Rückgewinnung	Anaerobbecken, Kaskade, Kristallisationsreaktor	Kristallisationsreaktor, Trocknungs- und Klassifiziereinrichtung	Tuchfilter, Fällungsreaktor, Beutelfilter	Kristallisationsreaktor	Ionentauscher, Fällreaktor
Entwicklungsstand	großtechnisch (teilweise eingestellt)	großtechnisch (vielfach umgesetzt)	Pilotanlage	Pilotanlage	großtechnisch (eingestellt)
Ansatz P-Rückgewinnung	dezentral	dezentral	dezentral	dezentral	dezentral
Flächenbedarf	~100 m <sup>2</sup>	120-320 m <sup>2</sup>	unbekannt	unbekannt	~200 m <sup>2</sup>
Endprodukt	CaP	MAP	MAP	Beladenes CSH (CaP)	MAP
P-Rückgewinnung Verfahren	~80 %	~90 %	~90 %	~ 80 %	~ 90 %
P-Rückgewinnung bez. Auf Zulauf	~40 %	15-25 %	~25 %	15-25 %	~ 50%
qualitativer Ressourcenbedarf	Essigsäure, Schwefelsäure, Kalkmilch, NaOH, Sand, Energie (elektrisch)	NaOH, MgCl <sub>2</sub> , Energie (elektrisch)	NaOH, MgO, Energie (elektrisch)	CSH, Energie (elektrisch)	Ionentauscherharze, NaOH, NaCl, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , MgCl <sub>2</sub> , Energie (elektrisch)
Welche Abfallstoffe sind zu erwarten?	keine	keine	keine	keine	beladenes Ionentauscherharz, beladene Sole
Welche Einflüsse müssen bei der ganzheitlichen Bewertung mitberücksichtigt werden?	+47 % Schlammanfall (fehlende Faulung)	verringerte P-Rückbelastung: 4900 kg verringerte N-Rückbelastung: 5200 kg -11,1 % Fällmittelbedarf -2,2 % Schlammanfall	verringerte P-Rückbelastung: 2250 kg verringerte N-Rückbelastung: 5200 kg -10,0 % Fällmittelbedarf -2,0 % Schlammanfall	verringerte P-Rückbelastung: 3400 kg -7,7 % Fällmittelbedarf -1,5 % Schlammanfall	-71 % Fällmittelbedarf -14,1 % Schlammanfall
erforderliche weiterführende Prozesse	Mitverbrennung, Reststoffdeponie, Untertagedeponie	Mitverbrennung, Reststoffdeponie, Untertagedeponie	Mitverbrennung, Reststoffdeponie, Untertagedeponie	Mitverbrennung, Reststoffdeponie, Untertagedeponie	Mitverbrennung, Reststoffdeponie, Untertagedeponie

## Verfahren aus Klär- und Faulschlamm

Die Verfahren zur Rückgewinnung aus Klär- und Faulschlamm sind im Gegensatz zu jenen aus dem Schlammwasser technisch aufwendig und komplex. Der im Faulschlamm vorhandene Phosphor muss zuerst zurück in Lösung gebracht werden, das kann zum Beispiel durch Verringerung des pH-Werts erfolgen. Allerdings sind dafür oft unverhältnismäßig große Säuremengen nötig. Ebenso

verschlechtert ein niedriger pH-Wert die Entwässerbarkeit des Klärschlammes, und Polymere zur Entwässerung können versagen. Zur besseren Rücklösung sollte vor dem Aufschluss eine Faulung des Schlammes stattfinden. Ein weiteres Problem ist, dass – anders als im Schlammwasser – im Klärschlamm höhere Konzentrationen an Schwermetallen vorhanden sind, die im Endprodukt nicht vorliegen sollten. Die Schwermetalle können durch Komplexierung in der flüssigen Phase gehalten werden. Wird der Phosphor bei höheren pH-Werten (pH 4) rückgelöst, lösen sich weniger Schwermetalle aus dem Schlamm – aber es sind geringere Rückgewinnungsraten erreichbar. Eine pH-Wertanhebung nach der Lösung führt ebenfalls zum Ausfallen von Schwermetallen. Eine weitere Möglichkeit der Rücklösung ist die thermische Hydrolyse. Unter hohen Drücken (5-7 bar) und Temperaturen (bis 165°C) wird Phosphor und Stickstoff aus der Biomasse freigesetzt. Eine biologische Phosphorentfernung ist hier notwendig, da die Fällmittel die Rücklösung stören würden. Wird der Schlamm vor der Hydrolyse angesäuert, kommt es neben der Rücklösung zu einer fast vollständigen Oxidation der organischen Substanz. Schwermetalle können durch (Nano-)Filtration abgetrennt werden. Die während der Oxidation freiwerdende Wärme kann genutzt werden. Werden Temperaturen und Drücke noch weiter erhöht, herrschen superkritische Zustände und der organische Anteil wird oxidiert. Hier müssen nur für die anschließende Rücklösung des Phosphors aus der entstehenden Asche Chemikalien eingesetzt werden. Die aus dem Prozess freiwerdende Energie kann erneut genutzt werden. Befindet sich der Phosphor nach dem Aufschluss in gelöster Form, kann er z.B. als MAP oder CaP gefällt werden. Die Pflanzenverfügbarkeit von MAP-Düngern ist wie bei den Prozesswasserverfahren vergleichbar mit konventionellen Mineraldüngern. AIP und FeP haben eine schlechte Pflanzenverfügbarkeit. Im Mephrec®-Verfahren oder ATZ-Eisenreaktor entsteht eine phosphatreiche Schlacke. Die Metalle aus dem Schlamm finden sich in der entstehenden Legierung oder im Gichtgas wieder. Verfahren wie AirPrex® sind eher wie die Schlammwasserverfahren zur Vermeidung von Inkrustationen u. Ä. und weniger primär zur Phosphorrückgewinnung einzusetzen. Interessant ist der Ansatz des AVA cleanphos- und des TerraNova® Ultra-Verfahrens. Das Bestverfahren mit dem größten Potential ist laut [14] allerdings das Budenheim Verfahren. In Abbildung 10 sind die einzelnen Schritte ausgewählter Verfahren dargestellt. Bei den Verfahren aus Klär- und Faulschlamm sind im Endprodukt meist nur geringe Schwermetallkonzentrationen zu finden. Die Rückgewinnungsraten liegen bezogen auf den Kläranlagenzulauf meist bei über 50% (verschiedene Angaben zu den Rückgewinnungsraten s. Tabelle 7; S. 16). In der Praxis werden bei den nasschemischen Verfahren höhere pH-Werte angestrebt als in der Literatur, was zu niedrigeren Rückgewinnungsraten (und geringerem Chemikalienverbrauch) führt.

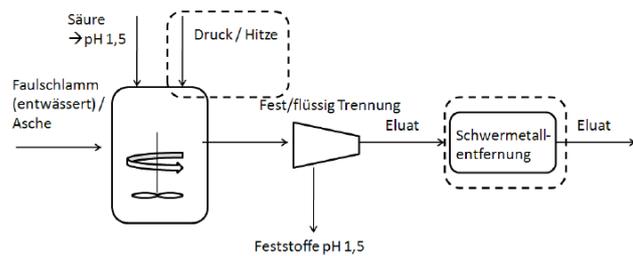


Abbildung 9: P-Rückgewinnung durch nass-chemischen Aufschluss [28]

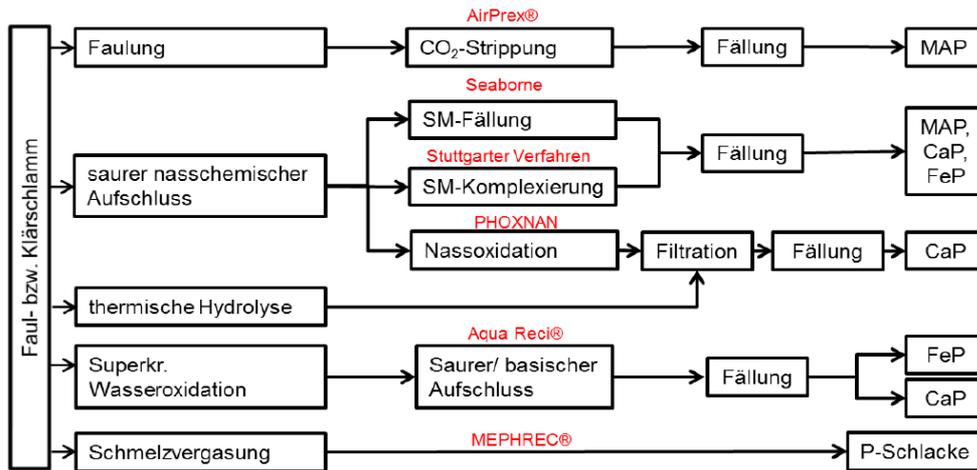


Abbildung 10: Prozessschritte zur Rückgewinnung von P aus Klärschlamm [13]

Die Verfahren sind aufgrund des hohen Ressourcenbedarfs (Chemikalien und Gas bzw. Koks) eher kostenaufwändig. Durch die oft hohen Chemikalieneinsätze sinkt der Kostenaufwand auch beim Einsatz in größeren Kläranlagen wenig. Eine Kostendeckung bzw. Gewinn kann durch die Nutzung des Energiepotentials bei stattfindenden Oxidationen erreicht werden. Oxidierter Klärschlamm kann ohne weitere Behandlung abgelagert werden. Bei den nasschemischen Verfahren sind die entstehenden sauren Schlämme kritisch für die Entsorgung. Abbildung 11: Kosten bzw. Erlöse für Rückgewinnung von Phosphor in Relation zum Referenzsystem (Einfluss Anlagengröße inkl. Einsparungen und Erlöse). Abbildung 11 zeigt Kosten für die Klärschlammprozesse. Tabelle 9: Zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Bewertungskriterien von Rückgewinnungsverfahren aus Klär- und Faulschlamm. Tabelle 9 zeigt eine Zusammenfassung der Erfüllung von Bewertungskriterien für ausgewählte Verfahren.

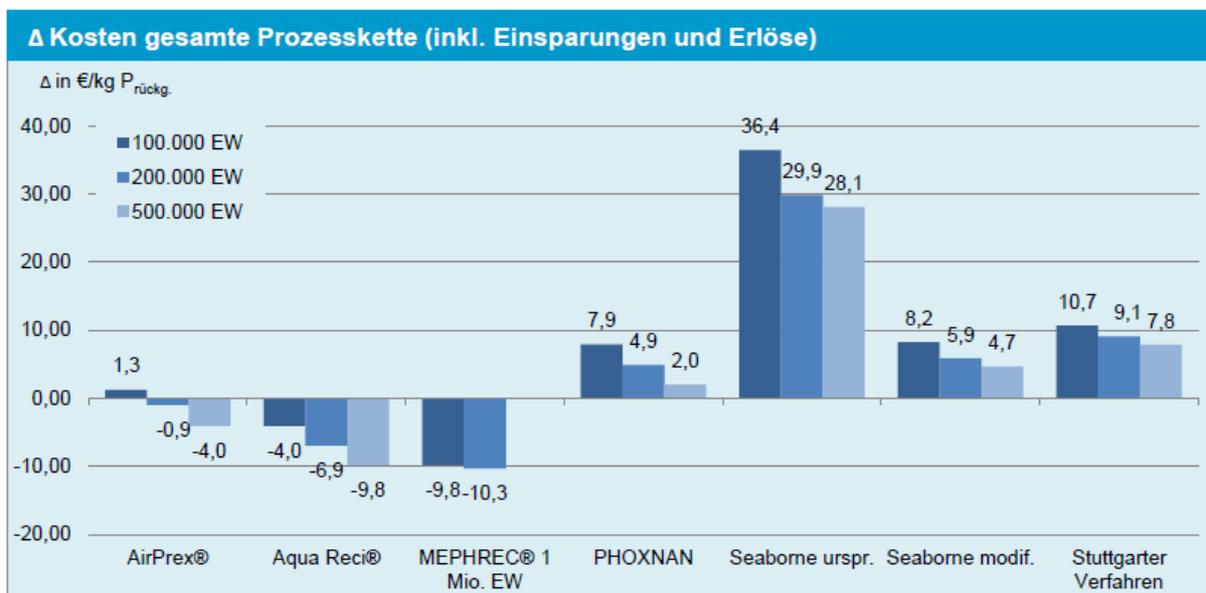


Abbildung 11: Kosten bzw. Erlöse für Rückgewinnung von Phosphor in Relation zum Referenzsystem (Einfluss Anlagengröße inkl. Einsparungen und Erlöse) [13]

Tabelle 9: Zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Bewertungskriterien von Rückgewinnungsverfahren aus Klär- und Faulschlamm [13]

Kriterien	Airprex®	Aqua-Reci®	MEPHREC®	PHOXNAN	Seabome	Stutt. Verfahren
Komplexität Anlagentechnik	einfach	hoch	hoch	hoch	mäßig	mäßig
Anforderung an Abwasserreinigung	BioP	nein	nein	BioP	nein	nein
Rückgewinnungspotential bezogen auf Kläranlagenzulauf [%]	~10	~60	50–70	~50	40–50	40–50
SM-Entfrachtung	nicht erforderlich	fast vollständig	mäßig	fast vollständig	Sehr gut	Sehr gut
Abfallstoffe	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Verfahrenskosten [€/kg P]	~7	~23	~14	~27	~13	~16 (13)
Zusätzliche Kosten zu Referenzsystem [%]	0–5	10–15	-20– -25	30–35	25–30	35–40
Pflanzenverfügbarkeit/-Wirksamkeit	sehr gut	mäßig	mäßig	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Schwermetallbelastung in Relation zu Handelsdünger	signifikant besser	signifikant besser	besser/ ähnlich	signifikant besser	gering	gering

Im „Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser“ (2014) werden folgende Verfahren aus Prozesswasser als „Rückgewinnungsverfahren ohne erkennbares zukünftiges Potential“ angegeben:

- ATZ Eisenbadreaktor
- Cambi®<sup>33</sup>
- KemiCond<sup>33</sup>
- KREPRO®

Beim Einsatz dieser Technologien ist aufgrund des hohen Wasseranteils im Klärschlamm meist eine dezentrale Rückgewinnung sinnvoll. Die Verfahren sind aufwändig und rechnen sich erst ab einer Kläranlagengröße von >100.000 EW. Bezogen auf den Mineraldüngereinsatz von 2011/12 („Grüner Bericht“, 2013) könnten mit nasschemischen oder nassoxidativen Verfahren bis zu 24% des Düngemittelbedarfs in Österreich gedeckt werden.

[13] [14] [28] [52] [53] [51]

<sup>33</sup> Verfahren wie AirPrex® eigentlich nicht auf Phosphorrückgewinnung ausgerichtet, aber werden großtechnisch zur Klärschlammbehandlung eingesetzt

Tabelle 10: Übersicht Rückgewinnung Klärschlamm [13] (abweichende Angaben aus anderen Quellen kenntlich gemacht)

Verfahren	Technologie								SM-Problematik				Endprodukt				Wirkungsgrad	
	Kristallisation	Fällung	nasschemisch (sauer)	therm. Hydrolyse	Nassoxidation	superkrit. Wasseroxidation	Schmelzvergasung	hydrothermale Carbonisierung	sulfidische Fällung	Komplexierung	Rauchgas/Eisenbad (Nano-) Filtration	MAP	CaP	Al- bzw. FeP	sonstige	bezogen auf Kläranlagenzulauf		
Air-Prex®	x	x										x				10-15 %	max. 45 % <sup>34</sup>	
AquaReci®						x							x	x		50-70 %	82-85 % <sup>34</sup>	
ATZ Eisenbadreaktor							x			x					x	90 %		
AVA cleanphos [54]							x			x		x				80 %		
Budenheimer Verfahren			x										x			50 % <sup>35</sup>		
CAMBI®				x								x				unbekannt <sup>36</sup>		
FIXPhos	x												x			20-30 %		
Ekobalans [14]												x				unbekannt		
KemiCond®				x								x				unbekannt <sup>36</sup>		
KREPRO®				x								x		x <sup>34</sup>		unbekannt	68 % <sup>34</sup>	
LysoGest®	x	x		x								x				unbekannt	mind. 30 % <sup>37</sup>	
MEPHREC®							x			x					x	~60 %	90 % <sup>34</sup>	
PHOXNAN (LOPROX®)			x		x					x			x			Bis 60 %		
Seaborne modifiziert (=Gifhorn Prozess)			x					x				x		x		30-50 %	70 % <sup>34</sup>	
Seaborne ursprünglich (=Seaborne®)			x					x				x		x		30-50 %	70 % <sup>34</sup>	
Stuttgarter Verfahren			x						x			x				Bis 60 %		
TerraNova® Ultra [44] [55] [56]							x								x <sup>38</sup>	unbekannt		

<sup>34</sup> [20]

<sup>35</sup> Laut [14] beträgt die Rückgewinnungsrate bezogen auf den Klärschlamm 50%

<sup>36</sup> Laut [20] keine P-Rückgewinnung angestrebt

<sup>37</sup> [33]

<sup>38</sup> Flüssigdünger?

Tabelle 11: Zusammenfassung der Grundlagen von Rückgewinnungsverfahren aus Faul- und Klärschlamm (I) [13]

Verfahren	AirPrex®	Aqua Reci®	MEPHREC®	PHOXNAN
Einsatzort	Faulschlamm, direkt in Faulbehälter	(teil-) entwässerter Klärschlamm	Entwässerter Klärschlamm, Klärschlamm- sche (Tiermehle)	(teil-) entwässerter Klärschlamm
technologischer Ansatz	MAP-Fällung/Kristallisation, CO <sub>2</sub> -Strippung, mechanische Abtrennung MAP	superkritische Wasseroxidation, Rücklö- sung P aus reaktiver Asche, CaP-Fällung	metallurgisches Schmelzverfahren > 1000°C, Reduktion Klärschlamm	thermische Hydrolyse bzw. Nassoxidation bei O <sub>2</sub> Zugabe, Ultra- und Nanofiltration
P-Elimination Abwasserreini- gung	Bio-P	Bio-P/Fällung	Bio-P/Fällung	Vorzugsweise Bio-P
erforderliche Prozesse Schlammbehandlung	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung (15 % TS)	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung (20 % TS)
Effekt auf Schlammbehand- lung	ja, im Falle von Bio-P verbesserte Entwäs- serungsleistung von Klärschlamm bei verringertem Polymerbedarf	ja, vollständige Oxidation der organischen Substanz (direkte Deponierung möglich)	ja, vollständige Oxidation der organischen- Substanz, Deponierung der anfallenden Reststoffe	ja, nahezu vollständige Oxidation der organischen Substanz (direkte Deponie- rung möglich)
Effekte auf Abwasserreini- gungsprozess	verringerte Nährstoffrückbelastung	keine	keine	keine
Erforderliche Anlagenteile zur P-Rückgewinnung	Vorlagebehälter Faulschlamm, Reaktions- behälter, Belüftungssystem für CO <sub>2</sub> - Strippung, Sandwäscher	Reaktor zur superkritischen Wasseroxida- tion, Rücklösebehälter, fest-flüssig Tren- nung, Fällreaktoren	Anlage zur Brikettherstellung, Kupolofen	Behälter zur Klärschlammensäuerung, LOPROX Reaktor, Ultra- und Nanofiltrati- onsstufe, Fällreaktor
Entwicklungsstand	großtechnisch (mehrfach umgesetzt)	großtechnisch (eingestellt)	Pilotanlage	LOPROX Reaktor großtechnisch, P- Rückgewinnung halbtechnisch
Ansatz P-Rückgewinnung	dezentral	zentral/dezentral	zentral/dezentral	zentral/dezentral
Flächenbedarf	~100 m <sup>2</sup>	~500 m <sup>2</sup>	~100 m <sup>2</sup>	~150 m <sup>2</sup>
Endprodukt	MAP	CaP (FeP möglich)	P-Schlacke (Thomasmehl)	MAP
P-Rückgewinnung Verfahren	20 %	~70 %	60-80 %	~ 50-55 %
P-Rückgewinnung bez. Auf Zulauf	Max. 15 %	~60 %	50-70 %	45-50 %
qualitativer Ressourcenbedarf	MgCl <sub>2</sub> , Energie (elektrisch)	O <sub>2</sub> , Energie (Gas und elektrisch), NaOH, CaCO <sub>3</sub>	Zement Koks, Eisen, O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaOH, Mg(OH) <sub>2</sub> , CaO, Energie (elektrisch)
Welche Abfallstoffe sind zu erwarten?	keine	Schwermetallschlamm	Stäube, Rauchgasreinigung, Eisenschlacke	ablagerbarer Rest-Feststoff (GV > 95 %), schwermetallhaltiges Nanoretentat
Welche Einflüsse müssen bei der ganzheitlichen Bewertung mitberücksichtigt werden?	verringerte N-Rückbelastung: 5100 kg	Energieerlöse SCWO, keine Mitverbren- nung mehr erforderlich	Energieerlöse, keine Mitverbrennung mehr erforderlich	1150 t Rest-Feststoff 69 t Schwermetallschlamm
erforderliche weiterführende Prozesse	Mitverbrennung, Reststoffdeponie, Unter- tagedeponie	Immobilisierung Schwermetallschlamm, Reststoffdeponie	Reststoffdeponie, Untertagedeponie	Immobilisierung Schwermetallschlamm Reststoffdeponie, keine Verbrennung notwendig

Tabelle 12: Zusammenfassung der Grundlagen von Rückgewinnungsverfahren aus Faul- und Klärschlamm (II) [13]

Verfahren	Seaborne urspr.	Seaborne modif. (Gifhorn)	Stuttgarter Verfahren
Einsatzort	Faulschlamm uneingedickt	Faulschlamm uneingedickt	Faulschlamm uneingedickt
technologischer Ansatz	nasschemischer Aufschluss (pH 2), FFT, sulfidische SM-Abtrennung, FFT, MAP-Fällung, Ammoniumstrippung	nasschemischer Aufschluss (pH 4-5), gleichzeitige Fe-Fixierung, FFT, MAP-Fällung, Ammoniumstrippung	nasschemischer Aufschluss (pH 3-4), Komplexierung, FFT, MAP-Fällung
P-Elimination Abwasserreinigung	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)
erforderliche Prozesse Schlammbehandlung	Eindicker, Faulung	Eindicker, Faulung	Eindicker, Faulung
Effekt auf Schlammbehandlung	Polymer versagt bei pH 2, schlechtere Entwässerbarkeit	verbesserte Entwässerung des angesäuerten Schlammes (pH 3), gleichzeitig verringerter Polymerbedarf, Effekt geht bei pH 2 verloren	verbesserte Entwässerung des angesäuerten Schlammes (pH 3-4), gleichzeitig verringerter Polymerbedarf, Effekt geht bei pH 2 verloren
Effekte auf Abwasserreinigungsprozess	verringerte Nährstoffrückbelastung	nein	Fällmittelrecycling, möglicherweise erhöhte SM-Belastung
erforderliche Anlagenteile zur P-Rückgewinnung	Reaktor für Rücklösung, SM-Abtrennung und MAP-Fällung, fest/flüssig-Trenner für SM-Schlamm	Reaktor für Rücklösung und MAP-Fällung, fest/flüssig-Trenner	Reaktor für Rücklösung, Kammerfilterpresse, Filtrvorlage, MAP-Fällung, fest/flüssig-Trenner
Entwicklungsstand	großtechnisch	halbtechnisch/großtechnisch	Pilotanlage
Ansatz P-Rückgewinnung	dezentral	dezentral	dezentral
Flächenbedarf	1600 m <sup>2</sup>	1000 m <sup>2</sup>	1000 m <sup>2</sup>
Endprodukt	MAP, CaP, FeP	MAP, CaP, FeP	MAP, CaP, FeP
P-Rückgewinnung Verfahren	30 %	50-60 %	50-60 %
P-Rückgewinnung bez. Auf Zulauf	20 %	40-50 %	40-50 %
qualitativer Ressourcenbedarf	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , NaS, Oxalsäure, NaOH, MgCl <sub>2</sub> , Energie (elektrisch)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaS, Oxalsäure, NaOH, Mg(OH) <sub>2</sub> , Energie (elektrisch)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Zitronensäure, NaOH, MgO, Energie (elektrisch)
Welche Abfallstoffe sind zu erwarten?	angesäuertes Klärschlamm – schwefelhaltig (pH 2), Schwermetallschlamm	angesäuertes Klärschlamm – schwefelhaltig (pH 3)	angesäuertes Klärschlamm – schwefelhaltig (pH 3), Fe- und SM-haltiger Überstand
Welche Einflüsse müssen bei der ganzheitlichen Bewertung mitberücksichtigt werden?	verringerte N-Rückbelastung: 1900 kg -7 % Schlammanfall 660 t Schwermetallschlamm	verringerte N-Rückbelastung: 1600 kg -7 % Schlammanfall	verringerte N-Rückbelastung: 1300 kg -7 % Schlammanfall -13 % Fällmittelbedarf -30 % Polymerbedarf
erforderliche weiterführende Prozesse	Mitverbrennung (fraglich bei hohen S-Gehalten), Immobilisierung Schwermetallschlamm, Reststoffdeponie, Untertagedeponie	Mitverbrennung (fraglich bei hohen S-Gehalten), Reststoffdeponie, Untertagedeponie	Mitverbrennung (fraglich bei hohen S-Gehalten), Reststoffdeponie, Untertagedeponie

## Verfahren aus Klärschlammasche

Phosphor in Klärschlammasche ist Großteils nicht wasserlöslich. Die Verbrennung sollte in Monoverbrennungsanlagen stattfinden, um einen möglichst hohen Phosphorgehalt in der Asche zu gewährleisten. Im Gegensatz zu Verfahren aus Schlamm oder Schlammwasser sollte die Rückgewinnung aus Klärschlammasche zentral erfolgen, da das Verfahren erst bei höheren Durchsatzmengen wirtschaftlich ist.

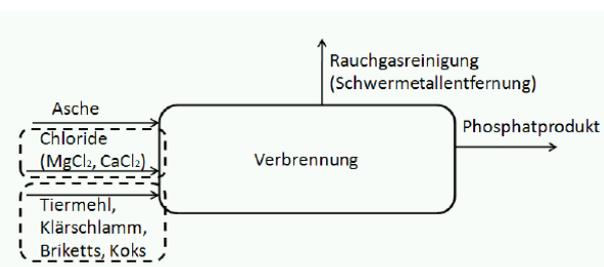


Abbildung 12: P-Rückgewinnung mit thermisch-metallurgischem Verfahren [28]

Neben Klärschlamm kann aufgrund des hohen Phosphorgehalts auch Tiermehl eingesetzt werden. Nicht in allen Verfahren werden gezielt Schritte gesetzt, um den Schwermetallgehalt im Endprodukt zu verringern. Ähnlich wie bei den Klärschlammverfahren kann auch aus der Klärschlammasche mittels Säurezugabe Phosphor gelöst werden. Ziel ist hier aber nicht immer eine Trennung von Asche und Phosphat, sondern teilweise nur eine Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit oder Erhöhung des Phosphoranteils. Falls eine Abtrennung erfolgt, können zuerst Schwermetalle entfernt und anschließend Phosphor als CaP gefällt werden. Über nasschemische Aufschlüsse kann auch Phosphorsäure als Endprodukt erhalten werden. Abbildung 13 zeigt mögliche Vorgangsweisen zur Rückgewinnung. Nasschemische Verfahren sind im Allgemeinen aufwändig jedoch können bis zu 90 % des im Zulauf vorhandenen Phosphors rückgewonnen werden. Saure Asche und Schwermetallrückstände verursachen einen zusätzlichen Entsorgungsaufwand. In thermischen Verfahren wird die Klärschlammasche erhitzt um Schwermetalle über das Rauchgas abziehen zu können. Im Ash Dec®-Verfahren sollen Schwermetalle als Chloride verdampft werden, die entstandene Asche kann als Rohstoff zur Düngemittelherstellung verwendet werden. Im Thermphos®-Verfahren wird P<sub>4</sub> erzeugt, der allerdings eher nicht zur Düngererzeugung verwendet wird.

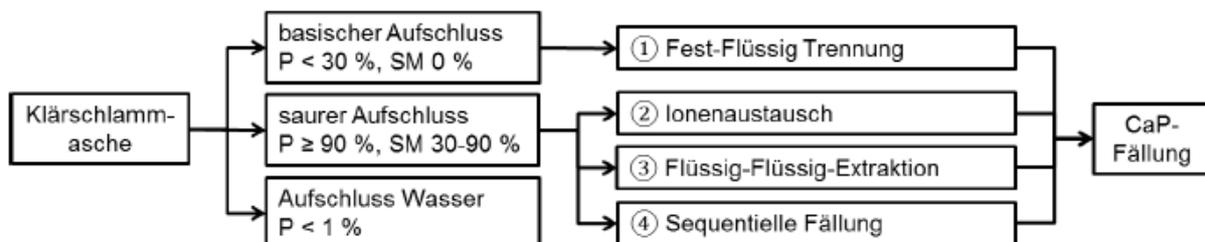


Abbildung 13: Nasschemische Verfahren zur Rückgewinnung aus der Klärschlammasche inklusive SM-Abtrennung [13]

Zu beachten ist, dass für die Rückgewinnung aus Klärschlamm oft eine Aluminiumfällung Voraussetzung ist. Aluminiumklärschlämme haben im Vergleich zu Eisenschlämmen einige Nachteile wie schlechtere Schlammabsetzbarkeit und -entwässerbarkeit, mögliche Schwefelsulfidbildungen und höhere Fällungsmittelkosten.

Tabelle 13: Zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Bewertungskriterien von Rückgewinnungsverfahren aus der Asche [13]

Kriterien	Ash Dec®	LEACH-PHOS®	PASCH	Reco-Phos®	SESAL-Phos	Düngemittel Industrie	Therm-phos®
Komplexität Anlagentechnik	hoch	mäßig	mäßig	einfach	mäßig	einfach	hoch
Anforderung an Abwasserreinigung	nein	nein	nein	nein	Ja (Al-Fällung)	nein	Ja (Al-Fällung)
Rückgewinnungspotential bezogen auf Kläranlagenzulauf [%]	~85	~65	~70	~85	~60	~85	~80
SM-Entfrachtung	teilweise	teilweise	Fast vollständig	keine	Fast vollständig	keine	Fast vollständig
Abfallstoffe	ja	ja	ja	nein	ja	nein	ja
Verfahrenskosten [€/kg P]	~2	~5	~4-5	~2	~6	~1	~2
Zusätzliche Kosten zu Referenzsystem [%] <sup>1)</sup>	10-15	~30	~30	~15	~25	~10	~20
Zusätzliche Kosten zu Referenzsystem [in €/kg Prückg.] <sup>2)</sup>	~4	~8	~7	~2	~8,5	~0,5	~2,5
Pflanzenverfügbarkeit/-Wirksamkeit	mäßig	gut	mäßig	sehr gut	mäßig	sehr gut	Keine Bewertung
Schwermetallbelastung in Relation zu Handelsdünger	besser	besser	signifikant besser	ähnlich	signifikant besser	ähnlich	signifikant besser

<sup>1)</sup>11 €/EW\*A; Erlöse unter der Annahme der derzeit am Markt erzielbaren Erlöse <sup>2)</sup>wahrscheinlichste Kosten

Im „Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser“ (2014) werden folgende Verfahren aus Prozesswasser als „Rückgewinnungsverfahren ohne erkennbares zukünftiges Potential“ angegeben:

- EPHOS
- Inocre® Verfahren (P-bac®)<sup>39</sup>
- SEPHOS
- therm. Aufschluss Konverterschlacke

In Österreich darf Klärschlamm seit 2004 nicht mehr unbehandelt deponiert werden. Nachdem für die direkte Aufbringung in der Landwirtschaft strenge Richtlinien gelten, wird ein Großteil (ca. 35 %) des anfallenden Klärschlammes verbrannt. Ca. 70 % (2013) davon werden in den Wirbelschichtöfen 1-3 der Fernwärme monoverbrannt. Würde aus allen Kläranlagen >10.000 EW Klärschlamm zentral verbrannt werden, könnten 90% des im Abwasser vorkommenden Phosphors rückgewonnen werden. Ab 2.000 EW können 99% erreicht werden. Bezogen auf den Mineräldüngereinsatz von 2011/12 („Grüner Bericht“, 2013) könnten je nach Verfahrensart 45% (nasschemisch) bzw. 58% (elektrochemisch, elektrothermisch, nasschemisch ohne Extraktion) des als Dünger eingesetzten Phosphors rückgewonnen werden.

[13] [14] [28] [6] [51]

<sup>39</sup> Das P-bac®-Verfahren wird auf der Anbieterseite als erfolgreich beworben.

Tabelle 14: Übersicht Rückgewinnung Klärschlamm-Asche [13] (alle Angaben [13], wenn nicht anders angeführt)

Verfahren	Technologie						SM-Problematic			Endprodukt			Wirkungsgrad	
	nasschemisch (sauer, basisch)	thermochemisch	thermoelektrolytisch	Eisenbad/Schmelzvergasung	elektrokinetisch	Bioleaching	Ionentauscher	flüssig-flüssig Trennung	Rauchgas/Eisenbad	MAP	CaP	Al- bzw. FeP	Sonstige	Bezogen auf Kläranlagenzulauf
ASH DEC (früher u.a. SUSAN)		x						x				x	85 %	90 % <sup>40</sup>
BioCon™	x					x				x		P-Säure	unbekannt	90 % <sup>40</sup>
CleanMAP®	x											NH <sub>4</sub> -P	unbekannt	
Eberhard-Verfahren	x					x				x			unbekannt	max. 82 % <sup>40</sup>
Ecophos [26]	x									x		P-Säure	unbekannt	
EPHOS					x					x			unbekannt	
LEACHPHOS®	x						x			x			-	
LOTUS Project	x									x			40-60 %	
MEPHREC®				x				x				Schlacke	50-80 %	90 % <sup>40</sup>
PASCH	x						x			x			70-80 %	82 % <sup>40</sup>
P-bac® (inocre®)						x						x	unbekannt	90 % <sup>41</sup>
Reco-Phos®	x											Asche Pellets	90 %	
RecoPhos/Inducarb				x								unbekannt	unbekannt	
SEPHOS	x									x			90%	
SESAL-Phos	x									x			~70 %	
TetraPhos® [38]	x					x						P-Säure	unbekannt	
Therm. Aufschluss Konverterschlacke				x				x				Schlacke	unbekannt	
Thermphos®			x									P <sub>4</sub>	85 %	
Düngemittelproduktion /-industrie ICL	x											SSP, TSP	90 %	

<sup>40</sup> [20]

<sup>41</sup> [34]: „Bis zu 90% des ursprünglichen Phosphats können so mit dem P-bac®-Verfahren zurück gewonnen werden.“ (vermutlich auf im Verfahren eingesetzten Phosphor bezogen.)

Tabelle 15: Zusammenfassung der Grundlagen von Rückgewinnungsverfahren aus der Klärschlammasche (I) [13]

Verfahren	Ash Dec®	LEACHPHOS	PASCH
Einsatzort	Klärschlammasche (Tiermehlasche)	Klärschlammasche (Tiermehlasche)	Klärschlammasche (Tiermehlasche)
technologischer Ansatz	thermochemische Behandlung, Rauchgasreinigung (Chloridrecycling)	nasschemischer Aufschluss, CaP-Fällung, Reststoffbehandlung	nasschemischer Aufschluss, FFT, SM-Abtrennung (flüssig-flüssig-Verfahren), Reinigung Reextraktionslösung, CaP-Fällung
P-Elimination Abwasserreinigung	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)
erforderliche Prozesse Schlammbehandlung	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung
Effekt auf Schlammbehandlung	Monoverbrennung erforderlich	Monoverbrennung erforderlich	Monoverbrennung erforderlich
Effekte auf Abwasserreinigungsprozess	nein	nein	nein
Erforderliche Anlagenteile zur P-Rückgewinnung	Venturi/Zyklonstufe (Vorwärmen der Asche), Drehrohrofen, Rauchgasreinigung (Filter, Chloridadsorption, SO <sub>2</sub> -Entfernung)	Rücklösebehälter, Feststoffabtrennung, Fällreaktor, CaP-Abscheider, Abwasserbehandlung	Reaktor für Rücklösung, Feststoffabtrennung, Einrichtung flüssig-flüssig-Trennung, Reinigung Reextraktionslösung, Reaktor CaP-Fällung, CaP-Abtrennung
Entwicklungsstand	Pilotanlage (großtechnische Anlage in Planung)	Pilotanlage	halbtechnisch (Potential zur großtechnischen Umsetzung, im Gespräch)
Ansatz P-Rückgewinnung	zentral	zentral	zentral
Flächenbedarf	500-1000 m <sup>2</sup>	600 m <sup>2</sup>	unbekannt
Endprodukt	Entfrachtete Asche (pelletiert) mit verbesserter Pflanzenverfügbarkeit	CaP	Ca(Al)P
P-Rückgewinnung Verfahren	>98 %	70-80 %	70-80 %
P-Rückgewinnung bez. Auf Zulauf	85-90 %	65-70 %	65-70 %
qualitativer Ressourcenbedarf	NaCl/MgCl <sub>2</sub> , MgCO <sub>3</sub> , NaHCO <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , Energie (elektrisch und Gas)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , CaO, NaOH, CaCO <sub>3</sub> , Energie (elektrisch)	HCl, Reaktionslösung, NH <sub>4</sub> /NH <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub> , Frischwasser, FeCl-Lösung, NaOH, Calciumquelle
Welche Abfallstoffe sind zu erwarten?	SM-hältige Stäube aus der Rauchgasreinigung	angesäuerte Asche, Gips, behandeltes Abwasser	angesäuerte Asche, feste und flüssige Rückstände Reextraktionsreinigungslösung
Welche Einflüsse müssen bei der ganzheitlichen Bewertung mitberücksichtigt werden?	Annahme der Asche, keine Ablagerung auf Deponie, Entsorgung anfallender Filterstäube	Annahme der Asche, angesäuerte Asche, Gipsablagerungen, zu behandelndes Abwasser	180 t Fällschlamm (Schwermetalle), Annahme der Asche, angesäuerte Asche, Gipsablagerungen, zu behandelndes Abwasser
erforderliche weiterführende Prozesse	Reststoffdeponie, Untertagedeponie (MonoverbrennungsfILTERKUCHEN)	Reststoffdeponie (Reststoffe aus Prozess(Asche+Gips)), Untertagedeponie (MonoverbrennungsfILTERKUCHEN)	Immobilisierung Reextraktionsrückstände, Reststoffdeponie, Untertagedeponie (MonoverbrennungsfILTERKUCHEN)

Tabelle 16: Zusammenfassung der Grundlagen von Rückgewinnungsverfahren aus der Klärschlammasche (I) [13]

Verfahren	RecoPhos®	SESAL-Phos	Thermphos	Düngemittelindustrie
Einsatzort	Klärschlammasche (Tiermehlasche)	Klärschlammasche (Tiermehlasche)	Klärschlammasche (Tiermehlasche)	Klärschlammasche (Tiermehlasche)
technologischer Ansatz	nasschemischer Aufschluss mit Phosphorsäure	nasschemischer Aufschluss (Salzsäure), Umlagerung Ca-Al-Phosphat, CaP-Fällung, Al-Rückgewinnung	elektrothermischer Prozess (Lichtbogenofen)	nasschemischer Aufschluss, Pelletieren, Klassifizieren
P-Elimination Abwasserreinigung	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)	Bio-P und/oder gezielte Fällung (Fe oder Al)
erforderliche Prozesse Schlammbehandlung	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung	Eindicker, Faulung, Entwässerung
Effekt auf Schlammbehandlung	Monoverbrennung erforderlich	Monoverbrennung erforderlich	Monoverbrennung erforderlich	Monoverbrennung erforderlich
Effekte auf Abwasserreinigungsprozess	nein	ja/ Aluminiumfällung erforderlich	ja/ Aluminiumfällung erforderlich	nein
erforderliche Anlagenteile zur P-Rückgewinnung	Drehrohr, Klassifizierer (optional Brecher und Trocknung)	Reaktor für Rücklösung, Einrichtung flüssig-flüssig-Trennung, Reaktor CaP-Fällung, CaP-Abtrennung	Sintern, elektrothermischer Prozess (Lichtbogenofen), Filtereinheiten, P-Kondensation, Lagerung	Drehrohr, Klassifizierer (optional Brecher und Trocknung)
Entwicklungsstand	großtechnisch	Labormaßstab	industriell erprobt	industriell erprobt
Ansatz P-Rückgewinnung	zentral	zentral	zentral	zentral
Flächenbedarf	500-1000 m <sup>2</sup>	unbekannt	unbekannt	unbekannt
Endprodukt	P-angereicherte und pelletierte Asche	CaP	reines P <sub>4</sub>	Mineraldünger (SSP, TSP)
P-Rückgewinnung Verfahren	100 %	71 %	96 %	98 %
P-Rückgewinnung bez. Auf Zulauf	~90 %	55-65 %	75-85 %	85-90 %
qualitativer Ressourcenbedarf	industrielle Phosphorsäure H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , Energie (elektrisch, optional Gas)	HCl, Wasser, NaOH, Calciumquelle	Koks, Si-Quelle, CaSiO <sub>3</sub> , Wasser, Energie (elektrisch, Gas)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Wasser, Energie (elektrisch+thermisch (Öl))
Welche Abfallstoffe sind zu erwarten?	keine	keine	Silikatschlacke, Eisenphosphat, Rauchgase aus Rauchgasreinigung	Abwasser und Rückstände der Abluftreinigung
Welche Einflüsse müssen bei der ganzheitlichen Bewertung mitberücksichtigt werden?	Annahme der Asche, keine Ablagerung auf Deponie notwendig	Rückgewinnung Al, Nutzung als Fällmittel in der Abwasserreinigung	anfallende Reststoffe wie Silikatschlacke, Eisenphosphate müssen abgelagert werden	Behandlung Abwasser und Ablagerung Rückstände Abluftreinigung
erforderliche weiterführende Prozesse	Untertagedeponie (MonoverbrennungsfILTERKUCHEN)	Reststoffdeponie, Untertagedeponie (MonoverbrennungsfILTERKUCHEN)	Reststoffdeponie (Reststoffe aus Prozess), Untertagedeponie (MonoverbrennungsfILTERKUCHEN)	Reststoffdeponie (Reststoffe aus Prozess), Untertagedeponie (MonoverbrennungsfILTERKUCHEN)

## Einzelne Verfahren im Detail

### DHV Crystalactor® (RoyalHaskoningDHV)

#### Verfahren

Die Rückgewinnung mit dem Crystalactor® erfolgt bereits seit 1994. Das Verfahren findet im Haupt- oder Nebenstrom der Kläranlage statt. Eine rein biologische P-Entfernung ist Voraussetzung. Mikroorganismen in einem Teil des Überschussschlammes der Kläranlage nehmen in einem anaeroben Becken zugegebene Essigsäure auf und setzen Phosphat frei. Dadurch wird das gelöste Phosphat im Schlammwasser aufkonzentriert. Mit NaOH wird der pH-Wert passend eingestellt. Der Schlamm wird abgetrennt um erneut

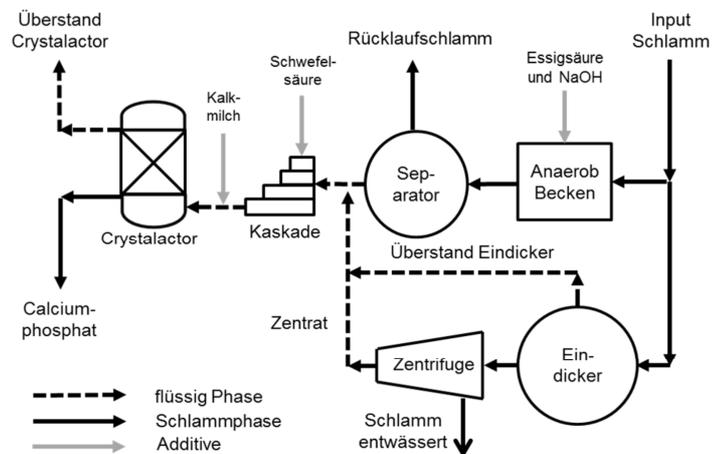


Abbildung 14: Prozessskizze DHV Crystalactor im modifizierten Nebenstrom [57]

in die Belebung Phosphor aufzunehmen. Das Zentrat wird über eine Kaskade geleitet, wo Carbonat mit Schwefelsäure als CO<sub>2</sub> entfernt wird. Ca. 25% des Überschussschlammes laufen durch einen Eindicker, wobei das Zentrat ebenfalls über die Kaskade geleitet wird. Der Schlammrückstand verlässt den Prozess. Das Schlammwasser strömt von der Kaskade mit hoher Geschwindigkeit durch den Crystalactor®; wo CaP (oder MAP) auskristallisieren. Die Kristalle sinken zu Boden, wo sie abgeführt werden. Der Überstand gelangt zurück in die Kläranlage. Das Rückgewinnungspotential liegt bei maximal 40% bezogen auf des Phosphorgehalt im Kläranlagenzulauf und bei bis zu 80% des in den Crystalactor® gelangenden Schlammwassers.

#### Endprodukt

Die entstandenen Pellets sind direkt in der Landwirtschaft einsetzbar, es sind keine organischen Spurenstoffe nachweisbar und die Schwermetallgehalte liegen deutlich jenen von handelsüblichem Mineraldünger und den Anforderungen der Düngemittelverordnung. Calciumphosphate sind weniger löslich und pflanzenverfügbar als MAP-Dünger. Auf sauren Böden sind sie mäßig bis gut geeignet, auf alkalischen Böden ungeeignet.

#### Kosten

Im Vergleich zu den anderen Rückgewinnungsverfahren aus dem Schlammwasser hat der Crystalactor erheblich höhere Investitionskosten (neben Reaktor werden noch Kaskade, Anaerobbecken usw. benötigt.) Ebenso kommt es zu einem 47% erhöhten Klärschlammanfall und die Faulung (damit auch die Biogasproduktion) entfällt. Auch bei großen Kläranlagen 500.000 oder 1.000.000 EW amortisiert sich die Anlage nicht innerhalb von 15 Jahren, was das Verfahren im kommunalen Bereich unwirtschaftlich macht.

[57] [58] [14] [20] [28]

## PEARL®-Verfahren (Ostara®)

### Verfahren

PEARL®-Reaktoren sind seit 2009 im Einsatz. Das Verfahren läuft im Nebenstrom und ist ähnlich jenem des Crystalactor®. Nach der Schlammmentwässerung sollten 75 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/l im Schlammwasser enthalten sein. In den PEARL®-Reaktor (Kristallisations- bzw. Fließbettreaktor) gelangt das Schlammwasser mit großer Geschwindigkeit. Der pH-Wert wird mit NaOH eingestellt. Mit MgCl<sub>2</sub> kristallisiert MAP aus. Optional kann vor der Eindickung und Faulung des Klärschlammes der WASSTRIP®-Prozess geschaltet werden um unerwünschte MAP-Ablagerungen in Faulung und Entwässerung zu vermeiden. Ebenso wird die Entwässerbarkeit des Klärschlammes so verbessert. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf liegt das Rückgewinnungspotential bei 15-25%, sowie 90% für das in den Reaktor gelangende Schlammwasser.

### Endprodukt

Das Endprodukt ist verkaufsfertiges Düngemittel (Handelsname Crystal Green®). Bei diesem Verfahren gelangt zusätzlich Stickstoff ins Endprodukt. Nachdem MAP das Endprodukt ist besteht eine auf sauren Böden sehr gute und auf alkalischen Böden mäßig bis gute Pflanzenverfügbarkeit. Es sind bei der Düngewirkung keine Unterschiede zwischen MAP und handelsüblichem Mineraldünger feststellbar. Die Schwermetallgehalte liegen weit unter den Grenzwerten und es sind keine organischen Spurenstoffverunreinigungen nachweisbar.

### Kosten

Im Gegensatz zum DHV Crystalactor übernimmt Ostara® die Vermarktung des Düngers, zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass Ostara® die Kosten zur Errichtung der Anlage übernimmt und der Kläranlagenbetreiber monatlich einen festgelegten Betrag zahlt sowie für die zuvor notwendige Errichtung einer Pilotanlage aufkommt. Durch die geringere Phosphorrückbelastung können Fällmittel eingespart werden dadurch kommt es zu einem geringeren Klärschlammfall. Bereits ab einer Kläranlagengröße von 200.000 EW sich die Anlage in weniger als 15 Jahren.

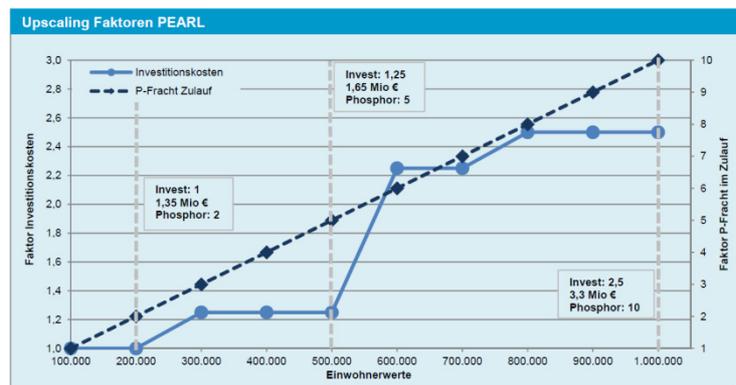


Abbildung 15: Upscaling Faktoren Investitionskosten PEARL® [13]

Wenn man von der Kläranlage der Stadt Graz in Gössendorf mit 500.000 EW ausgeht, läge die Amortisierungszeit bei 5-6 Jahren. Bei einer Neuinstallation des Ostara®-Verfahrens sind keine umfangreichen Umbauarbeiten erforderlich.

[13] [14] [20] [28] [59]

## Verfahren

Das REM NUT®-Verfahren arbeitet mit zwei Ionenaustauschern. Es darf/sollte zuvor keine Phosphorentfernung zur Einhaltung von Grenzwerten stattfinden. Die Rückgewinnung erfolgt aus dem Kläranlagenablaufwasser, das heißt, dass die Ionenaustauscher die letzte Barriere der Kläranlage bilden. Der Kationenaustauscher aus Zeolithen ersetzt das im Abwasser vorkommende Ammonium oder Kalium durch Natrium und der Anionenaustauscher aus einem basischen Harz ersetzt Phosphat aus dem Wasser durch Chlorid. Die nun an den Austauschern anhaftenden Ammonium-, Kalium- und Phosphationen werden anschließend mit einer NaCl-Lösung eluiert.

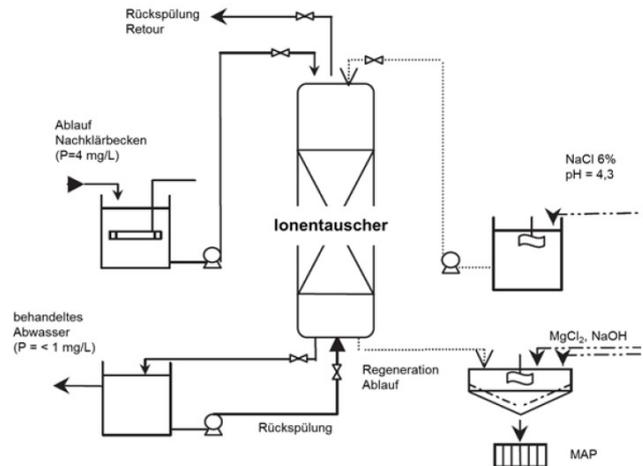


Abbildung 16: schematischer Aufbau Ionenaustauscher [49]

Gleichzeitig werden dadurch die Tauscher regeneriert. Die nun konzentriert vorliegenden Nährstoffe können nach pH-Werteinstellung zur Fällung der vorhandenen Schwermetalle mit  $MgCl_2$  gefällt werden. Es bilden sich  $MgNH_4PO_4$  (MAP) oder  $MgKPO_4$  (KAP). Die ausgefallenen Struvite werden durch aus dem Wasser entfernt. Probleme ergeben sich dadurch, dass die Kapazität der Ionenaustauscher stetig abnimmt, da organische Verunreinigungen (Tenside, bio-persistente Stoffe, Stoffe mit endokriner Wirkung...) irreversibel an die Austauscher gebunden werden. Durch Regeneration mit NaCl und Verwendung von  $MgCl_2$  als Fällungsmittel kommt es zu erhöhten Chloridkonzentrationen im Ablauf. Ebenso ist der Einsatz am Ende des Abwasserreinigungsprozesses als kritisch zu betrachten, da es im Ablauf zu starken Volumenschwankungen kommen kann, was zu einer ungenügenden Phosphorelimination führen kann. Weiters liegen im Vergleich zum Schlammwasser nur geringe Phosphorkonzentrationen vor.

## Endprodukt

Das Endprodukt ist sehr von der Zusammensetzung sehr rein und schadstoffarm. Durch die grobe Körnung kann es jedoch nicht maschinell auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht werden. Die Pflanzenverfügbarkeit ist sehr gut.

## Kosten

Es fallen Ionenaustauscherharze als Abfallprodukt an. Nachdem diese durch schädliche organische Verbindungen verunreinigt sind, sollten sie thermisch behandelt werden, was zusätzliche Kosten mit sich bringt. Nachdem die Betriebskosten im Gegensatz zu den Investitionskosten sehr hoch sind, amortisiert sich das Verfahren auch bei einer großen Kläranlage nicht innerhalb von 15 Jahren.

[13] [14] [20] [49]

## PASCH (RWTH Aachen)

### Verfahren

Das Verfahren wurde im Rahmen der deutschen Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ entwickelt. Eine halbtechnische Umsetzung war erfolgreich. Rückgewinnungsquoten lagen bezogen auf den Kläranlagenzulauf bei 70%, bezogen auf die Asche bei 80%. In Laugungsreaktor wird der Phosphor mit Salzsäure aus der Asche gelöst. Die Flüssigkeit wird von der Asche getrennt. Über eine Solvent-Extraktion werden Schadstoffe (Schwermetalle) entfernt, das Lösungsmittel wird anschließend regeneriert. Das Phosphat wird als CaP gefällt. Die Rückstände nach der Säurezugabe müssen vor einer Deponierung neutralisiert werden. Ebenso fällt aus der Extraktionsmittelaufbereitung ein Schwermetallschlamm an, der sehr hohe Konzentrationen an Zn, Cd, Cu, Pb und Fe aufweist. Aufgrund der ansonsten zu großen Verdünnung muss der Klärschlamm in Monoverbrennungsanlagen thermisch behandelt werden.

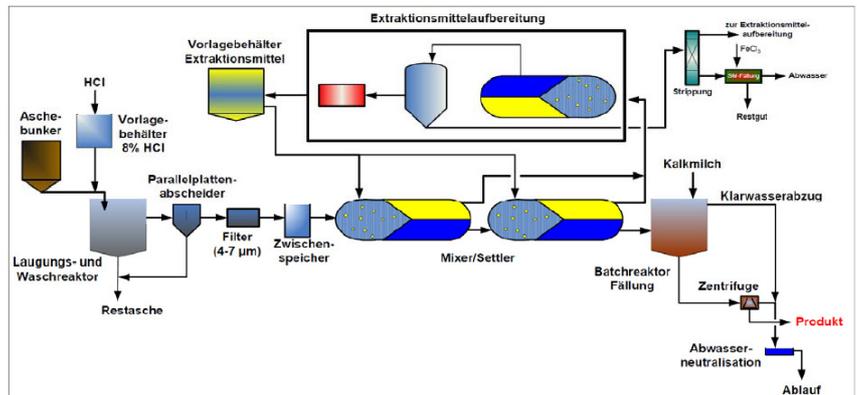


Abbildung 17: Prozessskizze PASCH Verfahren [60]

Über eine Solvent-Extraktion werden Schadstoffe (Schwermetalle) entfernt, das Lösungsmittel wird anschließend regeneriert. Das Phosphat wird als CaP gefällt. Die Rückstände nach der Säurezugabe müssen vor einer Deponierung neutralisiert werden. Ebenso fällt aus der Extraktionsmittelaufbereitung ein Schwermetallschlamm an, der sehr hohe Konzentrationen an Zn, Cd, Cu, Pb und Fe aufweist. Aufgrund der ansonsten zu großen Verdünnung muss der Klärschlamm in Monoverbrennungsanlagen thermisch behandelt werden.

### Endprodukt

Im Endprodukt (sehr reine CaP-Verbindungen) sind die Schwermetallgehalte deutlich unter jenen von herkömmlichen Mineräldüngern. Je nach Fällungsmittel unterscheiden sich ihre Konzentrationen im Endprodukt. Aluminium wird nicht entfernt. Es konnten ebenso sehr geringe Konzentrationen von LAS (Tenside) und Phtalaten nachgewiesen werden. Das Produkt ist aufgrund seiner Pulverform nicht direkt in der Landwirtschaft ausbringbar. Die Pflanzenverfügbarkeit ist deutlich geringer als die eines MAP-Düngers.

### Kosten

Die Phosphorausbeute ist im Vergleich mit anderen Klärschlammascheverfahren eher gering. Durch die Schwermetallentfrachtung erhöht sich der Ressourcenaufwand.

[13] [20] [28] [60]

## Zusammenfassung und Ausblick

Phosphor ist ein unersetzbarer und lebenswichtiger Nährstoff. In näherer Zukunft ist vermutlich kein Versorgungsengpass für Phosphor zu erwarten, allerdings sinkt die Qualität des verfügbaren Rohphosphats sehr wohl. Verunreinigungen mit Cadmium und Uran sind problematisch.

Einige Phosphorrückgewinnungsverfahren, vor allem jene aus Schlammwasser werden bereits großtechnisch eingesetzt. Die Rückgewinnungsraten dieser Technologien sind jedoch eher niedrig. Sie sind für andere Einsatzzwecke wie Vermeidung von Inkrustationen konzipiert. Dies sind Probleme, die vor allem bei Kläranlagen mit biologischer Phosphatentfernung auftreten. Die biologische Phosphatentfernung ist für die meisten der Verfahren eine Voraussetzung. In Österreich wird in den meisten Kläranlagen Phosphat über Fällung mit Metallsalzen eliminiert.

Die Klärschlammverfahren sind meist kompliziert und Ressourcenaufwändig. Einige haben denselben Einsatzbereich wie die Verfahren aus dem Schlammwasser (Vermeidung von Struvitablagerungen und Verbesserung der Entwässerbarkeit des Klärschlammes). Diese Verfahren sind großtechnisch einsetzbar und auch bereits in Verwendung. Die anderen Verfahren bedürfen oft noch einer Optimierung und könnten in ihrer derzeitigen Form eher nicht wirtschaftlich betrieben werden.

Für die Rückgewinnungsverfahren aus dem Klärschlamm müsste eine zentrale Monoverbrennung und Rückgewinnung erfolgen. Oft ist eine Aluminiumfällung erforderlich, was zu verschlechterten Schlammeigenschaften und zusätzlichen Kosten führt. Insgesamt wäre für eine Versorgung mit Sekundärphosphatdünger dieser Ansatzpunkt bei derzeitigem Stand des Wissens wahrscheinlich allgemein am besten geeignet. Eine Umsetzung sollte jedoch mindestens auf einen Durchsatz von 30.000 t Klärschlamm/a (~3.500.000 EW) ausgerichtet sein um auch wirtschaftlich betrieben werden zu können. Auch die Frage der Schwermetallentfrachtung bleibt bei einigen Verfahren offen.

Festzuhalten bleibt, dass für jede Kläranlagensituation ein passendes Verfahren gefunden werden muss. Allgemeine Aussagen können nur schwer getroffen werden, da in der Abwasserreinigung viele Faktoren das Rückgewinnungspotential eines Verfahrens beeinflussen (z.B. Ausbaugröße, Phosphorkonzentration im Abwasser, Art der Phosphoreliminierung und ähnliches mehr).

Um die (techn.-wirtschaftl.) Sinnhaftigkeit eines dieser Verfahren für die Kläranlage der Stadt Graz in Gösendorf zu überprüfen, wären detaillierte anlagenbezogene Untersuchungen, evtl. Datenerhebungen und spezifische Tests erforderlich. Als Literaturquelle könnte hier „Untersuchung der Stoffflüsse und sinnvollen Verwertung von sowie Reststoffnutzung aus Klärschlamm in der Steiermark – Endbericht“, im Auftrag des Amtes der Steirischen Landesregierung Fachabteilung 19D aus dem Jahr 2007 als Anhaltspunkt verwendet werden. Weiters sollte in Erfahrung gebracht werden, welche Phosphorkonzentrationen im Grazer Abwasser bei welchen Abwassermengen zu finden sind, welche Art der Phosphorelimination eingesetzt wird, wie der Klärschlamm verwertet wird und ob dieser überhaupt für/über eine ausreichende Qualität zur Monoverbrennung und Rückgewinnung verfügt. Ebenso sollte evaluiert werden, ob und an welcher Stelle der Einsatz eines Rückgewinnungsverfahrens wirtschaftlich sein könnte. Im in diesem Absatz erwähnten Bericht ist nur von Rückgewinnungsverfahren nach thermischer Verwertung die Rede.

Phosphorrückgewinnungsverfahren werden in der Zukunft vermutlich an Relevanz gewinnen, allerdings ist fraglich um welchen Zeitraum es sich dabei handelt. Viele Verfahren werden bzw. wurden noch entwickelt und optimiert. Die Ansätze sind dabei sehr unterschiedlich und im Laufe der Zeit wird sich vermutlich herausstellen welche Arten der Rückgewinnung potentiell am besten geeignet sind.

## Ergänzung

Als praktisches Beispiel für die potentielle Verwertung von Klärschlamm oder Abwasser, bzw. Prozesswasser, lässt sich anhand der Kläranlage der Stadt Graz in Gössendorf zeigen. Die jährliche Menge Abwasser beträgt ca. 30 Mio. m<sup>3</sup> Abwasser, mit einer Phosphorkonzentration zwischen 9-13 g/m<sup>3</sup>. Durch die gegebenen Verhältnisse wird sowohl eine biologische als auch eine chemisch-physikalische Phosphoreliminierung durchgeführt. Durch die biologische Eliminierung wird ca. 25-30% des Phosphors gebunden, der verbleibende Rest mit Fe(III)Cl gefällt. Der entstehende Fällschlamm geht ebenfalls in den allgemeinen Klärschlamm über.

Aus einem Positionspapier des ÖWAV geht hervor, dass in der momentanen Situation in Österreich bei einer Phosphorrückgewinnung mit volkswirtschaftlichen Mehrkosten zu rechnen ist. Das liegt in erster Linie, wie bereits erörtert an dem zu geringen Marktpreis für Phosphor, aber auch an strukturellen Defiziten, wie Reichweite von Phosphorlagerstätten. Die Empfehlung lautet, die Weichen für die Zukunft zu stellen, da anzunehmen ist, dass der Phosphorpreis früher oder später steigen wird. In Vorbereitung sollte ein langfristiger Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlämmen aus Anlagen >100 000 EW bei gleichzeitiger Förderung von P-Rückgewinnung. Um dies zu gewährleisten sollte die Zusammenarbeit der beteiligten Verwaltungsstellen und Düngemittelindustrien gefördert werden um die benötigten Rahmenbedingungen zu schaffen. Um diesen Zielzustand zu erreichen ist politischer Wille gefordert, der bereits jetzt die gesetzlichen, technologischen und finanziellen Weichen stellt, damit in Zukunft diese immer wertvollere Ressource genutzt werden kann. [68]

## Literaturverzeichnis

- [1] R. Schuhmann und A. Ehbrecht, „Phosphor-Rückgewinnung - Anwendungsreife erreicht,“ *ReSource*, Nr. 2, 2015.
- [2] H. Elsner, „Braunschweiger Nährstofftage 2008“.
- [3] „Mineral Commodity Summaries,“ 2015.
- [4] „UNEP Yearbook 2011 - Phosphorus and Food Production,“ 2011.
- [5] „Phosphate Rock Statistics,“ 2015.
- [6] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Endbericht Phosphorbilanz Österreich,“ 2014.
- [7] G. Griesmayr, O. Hofer, R. Fehrer, K. Brier und M. Langer, „Grüner Bericht 2005,“ 2005.
- [8] R. Lindner, O. Hofer, R. Fehrer, K. Brier und M. Langer, „Grüner Bericht 2009,“ 2009.
- [9] M. Schwaiger, O. Hofer, R. Fehrer und K. Brier, „Grüner Bericht 2014,“ 2014.

- [10] D. Cordell, „The Story of Phosphorus,“ 2010.
- [11] „Eutrophierung,“ 2010. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/eutrophierung>. [Zugriff am 14 Juli 2015].
- [12] A. Schönberg, K. Samiei, H. Kern und H. Raupenstrauch, „Der RecoPhos-Prozess - Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche,“ 2014.
- [13] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser,“ Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2014.
- [14] C. Fux, M. Theiler und T. Irzan, „Studie Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm - Gesamtbericht,“ TBF + Partner AG, Zürich, 2010.
- [15] U. Seiler, „Recyclingverfahren - Verfahren im Vergleich,“ *ReSource*, 2014.
- [16] J. Pinnekamp, D. Montag, K. Gethke, S. Goebel und H. Herbst, „Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers "Magnesiumammoniumphosphat - MAP" aus Abwasser und Klärschlamm,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2007.
- [17] W. Ewert, „Verfahren zur Optimierung der anaeroben Schlammbehandlung bei Anwendung der biologischen Phosphatelimination,“ DWA, Hennef, 2009.
- [18] „Outotec: Products & services: Energy production: About phosphorus,“ Outotec, 30 Juli 2015. [Online]. Available: [www.ashdec.com/en/Products--services/Energy/Ash-Treatment/#tabid-1](http://www.ashdec.com/en/Products--services/Energy/Ash-Treatment/#tabid-1). [Zugriff am 2015].
- [19] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse - Aqua Rec<sup>®</sup>,“ in *Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser - Teilberichte*, Wien, BMLFUW, 2014.
- [20] L. Hermann, „Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung - Eine Bestandesaufnahme,“ Bundesamt für Umwelt, Bern, 2009.
- [21] M. Mocker und I. Löh, „Energieeffiziente Wertstoffgewinnung mit dem ATZ-Eisenbadreaktor,“ 2011.
- [22] „VEOLIA Water Treatment Technologies: BIOCO™/BIOCON™: BioCon™ Brochure,“ [Online]. Available: [www.technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/productbrochures/key\\_technologies/A979YyE1Slx923GG02M7C9T.pdf](http://www.technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/productbrochures/key_technologies/A979YyE1Slx923GG02M7C9T.pdf). [Zugriff am 30 Juli 2015].
- [23] A. Giesen, „P-recovery with the Crystalactor®,“ 2009.
- [24] „AVA-CO2: Über AVA-CO2,“ AVA-CO2 Schweiz AG, 2015. [Online]. Available: <http://www.ava-co2.com/web/pages/de/ueber-ava-co2.php>. [Zugriff am 29 Juli 2015].
- [25] „EasyMining Sweden,“ EasyMining Sweden AB, [Online]. Available: [www.easymining.se/processes1.html](http://www.easymining.se/processes1.html). [Zugriff am 30 Juli 2015].

- [26] „ecophos: Our technology,“ ecophos, [Online]. Available: [www.ecophos.com/#/en/technology/](http://www.ecophos.com/#/en/technology/). [Zugriff am 30 Juli 2015].
- [27] LfU, Referat 33, „Elektrokinetische Phosphorrückgewinnung - EPHOS,“ Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg, 2010.
- [28] J. Pinnekamp, W. Everding, K. Gethke, D. Montag und Weinfurtner, „Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen,“ Bundesministerium für, Bonn, 2011.
- [29] A. Sigrist, „Leachphos-Verfahren,“ in *Fachtagung VSA/SVUT - Phosphorrecycling in der Abwasserreinigung*, Luzern, 2014.
- [30] „Sewage treatment plant,“ EkoBalans Fenix AB, [Online]. Available: [www.ekobalans.com/en/tjanster/reningsverk](http://www.ekobalans.com/en/tjanster/reningsverk). [Zugriff am 29 Juli 2015].
- [31] „EkoBalans: Sewage treatment plant,“ [Online]. Available: <http://ekobalans.com/images/illustrationer/STP.pdf>. [Zugriff am 29 Juli 2015].
- [32] Y. Morishima, „National Project Leading to the Recycling Society with Sewage Sludge in Japan - LOTUS Project,“ Japan Institute of Wastewater Engineering Technology.
- [33] „Eliquo Stulz GmbH: Lösungen: Energieressource Klärschlamm: LysoGest,“ [Online]. Available: [www.eliquostulz.com/de/lysogest.html?file=files/eliquo/stulz/downloads/150211\\_klaeranlage\\_lingen\\_foerderprojekt.pdf](http://www.eliquostulz.com/de/lysogest.html?file=files/eliquo/stulz/downloads/150211_klaeranlage_lingen_foerderprojekt.pdf). [Zugriff am 29 Juli 2015].
- [34] „inocre: Startseite: Leistungsspektrum: Gewinnung von Wertstoffen: Phosphatrückgewinnung,“ inocre, [Online]. Available: [www.inocre.de/phosphatrueckgewinnung](http://www.inocre.de/phosphatrueckgewinnung). [Zugriff am 30 Juli 2015].
- [35] NuReSys®, „References,“ 2015.
- [36] E. Hoffmann und M. Leicht, „Ionenaustauscher und Elektrodialyse zur P-Rückgewinnung aus Abwässern, PHOSIEDI-Verfahren,“ KIT Karlsruhe Institute of Technology, 2014.
- [37] „REMONDIS Austria GmbH,“ 2015 REMONDIS SE & Co. KG, 6 Juli 2015. [Online]. Available: [www.remondis.at/austria/sonderseiten/newsausgabe-remondis/inbetriebnahme-des-remondis-tetraphossupRsup-verfahren-mit-herrn-senator-jens-kerstan/](http://www.remondis.at/austria/sonderseiten/newsausgabe-remondis/inbetriebnahme-des-remondis-tetraphossupRsup-verfahren-mit-herrn-senator-jens-kerstan/). [Zugriff am 30 Juli 2015].
- [38] R. Czamecki und M. Lebek, „Stoffstrommanagement und wirtschaftliches Phosphorrecycling, Erkenntnisse aus Forschung und Praxis,“ REMONDIS Aqua GmbH & Co. KG, Stuttgart, 2015.
- [39] J. Lehmkuhl und M. Lebek, „Verfahren zur Behandlung von phosphathaltigen Feststoffen durch nasschemischen Aufschluss zur Gewinnung von Aluminium-, Kalzium-, Phosphor- und Stickstoffverbindungen“. Deutschland Patent DE102013018652 A1, 7 Mai 2015.
- [40] Y.Nawa, Unikita Ltd. Environment & Engineering Div., „P-recovery in Japan - the PHOSNIX process,“ in *BALTIC 21 - Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice*, Berlin, 2009.

- [41] M. Remy, W. Driessen, T. Hendrickx und R. Haarhuis, „Recovery of phosphorus by formation of struvite with the PHOSPAQ™ process,“ in *18th European Biosolids and Organic Resources Conference*, 2013.
- [42] „PHOSPAQ™,“ PAQUES, [Online]. Available: [www.de.paques.nl/produkte/other/phospaq](http://www.de.paques.nl/produkte/other/phospaq). [Zugriff am 28 Juli 2015].
- [43] S. W. E. Kaschka, Phostrip Handbook, PHOSTRIP ABWASSERTECHNIK GmbH, 1999.
- [44] TerraNova energy, „TerraNova energy: Verfahren,“ [Online]. Available: [www.s232856347.online.de/pdf/TerraNova-Ultra-Verfahren-Beschreibung.pdf](http://www.s232856347.online.de/pdf/TerraNova-Ultra-Verfahren-Beschreibung.pdf). [Zugriff am 30 Juli 2015].
- [45] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse - P-RoC,“ in *Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser - Teilberichte*, Wien, BMLFUW, 2014.
- [46] E. W. C. K. J. I. Sebastian Hellmann, „Verbundprojekt RECYPHOS: Recycling von Phosphor - Beitrag zur Nachhaltigkeit in der dezentralen Abwasserbehandlung,“ in *Gewässerschutz - Wasser - Abwasser*, Aachen, 2011.
- [47] B. Wiechman, C. Dienemann, C. Kabbe, S. Brandt und I. Vogel, „Klärschlammensorgung in der Bundesrepublik Deutschland,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2012.
- [48] Remondis Aqua, M. Lebek und S. Lohmar, „Nährstoffrückgewinnung in der Lebensmittelverarbeitung - Das REPHOS® Verfahren,“ in *Phosphorrückgewinnung – Aktueller Stand von Technologien-Einsatzmöglichkeiten und Kosten*, Bonn, 2013.
- [49] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse - REM-NUT®,“ in *Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser - Teilberichte*, Wien, BMLFUW, 2014.
- [50] C. Sartorius, „Technologievorausschau und Zukunftschancen durch die Entwicklung von Phosphorrecyclingtechnologien in Deutschland,“ in *Gewässerschutz - Wasser - Abwasser*, Aachen, 2011.
- [51] R. Lindner, O. Hofer, R. Fehrer und K. Brier, „Grüner Bericht 2013,“ Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2013.
- [52] „Kemira KemiCond® - Superior sludge conditioning,“ Kemira Oyi, Helsinki.
- [53] CAMBI GROUP AS, „Cambi: Products: CambiTHP®,“ [Online]. Available: [www.cambi.com/Products/CambiTHP](http://www.cambi.com/Products/CambiTHP). [Zugriff am 05 August 2015].
- [54] „AVA-CO2: Lösungen: AVA cleanphos,“ 2015. [Online]. Available: [www.ava-co2.com/web/pages/de/loesungen/ava-cleanphos.php](http://www.ava-co2.com/web/pages/de/loesungen/ava-cleanphos.php). [Zugriff am 04 August 2015].
- [55] „TerraNova energy: Verfahren,“ [Online]. Available: [www.terranova-energy.com/blog/project/verfahren/](http://www.terranova-energy.com/blog/project/verfahren/). [Zugriff am 04 August 2015].

- [56] „TerraNova energy: Vorteile: Umweltschutz: „Wachstumstests mit TerraNova® Ultra Flüssigdünger zeigten bessere Resultate als kommerzieller Flüssigdünger“,“ [Online]. Available: [www./s232856347.online.de/pdf/Ergebnisse-Wachstumstest-mit-Tomate-und-Weizen.pdf](http://www.s232856347.online.de/pdf/Ergebnisse-Wachstumstest-mit-Tomate-und-Weizen.pdf). [Zugriff am 04 August 2015].
- [57] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse - DHV Crystalactor®,“ in *Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser - Teilberichte*, Wien, BMLFUW, 2014.
- [58] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Vergleich von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm,“ Wien, Springer-Verlag, 2013.
- [59] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse - OSTARA® PEARL® Prozess,“ in *Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser - Teilberichte*, Wien, BMLFUW, 2014.
- [60] L. Egle, H. Rechberger und M. Zessner, „Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse - PASCH,“ in *Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser - Teilberichte*, Wien, BMLFUW, 2014.
- [61] „Lexikon der Geowissenschaften,“ Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2000. [Online]. Available: <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/bauwuerdigkeit/1490>. [Zugriff am 14 Juli 2015].
- [62] C. Waida, „Themenpapier P-Recycling, Düngemittel mit Recycling-P,“ Köln-Gremberghoven, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 2013.
- [63] W. Ewert, O. Hermanussen, C. Kabbe, C.Mêlè, C. Niewersch, H. Paillard, E. Stössel und A. Wagenbach, „Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency - Comparison of sludge related processes,“ P-REX, 2014.
- [64] P-REX, „Struvia™ - Struvite Crystallisation in sludge liquor,“ 2015.
- [65] M. L. Josef Lehmkuhl, „Einstufiges Verfahren in einem Reaktor zur Umwandlung von Aluminiumphosphat in Kalziumphosphat“. Deutschland Patent DE 102012015065 B3, 18 Juli 2013.
- [66] M. Bahdir, H. Parlar und M. Spitteller, Springer Umweltlexikon, Springer-Verlag, 2013.
- [6 „Klärschlamm als Ressource,“ ÖWAV, 2014.  
8]