

## Methoden und Verfahren der Klärschlammbehandlung

Christoph Ponak, Stefan Windisch, Harald Raupenstrauch und Andreas Schönberg

1.	Überblick über die Verfahren der Klärschlammbehandlung.....	670
1.1.	Klärschlammvererdung.....	670
1.2.	Thermische Trocknung .....	671
1.3.	Thermische Verwertung.....	671
2.	Situation in der DACH-Region.....	672
3.	Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen .....	673
4.	Beurteilung von Phosphorrückgewinnungsverfahren nach rechtlichen und anwendungsspezifischen Gesichtspunkten .....	674
4.1.	P-bac-Verfahren .....	676
4.2.	RecoPhos.....	676
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	677
6.	Literatur.....	677

Die Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abfällen, Abwässern und Nebenprodukten im Sinne der Umwelt- und Ressourcenschonung gewinnt mehr und mehr an Bedeutung. Besonders dann, wenn es sich um kritische Rohstoffe wie zum Beispiel Phosphor handelt, ist ein bewusster Umgang mit der Ressource unumgänglich. Da Phosphor, der besonders in der Düngemittelindustrie bzw. in der Nahrungsmittelproduktion eingesetzt wird, nicht ersetzt werden kann, ist die Rückgewinnung von Phosphor mittlerweile auch gesetzlich geregelt. Die Europäische Union ist vollkommen von Importen abhängig und diese stammen aus politisch oder arbeitsrechtlich nicht mittel- und langfristig sicheren Ländern – vor allem aus dem umstritten von Marokko annektierten Gebiet der Westsahara. Nicht zuletzt dadurch entsteht für alle Stakeholder ein immer größerer Druck aktiv zu werden und den Phosphorkreislauf durch entsprechende Rückgewinnungsverfahren zu schließen. [14]

Der bei der Behandlung von kommunalen Abwässern entstehende Klärschlamm erzeugt alleine in Deutschland eine Phosphorfracht von 61.000 Tonnen pro Jahr und steht auch aufgrund seiner Konzentration in den Schlämmen im Fokus des Phosphorrecyclings. Zählt man auch tierische Nebenprodukte und Gülle zum theoretisch verfügbaren Sekundärphosphor, ergibt sich für Deutschland ein Potential von etwa 250.000 Tonnen bei einem Bedarf von jährlich knapp über 500.000 Tonnen Phosphor. [10, 15]

Dieser Beitrag setzt sich mit den aktuellen Verfahren der Klärschlammaufbereitung und -verwertung auseinander und behandelt die Frage, wie neue rechtliche Rahmenbedingungen und die verpflichtende Phosphorrückgewinnung die Klärschlammbehandlung der Zukunft mitgestalten.

## 1. Überblick über die Verfahren der Klärschlammbehandlung

In Abwasserbehandlungsanlagen reichert sich der im Prozesswasser gelöste Phosphor teilweise im Klärschlamm an. Letztlich findet sich beinahe der gesamte ausgefällte und abgeschiedene Phosphor in diesem Klärschlamm wieder. Um den Volumenstrom an Klärschlamm zu verringern, geht der Verwertung üblicherweise eine Entwässerung voran, wobei 55 bis 80 Prozent des Wassers abgetrennt werden. Der im abgeführten Schlammwasser gelöste Phosphor (als Orthophosphat) lässt sich mit gängigen Rückgewinnungsverfahren – Fällung und Kristallisation durch Additive wie Magnesiumsalze – relativ leicht abscheiden. Damit sind Rückgewinnungsquoten von 5 bis 30 Prozent bezogen auf den Kläranlagenzulauf möglich. [10]

Rückgewinnungspotentiale von 50 Prozent und mehr lassen sich nur erreichen, wenn auch auf den Phosphor im entwässerten Klärschlamm zugegriffen wird. Im Gegensatz zum gelösten Orthophosphat im Schlammwasser liegt der Phosphor im entwässerten Klärschlamm biologisch und chemisch gebunden vor. Eine geeignete Behandlung ist daher nötig um den Phosphor aus der Schlammmatrix zu lösen. Dafür stehen im Wesentlichen chemische (z.B. mit Schwefelsäure) und thermische bzw. metallurgische Verfahren zur Verfügung. Organische Schadstoffe werden bei diesen Behandlungen in der Regel zerstört, weshalb von einem sauberen Rezyklat ausgegangen werden kann. Das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Zulauf nimmt dabei Werte von 50 bis 80 Prozent an, wobei mit steigenden Rückgewinnungsquoten natürlich auch mit höherem technischen und wirtschaftlichen Aufwand zu rechnen ist. [10]

### 1.1. Klärschlammvererdung

Eine Alternative zur konventionellen Klärschlamm-entwässerung – mechanisch mit Pressen und Zentrifugen – ist die Klärschlammvererdung. Sie stellt ein Verfahren dar, bei welchem flüssiger Klärschlamm in bepflanzten, abgedichteten Beeten eingebracht wird. Die Entwässerung wird zum einen durch Schwerkraft und zum anderen durch die Verdunstungsleistung der Pflanzen bestimmt. Durch Mikroorganismen und Bakterien findet neben der Entwässerung auch eine Zersetzung organischer Anteile der Klärschlamm-trockenmasse statt. Unter Klärschlamm-erde versteht man das Endprodukt der Klärschlammvererdung, welches nach wie vor rechtlich mit Klärschlamm gleichgestellt ist und daher auch der Klärschlammverordnung unterliegt. Anwendung findet dieses Verfahren hauptsächlich als günstigere Alternative zur konventionellen Entwässerung für kleine und mittlere Anlagen. [2]

## 1.2. Thermische Trocknung

Den nächsten Schritt in der Klärschlammaufbereitung stellt die Trocknung des entwässerten Klärschlammes dar. Dieser Schritt kann entweder in einer separaten Trocknungseinheit oder unmittelbar vor der thermischen Verwertung erfolgen. Durch die Trocknung sollen die kalorischen Eigenschaften des Klärschlammes verbessert werden, um den Einsatz als Brennstoff in Mono- oder Mitverbrennungsanlagen energieeffizienter gestalten zu können. Das Produkt aus der Trocknung kann zum Beispiel als Klärschlammgranulat anfallen. Bild 1 zählt einige Vorteile dieses Granulats im Vergleich zum entwässerten Klärschlamm auf. [9]

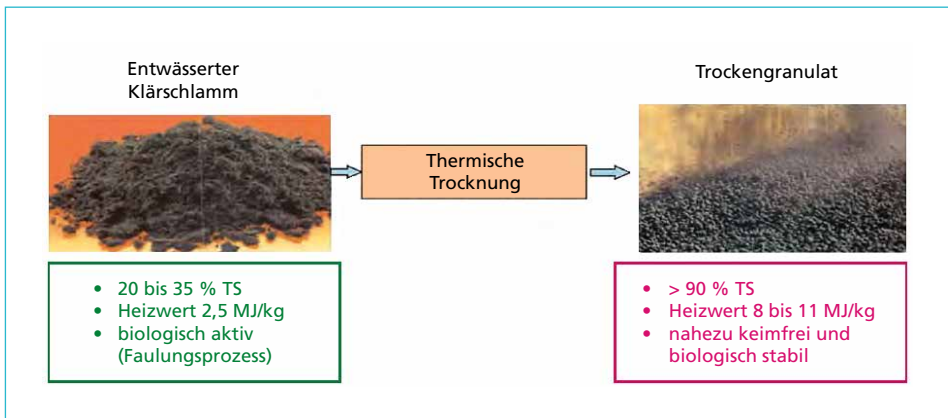


Bild 1: Entwässertem und getrocknetem Klärschlamm

Quelle: Geyer, J.: Klärschlamm-trocknung in Deutschland – Stand und Perspektiven. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrg.): Energie aus Abfall. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, Seite 928-948

Problematisch an der thermischen Trocknung als Aufbereitungsschritt ist die große Energiemenge die dafür aufgewendet werden muss. Ist es jedoch möglich, die benötigte Energie durch intelligente Energieverbunde bereitzustellen, so lässt sich durch den Einsatz konventioneller thermischer Trocknung ein umweltfreundlicher Energieträger gewinnen. [9] Ein mittlerweile mehrfach angewandtes Verfahren ist die solare Klärschlamm-trocknung. Hierbei wird der Klärschlamm auf einer großen Fläche ausgebracht und wie in einem Glashaus überdacht. Durch einen erzwungenen Luftstrom und geeignete Luftführung sowie die Umwälzung des Klärschlammes wird dieser getrocknet und nach entsprechender Zeit entfernt. Der einzige maßgebliche Nachteil des Verfahrens ist der große Flächen- und Zeitbedarf. [9]

## 1.3. Thermische Verwertung

Für die thermische Verwertung von entwässertem und getrocknetem Klärschlamm kommen mehrere Anwendungsmöglichkeiten in Frage. In Monoverbrennungsanlagen wird der Klärschlamm zur Energiegewinnung als Rohstoff eingesetzt. Am häufigsten

findet dabei die stationäre Wirbelschicht Anwendung, es können aber auch Etagenöfen, Etagenwirbler oder Rostfeuerungen verwendet werden. Nach der thermischen Verwertung bleibt Klärschlammasche mit einem  $P_2O_5$ -Gehalt von bis zu 23 Prozent zurück. Will man die Ressourceneffizienz weiter steigern, so muss im Anschluss an die thermische Verwertung in einer Monoverbrennungsanlage eine stoffliche Verwertung dieser Asche erfolgen. Ein anderes Beispiel für die thermische Verwertung ist die Mitverbrennung von Klärschlamm in der Zementindustrie, in Abfallverbrennungsanlagen oder in Kraftwerken, wo er als Ersatzbrennstoff eingesetzt wird und Primärenergieträger substituiert. Alternative thermische Verfahren sind die Vergasung des Klärschlammes in einem Festbett oder die Pyrolyse in einem Drehrohr oder Schneckenreaktor. [13, 18]

Neben der thermischen Verwertung gibt es auch Ansätze zur stofflichen Verwertung von Klärschlamm. Diese beschränken sich im Wesentlichen auf die Verwendung im Landschaftsbau und auf die Nutzung in der Landwirtschaft. Im Jahr 2015 wurden in Deutschland etwa 1,80 Millionen Tonnen Klärschlamm entsorgt. [1]

## 2. Situation in der DACH-Region

Die aktuelle Lage in der Klärschlammbehandlung unterscheidet sich in der Dach-Region (Deutschland, Österreich, Schweiz) durchaus maßgeblich. In Österreich werden Klärschlämme zurzeit zu etwa 50 Prozent thermisch verwertet. Der Anteil, der in der Landwirtschaft ausgebracht wird, ist mit knapp 20 Prozent sehr gering, da sich auch andere Verwertungsmöglichkeiten wie die Kompostierung etabliert haben. [3]

Von dem thermisch verwerteten Anteil wird eine beachtliche Menge, nämlich knapp 70 Prozent, monoverbrannt. [6] Hier besteht ein erster großer Unterschied zu Deutschland (Situation in Bild 2 dargestellt [1]) und zur Schweiz (fast 100 Prozent thermische Verwertung), wo jeweils knapp unter 50 Prozent (D) bzw. knapp über 50 Prozent (CH) der thermisch verwerteten Klärschlämme in Kraftwerken, Müllverbrennungsanlagen oder Zementwerken mitverbrannt werden. [11, 14]

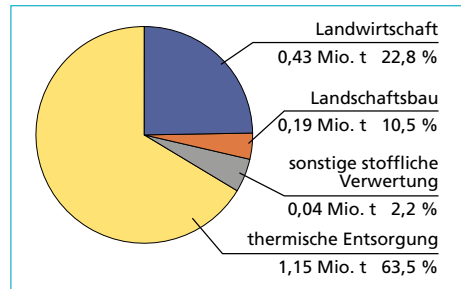


Bild 2: Verwertungssituation in Deutschland

nach Bergs, C.: Die neue Klärschlammverordnung (AbfKlärV) – Phosphorrecycling ante portas; 8. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung; Rotenburg a. d. Fulda; Oktober 2017

In der Schweiz gibt es zusätzlich seit 2006 eine Regelung, die es nicht erlaubt, Klärschlämme auf landwirtschaftlich genutzten Flächen auszubringen. Seit 2007 müssen neu gebaute Anlagen auch eine Phosphorrückgewinnung ermöglichen und seit 2016 gilt eine zehnjährige Übergangsfrist für die verbindliche Rückgewinnung von Phosphor aus phosphorreichen Abfällen. [15]

In Deutschland sind entsprechende Vorschriften 2017 in Kraft getreten. Je nach Größe von Kläranlagen gelten gewisse Übergangsfristen, in denen Konzepte für Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung vorgeschlagen und umgesetzt werden müssen bzw. die *bodenbezogene* Verwertung noch zulässig ist. Der nächste Schritt werden europaweite Regelungen wie die EU-Düngemittelverordnung und Ergebnisse der Strubias-Arbeitsgruppe sein, welche den Markteintritt von Struvit, pyrolyse- und aschebasierten Produkten ermöglichen will. [1, 15]

Diese Regelungen verursachen momentan einen Trend in Richtung Monoverbrennung und Mitverbrennung und damit einen erneuten Bedeutungszuwachs von Trocknungsmethoden und -anlagen. Damit werden auch die Verfahren zur Phosphorrückgewinnung die bei der Asche ansetzen an Bedeutung gewinnen.

### 3. Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen

Bereits seit Juni 2005 ist die Deponierung von Klärschlamm in Deutschland nur noch nach mechanisch-biologischer oder thermischer Behandlung erlaubt. Für die stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft gelten die Klärschlammverordnung und das Düngerecht, welche vor allem die Grenzwerte für die Belastung des Klärschlammes regeln. Durch diese auf dem Wasser- und Chemikalienrecht basierenden Regeln konnte der Schadstoffgehalt im Klärschlamm um bis zu 90 Prozent reduziert werden. Seit 26. Mai 2014 ist Phosphor in der, für die Umsetzung der Rohstoffinitiative von der EU erstellten, Liste kritischer Rohstoffe enthalten. Um die Ressourcenschonung zu erhöhen und den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor vermehrt in den Wirtschaftskreislauf zurückzuführen, sowie den Schadstoffeintrag in den Boden weiter einzuschränken, ist am 03. Oktober 2017 in Deutschland die Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung in Kraft getreten. [4]

Die neue Verordnung zur Klärschlammverwertung ist in acht Artikel aufgebaut:

- Artikel 1: Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV),
- Artikel 2: Änderung der Deponieverordnung,
- Artikel 3: Folgeänderungen,
- Artikel 4: Änderung der Klärschlammverordnung,
- Artikel 5 - 6: Weitere Änderung der Klärschlammverordnung,
- Artikel 7: Bekanntmachungserlaubnis,
- Artikel 8: Inkrafttreten, Außerkrafttreten [4].

Wie schon zuvor regelt auch die neue Verordnung die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm und fügt neue Regeln, zum Beispiel zum Landschaftsbau oder das Verbot der Aufbringung von Klärschlamm mit Abwasser aus der Kartoffelverarbeitung, hinzu.

Zusätzlich wurden Pflichten zum Phosphorrecycling definiert. So ist die Phosphorrückgewinnung bei Phosphorgehalten von über 20 g/kg Trockensubstanz Klärschlamm und für Anlagen mit einer Ausbaugröße von über 100.000 bzw. 50.000 Einwohnergleichwerten nach Ende einer Übergangsfrist unbedingt erforderlich. Die Konsequenzen für Behandlungsanlagen unterschiedlicher Ausbaugrößen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. [1, 4, 15]

Tabelle 1: Übergangsfristen für die Phosphorrückgewinnung

Zulässige Entsorgungsvariante	Ausbaugröße	Ausbaugröße	Ausbaugröße
	≤ 50.000 EW	> 50.000 EW ≤ 100.000 EW	> 100.000 EW
Bodenbezogene Verwertung	- Unbefristet zulässig	- Noch 15 Jahre (nach Inkrafttreten) zulässig	- Noch 12 Jahre (nach Inkrafttreten) zulässig
Mitverbrennung – Pflicht zum P-Recycling (MAP-Fällung); ggf. MBA-Behandlung	- MAP-Fällung nicht erforderlich (freiwillig möglich)	P-Gehalt (Schlamm) < 20 g: MAP-Fällung nicht erforderlich <b>P-Gehalt &gt; 20 g: MAP-Fällung spätestens 15 Jahre (nach Inkrafttr.)</b>	P-Gehalt (Schlamm) < 20 g: MAP-Fällung nicht erforderlich <b>P-Gehalt &gt; 20 g: MAP-Fällung spätestens 12 Jahre (nach Inkrafttr.)</b>
Monoverbrennung mit P-Recycling/Aschelagerung	- Nicht erforderlich (freiwillig möglich)	Alternativ zu Mitverbrennung spätestens <b>nach 15 Jahren Pflicht zu P-Rückgew./Aschelagerung bei P-Gehalt ab 20 g</b>	Alternativ zu Mitverbrennung spätestens <b>nach 12 Jahren Pflicht zu P-Rückgew./Aschelagerung bei P-Gehalt ab 20 g</b>

Quelle: Bergs, C.: Die neue Klärschlammverordnung (AbfKlärV) – Phosphorrecycling ante ortas; 8. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung; Rotenburg a.d. Fulda; Oktober 2017

Das bedeutet, dass nach der Übergangsfrist von 12 bzw. 15 Jahren die bodenbezogene Verwertung nur noch für Behandlungsanlagen kleiner 50.000 EW zulässig ist. Zum Vergleich ist in der Schweiz bereits seit 2006 die Ausbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen untersagt und die Phosphorrückgewinnung aus phosphorreichen Abfällen mit einer Übergangsfrist von 10 Jahren vorgeschrieben. [1, 15]

#### 4. Beurteilung von Phosphorrückgewinnungsverfahren nach rechtlichen und anwendungsspezifischen Gesichtspunkten

Aufgrund dieser sich ändernden Rahmenbedingungen besteht hinsichtlich der Rückgewinnung von Phosphor großer Handlungsbedarf. Der Druck, der durch die gesetzliche Verpflichtung zum Phosphorrecycling entsteht, führte in den letzten Jahren zum Aufkommen von über 50 in der Literatur beschriebenen Verfahren. Mittlerweile reichen deren Reifegrade von verworfenen Ideen bis hin zu großtechnischem Einsatz. [15] In weiterer Folge soll ein Überblick über zwei ausgewählte Verfahren gegeben werden. Da eine allgemeine Übersicht allerdings bereits vielfach in der Literatur zu finden ist, sollen die Verfahren zusätzlich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten bewertet werden:

Anwendungsumgebung: Wesentlich ist die Feststellung, dass es kein *bestes* Verfahren zur Phosphorrückgewinnung gibt. Zwar bemühen sich zahlreiche Bewerber mit unterschiedlichen Verfahren um einen Eintritt in den gerade entstehenden Markt, allerdings

kann es als Ergebnis dieses Wettstreits keinen Gewinner im eigentlichen Sinne geben. Das Spektrum der Systeme, in denen Klärschlamm auftritt, reicht von den Abwasserreinigungsanlagen selbst über die Behandlung von entwässertem Schlamm bis hin zur Asche aus der Mono- bzw. Mitverbrennung. Das System Zementwerk weist für ein Rückgewinnungsverfahren definitiv andere Synergiepotentiale (z.B. vorhandene Energieströme, Brennstoffe, usw.) und Herausforderungen auf als eine kommunale Kläranlage.

Produktqualität: Die Rückgewinnung von Phosphor ist ein wichtiges Thema geworden, weil Europa ausschließlich von Importen des Rohstoffes abhängt. Dieser politische bzw. wirtschaftliche Druck existiert allerdings neben dem bedeutenden Aspekt des Kreislaufwirtschaft-Gedankens. Um den Phosphorkreislauf zu schließen, muss die Produktqualität aller vorgeschlagener Verfahren neben rechtlichen Anforderungen auch anwendungsbezogene Kriterien (Stichwort Pflanzenverfügbarkeit) erfüllen. Hier spielt REACH eine bedeutende Rolle. Wenn ein Verfahren Produkte hervorbringt, die zum überwiegenden Teil nicht-mineralische Bestandteile enthalten, und, die in dieser Form noch nicht existieren, kommt REACH zur Anwendung und stellt eine riesige organisatorische Herausforderung dar. [7]

Bild 3 ist angelehnt an eine von der Deutschen Phosphorplattform (DPP) erstellten Übersicht über die meisten der bestehenden Verfahren. Als bei der DPP nicht aufscheinendes Verfahren, das an Relevanz gewinnt, ist das P-bac-Verfahren zu nennen. [15]

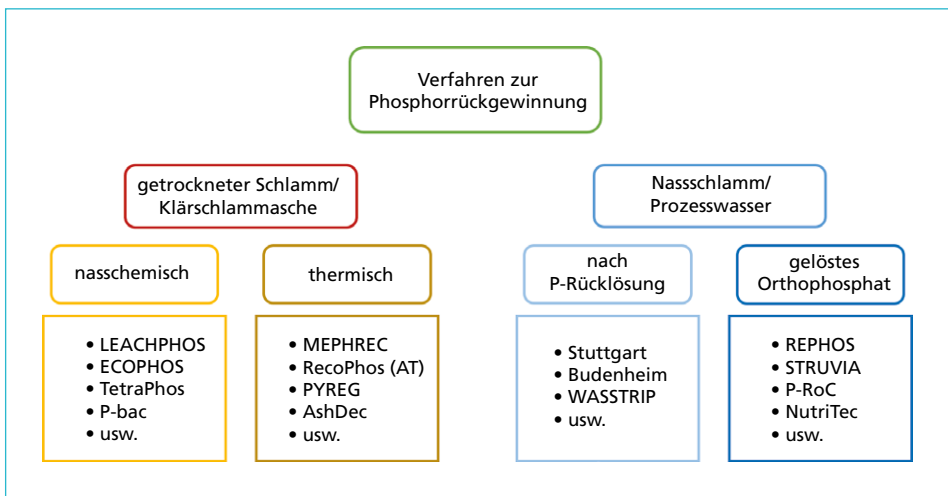


Bild 3: Einteilung von Phosphorrückgewinnungsverfahren

Nach: Schnee, R.: Phosphor-Recycling: Utopie oder realistischer Ansatz; 8. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung, Rotenburg an der Fulda, Oktober 2017

Es ist anzumerken, dass die mineraldünger- bzw. P-schlackenerzeugenden Verfahren auf das Problem eines REACH-Prozesses stoßen können. Ebenso werden die struvitproduzierenden Ansätze, die bereits großtechnisch eingesetzt werden, hier nicht näher

beleuchtet. Aus dem Bereich der Prozesse, die Phosphorsäure erzeugen, sollen aus dem nasschemischen Bereich das P-bac-Verfahren aufgrund seines Innovationsgrades und des noch geringeren Bekanntheitsgrades und auf der thermischen Schiene das RecoPhos-Verfahren – nicht zu verwechseln mit dem bereits am Markt erhältlichen Produkt RecoPhos und dem Verfahren aus Deutschland – näher beschrieben werden. Die letztere Auswahl baut auf die Bewertung in Schönberg 2018 [17] auf, die ihrerseits wieder auf Daten von der Ernst Basler + Partner AG 2017 [8] basiert. In seiner Kategorie ist das ausgewählte Verfahren dasjenige, das am besten abschneidet. Hier ist anzumerken, dass das an der Montanuniversität Leoben am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik im Rahmen des EU-Projektes RecoPhos – Recovery of Phosphorus from Sewage Sludge and Sewage Sludge Ashes with the thermo-reductive RecoPhos-Process, gefördert unter FP7 – Environment, ECO-Innovation zwischen 2012 und 2015 [5] – entwickelte Verfahren auf die Erzeugung von Phosphorsäure abzielt. Die allgemein als *Königsweg* betitelte  $P_4$ -Erzeugung ist damit bei unterschiedlicher Verfahrensführung zwar möglich, stellt aber sicherheitstechnisch und durch den Einsatz des Produkts in der Rüstungsindustrie Herausforderungen anderer Art dar. [15]

#### 4.1. P-bac-Verfahren

Beim P-bac-Verfahren der Firma Fritzmeier Umwelttechnik werden Klärschlammaschen behandelt. Das Ziel ist neben der Phosphatproduktion die Abreicherung von Schwermetallen.

Es handelt sich um ein nasschemisches Verfahren, bei dem eine spezielle Auswahl an Mikroorganismen für ein Bioleaching genutzt wird. Phosphor und Schwermetalle gehen bei der ersten Laugung in Lösung und die restliche Asche wird von der Flüssigkeit abgetrennt. Danach wird Phosphor selektiv rückgewonnen, indem erneut Mikrobiologie gezielt eingesetzt wird. Das Phosphorprodukt, ein Phosphat, wird abgetrennt und erst danach werden die Schwermetalle aus der Lösung entfernt.

Besondere Kennzeichen des Verfahrens sind die mikrobielle Produktion der Säure, die für die Laugung hergestellt wird. Es ist eine Kreislaufführung des Prozesswassers möglich und der Energiebedarf ist als gering anzusehen. Offene Fragen sind noch die Entsorgung der restlichen Klärschlamm-Asche (schwermetall- und phosphorarm), die rechtliche Lage um das Phosphatprodukt und die Pflanzenverfügbarkeit des entstehenden Düngers sowie die Wertschöpfung aus der Schwermetallfraktion. [12]

#### 4.2. RecoPhos

Das RecoPhos-Verfahren dient zur Aufbereitung von Klärschlammaschen und auch von entwässertem/getrocknetem Klärschlamm. Das Prinzip folgt dem Zero-Waste-Ansatz. Alle Produktströme sollen einer weiteren Verwendung zugeführt werden.

Bei dem Verfahren wird eine Schüttung aus Graphitwürfeln induktiv auf 1.600 °C erwärmt. Die aufgegebenen Aschen schmelzen im Eintrittsbereich des aufgebauten Reaktors und bilden einen Schmelzfilm aus, in welchem die entsprechenden Reduktionsreaktionen erfolgen. Einerseits werden die in der Asche enthaltenen Phosphate zu



reinem, elementarem Phosphor reduziert, andererseits können auch die Metalloxide (vorwiegend Eisenoxide) zu den reinen Metallen umgesetzt werden. Der Schmelzfilm hat den Vorteil geringer Stofftransportwege und der induktive Wärmeeintrag ermöglicht einen gleichmäßigen Wärmeeintrag über die komplette Querschnittsfläche der Schüttung.

Der Phosphor wird nachverbrannt und hydrolysiert, sodass Phosphorsäure entsteht, die bei jeder gewünschten Konzentration abgezogen werden kann. Restschlacke und Metallfraktion verlassen den Reaktor bodenseitig und können als Baustoff bzw. im Hüttenwerk eingesetzt werden. Das Verfahren wird im Pilotmaßstab in Leoben betrieben und weiterentwickelt.

Aufgrund der hohen Temperaturen, bei denen die Reaktionen stattfinden, ist eine Einbindung in eine Mitverbrennungsanlage oder eine Kombination mit einer Monoverbrennung hier als sinnvoll zu erachten. Vorhandene Energieströme können z.B. eine Vorwärmung ermöglichen und dadurch den notwendigen Energieeintrag für die Induktion erheblich senken. [16]

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend kann gesagt werden, dass die sich ändernden gesetzlichen Rahmenbedingungen einen Druck erzeugen, der die Rohstoffsicherheit der Europäischen Union langfristig verbessern kann. Die Wege der Klärschlammbehandlung werden dadurch maßgeblich beeinflusst und die Anzahl der entwickelten Verfahrensansätze, die es ermöglichen sollen, diesem Druck standzuhalten, ist enorm groß.

Alleine auf der Seite der thermischen Verwertung von Klärschlamm ist der Trend hin zum Ausbau der Infrastruktur an Monoverbrennungsanlagen bei gleichzeitigem Herunterfahren von Kraftwerken und damit der Verminderung von Mitverbrennungskapazitäten ein Indiz für die Komplexität dieses Marktes. Es wird sich daher zeigen, dass es kein *richtiges* oder *bestes* Verfahren zur Phosphorrückgewinnung gibt. Je nach bestehender regionaler Infrastruktur bzw. Möglichkeit zur Nutzung von Synergien wird ein entsprechendes Verfahren zur effizienten Rückgewinnung von Phosphor sinnvoll sein.

Den gesetzlichen Rahmenbedingungen muss allerdings in jedem Fall entsprochen werden. Deshalb ist der Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei fast allen Verfahren noch entsprechend hoch und der Wettbewerb um einen Markteintritt ist bereits voll im Gange.

## 6. Literatur

- [1] Bergs, C.: Die neue Klärschlammverordnung (AbfKlärV) – Phosphorrecycling ante portas; 8. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung; Rotenburg a. d. Fulda; Oktober 2017
- [2] Bester, K.; Chen, X.; Pauly, U.; Rehfus, S.: Abbau von organischen Schadstoffen bei der Klärschlammbehandlung in Pflanzenbeeten. In: Zeitschrift der DWA (Hg.) 2011 – KA Korrespondenz Abwasser Abfall; 2011; Hennef; Heft 11; S. 1050

- [3] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 Teil 1. Entwurf; Wien; 2017
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung, Bundesgesetzblatt 2017 Teil 1 Nr. 65; unter [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBL&jumpTo=bgbg117s3465.pdf#\\_bgbl\\_\\_%2F%2F%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl117s3465.pdf%27%5D\\_\\_1509373213988](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbg117s3465.pdf#_bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl117s3465.pdf%27%5D__1509373213988) zuletzt aufgerufen am 06.11.2017
- [5] CORDIS-Website der Europäischen Kommission; RecoPhos – Recovery of Phosphours from Sewage Sludge and Sewage Sludge Ashes with the thermo-reductive RecoPhos-Process; unter [http://cordis.europa.eu/project/rcn/102600\\_de.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/102600_de.html) zuletzt aufgerufen am 08.11.2017
- [6] Egle, L.; Rechberger, H.; Zessner M.; Endbericht Phosphorbilanz Österreich. Grundlage für ein nachhaltiges Phosphormanagement – gegenwärtige Situation und zukünftige Entwicklung; für das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Wien; 2014
- [7] Ehbrecht, A.: Randbedingungen für Phosphorrückgewinnung in Deutschland am Beispiel des P-RoC-Verfahrens; 8. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung; Rotenburg an der Fulda; Oktober 2017
- [8] Ernst Basler + Partner AG: Beurteilung von Technologien zur Phosphorrückgewinnung, Gesamtheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit von P-Rückgewinnungstechnologien im Schweizer Kontext; Zollikon; 2017
- [9] Geyer, J.: Klärschlamm-trocknung in Deutschland – Stand und Perspektiven. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrg.): Energie aus Abfall. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, Seite 928-948
- [10] LAGA Ad-hoc-AG; Ressourcenschonung durch Phosphorrückgewinnung, Abschlussbericht, 2015
- [11] Lehrmann, F.: Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung – Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrg.): Energie aus Abfall. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, Seite 901-926
- [12] Lewandowski, B.: Das P-bac-Verfahren auf dem Weg zu einem langzeitverfügbaren Düngemittel; 8. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung, Rotenburg an der Fulda, 2017
- [13] Scheidig, K.; Lehrmann, F.; Mallon, J.; Schaaf, M.: Klärschlamm-Monoverbrennung mit integriertem Phosphor-Recycling. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrg.): Energie aus Abfall. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, Seite 1040-1046
- [14] Schenk, K.; Phosphorrecycling: Wo steht die Schweiz?; DPP-Forum, Berlin, September 2017
- [15] Schnee, R.: Phosphor-Recycling: Utopie oder realistischer Ansatz; 8. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung, Rotenburg an der Fulda, Oktober 2017
- [16] Schönberg, A.; Raupenstrauch, H.: Vom Klärschlamm zu Phosphor – die Zukunft der Verwertung von Klärschlamm; Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, Jänner 2015
- [17] Schönberg A.; Raupenstrauch H.; Ponak C.: Verfahren und Produkte der Phosphor-Rückgewinnung, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, Jänner 2018
- [18] Quicker, P.; Horst, T.: Thermische Verwertung von Klärschlamm in Mono- und Mitverbrennungsanlagen; 8. VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung, Rotenburg an der Fulda, Oktober 2017