

Phosphor-Rückgewinnung – Aktuelle Entwicklungen in Deutschland

Heidrun Steinmetz, Kaiserslautern

1. Hintergrund

Phosphor, ein essentieller Stoff des Lebens und somit wichtiger Bestandteil von Düngemitteln, wird bislang fast ausschließlich durch Ausbeutung geogener Lagerstätten gewonnen, was zu erheblichen Umweltschäden führt. Weiterhin sinken die Phosphorkonzentrationen in den noch verfügbaren Phosphatgesteinen, während die Schadstoffgehalte wie Cadmium und Uran steigen. Dies führt zu einer zunehmenden Verschmutzung der Umwelt beim Abbau der Gesteine und bei der Anwendung von Düngern.

Der überwiegende Anteil des Phosphats wird in der Landwirtschaft in Form von Dünge- und Futtermitteln verwendet. Ein kleinerer Anteil wird in Seifen und Detergenzien, Lebensmitteln und Getränken und in der Wasseraufbereitung eingesetzt. Mit Anstieg der Weltbevölkerung wird auch der Bedarf an Phosphor steigen. Die Rohphosphaterz-Reserven befinden sich jedoch in einigen wenigen Ländern wie Marokko, Algerien, Syrien, China, im Irak und in der Westsahara. Alleine in Marokko und der Westsahara lagern nach derzeitigem Kenntnisstand rund 70 % der globalen Reserven [USGS 2012]. Dies führt für Länder wie Deutschland, die über keine eigenen Phosphaterz-Reserven verfügen, zu wirtschaftlichen und handelspolitischen Abhängigkeiten.

Die EU-Kommission hat 2014 Phosphor als „kritischen Rohstoff“ eingeordnet [EU 2014].

Es gibt somit zahlreiche Gründe, nach Alternativen zur Phosphorgewinnung aus Phosphat-Erz zu suchen. Bei Betrachtung potenzieller Sekundärrohstoffe in Deutschland liegt das weitaus größte Potential im Abwasser und letztendlich, nach dem Reinigungsprozess mit gezielter Phosphorelimination, im Klärschlamm bzw. der Klärschlammmasche aus Monoverbrennungsanlagen.

Tabelle 1 verdeutlicht, dass Abwasser ein hohes Nährstoffpotenzial besitzt und durch die Implementierung von Rückgewinnungsverfahren in der Abwasserentsorgung Handelsdünger in Teilen ersetzen könnte. Rein rechnerisch ergibt sich ein Substitutionspotenzial von fast 65 % bezogen auf Phosphor. Da eine 100%ige Rückgewinnungsquote technisch nicht erreichbar ist, kann in Deutschland realistischer Weise von einem Substitutionspotenzial von ca. 30 bis maximal 50 % ausgegangen werden.

Tab. 1: Nährstoffgehalte in Handelsdünger und im Abwasser in Deutschland

	Phosphor (t/a)	Stickstoff (t/a)	Kalium (t/a)
Inlandsabsatz Handelsdünger (Mittel 2002 bis 2012) (Daten aus BMLEV, 2013)	270.000 (P ₂ O ₅) Ca. 118.000 (P)	1.700.000 (N)	418.000 (K ₂ O) Ca. 347.000 (K)
Gehalt im Abwasser (Summe Zulauf aller Kläranlagen in D)*	76.000 (P)	440.000 (N)	200.000 (K)

* Berechnung über 110 Mio. EW in Deutschland mit angenommenen 11 g N/(EW*d), 5 g K/(EW*d), 1,8 g P/(EW*d)

Bislang wird ein Teil des mit dem Abwasser auf die Kläranlagen gelangenden Phosphors über in der Landwirtschaft verwertete Schlämme dem Stoffkreislauf vermeintlich wieder zugeführt. Die direkte landwirtschaftliche Klärschlammasbringung ist jedoch umstritten, da der Klärschlamm eine Senke für die im Abwasser enthaltenen organischen und anorganischen Schadstoffe darstellt. Außerdem enthalten Klärschlämme meist Eisen- oder Aluminiumphosphate, die kaum pflanzenverfügbar sind und auf manchen Böden noch vorhandene Phosphorreserven an Eisen binden und somit der Aufnahme durch Pflanzen entziehen können. Römer (2013) hat in umfassenden Pflanzversuchen mit Eisenphosphat bzw. eisenphosphathaltigen Rezyklaten aufzeigen können, dass „Eisenfällungsprodukte eine völlig unakzeptable P-Düngerwirkung aufweisen“. Mit der anstehenden Novellierung der Klärschlammverordnung [BMUB 2015] wird daher ein zumindest teilweiser Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlamm Entsorgung bei gleichzeitiger Verpflichtung zur Rückgewinnung von Phosphor angestrebt (siehe Kapitel 3).

Um den Konflikt zwischen Schließung von Nähr- und damit auch Schadstoffkreisläufen bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlämmen sowie der Unterbrechung von Nährstoffkreisläufen bei der Verbrennung von Klärschlämmen zu umgehen, bedarf es der Implementierung von Methoden, bei denen Nährstoffe, und insbesondere den Phosphor, vor oder nach der Verbrennung aus dem Klärschlamm bzw. der Asche extrahiert werden oder Phosphor vorher bereits dem Abwasserpfad entzogen wird. Die Entwicklung entsprechender Verfahrenstechniken wurde in Deutschland über zahlreiche Forschungsprojekte gefördert, zu nennen sind hier gezielte Fördermaßnahmen des BMBF und des BMU (gemeinsame Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe - insbesondere Phosphor“ seit 2004), Projekte mit Förderung durch die DBU oder Umweltministerien der Länder (Beispiel Stuttgarter Verfahren in Baden-Württemberg). Auch EU-weit gab es geförderte Forschungsprojekte [z.B. P-Rex]. Somit gibt es inzwischen zahlreiche Verfahren und technische Ansätze zur Phosphorrückgewinnung, die vereinzelt großtechnisch umgesetzt wurden oder vor der

technischen Umsetzung stehen. Darüber hinaus werden zunehmend Projekte und Studien durchgeführt, die sich mit einem Technologievergleich und der Bewertung verschiedener Ansätze ebenso befassen wie mit Fragen der Produktqualität und Vermarktung [z.B. Egle et al. 2014; UBA 2015]. Regional werden Umsetzungsstrategien erarbeitet [z.B. Pinnekamp et al. 2016; Reinhardt et al. 2014; RLP 2016] wobei die Themen Phosphorrückgewinnung und Klärschlamm Entsorgungsstrategien eng verflochten sind.

Dies geht auch aus der Formulierung im Koalitionsvertrag von 2013 hervor, wo es erklärtes Ziel ist, die Klärschlammausbringung zu Dünge Zwecken zu beenden, aber Phosphor und andere Nährstoffe zurückzugewinnen [BRD 2013].

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wo wir heute stehen und welche weiteren Schritte für eine flächendeckende Implementierung der Phosphorrückgewinnung in der Siedlungswasserwirtschaft erforderlich sind. Dem wird in den folgenden Kapiteln nachgegangen.

2. Technische Aspekte

Weltweit werden derzeit zahlreiche Verfahren zur Phosphorrückgewinnung erforscht, die an verschiedenen Stellen im Behandlungsprozess ansetzen. Dies gilt auch für Deutschland, wo inzwischen halbertechnische Anlagen erprobt wurden oder in der Pilotierung bis hin zum großtechnischen Maßstab umgesetzt werden.

Dabei lässt sich Phosphor an verschiedenen Stellen rückgewinnen:

- Aus Teilströmen des kommunalen Abwassers nach Stoffstromtrennung (z. B. Urinseparation oder Schwarzwasserbehandlung)
- Innerhalb einer Kläranlage aus unterschiedlichen Wasser- oder Schlammströmen
- Nach/während einer thermischen Behandlung des Klärschlammes, ggf. außerhalb der Kläranlage

Die den Verfahren zugrunde liegenden Grundprinzipien können auf einige wenige zurückgeführt werden. Kristallisations- und Fällungsverfahren wurden bislang am häufigsten untersucht und umgesetzt (Bsp. AirPrex/Berliner-Verfahren, Ostara-PEARL Verfahren, Gifhorner Verfahren, Stuttgarter Verfahren; siehe Tabelle 2), Ionenaustauschverfahren [Bsp. Drenkova-Tuhtan et al. ,2015] spielen noch eine untergeordnete Rolle, ebenso wie elektrochemische Verfahren [Bsp. Bilbao und Egner, 2012; Hofmann und Homa, 2011]. Auch Verfahren zum Einsatz von Nanofiltrationsmembranen zur Abtrennung von Phosphor wurde im kleineren Maßstab vereinzelt untersucht [Bsp. Blöcher et al., 2011]. Bei Verfahren zur Rückgewinnung aus Feststoffen (Klärschlämme und Aschen) sind i. d. R. zusätzliche Verfahrensschritte zum Aufschluss der Phosphate erforderlich. Häufig werden hierzu saure Aufschlüsse aber auch thermische Aufschlussprozesse eingesetzt. Bei Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen von Monoverbrennungsanlagen ermöglicht letzteres

2. Kongress: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft -
am 26. und 27. Oktober 2016 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

die Kombination des Verbrennungsprozesses mit dem Aufschlussprozess, teilweise wird jedoch der Phosphor in nachgeschalteten Verfahren aus der Asche wieder aufgeschlossen.

Durch Modifikationen und Variationen bei der Anwendung sowie Nutzung unterschiedlicher Inputströme gibt es inzwischen über 50 verschiedene Verfahren, von denen einige einem Patentschutz unterliegen. Eine gute Verfahrensübersicht geben u.a. Egnér et al. (2014) sowie Pinnekamp et al. (2016).

Viele Verfahren verfolgen den Weg der Ressourcenrückgewinnung im strengeren Sinne, also eine gezielte Schadstoffentfrachtung bzw. eine Trennung des Wertstoffes Phosphor von Schadstoffen (siehe auch Kapitel 3). Teilweise werden verfahrensimmanent bestimmte Schadstoffe entfernt (z.B. organische Schadstoffe bei thermischen Verfahren) wohingegen andere Schadstoffe (z.B. Schwermetalle) nicht gezielt vom phosphorhaltigen Rezyklat abgetrennt werden (überwiegender Anteil der Aschen aus Monoverbrennung). Auch eine Vermischung z.B. von Aschen mit Phosphorsäure entspricht keiner Phosphorrückgewinnung, solange die Schwermetalle bei der Produktherstellung nicht gezielt entzogen werden. In diesem Kontext sind auch die Produkte aus Pyrolyseverfahren zu sehen, bei denen zwar ebenfalls die organischen Schadstoffe eliminiert und eine Hygienisierung erreicht wird, Schwermetalle (außer in Teilen leicht flüchtige) aber im Produkt verbleiben. Die Grenzen zwischen Rückgewinnung und Wiederverwendung sind somit fließend.

Der Entwicklungsstand und die Anwendungsreife der bislang entwickelten Verfahren sind sehr unterschiedlich. Manche Technologien wurden bislang nur im Labor- oder bestenfalls halbtechnischem Maßstab erprobt, manche nur unter sehr spezifischen Randbedingungen. Ein kleiner Teil ist inzwischen auf Kläranlagen z.B. im Rahmen von Pilotprojekten umgesetzt worden (Definition Pilotierung nach Egle et al. (2014): „Ein Verfahren wird im kleinen Maßstab umgesetzt, um Erkenntnisse aus dem Labormaßstab z.B. direkt auf der Kläranlage und im Dauerbetrieb sowie in Teilströmen zu gewinnen. Ziel ist ein kontinuierlicher und kontrollierter Betrieb sowie die Optimierung der Prozesse“). Umfassendste Erfahrungen aus dem großtechnischen Betrieb liegen u.a. in Berlin vor, wo das AirPrex/Berliner Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Prozesswasser bzw. im Klärschlamm mittels MAP fest in den Kläranlagenbetrieb integriert ist.

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über Verfahren, die in Deutschland bereits auf Kläranlagen zumindest im Teilstrom umgesetzt wurden bzw. sich aktuell in der Umsetzung befinden.

Derzeit ist eine Verschiebung von den bislang umgesetzten Verfahren zur Rückgewinnung aus Prozesswasser bzw. Schlamm aus Anlagen mit biologischer Phosphorelimination (z.B. Berliner Verfahren [Heinzmann und Lengemann 2014] bzw. Klärschlamm aus Anlagen mit chemischer Phosphatfällung (Stuttgarter Verfahren, modifiziertes Gifhorner-Verfahren) hin zu Klärschlammaschen oder thermischen Pyrolyseprozessen (z.B. Pyreg, MePhrec, Tetraphos) zu beobachten (siehe auch Tabelle 2).

Tab. 2: Anlagen in der Pilotierung bzw. der großtechnischen Umsetzung (nach Pollak und Greschonig, 2015; Egle et al., 2014; Pinnekamp et al., 2016, P-REX)

Ausgangsstoff: Prozesswasser und Klärschlamm			
Verfahren	Prozesse	Zielprodukt	Anlagenstandort und (geplanter) Betriebsbeginn
AirPrex/Berliner Verfahren	Fällung/ Kristallisation	MAP	KA Mönchengladbach-Neuwerk, 2009 KA Waßmannsdorf Berlin, 2011 KA Uelzen, 2014 BS Steinhof, 2015
FixPhos	Adsorption an CSH Kristallisation	P-haltiges CSH	KA Hildesheim, 2012
LysoPhos	Kristallisation	MAP	KA Lingen, 2015
PYREG	Pyrolyse	Phosphathaltiges Granulat	KA Linz-Unkel, 2015 KA Homburg, 2016
Stuttgarter Verfahren	Fällung/ Kristallisation	MAP (u.a.)	KA Offenburg, 2011 Mobile MSE-Anlage derzeit LFKW Stuttgart, 2016
MePhrec	Metallurgisch	P-haltige Schlacke	KA Nürnberg, 2016
Gifhorner Verfahren	Fällung/ Kristallisation	MAP	KA Gifhorn, 2007
P- Roc	Adsorption an CSH Kristallisation	P-haltiges CSH	KA Neuburg, 2016
Budenheimer Verfahren ExtraPhos	Fällung	Ca-Phosphat	KA Mainz, 2017 (mobile Anlage)
SolarMining (Thermo- System)	thermisch	Düngekohle oder mineralisches Produkt	KA Grünstadt, 2015
Ausgangsstoff: Klärschlammasche			
Tetraphos	Thermochemisch	Phosphorsäure	KA Hamburg, 2015

Insgesamt fokussiert die überwiegende Anzahl der Verfahren auf Prozesswasser, Klärschlamm oder Asche aus der Monoverbrennung als Ausgangsstoff der Rückgewinnung während Ansätze zur Rückgewinnung aus Abwasser oder Abwasserteilströmen (z.B. Schwarzwasser oder Urin) in Deutschland bislang nicht im Dauerbetrieb großtechnisch umgesetzt wurden.

Bisherige Ansätze zur Phosphorrückgewinnung orientieren sich weitgehend an den aktuellen Gegebenheiten der Abwasserreinigungs- und Klärschlammbehandlungsprozesse. Bestenfalls wird erwogen, den Reinigungsprozesses von chemischer Phosphorelimination auf biologische Phosphatelimination umzustellen, um so den P-Rückgewinnungsprozess zu vereinfachen. In wie weit sonstige Verfahrensumstellungen wie eine kombinierte Elimination und Rückgewinnung von Phosphor vorteilhaft sein könnten, ist bislang selten Gegenstand der Betrachtung und wird nur vereinzelt in Forschungsprojekten [z.B. Drenkova-Tuhtan et al. 2015] untersucht; der Weg zur großtechnischen Umsetzung ist noch nicht beschritten.

3. Rechtliche Aspekte

Einige Bundesländer, wie Baden-Württemberg, verfolgen seit längerem zum Schutz von Boden und Grundwasser den Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammausbringung. Im Jahre 2013 ist dieses Ziel im Koalitionsvertrag der 18. Legislaturperiode festgeschrieben worden [BRD 2013]. Um insbesondere den essentiellen Nährstoff Phosphor nutzen zu können, werden gleichzeitig Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung vorgesehen. Wörtlich heißt es im Koalitionsvertrag [BRD 2013]: „Wir werden die Klärschlammausbringung zu Dünge Zwecken beenden und Phosphor und andere Nährstoffe zurückgewinnen.“. Dem kann man folgendes entnehmen:

- Ein Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlamm Entsorgung ist Ziel
- Phosphor muss rückgewonnen werden und nicht nur „irgendwie“ in den Naturkreislauf zurückgeführt werden
- Andere Nährstoffe müssen ebenfalls betrachtet werden

Die gesetzliche Grundlage zur Erreichung dieser Ziele soll durch die Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (Klärschlammverordnung – AbfKlärV) geregelt werden und ist in einem Entwurf [BMUB 2015] weiter präzisiert worden. Eine eigenständige „Phosphorverordnung“ ist nicht vorgesehen. Seit August 2015 sind Teile der im Entwurf vorgeschlagenen Maßnahmen nach Anhörungen abgeschwächt worden. Nach derzeitigem Diskussionsstand (September 2016) sind folgende wesentliche Änderungen bezüglich Klärschlammverwertung und Nährstoffrückgewinnung vorgesehen [Schneichel 2016]:

- Ausstieg aus der bodenbezogenen Verwertung. Allerdings ist die „Bagatellgrenze“ für Ausnahmen von anfangs diskutierten Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 10.000 EW nach aktuellem Diskussionsstand auf 50.000 EW angehoben worden.
- Keine Mitverbrennung von Klärschlämmen mit Phosphorgehalten über 20g/kgTM. Somit ist i.d.R. eine P- Abreicherung von Klärschlämmen, die in die Mitverbrennung gehen, erforderlich. Diese soll mindestens 50% betragen. Faktisch betrifft das alle Klärschlämme von kommunalen Kläranlagen mit weitergehender biologischer Phosphorelimination oder Simultanfällung.
- Schlämme, die in Monoverbrennungsanlagen behandelt werden, müssen unabhängig vom P-Gehalt anschließend zu Düngemittel aufbereitet werden oder die Aschen zunächst separat für eine spätere Rückgewinnung gelagert werden. Als Rückgewinnungsquote stehen 80% in der Diskussion.
- Übergangsfristen wurden gegenüber dem Entwurf 2015 deutlich verlängert und nach Größenklassen gestaffelt. Für Kläranlagen > 100.000 EW sollen 12 Jahre gelten, für Kläranlagen von 50.000 EW bis 100.000 EW 15 Jahre. Ursprünglich war eine Umsetzung bis 2021, also innerhalb von 5 Jahren vorgesehen ab jetzt und nicht erst 5 Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung.

2. Kongress: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft -
am 26. und 27. Oktober 2016 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Bezüglich einzuhaltender Grenzwerte für die noch bodenbezogen verwertbaren Klärschlämme erfolgt eine Harmonisierung mit dem Düngerecht, so dass die Anforderungen nach Düngemittelverordnung (DüMV) Gültigkeit erhalten. Auch hier wird derzeit (Stand September 2016) der Entwurf einer zweiten Verordnung zur Änderung der Düngemittelverordnung diskutiert.

In der Novellierung der Abwasserverordnung ist es nicht vorgesehen technische Verfahren vorzugeben, so dass die Entscheidung, welches Verfahren unter welchen Randbedingungen geeignet ist, von den Betreibern zu treffen ist.

Zur Bewertung der Verfahren und Technologien müssen die in Diskussion befindlichen Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung berücksichtigt und Begrifflichkeiten geklärt werden. So wird sowohl im Koalitionsvertrag als auch im Entwurf zur Novellierung der Klärschlammverordnung [BRD 2013; BMUB 2015] von Rückgewinnung gesprochen. Im Kreislaufwirtschaftsgesetz hingegen findet sich unter §3 „Definitionen“ dieser Begriff nicht, sondern es wird u.a. von Recycling und Wiederverwertung gesprochen. Recycling (§3 (25)) wird dort wie folgt definiert: „...jedes Verfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Material oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden.“ Eine Wiederverwertung im Sinne des Gesetzes (§3 (21)), ist „...jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse der Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren.“

Dem Recyclingbegriff liegt damit zugrunde, dass ein Rohstoff zuvor als Abfall eingestuft wurde. Gemäß §5 Kreislaufwirtschaftsgesetz endet die Abfalleigenschaft, wenn u.a. gilt, dass „seine Verwendung nicht zu schädlichen Auswirkungen für Mensch und Umwelt führt“.

Der Begriff Rückgewinnung ist im Kreislaufwirtschaftsgesetz nicht definiert, spielt aber ebenso wie die Frage, was ist ein Sekundärrohstoff, was ein Wertstoff, eine Rolle bei der Bewertung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung und den erzielbaren Produkten. Zieht man dazu allgemeine Definitionen heran, so sind Wertstoffe Stoffe, die nach ihrem Gebrauch wieder genutzt, zu anderen Produkten umgewandelt oder in Rohstoffe aufgespaltet werden können. Man kann sie wiederverwerten, wodurch sie in den Wirtschaftskreislauf zurückkehren“ [wikipedia, 2016]. Sekundärrohstoffe sind Rohstoffe, die durch Aufarbeitung (Recycling) aus entsorgtem Material gewonnen werden. Sie dienen als Ausgangsstoffe für neue Produkte und unterscheiden sich dadurch vom primären (aus der Natur gewonnenen) Rohstoff. Es handelt sich also um Stoffe, die im Rahmen der Rohstoffwirtschaft in einer Kaskade zum zweiten oder wiederholten Mal genutzt werden“ [wikipedia, 2016]. Beim Recycling werden Abfallprodukte bzw. deren Ausgangsmaterialien zu Sekundärrohstoffen.

Diese Definitionen verdeutlichen, dass es mit Bezug auf die genannten Gesetzestexte und Definitionen Spielräume bei der Bewertung gibt, was genau unter „Rückgewinnung“ zu verstehen ist. So ist z.B. die Einschätzung von schädlichen Auswirkungen für Mensch und Umwelt nicht klar definiert und kann Veränderungen unterliegen. Man kann aber interpretieren, dass eine Phosphorrückgewinnung die gezielte Trennung des Wertstoffes Phosphor von anderen im Abwasser, Klärschlamm oder

Klärschlammaschen enthaltenen (Schad)stoffen umfasst bzw. zumindest eine Entfernung der Schadstoffe aus den Sekundärrohstoffen. Verfahren, die dies nicht gezielt anstreben, wären somit keine Rückgewinnungsverfahren.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass mit der aktuellen Diskussion zur Phosphorrückgewinnung die Zielsetzung des Koalitionsvertrages zur „Nährstoffrückgewinnung“ nur in Teilen umgesetzt werden würde. Wie Tabelle 1 verdeutlicht, weist Abwasser auch erhebliche Mengen an Stickstoff und Kalium auf, die zwar nur teilweise in den Klärschlamm überführt werden (Stickstoff wird zu wesentlichen Teilen im Reinigungsprozess als Stickstoffgas entfernt), aber dennoch ein Rückgewinnungspotenzial aufweisen. Bei den Verfahren zur Phosphorrückgewinnung mit oder nach thermischer Klärschlammbehandlung geht der Stickstoff dem entstehenden Produkt verloren und steht für eine Wiedergewinnung nicht mehr zur Verfügung. Bei Verfahren mit MAP Fällung aus Prozesswasser oder Klärschlamm wird Stickstoff in Teilen in das Recyclingprodukt überführt.

Es ist damit zu rechnen, dass es für Betreiber von Kläranlagen über 50.000 EW zukünftig rechtliche Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung mit entsprechenden Übergangszeiten geben wird. Die Rückgewinnung weiterer Nährstoffe ist nicht in der Diskussion. Für Betreiber gibt die anstehende rechtliche Festlegung zur P-Rückgewinnung Planungssicherheit, da die Kosten für die dazu erforderlichen Verfahrensschritte auf Gebühren umgelegt werden können.

4. Verwertung und Wirtschaftlichkeit

Grundvoraussetzung für eine Rückführung von Phosphor in den Wirtschaftskreislauf ist die Eignung als Rohstoff oder direkt als Dünger. Für die Bewertung von Verwertungsmöglichkeiten ist es bedeutsam, ob fertige Düngerprodukte gewonnen und vermarktet werden sollen oder Rohstoffe, die in der (Düngemittel)industrie zur weiteren Verarbeitung genutzt werden. Viele der derzeit entwickelten Verfahren streben die Produktion eines Düngers an. Damit gewinnen Aspekte wie Pflanzenverfügbarkeit, Schadstoffgehalt und Handling bei der Ausbringung in der Landwirtschaft an Bedeutung.

Bezüglich dieser Parameter unterscheiden sich die Rezyklate erheblich je nach Herstellungsverfahren und Qualität des Ausgangsstoffes. Obwohl es inzwischen einige Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit und zum Schadstoffgehalt gibt [z.B. Römer 2013] lassen sich allgemeingültige Aussagen noch nicht ableiten, da viele Produkte erst unter Laborbedingungen gewonnen wurden und mit verfahrenstechnischen Modifikationen beim Einsatz auf Kläranlagen zu rechnen ist. Auch können sich Produkte, die von verschiedenen Kläranlagen nach dem gleichen Verfahren gewonnen werden, aufgrund der Heterogenität der Ausgangsstoffe unterscheiden. Es bedarf daher einer gewissen Mindestanzahl an Untersuchungen, um statistisch abgesicherte Aussagen über Produktqualitäten treffen zu können.

Daneben sind die bisherigen Untersuchungsmethoden z.B. zur Pflanzenverfügbarkeit eben so wenig genormt, wie die Auswahl an zu untersuchenden Schadstoffen. Je nach Boden- und Pflanzenart kann ein Rezyklat unterschiedliche Düngewirkung aufweisen. Unter anderem ist der pH-Wert des Bodens relevant. Auch die Wasserlöslichkeit ist nicht oder nur bedingt als Maß für die Pflanzenverfügbarkeit geeignet [Römer 2013].

Es bedarf daher genormter Bewertungsverfahren, die nicht nur die kurzfristige Verfügbarkeit, sondern gerade auch Langzeiteffekte mit einbeziehen.

Dennoch lassen sich aus den derzeitigen Ergebnissen von Studien einige wichtige Anhaltspunkte bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit ableiten. Auf der Basis von Gefäß- und Feldversuchen mit unterschiedlichen Rezyklaten [z.B. Römer 2013] lässt sich schließen, dass im Vergleich mit einem Trippel-Superphosphat (TSP)- Mineraldünger folgende Effizienz je nach Produktart zu erwarten ist:

- MAP → hoch bis sehr hoch (vergleichbar mit TSP) auf allen Testböden, wenn MAP in hoher Reinheit vorliegt [Römer 2013]
- Mg-Phosphate → mittel bis hoch, leichter Umsetzbar als CA- Phosphate [Römer,2013]
- Ca-Phosphate → gering bis hoch, je nachdem ob es sich um primäre, sekundäre oder tertiäre Phosphate handelt und Unterschiede je nach Bodenart [Römer 2013]
- Fe-Phosphate → gering bis nicht wirksam. Dies gilt auch für Tiermehlaschen und Klärschlammasche, auch nach Behandlung mit Chlorid zur Schwermetallabreicherung [Römer 2013].

Bezogen auf die Herstellungsverfahren heißt das, dass die Produkte aus Kristallisations- und Fällungsverfahren (Mg, Ca-basiert) i.d.R. besser sind, als die aus Aschen. Allerdings lässt sich das nicht pauschalisieren, da es zahlreiche Verfahrensmodifikationen gibt und auch jahreszeitliche Variationen auftreten können. Auch ist die Pflanzenverfügbarkeit eines Rezyklats von der Bodenart abhängig [Römer 2013].

Bezüglich der Schadstoffgehalte können ebenfalls deutliche Unterschiede bestehen. Hier muss zwischen Schwermetallen und organischen Schadstoffen unterschieden werden. Bei allen Verfahren, denen thermische Prozesse zugrunde liegen, ist davon auszugehen, dass die organischen Schadstoffe weitestgehend eliminiert werden. Für Produkte aus Prozesswasser und Klärschlämmen gibt es erst wenige Studien. Untersuchungen von MAP- Fällungsprodukten aus Klärschlamm deuten jedoch darauf hin, dass die organischen Schadstoffe stark entfrachtet werden und überwiegend nicht im Produkt nachweisbar sind [z.B. Antakyali et al. 2011].

Schwermetalle sind in den Produkten aus Prozesswasser und Klärschlamm meist nur in geringen Konzentrationen feststellbar, die weit unterhalb der Grenzwerte der Düngemittelverordnung und den Gehalten von Mineraldüngern liegen. Anders kann dies bei Klärschlammaschen als Ausgangsprodukt aussehen, da hier die Schwermetalle zunächst weitgehend in den Aschen verbleiben. Verschiedene

2. Kongress: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft -
am 26. und 27. Oktober 2016 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Studien belegen, dass Aschen die Grenzwerte der Düngemittelverordnung teilweise überschreiben [z.B. Krüger und Adam 2014, Rheinhardt et al. 2013].

Es bedarf daher weiterer Aufbereitungsverfahren zur Abtrennung der Wertstoffe (oder der Schadstoffe). Bei einigen thermischen Verfahren führt bereits die Zugabe von z.B. Magnesium- oder Calciumchlorid während des Prozesses zu einer Verringerung der Schadstofffracht einiger Schwermetalle (Cd, Pb, Cu, Zn) in den Aschen (Schick 2010).

Bislang waren betriebswirtschaftliche Argumente ein erhebliches Hemmnis für die großtechnische Umsetzung von Phosphorrückgewinnungsverfahren. Zwar gibt es inzwischen einige Studien, die sich mit den Kosten unterschiedlicher Rückgewinnungsverfahren befassen, allerdings basieren die Grundannahmen oftmals auf Firmenangaben und/oder Ergebnissen aus kleinmaßstäblichen Versuchen, so dass gesicherte und vergleichbare Kosten kaum vorliegen. Auch sind die Systemgrenzen, z.B. bei der Kalkulation von Energiekosten nicht immer klar definiert. Unklar ist teilweise, wo die Schnittstellen liegen, z.B. ob bei thermischen Verfahren die Erfordernis einer Monoverbrennung mit eingerechnet wird oder nicht [siehe z.B. Reinhardt et al. 2014].

Entsprechend ist die Spanne angegebener Kosten für Düngemittel aus Recyclingprodukten sehr breit. Meist deckt der Verkauf der Rezyklate die Kosten für die Rückgewinnung nicht, so dass mit Mehrkosten in der Größenordnung von ca. 10 – 20 EuroCt/m³ bzw. ca. 4 €/(E*a) zu rechnen ist [Pinnekamp et al. 2016; P-Rex; UBA 2015 u.a.]].

Unter bestimmten Bedingungen ist jedoch bereits heute ein wirtschaftlicher Betrieb möglich, wie das Beispiel der großtechnischen Umsetzung des Berliner Verfahrens auf der Kläranlage Waßmannsdorf zeigt [Heinzmann und Lengemann 2014]. Hier führen Einsparungen in den Betriebskosten, die vor der gezielten Einführung der P- Rückgewinnung aufgrund von MAP-Ablagerungen in Leitungen und Aggregaten angefallen sind, dazu, dass die P- Rückgewinnung betriebswirtschaftliche Vorteile bringt. Allerdings wird auch nur ein kleiner Prozentsatz des P bezogen auf den Zulauf zur Kläranlage zurückgewonnen. Generell lassen sich Verfahren zur P- Rückgewinnung aus dem Prozesswasser eher wirtschaftlich darstellen, da aufwändige Schritte zum Aufschluss des Phosphors entfallen. Zur Erfüllung der geplanten Vorgaben der AbfKlärV reichen diese Verfahren nicht aus.

Auch wenn heute noch betriebswirtschaftliche Überlegungen im Vordergrund stehen, so sollten volkswirtschaftliche Aspekte stärker berücksichtigt werden. Ziel der Phosphorrückgewinnung ist es, Umweltschäden zu verringern und zu einem nachhaltigen Umgang mit Ressourcen ebenso beizutragen, wie eine teilweise P-Autarkie in der BRD zu erreichen. Bis heute werden aber Umweltschäden meist sozialisiert, so dass diese Aspekte zu wenig in die Bewertung der Wirtschaftlichkeit Eingang finden.

Mit der rechtlichen Anforderung an eine P- Rückgewinnung (siehe Kap.3) werden Betreiber zukünftig Verfahren und Konzepte finden müssen, um den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor einer Verwertung zuzuführen. Da dies nicht zwingend dezentral auf jeder einzelnen Kläranlage erfolgen

muss, sind regionale Klärschlammstrategien ebenso erforderlich, wie Geschäftsmodelle zur Vermarktung der Rezyklate, um Kläranlagenbetreiber von dieser Aufgabe zu entlasten.

5. Sind wir auf dem richtigen Weg?

In Deutschland und einigen anderen Ländern wurden in den letzten Jahren zahlreiche Verfahren zur P-Rückgewinnung entwickelt. Ein wesentliches Hemmnis liegt bislang in der fehlenden betriebswirtschaftlichen Darstellbarkeit (siehe Kap. 4). Dies könnte sich mit der Verpflichtung der Betreiber zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm bzw. Klärschlammaschen aufgrund rechtlicher Regelungen zukünftig ändern. Es bleibt zu hoffen, dass Betreiber trotz längerer Übergangsfristen zügig Konzepte erstellen und dass durch großtechnische Pilotprojekte vielfältige Erfahrungen gesammelt werden können. Auf politischer Seite ist schon jetzt, also vor Festlegung rechtlicher Rahmenbedingungen, zumindest teilweise die Bereitschaft vorhanden, entsprechende Projekte zu fördern (siehe Förderprogramme im Bund, bei der DBU sowie in einigen Länderministerien).

Noch ist der Kenntnisstand zu den meisten Verfahren begrenzt und es liegen erst wenige Erfahrungen im realen Betrieb vor. Daher kann vor einer frühzeitigen Festlegung auf einzelne Verfahren nur gewarnt werden. Um bei der Wahl eines Verfahren können, reagieren zu können, werden Erfahrungen aber auch Weiterentwicklungen für zahlreiche Prozesse und Verfahren bedeutsam sein. Noch sind zu wenig Verfahren im Dauerbetrieb und auf unterschiedlichen Anlagen evaluiert, als dass sich eine eindeutige Bewertung sowie konkrete Betriebs- und Bemessungsparameter ableiten lassen.

Für die Wahl eines Verfahrens sind neben technischen Aspekten weiterhin u. a. folgende Parameter relevant:

- Rückgewinnungspotenzial
- Zu behandelnder Volumenstrom
- Konzentration von Phosphor im zu behandelnden Stoffstrom
- Bindungsform des P (gelöst, ungelöst, chemisch gebunden, biologisch gebunden)
- Schadstoffkonzentrationen (organische Schadstoffe, Schwermetalle)
- Störstoffe (Metallsalze, organische Verbindungen, Feststoffe etc.)
- Verbleib von Schad- und Reststoffen
- Angestrebtes Produkt und Produktqualität (z. B. Dünger, Phosphorsäure, reiner Phosphor etc.)
- Auswirkungen der Behandlungsstufen auf die Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung
- Betriebsmittel- und Energieeinsatz
- Betriebsstabilität und Komplexität des Verfahrens
- Flexibilität bei Änderungen der Verfahrensführung in der Abwasserbehandlung
- Zielsetzung, z. B. ausschließlich P- Rückgewinnung oder Behebung von Betriebsstörungen; Rückgewinnung weiterer Ressourcen, z. B. Stickstoff etc.
- Wirtschaftlichkeit

Welcher Ansatzpunkt am besten geeignet ist, hängt von zahlreichen Einflüssen ab. So ergibt eine Rückgewinnung aus Klärschlammasche nur dann Sinn, wenn der Schlamm vorher einer Monoverbrennungsanlage zugeführt wird. Der mögliche Entsorgungsweg bestimmt daher auch die Rückgewinnungsoptionen.

Ökobilanzen zeigen bereits jetzt auf, dass die P- Rückgewinnung aus Abwasserströmen eindeutig besser ist als der Abbau geogener Ressourcen. Dies liegt im Wesentlichen auch an den hohen Schadstoffgehalten (Cd, U) der Primärdünger [UBA, 2015].

Zeitnah sollten umfassende Betriebserfahrungen bezüglich technischer und personeller Aspekte gewonnen werden, z.B. zeitlicher Aufwand, erforderliches Know How des Betriebspersonals etc. Außerdem sollten Pilotierungen genutzt werden, um den Betrieb umfassend zu evaluieren. Nur dadurch ist eine faire Bewertung der vielfältigen Verfahren und der jeweils günstigen Randbedingungen möglich. Auch Fragen zur Einbindung in den Kläranlagenbetrieb einschließlich der Schnittstellen zu anderen Prozessschritten (Beispiel Umgang mit angesäuertem Klärschlamm, Wiederverwendung von Überständen aus Fällungs- und Kristallisationsreaktionen, Trocknungskapazitäten als Vorstufe der Pyrolyse) können nur unter realen Betriebsbedingungen geklärt werden. Ein weiterer Erkenntnisgewinn ist zwingend erforderlich, auch um zu erforschen, warum das gleiche Verfahren je nach Randbedingungen unterschiedliche Eignung aufweist.

Darüber hinaus ist die Entwicklung von regionalen Klärschlamm- und P-Rückgewinnungsstrategien bis hin zu Verwertungsstrategien erforderlich. In vielen Fällen werden die anstehenden Aufgaben nicht von einem Kläranlagenbetreiber alleine zu bewerkstelligen sein, so dass neue Verbünde zwischen Betreibern aber auch mit anderen Akteuren, z.B. aus der Landwirtschaft und der Industrie geschlossen werden sollten.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Phosphorrückgewinnung und die Schaffung geschlossener Phosphorkreisläufe werden aus umwelt- und ressourcenbezogenen, aber auch aus gesellschaftspolitischen Gründen, zunehmend bedeutsam.

Die bislang entwickelten technologischen Ansätze sind vielfältig. Die Verfahren haben sehr unterschiedliche Entwicklungsstände, inzwischen sind viele Verfahren von der technischen Entwicklung her reif für den großtechnischen Einsatz. Allerdings bedarf es, wie bei der Einführung jeder neuen Technologie, noch einer gewissen Zeit zur Verbesserung der Verfahren und zur Integration in betriebliche Abläufe von Kläranlagen. Da es bei der Phosphorrückgewinnung nicht um die Implementierung eines weiteren Reinigungsverfahrens sondern um die Generierung eines marktreifen Produktes geht, sind darüber hinaus neue Organisationsstrukturen und Vermarktungsstrategien zu entwickeln.

Bislang verhindern die gegenüber Mineraldüngern höheren Kosten der Recyclingprodukte sowie noch nicht vorhandene Zulassungen als Düngemittel die flächendeckende Umsetzung von

2. Kongress: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft -
am 26. und 27. Oktober 2016 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Rückgewinnungsanlagen außerhalb von geförderten Pilotprojekten. Dies könnte sich mit der anstehenden Einführung gesetzlicher Vorgaben zum Phosphorrecycling bald ändern.

In den nächsten Jahren steht an, Verfahren bis zur Marktreife weiter zu entwickeln, so dass sich aus Pilotversuchen Bemessungswerte, Betriebskennwerte und Produkt-Anforderungen ableiten lassen. Nur das Beibehalten einer Verfahrensvielfalt wird es ermöglichen, auf unterschiedliche Randbedingungen und regionale Gegebenheiten reagieren zu können und die jeweiligen Vor- und Nachteile im Langzeittest zu untersuchen. Neue Ansätze sollten in der Forschung trotz nun anstehender großtechnischer Umsetzung derzeitiger Verfahren weiter gefördert werden, um mögliche Nachteile bisheriger Verfahren abzumildern und ggf. bessere Ansätze verfolgen zu können. Dazu gehört auch die Rückgewinnung von Phosphor aus kommunalen Abwasserteilströmen wie Urin und Schwarzwasser.

Liegen ausreichende Erfahrungen zu bestimmten Verfahren vor, so könnten damit auch neue Phosphatquellen wie Gülle erschlossen werden, um auch hier gezielt Nährstoffkreisläufe von Schadstoffkreisläufen zu entkoppeln.

Deutschland ist gut beraten, in die technologischen Entwicklungen zu investieren, um eine Vorreiterrolle zu übernehmen und entsprechende Technologien exportieren zu können.

7. Quellenverzeichnis

Antakyali D.; Kuch B.; Preyl V.; Steinmetz H. (2011): Effect of Micropollutants in Wastewater on Recovered Struvite. Proceedings of the WEF Conference Nutrient Recovery and Management, Miami, USA.

Bilbao J., Egner S. (2012) Rückgewinnung von Nährstoffen zur Herstellung von Düngemitteln. Informationsbrochüre. Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB.

Blöcher Chr., Niewersch C., Schröder Fr., Gebhardt W., Melin T. (2011) Optimierte Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen durch Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration. In: Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, Band 228. Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor

BMUB (2015): Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 18.08.2015. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/abfklaerv_novelle_2015_bf.pdf, Stand 24.09.2016

BRD (2013): Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD 18. Legislaturperiode vom November 2013, S. 120. https://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2013/2013-12-17-koalitionsvertrag.pdf?__blob=publicationFile

2. Kongress: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft -
am 26. und 27. Oktober 2016 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Drenkova-Tuhtan A., Schneider M., Mandel K., Meyer C., Gellermann C., SEXTL G. and Steinmetz H. (2015): Influence of cation building blocks of metal hydroxide precipitates on their adsorption and desorption capacity for phosphate in wastewater – A screening study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 488 (2016): 145-153, <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.1010.1017>.

Egle L., Rechberger H., Zessner M. (2014): Endbericht Phosphor-Rückgewinnung aus Abwasser. http://iwr.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-wasserguete/Projekte/Phosphor/Phosphor%20C3%BCckgewinnung_aus_dem_Abwasser_Endbericht_6.3.14.pdf (Stand 24.09.2016)

EU (2014): Pressemitteilung der Europäischen Kommission. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-599_de.htm, Stand: 24.09.2016

Heinzmann B. und Lengemann A. (2014): Vom Betriebsproblem zum marktfähigem Produkt "Berliner Pflanze" – Phosphatrückgewinnung auf der Kläranlage Waßmannsdorf. *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 86

Hoffmann E., Homa J. (2011) Phosphorrückgewinnung mittels Ionenaustausch und Elektrodialyse. In: *Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser* Nr. 228.

Küger O., Adam C. (2014): Monitoring von Klärschlammmonverbrennungssaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffpotenziale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. *Texte 49/2014 Umweltforschungsplan des BMUB* Forschungskennzahl 37 11 33 321 UBA-FB 001951, Berlin

Pollak H. und Greschonig G. (2015): Phosphor und Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser, *Fachrecherche der Stadt Graz, Umweltamt*. http://www.umwelt.graz.at/cms/dokumente/10259600_6669522/d1e6324e/Phosphor%20Recherche%20Pollak%2020150821c.pdf (Stand 05.10.2016)

Pinnekamp J., Batian D., Montag D., Malms S., Firk J. (2016): Gutachten zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung in Hessen aus dem Abwasser, dem Klärschlamm bzw. der Schlammasche, Abschlussbericht für das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.

P-Rex: <http://www.p-rex.eu/> (Stand 24.09.2016)

Reinhardt T., Meyer C. and Steinmetz H. (2013): Interkommunales Pilotprojekt zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen in Baden-Württemberg. *Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.) Abschlussbericht*. Verfügbar unter: http://www.dwa-bw.de/tl_files/_media/content/PDFs/LV_Baden-Wuerttemberg/Homepage/BW-Dokumente/Homepage%202013/Service/Fachdatenbank/Interkommunales_Pilotprojekt_zur_Phosphorrueckgewinnung.pdf

2. Kongress: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft -
am 26. und 27. Oktober 2016 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Römer W. (2013): Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2013 (60) Nr.3, S. 202 - 215

UBA (2015): Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz. Umweltbundesamt Texte 98/2015, Forschungskennzeichen 3713 26 301, Berlin

RLP 2016: Regionale Klärschlammstrategien für Rheinland-Pfalz.
http://www.klaerschlammkoooperation-rlp.de/klaerschlammkoooperation_rlp/ (Stand:25.09.2016)

Schick J. (2010): Untersuchungen zur P-Düngewirkung und Schwermetallgehalten thermisch behandelter Klärschlammaschen. Dissertation an der Fakultät für Lebenswissenschaften Braunschweig

Schneichel H.W. (2016): Auswirkungen der novellierten Klärschlammverordnung und des Düngerechts auf die Zukunft der Klärschlammverwertung. 17. Fachtagung Emmelshausen „Agenda 2019 – Zukunft gemeinsam gestalten“ am 05.10.2016

USGS (2012): U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2012;
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcsapp2012.pdf> (05.06.2015)