

## 12. **Technologievorausschau und Zukunftschancen durch die Entwicklung von Phosphorrecycling-technologien in Deutschland**

Christian Sartorius, Karlsruhe

### 1 **Einleitung**

Die Verwendung von Klärschlamm als nährstoffhaltiges Substrat in der Landwirtschaft stellt eine Low-Tech-Variante des Phosphorrecyclings dar, das die für das Pflanzenwachstum nicht ersetzbare Ressource Phosphor (P) zu entlasten hilft. Seitdem die Kontaminierung des Klärschlammes mit Schwermetallen und toxischen organischen Substanzen diese Art der Klärschlammnutzung jedoch zunehmend diskreditiert, wird nach anderen technischen Ansätzen der P-Rückgewinnung aus Abwasser oder Klärschlamm gesucht. Aus diesem Anlass wurden im vergangenen Jahrzehnt nicht zuletzt im Rahmen der BMBF/BMU-Förderinitiative "Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor" eine ganze Reihe verschiedener Verfahren entwickelt, mit denen dem Abwasser oder Klärschlamm das Phosphat entzogen werden kann, um anschließend als Düngemittel wieder den Weg in die Landwirtschaft zu finden.

Ziel des Projektverbundes „Phosphorrecycling - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland“ (PHOBE) ist es in diesem Zusammenhang, die von BMBF und BMU geförderten Projekte zur Entwicklung und Erprobung von Verfahren zu evaluieren, die gewonnenen Produkte sowie deren Verwertbarkeit zu bewerten und schließlich für Deutschland insgesamt ein strategisches Konzept für die integrierte Nutzung der vorteilhaftesten Verfahren zu entwickeln. Dieses Konzept umfasst nicht nur die technischen Aspekte, d.h. in welchen Kläranlagen oder Klärschlammverbrennungsanlagen unter den gegebenen Rahmenbedingungen welche Verfahren sinnvoll und mit möglichst großer Wirkung zum Einsatz gebracht werden können (vgl. Everding und Pinnekamp, 2011a). Vielmehr geht es im vorliegenden Beitrag um die wirtschaftlichen Aspekte, mit welchen Verfahren und in welchem zeitlichen Abfolge die Phosphorrückgewinnung aus Abwasser möglichst kostengünstig und dennoch umfassend implementiert werden kann (Kap. 3) und wie und unter welchen Bedingungen die deutsche Wirtschaft als Technologieanbieter von dieser Entwicklung profitieren kann (Kap. 4). Vorgeschaltet ist dieser Analyse (in Kap. 2) eine Technologievorausschau, die sich mit Blick auf die Zeit bis zum Jahr 2050 mit der Frage beschäftigt, welche Treiber dieser Entwicklung von der Mehrzahl der ExpertInnen als förderlich angesehen und welche grundsätzlichen technischen Ansätze als am aussichtsreichsten eingeschätzt werden.

## **2 Technologievorausschau für die Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser**

### **2.1 Bedeutung und Kontext der P-Rückgewinnung**

Schon lange bevor die Wissenschaft im 19. Jahrhundert herausfand, dass (neben anderen Elementen) Phosphor für das Pflanzenwachstum und damit für die Sicherung der Ernährung essenziell (d.h. nicht ersetzbar) ist, wurde Wirtschaftsdünger gesammelt und auf den Feldern ausgebracht. Dieser Nährstoffkreislauf drohte unterbrochen zu werden, als vor allem in den Städten die Exkremamente in Kanalisationen gesammelt und in die Flüsse geschwemmt wurden. Erst als das städtische Abwasser in zunehmendem Maße einer Reinigung in Kläranlagen unterzogen wurde, sammelte sich ein großer Teil der Nährstoffe im Klärschlamm und konnte in dieser Form wieder der Landwirtschaft zugeführt werden. Dieser erweiterte Nährstoffkreislauf droht nun in jüngerer Zeit erneut dadurch unterbrochen zu werden, dass Schadstoffe in zunehmendem Maße das Abwasser und den Klärschlamm kontaminieren und dadurch eine Nutzung in der Landwirtschaft nicht länger wünschenswert erscheinen lassen. Noch ist zwar die Klärschlammausbringung in der Landwirtschaft in Deutschland nicht verboten, die Bedingungen für diese Nutzung verschärfen sich aber zunehmend, so dass der Anteil, der in der Landwirtschaft genutzt werden kann, immer mehr zurückzugehen droht.

Die Alternative, die Phosphatgewinnung aus fossilen Quellen, ist zwar kurz- bis mittelfristig nicht durch eine Erschöpfung der Ressource bedroht. Dennoch ist offensichtlich, dass durch den zunehmenden Bedarf an Nahrungsmitteln (für eine steigende Bevölkerung), Futtermitteln und Biomasse (für den Klima- und Ressourcenschutz) die Nachfrage nach Phosphat stark ansteigen wird, während die Zugänglichkeit der Ressource sich laufend deutlich verschlechtert. Sich angesichts dieses Auseinanderklaffens von Angebot und Nachfrage alleine auf Rohphosphat als P-Quelle zu verlassen erscheint daher als nicht nachhaltig.

Vor diesem Hintergrund werden Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus häuslichem Abwasser seit mindestens 10 Jahren intensiv beforscht. Wie im Rahmen dieses Beitrags noch zu zeigen sein wird, gibt es eine Vielzahl von Verfahren, die Phosphor an unterschiedlichen Stellen der Entsorgungs- und Behandlungspfade von Abwasser ausschleusen. Dabei ging es zunächst oft primär darum, das Phosphat, das sich im Verlaufe der P-Eliminierung aus dem Kläranlagenablauf im Nebenstrom oder Klärschlamm anreichert und zu verschiedenen Komplikationen im Betrieb der Kläranlage führen kann, aus den entsprechenden Stoffströmen zu entfernen. Aufgrund der Ressourcenproblematik hat dann in den letzten Jahren die Rückgewinnung zunehmend an Bedeutung gewonnen.

### **2.2 Durchführung der Technologievorausschau**

Um herauszufinden, wie die Knappheit der Ressource Phosphor von den Fachleuten beurteilt wird, welche Rolle der landwirtschaftlichen Verwertung des Klärschlammes in

Zukunft beigemessen wird und welche plausiblen Pfade der Technikentwicklung im Bereich der P-Rückgewinnung aus Abwasser in der mittleren Frist, d. h. bis zum Jahr 2030 gesehen werden, haben wir in der ersten Jahreshälfte 2010 eine Technologievorausschau durchgeführt. Darin wurde eine große Zahl von Fachleuten, die auf diesem Gebiet tätig sind, gebeten, ihr Urteil über unterschiedliche, relevante Aspekte des P-Recyclings abzugeben. Insgesamt wurden 417 ExpertInnen aus 40 Ländern kontaktiert, die entweder im Mai 2009 an der „International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams“ in Vancouver (Kanada) oder im September 2009 an der „Baltic 21“ in Berlin teilgenommen hatten oder Adressaten des E-Mail-Verteilers der Internetseiten „Phosphorous Recovery“ des Instituts IWAR der TU-Darmstadt (<http://www.phosphorus-recovery.tu-darmstadt.de>) oder des Centre Européen d'Études des Polyphosphates (CEEP) waren. Am Ende des Befragungszeitraums konnten wir die Teilnahme von 47%, d.h. 197 ExpertInnen aus 31 Ländern feststellen, von denen 85% die Umfrage auch beendet haben.

Die zur Diskussion gestellten 23 Thesen waren in Thesenblöcke unterteilt, die auf folgende Aspekte der P-Rückgewinnung anspielten:

- Dringlichkeit der Phosphatrückgewinnung
- Erfolgspotenzial von Verfahren zur Phosphatrückgewinnung aus der flüssigen Phase der Abwasserbehandlung und aus Klärschlamm
- Potenziale der Phosphatrückgewinnung aus Klärschlammmasche
- Phosphatrückgewinnung im Kontext eines Systemwandels in der Wasser- und Abwasserwirtschaft (einschließlich Separierung des P-Stroms vor Beimischung zum Abwasser)

Bei den zur Diskussion gestellten Technikaspekten handelte es sich im Wesentlichen um solche, die auch heute schon von Bedeutung sind, weil sie auf funktionierenden Verfahren der Abwasserbehandlung aufbauen, die ausgereift und weit verbreitet sind. Außerdem weisen viele Verfahren eine lange Lebensdauer auf und sind erst vor ein bis zwei Jahrzehnten etabliert worden, so dass innerhalb des Zeithorizonts der Technikvorausschau (bis 2050) nicht mit einer grundlegenden Veränderung der technischen Rahmenbedingungen zu rechnen ist.

Die Experten wurden jeweils am Ende eines Thesenblocks um die Einschätzung ihrer eigenen Fachkompetenz gebeten. Hierbei bestand die Antwortmöglichkeit in fünf Stufen von groß bis fachfremd. Wie zu erwarten wurde im Thesenblock 1 durchschnittlich eine sehr hohe Fachkompetenz bekundet, im Thesenblock 2 war sie etwas geringer aber immer noch recht hoch und in den Thesenblöcken 3 und 4 schlechter als in den ersten beiden.

### **2.3 Bevorzugte Ansätze der P-Rückgewinnung**

Insgesamt konnten folgende wichtige Erkenntnisse aus der Expertenbefragung gewonnen werden.

- Die Mehrheit der Experten ist der Meinung, dass Phosphorrückgewinnung spätestens im Jahr 2030 in den Industrieländern Einzug halten wird und dass sie dann wirtschaftlich tragfähig sein wird. Um dieses Ziel zu erreichen, erscheint es den Experten notwendig, die Einführung von Verfahren der P-Rückgewinnung ab sofort durch geeignete politische Maßnahmen zu unterstützen. Der Nutzung des Phosphats durch Ausbringung des Klärschlammes auf landwirtschaftlichen Flächen wird demgegenüber in Zukunft eine (weiter) abnehmende Bedeutung beigemessen.
- Bei der Einführung eines flächendeckenden P-Recyclings sehen die meisten Experten (in der Einführungsphase) die Umsetzung einfacher Verfahren an vielen (auch kleineren Standorten) als wahrscheinlicher an als die Umsetzung komplexer Verfahren in zentralen Anlagen. P-Recycling aus der flüssigen Phase, vor allem aus Schlammwasser, wird in diesem Zusammenhang als besonders relevantes Verfahren eingestuft.
- Schlammverbrennung wird sich den Experten zufolge in vielen Industrieländern etwa im gleichen Zeitraum wie die Phosphatrückgewinnung etablieren. Im Zuge dessen wird auch die Phosphatrückgewinnung aus Asche (obwohl ein verfahrenstechnisch aufwendigeres Verfahren) an Bedeutung zunehmen. Im Vergleich zwischen Rückgewinnung aus Faulschlamm oder aus Asche scheint letztere bevorzugt zu werden.
- Eindeutig geht jedoch aus den Voten der Experten hervor, dass die Qualität der aus den Verfahren hervorgehenden Produkte in jedem Fall wichtiger ist als wirtschaftliche oder verfahrenstechnische Aspekte. Bei der Produktion von Düngemittel ist ein möglichst sauberes Produkt mit optimaler Pflanzenverfügbarkeit das Ziel.
- Stoffstromtrennung und die Rückgewinnung von Phosphat aus Urin sehen die meisten Experten besonders in Gebieten mit Wassermangel als Zukunftsoption. Die derzeit bestehenden Logistikprobleme werden zwar als kritischer Punkt gesehen, vor allem aber von Experten mit hoher Fachkenntnis als lösbar angesehen. Diese Technik wird sich nach Expertenmeinung eher in industrialisierten Ländern als in Entwicklungsländern etablieren.
- Interessanterweise wird sich nach Meinung der Experten die direkte Wiederverwendung von Nährstoffe in vielen Ländern aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Spurenstoffproblematik erschweren und den Technologien zur Nährstoffrückgewinnung neue Marktchancen bieten.

### **3 Wirtschaftliches Potenzial von Phosphorrückgewinnungstechnologien**

#### **3.1 Erfolgversprechende Technologieansätze der P-Rückgewinnung**

In Deutschland und einer Reihe anderer, vor allem europäischer Länder wurde innerhalb des vergangenen Jahrzehnts eine Vielzahl von Verfahrensansätzen entwickelt, mit deren Hilfe Phosphor (bzw. Phosphat), welches mit dem Abwasser in die Kläranlagen gelangt, aus dem Abwasser oder Klärschlamm entfernt und für eine weitere Nutzung z. B. in der Landwirtschaft zurückgewonnen werden kann. Abb. 1 führt einen Großteil der bekannten Verfahren auf und differenziert sie systematisch nach

dem Stoffstrom, aus dem das P stammt, dem Verfahrensprinzip der Rückgewinnung und anderen Parametern.

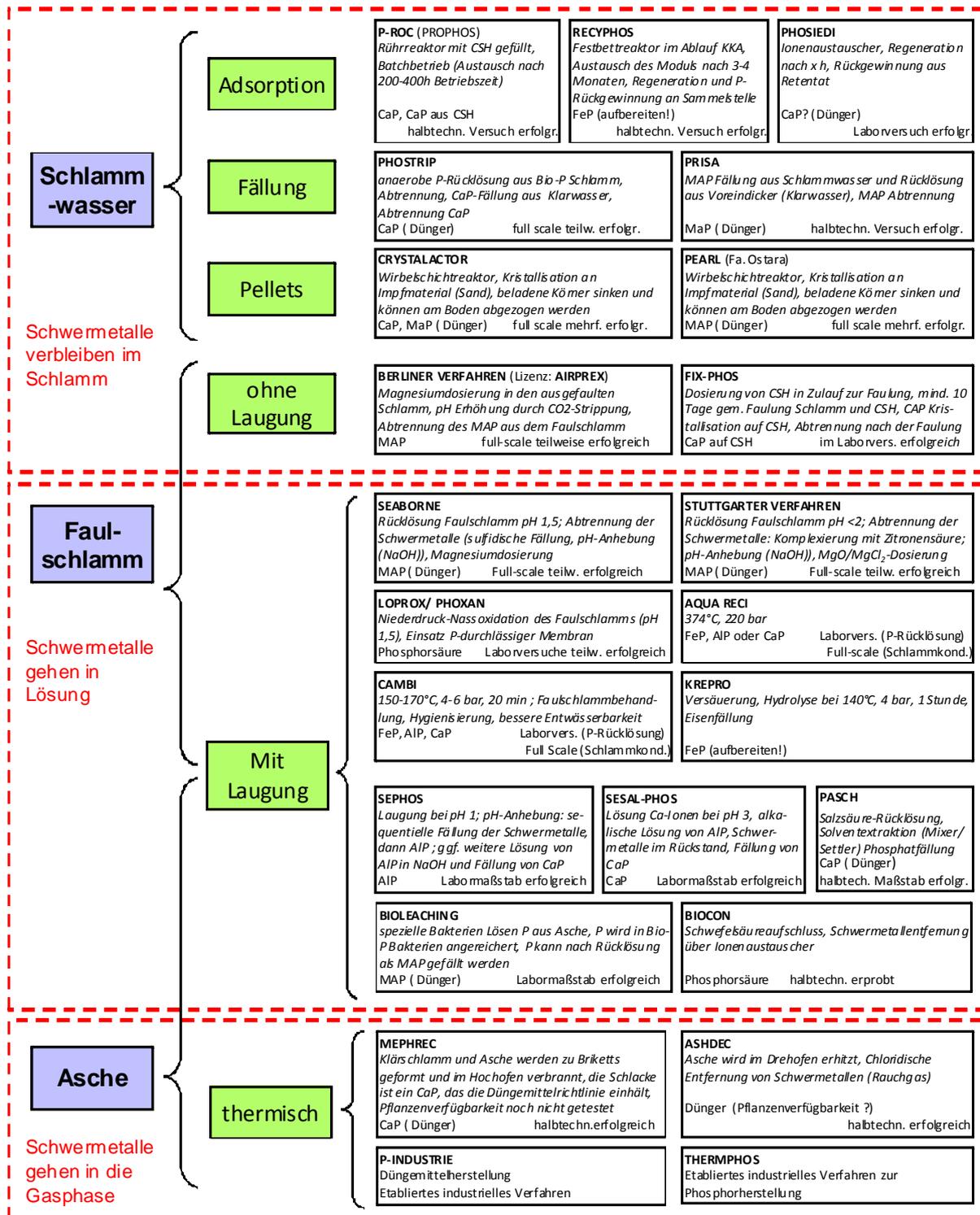


Abb. 1: Systematische Darstellung bekannter Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser oder Klärschlamm

Folgende grundlegenden Verfahrensprinzipien lassen sich unterscheiden:

- 1) Am „einfachsten“ hinsichtlich der Prozessführung ist die Fällung oder Adsorption von Phosphat aus dem Kläranlagenablauf, da hier fast alle Begleitstoffe bereits entfernt sind und im Wesentlichen nur eine Anreicherung durchgeführt werden muss. Nachteil ist, dass das Phosphat in sehr verdünnter Form vorliegt und die Ausbeute gering ist, was sich auf die Wirtschaftlichkeit der Verfahren (z. B. P-ROC, RECYPHOS, PHOSIEDI) negativ auswirkt.
- 2) Im Schlammwasser liegt Phosphat in konzentrierterer Form vor, es muss im Vergleich zur Rückgewinnung aus dem Ablauf (1) aber ein gewisser Zusatzaufwand betrieben werden, um das Schlammwasser vom übrigen Schlamm abzutrennen. Schwermetalle und organische Schadstoffe verbleiben im Schlamm und müssen nicht abgetrennt werden. Die Verfahren (z. B. PEARL, PRISA) sind daher relativ kostengünstig und haben eine mittlere P-Ausbeute.
- 3) Ähnlich wie bei der Rückgewinnung aus dem Schlammwasser (2) ist die Ausbeute bei der Fällung im Schlamm, vorzugsweise während oder nach der Faulung. Allerdings müssen die ausgefällten Phosphatpellets im Zuge dieser Verfahren (z. B. AIRPREX, FIX-PHOS) anschließend vom Schlamm getrennt werden, was den Aufwand erhöht.
- 4) Am größten ist der Aufwand, wenn Phosphat vor der Abtrennung zuerst chemisch und physikalisch aus dem Schlamm gelöst werden muss (z. B. PHOXNAN, SEABORNE). In diesem Fall lösen sich typischerweise auch die unerwünschten Begleitstoffe, so dass viel Aufwand getrieben werden muss, diese vom Phosphat zu trennen. Neben der Verfahrenstechnik erweisen sich hier die erforderlichen Betriebschemikalien als Kostentreiber.
- 5) Aufgrund der durch die Verbrennung entfernten organischen Substanzen ist die Rücklösung und Reinigung des in der Klärschlammmasche enthaltenen Phosphats (z. B. im PASCH-Verfahren) etwas einfacher und erfordert weniger Chemikalien als in Ansatz (4), dennoch muss auch hier einiger Aufwand getrieben werden.
- 6) Schließlich wird versucht, die Asche unmittelbar als P-Quelle zu verwenden, zuvor jedoch mit chemisch-metallurgischen Verfahren die unerwünschten Schwermetalle zu entfernen (Bsp. ASH DEC, MEPHREC). In diesem Fall kommt als wirtschaftlicher Bonus hinzu, dass die abgereicherte Klärschlammmasche nicht auf einer Deponie entsorgt werden muss.

Die vorgenannten Überlegungen werden größtenteils durch die Angaben zur Wirtschaftlichkeit der im PHOBE-Projekt und in der Literatur untersuchten Verfahren bestätigt. Am kostenträchtigsten sind die Verfahren der Gruppe (4), wo für PHOXNAN Kosten von über 11 €/kg P und für SEABORNE mehr als 14 €/kg P (Bayerle 2009) veranschlagt werden. In einem ähnlichen Kostenbereich liegt die der Gruppe (1) zuzuordnende P-Fällung im Ablauf (12 €/kg P), wobei hier bei sehr großen Anlagen (1 Mio. EW) weitere Kostensenkungspotenziale bis unter 5 €/kg P bestehen (P-ROC im Projekt Prophos). Kostengünstiger sind demgegenüber die Verfahren der Gruppe (5). Genannt werden hier rund 8 €/kg P für SESALPHOS und günstige 4,50 €/kg P für PASCH in großen Anlagen mit einer Aschebehandlungskapazität von 30.000 Jahrestonnen entsprechend 2,9 Millionen Einwohnerwerten (Everding und Pinnekamp, 2011b). In einer ähnlichen Größenordnung bewegen sich die Verfahren der Gruppen (2) und (3), wobei die Kosten stark von den spezifischen Umständen abhängen. Sie können unter ungünstigeren Umständen über 12 €/kg P

betragen, unter geeigneten Umständen und unter Nutzung von Synergieeffekten mit den bestehenden Anlagen bis auf 2 €/kg P (FIX-PHOS) sinken. Alle genannten Kostenwerte müssen in Relation zu einem Preis von etwa 1,25 €/kg P gesehen werden, der gegenwärtig (Stand Januar 2011) für Phosphatdüngemittel aus Rohphosphat gezahlt werden muss. Allzu groß ist der Abstand also nicht mehr. Und in Gruppe (6) sind schließlich sogar Verfahren zu finden, die zu diesem Preis jetzt oder in naher Zukunft wirtschaftlich betrieben werden können (ASH DEC, THERMPHOS, MEPHREC) (Horn et al. 2010; Scheidig et al. 2010). Allerdings hängt die Wirtschaftlichkeit teilweise von bestimmten Rahmenbedingungen ab, die in Deutschland nicht immer die günstigsten sind. Wir werden auf diesen Punkt später zurückkommen. Einstweilen kann festgestellt werden, dass es im Bereich des P-Recyclings zwei grundlegende Verfahrensansätze gibt, die kurz- bis mittelfristig vor allem auch aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus besonders aussichtsreich erscheinen: die Fällung bzw. Adsorption von Phosphat aus Schlammwasser (nach Abtrennung vom oder im Schlamm) sowie die Herstellung eines P-haltigen Düngers bzw. düngemittelwirksamen Phosphats aus Klärschlammasche.

### **3.2 Einsatz- und Entwicklungspotenziale der Rückgewinnungstechnologien**

Bei den Einsatzpotenzialen für P-Rückgewinnungstechnologien können mittelfristige und längerfristige unterschieden werden. Unter den mittelfristigen Potenzialen werden solche verstanden, die bis zum Jahr 2020 oder 2030 umsetzbar sind, das heißt ohne wesentliche Änderung der gegebenen Rahmenbedingungen. Dieser Zeithorizont ist auch als maßgeblich für die mögliche Einführung der P-Rückgewinnung auf deutschen Kläranlagen anzusehen.

#### **3.2.1 P-Rückgewinnung aus Schlammwasser**

Die Fällung aus dem Schlammwasser setzt eine möglichst hohe Konzentration noch gelösten oder rückgelösten Phosphats im Klärschlammstrom voraus, was am wahrscheinlichsten nach biologischer P-Eliminierung im Hauptstrom der Fall ist. Kläranlagen mit Bio-P-Eliminierung sind auch diejenigen, die am häufigsten mit Problemen durch die Freisetzung bis dahin biologisch gebundenen Phosphats während und nach der Vergärung des Klärschlammes und damit einhergehende spontane Struvitinkrustierungen zu kämpfen haben. Dementsprechend setzen die Verfahren PEARL, FIX-PHOS und AIRPREX vor, während und nach der Vergärung an, um das Phosphat gezielt aus dem Schlammstrom zu entfernen, bevor es in den Leitungen Inkrustationen bilden oder andere Schäden hervorrufen kann. Vor allem das PEARL-Verfahren der Firma Ostara kann durch den kombinierten Nutzen der Rückgewinnung eines P- (und N-)haltigen Düngemittels („Crystal green“) und der Vermeidung von betrieblichen Schwierigkeiten bereits heute im großen Maßstab wirtschaftlich arbeiten.

Das Potenzial für den Einsatz der P-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase des Klärschlammes umfasst dementsprechend alle Kläranlagen, die auch heute schon überwiegend oder ausschließlich P-Eliminierung mittels des Bio-P-Verfahrens betreiben. Der DWA-Klärschlammhebung für das Jahr 2003 (DWA, 2005) zufolge

waren das 37 Prozent der Kläranlagen, die gleichzeitig 37 Prozent des Abwassers aller an Kläranlagen angeschlossenen Einwohner behandelten. Mit einer Veränderung dieses Anteils ist ohne Veränderungen in den Rahmenbedingungen, die die Attraktivität des Bio-P-Verfahrens erhöhen, nicht zu rechnen. Zusätzlich zum Bio-P-Anteil ist für die Berechnung der notwendigen Investitionen (die gleichzeitig das Marktvolumen entsprechender Technologieanbieter abstecken) in diese Variante der P-Rückgewinnung auch noch zu berücksichtigen, dass es nur dann sinnvoll ist, dem Schlammwasser P zu entziehen, wenn der verbleibende Klärschlamm anschließend weder der Monoverbrennung (mit anschließender P-Rückgewinnung aus der Asche) noch der landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt werden soll. Daher stehen nur 48 Prozent des Klärschlamm für eine P-Rückgewinnung aus dem Schlammwasser zur Verfügung.

Um die Kosten der Implementierung der P-Rückgewinnung niedrig zu halten, gelangt das im PHOBE-Projekt näher untersuchte FIX-PHOS-Verfahrens in erster Linie in solchen Kläranlagen zum Einsatz, die eine Faulung durchführen, über mehrere Faulbehälter verfügen und Bio-P-Eliminierung durchführen. Das werden in erster Linie Kläranlagen der Größenklasse 5 sein, von denen, wie in Everding und Pinnekamp 2011a dargestellt, 95 Prozent eine Faulung (i.d.R. mit mehreren Behältern) besitzen. Unter Berücksichtigung des 37%-Anteils der Bio-P-Eliminierung und der Verfügbarkeit von nur 48 Prozent des gesamten Klärschlammaufkommens lässt sich also berechnen, dass von den 252 Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von 77 Mio. EW, die gegenwärtig in Deutschland der Größenklasse 5 zugeordnet sind (DeStatis 2009)  $(0,95 \times 0,37 \times 0,48 \times 252 =)$  43 mit einer Gesamtbehandlungskapazität von 13,2 Mio. EW mit dem FIX-PHOS-Verfahren ausgerüstet würden, was einem Gesamtinvestitionsvolumen von  $(43/252 \times 77 \text{ Mio. EW} \times 70.000 \text{ €/}100.000 \text{ EW} =)$  9,2 Mio. € entspräche. Da die erforderlichen Anlagenkomponenten (Siebe, Rohrleitungen und Pumpen) keinen hohen Innovationsgrad aufweisen, wird in der ersten Phase nur von geringen Lerneffekten in Höhe von 5 Prozent ausgegangen, die die Gesamtinvestitionssumme aber immerhin auf 7,3 Mio. € senken.<sup>1</sup>

### **3.2.2 P-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche**

Die P-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche setzt die Verbrennung des Klärschlamm voraus. Diese ist im Vergleich zur Deponierung mit zusätzlichem Aufwand und Kosten verbunden und wird dementsprechend vor allem dann durchgeführt, wenn die Verwertung des Klärschlamm weder in der Landwirtschaft noch im Landschaftsbau möglich ist.<sup>2</sup> In Deutschland hat der Anteil der Verbrennung an der Klärschlamm Entsorgung aufgrund von Vorbehalten in Bevölkerung und Politik hinsichtlich der möglichen Schädlichkeit der landwirtschaftlichen Verwertung von 1995 bis 2008 von 12 auf 53 Prozent zugenommen und noch ist kein Ende dieser

---

<sup>1</sup> Für Europa außerhalb Deutschlands kann aufgrund der Verbreitung von Verfahren der Nährstoffeliminierung (EC 2009) und einem kleineren Anteil des anspruchsvollen Bio-P-Prozesses insgesamt von einem deutlich kleineren Potenzial als in Deutschland ausgegangen werden.

<sup>2</sup> Die direkte Deponierung des Klärschlamm ist in Deutschland seit 2005 unzulässig.

Entwicklung absehbar (EUWID 2010). Allerdings ist vom Gesamtvolumen thermisch entsorgten Klärschlammes nur ein Teil für die P-Rückgewinnung geeignet. Bei der Mitverbrennung als energiereicher Brennstoff in Kraftwerken, Zementwerken und Müllverbrennungsanlagen wird der im Klärschlamm enthaltene Phosphor so stark verdünnt, dass er nur mit sehr hohem Aufwand zurückgewonnen werden könnte. Nur ein Anteil von 44 Prozent des für die thermische Entsorgung bestimmten Klärschlammes, d. h. 23 Prozent des gesamten Klärschlammes wird in Monoverbrennungsanlagen verbrannt und weist daher kurzfristig eine für die Rückgewinnung ausreichende P-Konzentration auf.

Mittelfristig, bis 2030, ist mit einem weiteren Anstieg des Anteils thermisch verwerteten Klärschlammes zu rechnen. Dabei gehen Studien davon aus, dass etwa 40 bis 80% des heute landwirtschaftlich verwerteten Klärschlammes in Zukunft nicht mehr die derzeit diskutierten Grenzwerte einer novellierten Klärschlammverordnung einhalten können. Einschließlich des heute bereits festzustellenden Anteils von 53% würde daraus bis 2030 ein Verbrennungsanteil von 64 bis 75 Prozent resultieren. Dabei ist aus betrieblichen Gründen mit einer deutlichen Ausweitung des Anteils der Mitverbrennung in Kraft- und Zementwerken nicht zu rechnen (EUWID 2010). Selbst wenn sich der Anteil von 3 Prozent der Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen verdoppeln würde, wäre dann mittelfristig mit einem Gesamtanteil der Monoverbrennung von etwa 37 Prozent zu rechnen.<sup>3</sup>

Um bei den 23 bzw. 37% des in Deutschland einer Mono-Verbrennung unterzogenen Klärschlammaufkommens eine P-Rückgewinnung mittels des PASCH-Verfahrens vorzunehmen, müssten (ungefähr auch den Szenarien 3 und 4 (nach Everding und Pinnekamp, 2011a entsprechend) 7 bzw. 11 PASCH-Anlagen mit einer Jahreskapazität von je 30.000 Tonnen Asche gebaut werden. Tatsächlich sind, wie in Everding und Pinnekamp (2011a) gezeigt wird, auf der Grundlage der aktuell vorhandenen Mono-Verbrennungsanlagen (entsprechend dem Szenario 3) 8 Standorte sinnvoll, an denen solche PASCH-Anlagen wirtschaftlich betrieben werden können. Einige dieser Anlagen hätten dann aber kleinere Kapazitäten als die vorgegebenen 30.000 Jahrestonnen oder sie wären zumindest zu Beginn nicht voll ausgelastet. Bei der anschließenden Steigerung der Anzahl der PASCH-Anlagen auf 11 bis zum Jahr 2030 (Szenario 4) gilt in der Realität ebenfalls, dass eher eine größere Zahl kleinerer Anlagen zu erwarten ist, die dann aber hinsichtlich ihrer spezifischen Investitionskosten etwas teurer wären. 7 bzw. 11 PASCH-Anlagen mit einer Jahreskapazität von jeweils 30.000 Tonnen Asche entsprächen ohne Einbeziehung der Kostendegression einem Gesamtinvestitionsvolumen von 33 bzw. 52 Mio. €. Werden Lerneffekte unter Annahme eines Lernkoeffizienten von 0,85 mit einbezogen, so könnten die Investitionskosten pro Anlage bis zur elften Anlage auf knapp 60 Prozent des Ausgangswertes sinken, woraus ein Gesamtinvestitions-

---

<sup>3</sup> Was das Gesamtpotenzial der P-Rückgewinnung aus Klärschlammesche in Europa angeht ist die Situation ähnlich wie bei der Rückgewinnung aus Schlammwasser. Grundsätzlich bewegt sich das Potenzial außerhalb Deutschlands in einer ähnlichen Größenordnung wie innerhalb; momentan reichen die Verbrennungskapazitäten aber noch lange nicht an die in Deutschland bereits realisierten heran.

volumen bis 2030 von 37 Mio. € resultieren würde. Unterstellte man im europäischen Ausland ein Potenzial für noch einmal die gleiche Anzahl von Anlagen, dann würden die Anlagenkosten weiter auf 2,3 Mio. € sinken und das Gesamtinvestitionsvolumen auf 64 Mio. € ansteigen.

### **3.3 Kostenentwicklung und Wirtschaftlichkeit**

#### **3.3.1 Primäres und sekundäres Phosphat im Vergleich**

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Anfang 2011) existiert kein Verfahren zur P-Rückgewinnung, das unter normalen Umständen, d. h. im direkten Wettbewerb mit aus Rohphosphat gewonnener und für die chemische Düngemittelproduktion erforderlicher Phosphorsäure wirtschaftlich wäre. Nachdem der Preis von Phosphorsäure lange Jahre bei etwa 0,5 €/kg P gelegen hatte und während der Krise auf den Rohstoffmärkten auf über 4 €/kg P angestiegen war, liegt der Kilogrammpreis nun zwischen 1,20 und 1,30 € – Tendenz steigend (vgl. Abb. 2). Das ist fast das Doppelte des Preises, der in AP1 des PHOBE-Projektes (Horn/Sartorius 2009)) als kostenbasierter Minimalpreis für Phosphorsäure festgestellt worden war. Dass der Preis gegenwärtig deutlich über den Kosten liegt, ist einerseits der starken Aus- bzw. Überauslastung der bestehenden Förderkapazitäten geschuldet; andererseits ist gegenwärtig die Spekulation auf weiter steigende Rohstoff- und damit auch Phosphorpreise ein wohlbekannter Kostentreiber. Da der untere Rand des in Abb. 2 dargestellten Preisbandes nicht unterschritten werden dürfte, stellt er den Referenzpreis für alle alternativen Verfahren der P-Gewinnung dar. Andererseits ist unter Anderem aufgrund des von Cordell et al. (2009) für ca. 2035 prognostizierten Phosphor-Peak in Zukunft nicht mit einer nennenswerten Ausweitung der effektiven Förderkapazitäten für Rohphosphat zu rechnen. Weil außerdem die Nachfrage nach P-Quellen in Zukunft eher zunehmen wird, ist nicht davon auszugehen, dass der Phosphorsäurepreis über längere Zeit auf dem Minimalniveau verharren wird. Stattdessen ist eher anzunehmen, dass der Phosphorsäurepreis zwischen dem oberen und unteren Rand hin- und her schwanken und im Durchschnitt eher entlang der Kurve der mittleren Erwartung bewegen wird.

Die hinsichtlich ihrer Kosten günstigsten Verfahren der P-Rückgewinnung aus der kommunalen Abwasserbehandlung, die im Folgenden genauer analysiert werden, sind den Berechnungen nach Everding und Pinnekamp (2011b) die folgenden Verfahren

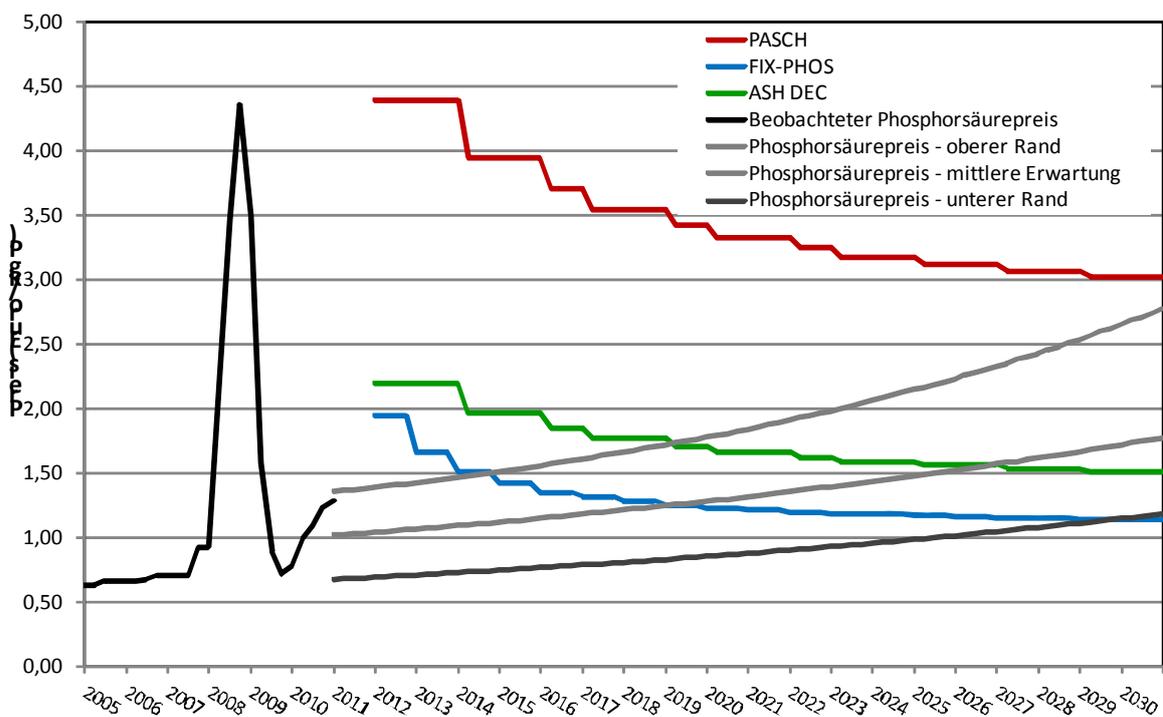
- FIX-PHOS in der kostengünstigen Variante (unter Rückgriff auf vorhandene Faulbehälter) mit weniger als 2 €/kg P (bei 1 Mio. bzw. 100.000 EW Ausbaugröße)
- PASCH in Anlage mit Jahreskapazität von 30.000 Tonnen Asche (entsprechend knapp 3 Mio. EW) mit 4,40 €/kg P

sowie ohne Kostenanalyse innerhalb des PHOBE-Projektes das Verfahren

- ASH DEC in Anlagen mit Jahreskapazität von mind. 25.000 Tonnen Asche mit berichteten 2,20 €/kg P (Hermann, 2010)

Sollen diese Kostenzahlen mit dem Referenzpreis für düngemittelfähiges P in Relation gesetzt werden, so ist nicht nur zu berücksichtigen, dass die Gewinnung von Rohphosphat, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, aufgrund knapper werdender bzw. schwerer zugänglicher Reserven in Zukunft teurer werden wird. Es muss außerdem der Tatsache Rechnung getragen werden, dass durch den Bau und Betrieb einer größeren Zahl von Anlagen zur P-Rückgewinnung Skalen- und Lerneffekte erzielt werden. Skaleneffekte entstehen dadurch, dass bei einer größeren Zahl von Anlagen Abläufe standardisiert und Werkzeugmaschinen eingesetzt werden können, die eine rationellere und damit kostengünstigere Produktionsweise erlauben. Lerneffekte (auch als „Learning by doing“ bekannt) stehen dagegen eher für Effizienzgewinne bei den Betriebsabläufen, d. h. z. B. zuverlässigerer Routinebetrieb mit geringerem Überwachungsaufwand und Einsparungen bei den Betriebsstoffen. Für jede Verdoppelung der kumulierten installierten Anlagenkapazitäten wird dabei üblicherweise je nach Innovationsgrad ein Kostenrückgang zwischen 10 und 20 Prozent unterstellt. Für die Anlagen der P-Rückgewinnung gehen wir von 15 Prozent Kostendegression aus. Eine Ausnahme stellt die kostengünstige Variante von FIX-PHOS dar, die sich aus technischen Standardkomponenten zusammensetzt und daher nur eine Kostendegression von 5 Prozent rechtfertigt. Beim Betrieb nehmen wir aufgrund der Abhängigkeit von ebenfalls knapper werdenden Rohstoffen allgemein einen Kostenrückgang von jeweils nur 10 Prozent an.

In Abb. 2 sind die Kostendegressionskurven verschiedener P-Rückgewinnungsverfahren der erwarteten Preisentwicklung geogenen Phosphors gegenüber gestellt.



**Abb. 2: Kostendegressionen und Break-even-Punkte für verschiedene, kostengünstigere Verfahren der P-Rückgewinnung**

Unter der Annahme eines Beginns der systematischen Einführung des P-Recyclings im Jahr 2012 ist bis zum Jahr 2030 für alle Ansätze eine Kostenreduktion von gut einem Drittel bis zu knapp der Hälfte zu verzeichnen. Dabei werden stärkere Rückgänge dort verzeichnet, wo kleinere Anlagen in größeren Stückzahlen errichtet werden (Bsp. FIX-PHOS). PASCH weist als teuerstes Verfahren in diesem Vergleich einen Rückgang seiner spezifischen Kosten von 4,40 auf 3,03 €/kg P auf und bleibt damit im Jahr 2030 knapp über dem oberen Rand des Referenzpreiskorridors für geogenes P. ASH DEC und FIX-PHOS, die im Jahr bei 2,20 bzw. 1,95 €/kg P starten, erreichen dagegen den oberen Rand des Korridors schon in den Jahren 2019 bzw. 2015 und den mittleren Erwartungspreis (= Break-even) in den Jahren 2027 bzw. 2019. Das heißt, dass unter diesen Umständen schon in weniger als einem Jahrzehnt mit der Wirtschaftlichkeit der günstigeren Verfahren zu rechnen ist. Es sei an dieser Stelle aber explizit darauf hingewiesen, dass die dargestellten Kostenrückgänge nur dann eintreten, wenn im Jahr 2012 tatsächlich mit der Implementierung der entsprechenden Rückgewinnungstechnologien im angenommenen Umfang begonnen wird.

**3.3.2 Die zusätzlichen Kosten der P-Rückgewinnung**

Die zusätzlichen oder *Differenzkosten* der verschiedenen Verfahren der P-Rückgewinnung sind umso höher je weiter der Break-even-Punkt in der Zukunft liegt. Um die im Zeitverlauf anfallenden Differenzkosten zu beziffern, ist es notwendig, neben den Investitions- und Betriebskosten die kumulierten Anlagenkapazitäten explizit in die Analyse mit einzubeziehen. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist für die drei Verfahren FIX-PHOS, ASH DEC und PASCH in Tab. 1 dargestellt.

Wie aus Abb. 2 und Tab. 1 ersichtlich, sinken die spezifischen Rückgewinnungskosten des günstigsten Verfahrens, FIX-PHOS, schon 2019 unter das Niveau des Rohphosphatpreises. Die bis zu diesem Zeitpunkt kumulierten Differenzkosten betragen knapp 1 Mio. €. Danach trägt sich das Verfahren nicht nur aus Sicht der Investoren, sondern ermöglicht der gesamten Wirtschaft die Versorgung mit kostengünstigerem Phosphor aus einer dazu noch sicheren Quelle. Der Nachteil: Die Ausbeute des Verfahrens ist relativ gering und die Anwendbarkeit auf einen relativ kleinen Anteil der Kläranlagen beschränkt. Insgesamt wäre mit dieser Technik eine Rückgewinnungsquote von etwa 2% erreichbar. Dennoch ist sie wichtig, um gerade zu Beginn der Einführung einer neuen Technologie auch preisgünstige Alternativen verfügbar zu haben und damit Hemmnisse für ein Engagement zu überwinden.

Im Gegensatz dazu ist beim PASCH-Verfahren nicht nur die Ausbeute deutlich höher, sondern auch die Menge der verfügbaren Klärschlamm(asche). Dafür erreicht das Verfahren zumindest im untersuchten Zeitraum (bis 2030) den Break-even-Punkt nie. Im Jahr 2027 überschreiten die Differenzkosten das Maximum von rund 24 Mio. € jährlich und kumulieren sich bis 2030 auf eine Summe von rund 340 Mio. €. Dieser Wert ist in Relation zur in der gleichen Zeit zurückgewonnenen P-Menge von 193.000 Tonnen zu sehen. Die kumulierten Differenzkosten relativieren sich weiter,

wenn berücksichtigt wird, dass die als Zwischenlösung oft vorgeschlagene „Zwischendeponierung“ von Klärschlammasche für diese Mengen ebenfalls 290 Mio. € kosten würde.<sup>4</sup>

**Tabelle 1: Spezifische Rückgewinnungskosten und Differenzkosten für verschiedene P-Rückgewinnungsverfahren von 2012 bis 2030**

| Jahr | P-Referenzkosten* (€/Mg P) | FIX-PHOS-Verfahren                        |                          | PASCH-Verfahren                           |                          | ASH DEC-Verfahren                         |                          |
|------|----------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|
|      |                            | Spezifische Rückgewinnungskosten (€/Mg P) | Differenzkosten (1000 €) | Spezifische Rückgewinnungskosten (€/Mg P) | Differenzkosten (1000 €) | Spezifische Rückgewinnungskosten (€/Mg P) | Differenzkosten (1000 €) |
| 2012 | 1.058                      | 1.857                                     | -104                     | 4.397                                     | -5.509                   | 2.199                                     | -1.882                   |
| 2013 | 1.085                      | 1.605                                     | -169                     | 4.397                                     | -5.465                   | 2.199                                     | -1.838                   |
| 2014 | 1.112                      | 1.479                                     | -191                     | 3.947                                     | -9.355                   | 1.973                                     | -2.843                   |
| 2015 | 1.141                      | 1.396                                     | -199                     | 3.947                                     | -9.260                   | 1.973                                     | -2.747                   |
| 2016 | 1.172                      | 1.339                                     | -163                     | 3.705                                     | -12.539                  | 1.853                                     | -3.369                   |
| 2017 | 1.204                      | 1.303                                     | -116                     | 3.543                                     | -15.440                  | 1.772                                     | -3.748                   |
| 2018 | 1.236                      | 1.273                                     | -51                      | 3.543                                     | -15.230                  | 1.772                                     | -3.538                   |
| 2019 | 1.270                      | 1.248                                     | 33                       | 3.422                                     | -17.759                  | 1.711                                     | -3.642                   |
| 2020 | 1.306                      | 1.227                                     | 138                      | 3.327                                     | -20.008                  | 1.663                                     | -3.542                   |
| 2021 | 1.343                      | 1.211                                     | 249                      | 3.327                                     | -19.637                  | 1.663                                     | -3.170                   |
| 2022 | 1.382                      | 1.199                                     | 368                      | 3.248                                     | -21.547                  | 1.624                                     | -2.790                   |
| 2023 | 1.422                      | 1.189                                     | 500                      | 3.181                                     | -23.221                  | 1.591                                     | -2.226                   |
| 2024 | 1.464                      | 1.179                                     | 649                      | 3.181                                     | -22.666                  | 1.591                                     | -1.670                   |
| 2025 | 1.509                      | 1.170                                     | 815                      | 3.123                                     | -23.982                  | 1.562                                     | -790                     |
| 2026 | 1.554                      | 1.161                                     | 997                      | 3.123                                     | -23.305                  | 1.562                                     | -113                     |
| 2027 | 1.602                      | 1.155                                     | 1.164                    | 3.073                                     | -24.265                  | 1.536                                     | 1.086                    |
| 2028 | 1.651                      | 1.151                                     | 1.333                    | 3.073                                     | -23.463                  | 1.536                                     | 1.888                    |
| 2029 | 1.703                      | 1.147                                     | 1.520                    | 3.028                                     | -24.038                  | 1.514                                     | 3.438                    |
| 2030 | 1.758                      | 1.143                                     | 1.720                    | 3.028                                     | -23.040                  | 1.514                                     | 4.436                    |

\* Mittelwert des erwarteten Preiskorridors für P aus Rohphosphat (von Horn/Sartorius 2009)

Quelle: Eigene Berechnungen

Alternativ (oder parallel) zum PASCH-Verfahren könnte ggf. auch das ASH DEC-Verfahren zum Einsatz kommen. Es weist die Vorteile des PASCH-Verfahrens hinsichtlich Menge und Wirkungsgrad auf, kostet aber nur etwa die Hälfte. Das

<sup>4</sup> Bei dem Vorschlag, P-haltige Klärschlammasche „zwischenzulagern“ bis die Kosten der Rückgewinnungsanlagen gesunken sind, wird meist übersehen, dass die Kosten nur dann aufgrund von Lerneffekten sinken können, wenn die Technik tatsächlich implementiert wird.

Die Kosten der Deponierung von Klärschlammasche betragen dem PHOBE-Projekt zufolge aufgrund der hohen Anforderungen hinsichtlich Boden- und Grundwasserschutz 1,50 €/kg P.

ASH DEC-Verfahren würde im Jahr 2026 den Break-even-Punkt erreichen und bis dahin Differenzkosten in Höhe von maximal 38 Mio. € anhäufen. Allerdings ist mit dem Nachteil behaftet, dass kein reines Phosphat gewonnen wird, das analog zum Rohphosphat in der industriellen Düngemittelproduktion Eingang finden könnte, sondern eine weitgehend von Schadstoffen entfrachtete Klärschlammasche, die unmittelbar in der Landwirtschaft eingesetzt werden könnte. Hierfür existiert gegenwärtig aber noch kein Vertriebsnetz, außerdem ist die Handhabung für die Landwirte mit gewissen Umstellungen verbunden. Beides stellt nicht zu vernachlässigende Barrieren für eine schnelle Markteinführung dar.

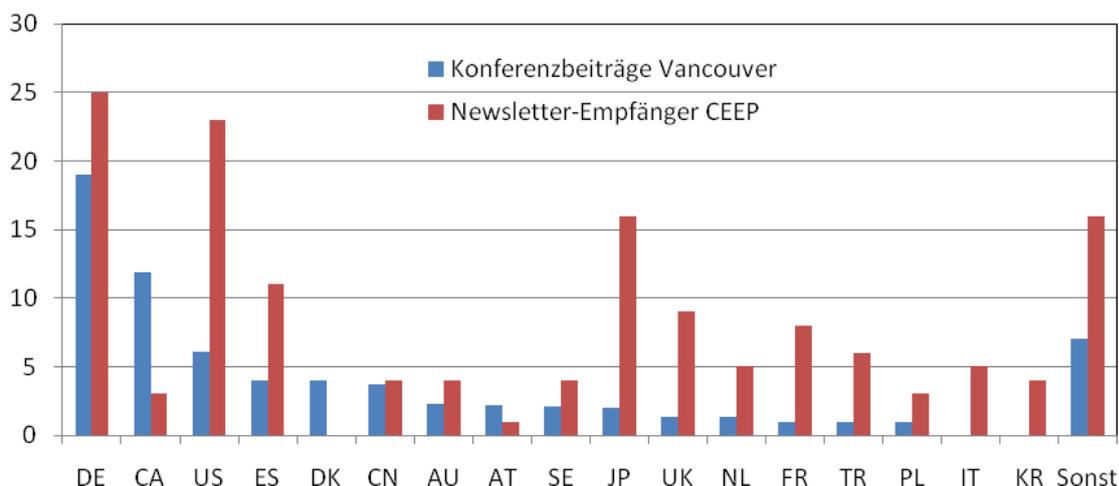
#### **4 Deutschland als Vorreitermarkt für die P-Rückgewinnung aus Abwasser**

Neben einer größeren Unabhängigkeit von Rohphosphat- oder Düngemittelimporten und ihren schwankenden und häufig steigenden Preisen bedeutet ein zunehmendes Engagement deutscher Unternehmen im Bereich der P-Rückgewinnung auch die Aneignung spezifischen Wissens hinsichtlich der Entwicklung der erforderlichen Anlagen und ihres Betriebs. Dieses Know-how kann dazu genutzt werden und ist gleichbedeutend mit Wettbewerbsvorteilen, wenn es darum geht, Anlagen zur P-Rückgewinnung herzustellen und auch im Ausland zu verkaufen und zu betreiben. Der daraus möglicherweise resultierende Anstieg der Wirtschaftsleistung kann als weiteres Argument für den Einstieg in die P-Rückgewinnung gelten. Allerdings müssen zur Umsetzung dieses Potenzials gewisse Bedingungen erfüllt sein: Wissenschafts- und forschungsseitig müssen die erforderlichen Kompetenzen verfügbar sein, entsprechende Technologieanbieter müssen vorhanden sein und die Konkurrenz im Ausland darf nicht zu groß sein. Schließlich spielt bei der Nutzung eines Potenzials der Zeitfaktor eine wichtige Rolle, damit vorhandene Vorteile nicht wieder verloren gehen.

##### **4.1 Deutsche Forschungskompetenzen im Bereich der P-Rückgewinnung**

Ein erster Hinweis auf die Bedeutung deutscher Forschungsinstitutionen bei der Erforschung von Technologien zum P-Recycling ergibt sich aus der Analyse der Herkunftsländer der in Abb. 1 dargestellten Verfahren. Von den 20 dargestellten Verfahren wurden bzw. werden 14 in Deutschland erforscht, je zwei in den Niederlanden und Schweden und je eine in Dänemark, Norwegen, Finnland, USA und Kanada. Dass Deutschland bei der Erforschung des P-Recyclings eine herausragende Rolle spielt, wird auch aus der Anzahl der Konferenzbeiträge zur „International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams“ ersichtlich, die im Mai 2009 in Vancouver, Kanada, stattfand. Selbst wenn berücksichtigt wird, dass deutsche Forschergruppen, die sich mit dem Thema P-Recycling beschäftigen, vom Projektträger besonders ermutigt wurden, ihre Ergebnisse auf der Konferenz vorzustellen, ist es doch bemerkenswert, dass die Zahl der deutschen Beiträge deutlich vor der der Gastgeber und weit vor der der USA lag. Im europäischen Vergleich ragen noch Spanien, Österreich, Schweden, Großbritannien und die Niederlande hervor (die dänischen Beiträge befassen sich

ausschließlich mit Wirtschaftsdüngern), im außereuropäischen Vergleich China, Australien und Japan (vgl. Abb. 3).



**Abb. 3: Internationaler Vergleich der Anzahl der Konferenzbeiträge in Vancouver 2009 und der News Group-Mitglieder der CEEP-Webseite (Stand: März 2010)**

Zum Vergleich ist in Abb.3 auch noch die Anzahl der News Group-Mitglieder des CEEP (Centre Européen d'Études des Polyphosphates; [www.ceep-phosphates.org](http://www.ceep-phosphates.org)), eines Informationsforums für die europäische Phosphatindustrie aufgeführt, das sich in der Vergangenheit auch intensiv mit dem Thema P-Recycling beschäftigt hat.<sup>5</sup> Die Webseite wurde bis vor Kurzem in England betrieben, so dass nicht von einem standortbedingtem Bias zugunsten deutscher TeilnehmerInnen auszugehen ist. TeilnehmerInnen aus Spanien, Schweden, Großbritannien, den Niederlanden, Frankreich, Türkei, Polen und Italien stellen sich im Vergleich zu Deutschland besser als bei den Beiträgen zur Konferenz in Vancouver, was angesichts der besonderen Anreize für deutsche ForscherInnen nicht überrascht. Dennoch sind Letztere auch hier deutlich in der Überzahl. Interessant ist auch die hohe Zahl von US-AmerikanerInnen und JapanerInnen, die die Webseite offensichtlich als international zugängliche Informationsquelle für die Entwicklung in Europa nutzen.

#### 4.2 In Deutschland bereits umgesetzte P-Rückgewinnungsverfahren

Ein großtechnisches Verfahren zur Lösung von Inkrustationsproblemen bei der Faulung und in den nachgeschalteten Rohrleitungen wurde von den Berliner Wasserbetrieben entwickelt. In diesem als „**BERLINER VERFAHREN**“ bezeichneten Prozess wird der ausgefaulte Schlamm im Vorlagebehälter der Zentrifugen einer gezielten MAP-Fällung unterzogen. Zur wirkungsvolleren Abtrennung des MAP gelangte zunächst ein Hydrozyklon, später dann mit Erfolg ein Airlift-Reaktor zum

<sup>5</sup> Vor Kurzem wurde das Thema P-Recycling auf die Webseite [www.phosphorus-recovery.tu-darmstadt.de](http://www.phosphorus-recovery.tu-darmstadt.de) des Institutes IWAR der TU Darmstadt ausgliedert.

Einsatz (Stumpf et al. 2009). Das MAP-Produkt wird im Anschluss gewaschen und getrocknet und besitzt die Düngemittelzulassung. Unter dem Namen **AIRPREX** wird das Verfahren außerdem von der Hamburger Firma PCS Consult in Lizenz vermarktet (PCS-Consult, 2010).

Das **SEABORNE**-Verfahren wurde zur Rückgewinnung von Phosphat aus gefaultem Klärschlamm und Gülle entwickelt. Nach einer halbtechnischen Anlage, die seit 2000 in Owschlag (Schleswig-Holstein) in Betrieb ist (Schulz/Schultze 2001), hat im Jahr 2007 in Gifhorn (Ostniedersachsen) eine großtechnische Anlage in vereinfachter Verfahrensvariante den Betrieb aufgenommen. Zwecks Senkung der Chemikalienkosten wird die Anlage bei pH 5 gefahren, was zwar zulasten der P-Ausbeute geht (Müller 2004; Bayerle 2009). Die höhere Gasausbeute bei der Faulung und bessere Entwässerbarkeit machen das Verfahren aber rentabel, so dass die Betreiber z. Z. ohne Förderung auskommen. Das P-Produkt (MAP) wird getrocknet und direkt in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt.

Beim „**STUTTARTER VERFAHREN**“ wird Phosphat zunächst mittels Säure aus dem anaerob stabilisierten Klärschlamm zurückgelöst, durch Komplexbildung mit Zitronensäure von Schwermetallionen befreit und dann als MAP gefällt. Es hat den Vorteil, dass es auch in Kläranlagen mit P-Eliminierung mittels Eisensalzen durchgeführt werden kann und daher in vielen Kläranlagen ohne Verfahrensumstellung einsetzbar ist. Nach Entwicklung und Erprobung im Labormaßstab in den Jahren 2003 und 2004 wurde das Stuttarter Verfahren zunächst zum halbtechnischen Maßstab (1 m<sup>3</sup> Reaktorvolumen) weiterentwickelt (2006 bis 2007), wobei eine Rückgewinnungsquote von 70% stabil erreicht wurde. Zwischenzeitlich wurde auf der Kläranlage Offenburg-Grießheim eine Modellanlage mit 20 Kubikmetern Reaktorvolumen errichtet, mit der der Klärschlamm von 5.000 bis 10.000 Einwohnern behandelt werden kann (MUNV 2011). Das ausgefällte MAP kann unmittelbar als Mehrnährstoffdünger verwendet werden.

Das ursprünglich in Österreich entwickelte und in Löben im Pilotmaßstab umgesetzte **ASH DEC**-Verfahren wird derzeit in der Niederlassung Oberursel der finnischen Firma Outotec weiterentwickelt. Die Technologie wurde über längere Zeit erfolgreich im halbtechnischen Maßstab erprobt. Die Hochskalierung zur großtechnischen Anlage ist geplant. Es werden zurzeit mehrere Standorte für eine Großanlage geprüft (Hermann 2010). Beim ASH DEC-Verfahren wird die P-haltige Klärschlammasche durch Behandlung mit Säure und Brennen mit chlorhaltigen Verbindungen in ein schwermetallentfrachtetes Düngeprodukt überführt, das hinsichtlich seiner Düngewirkung mit Handelsdünger (TSP) vergleichbar ist. Nach Einstellung der Nährstoffkomponenten und Pelletierung entspricht das entstandene Produkt der Düngemittelverordnung und besitzt die Düngemittelzulassung.

Beim **MEPHREC**<sup>®</sup>-Verfahren wird in einem metallurgischen Verfahrensschritt eine Sauerstoff-Schmelz-Vergasung von P-haltigen Materialien wie Klärschlamm (oder Klärschlammasche) durchgeführt. Dazu wird der brikettierte Klärschlamm vergast und seine Aschebestandteile bei 2000°C eingeschmolzen. Die Phosphatfraktion kann (bei 1450°C) von den (Schwer-) Metallen getrennt abgestochen werden und

liegt nach Erstarrung im Wasserbad in einer gut pflanzenverfügbaren Form vor. Das Düngeprodukt ist mit der Düngemittelverordnung konform. Für das bisher im Technikumsmaßstab (300 kg Schlacke/h) realisierte Verfahren befinden sich größere Anlagen in der Planung (Scheidig 2010). Mit einer Machbarkeits-Studie im Auftrag der Stadt Nürnberg konnte nachgewiesen werden, dass der MEPHREC<sup>®</sup>-Prozess auf einer Kläranlage aufgrund der Nutzung der im Klärschlamm (anstelle entsprechender Asche) enthaltenen Energie so gestaltet werden kann, dass die P-haltige Schlacke zu wettbewerbsfähigen Preisen auf den Markt gebracht werden kann. 2012 soll auf dieser Grundlage eine Demo-Anlage mit 500 t und 2014 eine Produktionsanlage mit 7.500 t Jahreskapazität errichtet werden.

### 4.3 Konkurrenz aus dem Ausland

In den Niederlanden ist die landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes aus Gründen mangelnder öffentlicher Akzeptanz, wegen sehr niedriger Schadstoffgrenzwerte und weil aus der Massentierhaltung bereits ausreichend Wirtschaftsdünger zur Verfügung steht, praktisch ausgeschlossen. Die jedes Jahr in den Niederlanden anfallenden 350.000 Tonnen Klärschlamm werden daher fast ausschließlich thermisch entsorgt, zumal damit auch dem Ziel der weitgehenden Volumenreduktion Rechnung getragen werden kann. 55 Prozent des Klärschlammes werden dabei zwei Monoverbrennungsanlagen zugeführt, der Rest wird mitverbrannt oder exportiert (EUWID 2009). In der Vergangenheit wurde mit Hilfe des DHV Crystalactors Phosphor als Kalziumphosphat aus dem Klärschlammwasser im großen Maßstab auskristallisiert und diente als Rohstoff für die industrielle Phosphorproduktion mittels des Thermphos-Verfahrens. In jüngerer Zeit sind die P-Konzentrationen aber gesunken, weshalb die Anlage in Geestmeranbracht nicht mehr rentabel ist und vor kurzem geschlossen wurde. Nun versucht man stattdessen, Klärschlamm-Asche unmittelbar als Substitut für Rohphosphat zu verwenden (Korvang 2010). Dazu darf der Eisengehalt einen gewissen Schwellenwert ( $0,2 \text{ mol Fe/mol P}$ ) nicht überschreiten. Tatsächlich liegt das Verhältnis im Durchschnitt bei 0,6 bis 0,8. Zur Lösung des Problems werden gegenwärtig zwei Strategien besprochen: erstens die getrennte Sammlung und Verbrennung von Klärschlamm aus Kläranlagen mit Bio-P-Eliminierung und zweitens die Umstellung von Fe- auf Al-Salze bei der chemischen P-Eliminierung. Das Non-Profit-Unternehmen SNB, das eine der beiden Monoverbrennungsanlagen betreibt, sieht gute Chancen, auf diese Weise bis 2015 den Phosphor aus 30 Prozent des niederländischen Klärschlammes zu recyceln. Dabei soll die P-Rückgewinnung wirtschaftlich tragfähig sein, weil die Klärschlamm-Asche dann nicht mehr kostenpflichtig auf dem in den Niederlanden knappen Deponieraum entsorgt werden muss, sondern Thermphos für die P-Quelle Klärschlamm-Asche sogar noch etwas zahlt (Korvang 2010). Wie ernst das Thema Nährstoffrückgewinnung in den Niederlanden genommen wird, lässt sich aus der Gründung der „Nutrient platform“ ersehen, die im Dezember 2010 ins Leben gerufen wurde und in der sich etwa ein Dutzend Unternehmen, Verbände, NGOs und die Politik gemeinsam daran machen, eine landesweite Strategie zur Nährstoffrückgewinnung aus Abwasser zu entwickeln (<http://www.phosphaterecovery.com/news/current-news/launch-of-nutrient-platform/1018>).

Seit Mai 2009 sind in Nordamerika drei PEARL-Reaktoren im Einsatz, die täglich 1.500 kg Struvit produzieren. Das PEARL-Verfahren wurde in Kanada (University of British Columbia) entwickelt und von der Firma Ostara in den letzten Jahren bis zum großtechnischen Einsatz weiterentwickelt. Das Verfahren ist dem DHV-Crystalactor ähnlich. Aus Prozesswasser wird durch Dosierung von Magnesiumchlorid in einem Schwebebettreaktor Struvit gewonnen. Ca. 90% des im Prozesswasser gelösten Phosphats werden durch das Verfahren recycelt. Das Struvit wird in Form von staubfreien Pellets produziert, die direkt als (Langzeit-) Rasendünger (Crystal Green) zum Einsatz kommen. Eine Besonderheit am PEARL-Verfahren stellt auch das Geschäftsmodell dar, wonach die Anlagen nicht einfach verkauft werden, sondern die Nutzer für den erfolgreichen Betrieb, d. h. die Eliminierung von P aus dem Schlamm zahlen (Britton 2009). Im Vordergrund steht dabei die Vermeidung von Komplikationen durch zu hohe P-Konzentrationen im Schlammstrom. Die Rückgewinnung des Phosphors ist eine Möglichkeit, mit Hilfe des anfallenden Nebenproduktes einen zusätzlichen Deckungsbeitrag zu erlösen. Eine Variante des hier dargestellten Verfahrens ist das in Japan entwickelte PHOSNIX-Verfahren (Nawa/Matsushita 2009).

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Von der beachtlichen Zahl von P-Rückgewinnungsverfahren, die innerhalb der letzten Jahre vor allem in Deutschland aber vereinzelt auch im Ausland im Rahmen von Forschungs- und Demonstrationsprojekten untersucht wurden, konnten zwei Verfahrensstränge als wirtschaftlich kurz- bis mittelfristig besonders aussichtsreich identifiziert werden: die Fällung bzw. Adsorption von Phosphat aus Klärschlammwasser (nach Abtrennung vom oder im Schlamm) sowie die Herstellung eines P-haltigen Düngers bzw. düngemittelwirksamen Phosphats aus Klärschlammmasche. In keinem Fall kann das zurückgewonnene Phosphat oder phosphathaltige Düngemittel hinsichtlich des Preises mit aus geogenem Rohphosphat hergestellter Phosphorsäure konkurrieren, die in der chemischen Industrie als Grundstoff für P-Dünger dient. Während im letztgenannten Fall ca. 1,25 €/kg P zu zahlen sind, liegen die günstigsten Rückgewinnungsverfahren bei einem P-Preis von knapp 2 €/kg. Allerdings ist es in bestimmten Fällen auch heute schon möglich, P wirtschaftlich zurückzugewinnen, wenn die P-Rückgewinnung nicht der einzige Zweck ist bzw. besondere Rahmenbedingungen die Nutzung des Verfahrens begünstigen. Solche Marktnischen können darin bestehen, dass durch die P-Entnahme aus dem Klärschlamm Betriebsprobleme durch Struvitinkrustierungen in den Leitungen und Behältern der Kläranlage verhindert werden können (Bsp. BERLINER VERFAHREN, PEARL) oder, wie in den Niederlanden der Fall, die Entsorgung von Klärschlammmasche so teuer ist, dass sich die Umwandlung in ein handelbares Düngemittelprodukt auch heute schon lohnen kann (Bsp. ASH DEC).

Aber selbst wenn von der Existenz von Marktnischen abgesehen wird, ist die P-Rückgewinnung aufgrund der Kostendegression seitens der Technologie selbst und des erwarteten Kostenanstiegs seitens der P-Gewinnung aus Rohphosphat nicht weit von der wirtschaftlichen Tragfähigkeit entfernt. Unseren Berechnungen zufolge

könnte die P-Rückgewinnung aus dem Klärschlammwasser (FIX-PHOS) schon in knapp 10 Jahren und die Düngergewinnung aus Klärschlammasche (ASH DEC) in weniger als 15 Jahren wirtschaftlich sein. Gelingt es darüber hinaus Marktnischen zu identifizieren und zu nutzen, dann verkürzen sich die verbleibenden Zeiträume entsprechend. Es muss allerdings betont werden, dass Kostendegression nur in dem Umfang stattfindet wie die tatsächliche Implementierung der entsprechenden Technologien. Bloßes Abwarten ist hier also allenfalls hinsichtlich des zu erwartenden Preisanstiegs beim Rohphosphat zielführend.

Für mögliche deutsche Produzenten von P-Rückgewinnungstechnologien ergäbe sich aus dem hier betrachteten Szenario bei kurzfristigem (bis 2012) Einstieg in die Technologie und Nutzung der günstigsten Gelegenheiten bis zum Jahr 2030 ein europaweites Marktpotenzial von 12 bzw. 64 Millionen Euro für die beiden betrachteten Technologiezweige. Die Aussichten für solch einen kurzfristigen Einstieg deutscher Unternehmen können dabei als positiv beurteilt werden, da die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich in Deutschland gegenüber anderen Ländern als dominant angesehen werden kann. Was den marktnahen Bereich angeht, so gibt es in Deutschland ebenfalls relevante Aktivitäten, die sich zudem auf verschiedene Verfahrensstränge verteilen. Es gibt aber in beiden Fällen auch signifikante Konkurrenten in Nordamerika (PEARL) und den Niederlanden (CRYSTALACTOR, THERMPHOS), die in ihren Heimatländern hinsichtlich einer möglichen Marktdurchdringung schon jetzt im Vorteil sind. Um den jetzt zumindest im Bereich der Forschung und Entwicklung noch vorhandenen Vorsprung zu halten, müsste in Deutschland die bisherige Entwicklung kontinuierlich vorangetrieben werden und ein schneller Übergang hin zu größeren Demonstrations- und Produktionsanlagen im Großmaßstab erfolgen.

## Literatur

- Bayerle, N. (2009). P-recycling in Gifhorn with the modified Seaborne process. Conference Baltic 21 on „Phosphorus Recycling and Good Agricultural Practice“. Berlin, 28.-30. September 2009.
- Britton, A.(2009) P-Recovery in Noirth America – Ostara´s Pearl Process. Conference Baltic 21 on „Phosphorus Recycling and Good Agricultural Practice“. Berlin, 28.-30. September 2009
- Cordell, D.; Drangert, J.-O., White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change 19 (2009) 292-305.
- DWA (2005): Stand der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in Deutschland – Ergebnisse der DWA-Klärschlammhebung 2003. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef
- EC (2009): Annex to the 5th Commission Summary on the implementation of the Urban Waste Water Treatment Directive. Commission Staff Working Document SEC(2009) 1114 (3.8.2009) [http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/implementation/pdf/implementation\\_report\\_annex.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/implementation/pdf/implementation_report_annex.pdf)
- EUWID (2009): Klärschlamm in Holland fast ausschließlich thermisch entsorgt. EUWID Wasser und Abwasser 15/2009: S. 16
- EUWID (2010): Mit weiterem Rückgang der Klärschlammdüngung ist zu rechnen. EUWID Wasser Abwasser 44/2010 (3.11.2010), S. 5

- Everding, W. und Pinnekamp, J. (2011a): Bundesweites Phosphor-Rückgewinnungskonzept für Klärschlamm und Klärschlammasche aus der Monoverbrennung In: Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor, Schlusspräsentation der Förderinitiative am 14.09.2011 in Berlin. Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser Band 228. Hrsg.: Prof. J. Pinnekamp, Aachen. ISBN 978-3-938996-34-8
- Everding, W. und Pinnekamp, J. (2011b): Kostenabschätzung von ausgewählten Phosphorrückgewinnungsverfahren In: Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor, Schlusspräsentation der Förderinitiative am 14.09.2011 in Berlin. Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser Band 228. Hrsg.: Prof. J. Pinnekamp, Aachen. ISBN 978-3-938996-34-8
- Hermann, L. (2010). Persönliche Mitteilungen (telefonisch, Email) im März 2010 und Januar 2011.
- Horn, J. von; Sartorius, C. (2009): Impact of supply and demand on the price development of phosphate (fertilizer), International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams, 10-13. Mai 2009, Vancouver. [http://www.phosphorrecycling.de/attachments/040\\_vonHorn-Sartorius-2009\\_P-price-development.pdf](http://www.phosphorrecycling.de/attachments/040_vonHorn-Sartorius-2009_P-price-development.pdf)
- Horn, J. von; Sartorius, C.; Tettenborn, F. (2010): Technologievorausschau für Phosphorrecycling-technologien. AP 6 des BMBF-Projektes „Phosphorrecycling - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland“ (PhoBe). [http://www.phosphorrecycling.de/attachments/041\\_Bericht\\_AP6\\_Technologievorausschau\\_2010-08-10.pdf](http://www.phosphorrecycling.de/attachments/041_Bericht_AP6_Technologievorausschau_2010-08-10.pdf)
- Müller, J. (2004). Anpassung der Seaborne-Verfahrenstechnik an die Bedingungen einer kommunalen Kläranlage. Vortrag beim DWA Workshop Phosphorrückgewinnung in Weimar im Oktober 2004.
- MUNV (Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg) (2011): Land bezuschusst Modellvorhaben zur großtechnischen Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen mit 645.000 Euro. <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/68377/>
- Nawa, Y., Matsushita, T. (2009). P-Recovery in Japan – The Phosnix process. Conference Baltic 21 on „Phosphorus Recycling and Good Agricultural Practice“. Berlin, 28.-30. September 2009
- PCS-Consult (2010). Homepage <http://www.pcs-consult.de/html/airprex1.html> und Telefoninterview mit Mitarbeiterin Svenja Rogge.
- Scheidig, K. (2011): Beschreibung des Mephrec®-Produktionsprozesses. Persönliche Mitteilung.
- Scheidig, K.; Mallon, J.; Schaaf, M. (2010). Zukunftsfähige Klärschlammverwertung. KA Korrespondenz Abwasser Abfall 57 (9): S. 902-915.
- Stumpf, D.; Heinzmann, B.; Schwarz, R.-J., Gnirss, R.; Kraume, M. (2009). Induced struvite precipitation in an airlift reactor for phosphorus recovery. Proceedings of the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams. Vancouver, Kanada 10.-13. Mai 2009.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Dr. Christian Sartorius  
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Breslauer Straße 48  
76139 Karlsruhe  
E-Mail: [Christian.Sartorius@isi.fraunhofer.de](mailto:Christian.Sartorius@isi.fraunhofer.de)