

Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Mario Mocker, Ingrid Löh und Fabian Stenzel

1 Einleitung

Phosphor ist ein essenzielles Element für alle Lebewesen und Pflanzen und deshalb in vielen Bereichen unersetzlich. So gehört der Rohstoff Phosphor zu den entscheidenden Komponenten der Lebensmittel- und Düngerindustrie. Auch in der Futtermittelproduktion, der Pharmaindustrie, für Oberflächenbehandlungen und in Hochleistungsakkumulatoren (Lithium-Eisen-Phosphat-Elektroden) werden Phosphorverbindungen eingesetzt.

Da die wirtschaftlich abbaubaren und nur gering mit Schadstoffen belasteten Vorräte absehbar zur Neige gehen und diese Lagerstätten in vergleichsweise wenigen Ländern liegen, kann Phosphor in den nächsten Jahrzehnten zum Mangelstoff werden. Diese Entwicklung war in den letzten Jahren am Rohstoffmarkt zu spüren, als innerhalb von eineinhalb Jahren der Preis für Rohphosphat um mehr als das 10-fache anstieg [Mongabay 2011]. Nach einem kurzzeitigen Rückgang während der Wirtschaftskrise 2008/2009 auf ein Fünftel des Höchstpreises ist mittlerweile wieder eine deutliche Steigerung des Handelswertes zu beobachten. Außerdem verfügen Deutschland und die meisten europäischen Länder nicht über natürliche Phosphorvorkommen und sind somit auf den Import von Rohphosphat oder Düngemitteln angewiesen. Aus diesen Gründen wurden in den letzten Jahren weltweit Forschungsaktivitäten zur Phosphorrückgewinnung unternommen. Besonders aktiv sind hier vor allem Deutschland, Japan, Kanada, Schweden, die USA und die Schweiz.

Als wesentliche Stoffströme für die Phosphorrückgewinnung kommen vor allem Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammasche, sowie Tier- und Fleischknochenmehl in Frage. Einige andere Substanzen wie Wirtschaftsdünger, Biomasseaschen, Komposte, Gärreste aus Biogasanlagen oder Rückstände aus der Nahrungsmittelproduktion werden zum Teil bereits zu Dünge Zwecken genutzt, wobei hier zum Teil die Kreislaufführung anderer Pflanzennährstoffe im Vordergrund steht.

Klärschlamm bzw. Klärschlammasche gelten als die Stoffe mit dem größten Einzelpotenzial zur Phosphorrückgewinnung. In früheren Jahren wurde durch die direkte Schlamm- ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen ein Großteil des Phosphors wieder dem Nahrungskreislauf zugeführt. Aufgrund der Funktion des Klärschlammes als Schadstoffsenke bei der Abwasserreinigung und der damit verbundenen Belastung sowie aufgrund von Unsicherheiten bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit des darin enthaltenen Phosphors ist diese Kreislaufführung in Frage zu stellen und sollte immer mehr eingeschränkt werden. Als Alternative bietet sich die thermische Klärschlammverwertung an. Um geschlossene Ressourcenkreisläufe zu erreichen, kommt der Entwicklung geeigneter Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammaschen damit umso größere Bedeutung zu.

2 Ausgangslage und Rahmenbedingungen

2.1 Stoffströme und Potenziale

Im Wirtschaftsjahr 2009/2010 wurden in Deutschland 103.000 Mg Phosphor [Destatis 2010] in Form mineralischer Düngemittel eingesetzt, was die weit überwiegende Verwendungsart darstellt. Für Europa weist die Statistik einen Düngeinsatz von 975.000 Mg Phosphor aus [Eurostat 2011]. Die weltweite Rohphosphatproduktion aus natürlichen Lagerstätten beträgt ca. 176 Mio. Mg pro Jahr. Daraus ergibt sich bei den heute bekannten Reserven, das heißt den in der Erdkruste nachgewiesenen Mengen, die derzeit wirtschaftlich gefördert werden können, von etwa 65 Mrd. Mg eine statische Reichweite von etwa 370 Jahren [Jasinski 2011]. Diese rechnerische Reichweite ist im Vergleich mit anderen Rohstoffen momentan noch nicht als kritisch anzusehen. Allerdings sind die Phosphaterze zunehmend durch Schwermetalle verunreinigt und enthalten derzeit bis zu 165 mg Cadmium pro kg P und bis zu 700 mg Uran pro kg P [Elsner 2008, Kabbe 2010]. Zudem ist anzunehmen, dass der Phosphatverbrauch aufgrund der steigenden Weltbevölkerung in den nächsten Jahren deutlich zunehmen wird. Leicht zugängliche und schadstoffarme Vorräte könnten demnach bereits in etwa 50 Jahren erschöpft sein [Gilbert 2009].

Weitere Verfügbarkeitsrisiken erwachsen durch die regionale Verteilung des Rohstoffs. Zur Zeit konzentrieren sich etwa 80 % der Lagerstätten auf die fünf Länder Marokko, Südafrika, China, USA und Jordanien, die etwa zu 70 % an der weltweiten Rohphosphatproduktion beteiligt sind [Kabbe 2010].

Einer möglichen Verknappung von Phosphor sollte mit einer konsequenten Kreislaufführung entgegengewirkt werden. Möglichkeiten zur Bereitstellung von Phosphorverbindungen aus sekundären Quellen bieten sich vor allem im Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung an. Aus dem 2009 in Deutschland registrierten Klärschlammaufkommen von 1,96 Mio Mg Trockensubstanz [Destatis 2011] errechnet sich unter der Annahme eines mittleren Phosphoranteils von ca. 2,4 % [Durth 2005] ein theoretisches Rückgewinnungspotenzial von 47.000 Mg P/a, was etwa 45 % des Jahresbedarfs an mineralischen Phosphordüngern entspricht. Eine im Auftrag der Europäischen Kommission durchgeführte Studie prognostizierte für das Jahr 2010 einen Klärschlammfall der 27 EU-Länder von 11,56 Mio. Mg [Milieu 2010]. Unter identischen Annahmen errechnet sich ein europaweites Substitutionspotenzial für Phosphordünger von immerhin 28 %.

Trotz der eingangs beschriebenen Problemfelder gelangen immer noch beträchtliche Klärschlammengen in die landwirtschaftliche Verwertung. In Abbildung 1 sind die Entsorgungswege für Deutschland und Europa gegenübergestellt. Während die deutsche Aufteilung aus amtlichen Quellen belegt ist [Destatis 2011], wurde für die europäischen Anteile aufgrund der lückenhaften Statistik auf die Prognose zurückgegriffen [Millieu 2010].

Wie in Abbildung 2 verdeutlicht wird, ist in Deutschland eine eindeutige Tendenz hin zur thermischen Klärschlammverwertung zu erkennen, die sich in Zukunft weiter fortsetzen wird [Horn 2010]. Dieser Verlauf ist auch auf europäischer Ebene zu erkennen. Hier wurde im Jahre 2006 ein Verbrennungsanteil von 20,2 % ausgewiesen [Schmelz 2006], während die Prognose für 2010 einen Anteil von 27 % und die Fortschreibung ins Jahr 2020 einen Anteil

von 32 % ermittelt [Millieu 2010]. Allerdings wird in 2020 ebenso ein leichter Anstieg der landwirtschaftlichen Verwertung in Europa auf 44 % erwartet, da in 2010 immer noch 14 % der Klärschlämme deponiert wurden und sich dieser Anteil bis 2020 halbiert [Milleu 2010].

Die Mengensteigerungen bei der thermischen Klärschlammverwertung in Deutschland wurden aus Kosten- und Kapazitätsgründen bis vor einigen Jahren vor allem durch eine Ausweitung der Mitverbrennung in Zementwerken und insbesondere in Kohlekraftwerken erreicht [Quicker 2004, Hanßen 2005]. Inzwischen deutet sich hier eine Trendumkehr an. Aufgrund der zunehmenden Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien werden die Kohlekraftwerke immer unregelmäßiger betrieben, was die in der Praxis resultierende Mitverbrennungskapazität für Klärschlamm stark vermindert [Jasper 2009]. In neu errichteten Kohlekraftwerken mit modernen Kesselwerkstoffen werden aus Gewährleistungsgründen zunächst keine Abfälle mitverbrannt.

In den letzten Jahren wurden einige neue Monoverbrennungsanlagen errichtet, außerdem sind bei dieser Anlagenart vielfältige Entwicklungsaktivitäten insbesondere im dezentralen Leistungsbereich zu verzeichnen [Hamatschek 2009]. Im Hinblick auf die Phosphorrückgewinnung ist dies ausdrücklich zu begrüßen. Während die Rückstände der Mitverbrennung in der Regel baustofflich verwertet werden und der aus dem Klärschlamm stammende Phosphor somit dissipativ verteilt wird, erreichen die Aschen der Monoverbrennung mitunter mit natürlichen Rohphosphaten vergleichbare Wertstoffkonzentrationen [Adam 2010]. Diese stellt somit einen besonders attraktiven Einsatzstoff für Phosphorrückgewinnungsverfahren dar.

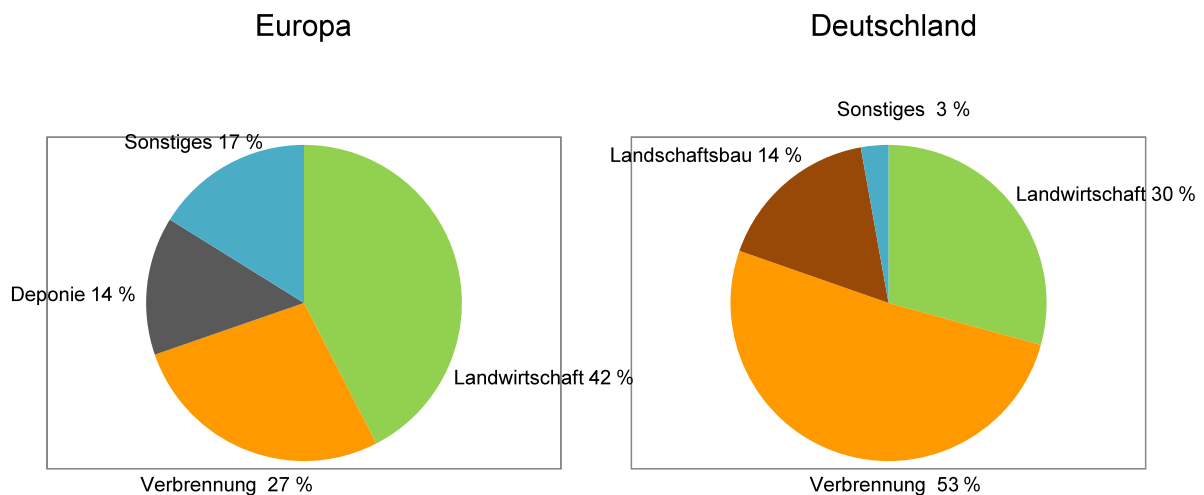


Abbildung 1: Verwertungswege für Klärschlamm in der EU (Hochrechnung für 2010, gerundet) [Millieu 2010] und in Deutschland (Statistik 2009) [Destatis 2011]

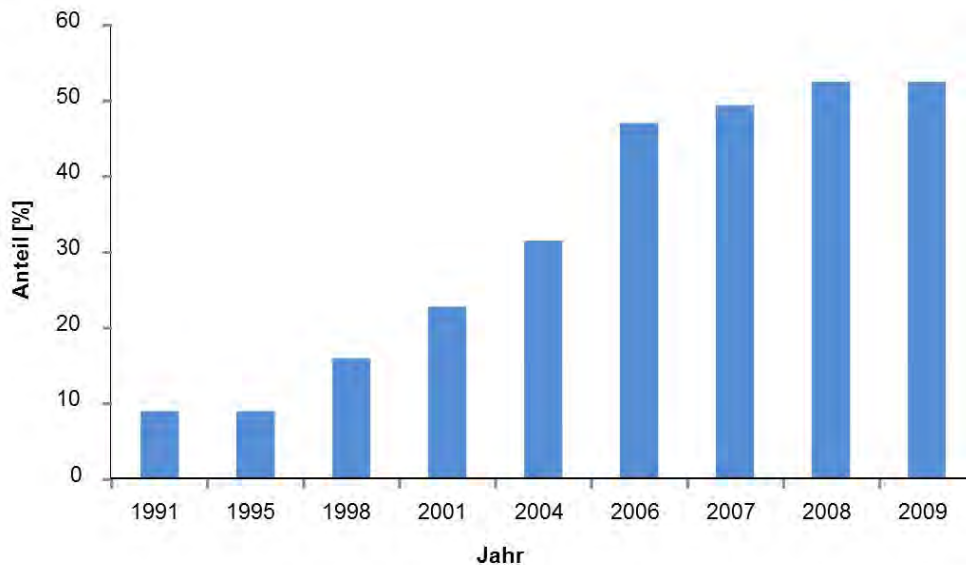


Abbildung 2: Entwicklung der Klärschlammverbrennung in Deutschland [UBA 2011, Destatis 2011]

2.2 Pflanzenverfügbarkeit

Das Festhalten an der stofflichen Klärschlammverwertung wird mit der Düngewirkung von Klärschlamm begründet. Klärschlamm fungiert als Phosphor- und in untergeordnetem Maße als Kalk- und Stickstoffträger bzw. Träger organischer Substanz. Im Abwasserreinigungsprozess stellt Klärschlamm jedoch die eigentliche Schadstoffsенке dar und enthält deshalb auch eine Vielzahl schädlicher Substanzen (Schwermetalle, Medikamentenrückstände, problematische org. Verbindungen). Gleichzeitig werden mit Klärschlamm – normiert auf den gleichen Nährstoffgehalt – deutlich höhere Schwermetallfrachten als mit den meisten anderen organischen und mineralischen Düngemitteln eingetragen [Barkowski 2006]. Eine fundierte Abwägung von Nutzen und Risiken der Klärschlammdüngung sollte gerade deshalb auch die Pflanzenverfügbarkeit der Phosphorverbindungen in Klärschlamm beinhalten. Auch bei den Phosphorrückgewinnungsverfahren ist neben dem Potenzial die Pflanzenverfügbarkeit der erhaltenen Phosphorverbindungen von großer Bedeutung, da nicht jede Art von Phosphor auch von den Pflanzen gleichermaßen gut als Nährstoff aufgenommen werden kann.

In Böden liegt Phosphor in drei unterschiedlichen Phosphorstrukturen vor, den organischen Phosphaten (z. B. Phytate), den anorganischen Phosphaten (z. B. Apatitformen) und den adsorbierten Phosphaten (meist an hydroxylierten Oberflächen von Fe-/Al- und Mn-Oxiden und -hydroxiden). Um den Phosphor für die Pflanze verfügbar zu machen, muss er als Orthophosphat (PO_4^{3-}) vorliegen. Dieses wird aus den verschiedenen Bindungsformen unterschiedlich freigesetzt. Daneben ist die Phosphorverfügbarkeit vom pH-Wert sowie der Pflanze selbst abhängig [Weinfurter 2005]. Insbesondere für Klärschlamm sind die folgenden Aspekte der Pflanzenverfügbarkeit von Bedeutung:

- Beschaffenheit der Schlämme (Nassschlämme wirken im Vergleich zu Superphosphat und Hyperphosphat auf einen Sand- bzw. Lehmboden besser als Trockenschlämme [Onnen 2001])
- pH-Wert des Bodens bzw. Kalkgehalt im Klärschlamm (kalkhaltige Schlämme verbessern vor allem in sauren Böden Parameter der Phosphorversorgung deutlicher als Mineraldünger [Weinfurtner 2005], eine zu starke Anhebung des pH-Wertes kann aber die Verfügbarkeit von Phosphor und Spurennährstoffen wieder herabsetzen [Römer 2003, Weinfurtner 2005])
- Art der Phosphatelimination (chemische Fällung mit diversen Fällmitteln, biologische Phosphorelimination)
- Modifikation, in der der Phosphor vorliegt (die Phosphorlöslichkeit im Boden aus Ca-Phosphaten nimmt vom primären, sekundären, tertiären Ca-Phosphat bis hin zum Apatit deutlich ab)
- Fe/P-Verhältnis im Klärschlamm (ein Fe/P-Verhältnis größer als 2:1 wirkt sich ungünstig auf die P-Verfügbarkeit aus [Römer 2003, Weinfurtner 2005] und kann sogar die Konzentration von pflanzenverfügbarem Phosphat über Monate hinweg erniedrigen)

Da in vielen Klärwerken Eisensalze als Fällmittel eingesetzt werden und diese ab einem bestimmten Wert die Phosphoraufnahme behindern, werden Klärschlämme oftmals als für Düngezwecke ungeeignet angesehen [Römer 2002].

Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren stellt sich die Beurteilung der Pflanzenverfügbarkeit generell sehr problematisch dar. Die bisherigen Untersuchungen lassen auf Verfügbarkeiten zwischen 20 % bei chemischer Phosphatfällung und 80 % bei vermehrter biologischer Phosphorelimination schließen [Barkowski 2006]. Eine Korrelation zwischen den Ergebnissen unterschiedlicher Extraktionsverfahren und Aufwuchsversuchen ist oftmals nicht gegeben [Weinfurtner 2005]. In die Beurteilung der Wirksamkeit der Klärschlammdüngung müssen zahlreiche standortspezifische Einflussfaktoren einbezogen werden (z. B. Boden- und Pflanzenart, P-Versorgungsstufe des Bodens). Außerdem sind aufgrund dieser Gegebenheiten und der uneinheitlichen Prüfbedingungen die bisher durchgeführten Untersuchungen kaum miteinander vergleichbar.

3 Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung

3.1 Prinzipielle Möglichkeiten

Die früher praktizierte Phosphorrückgewinnung aus dem Bereich der kommunalen Abwasserreinigung beschränkte sich im Wesentlichen auf die direkte Klärschlamm- ausbringung. Wegen der möglichen Belastung mit Schadstoffen sowie der vor allem bei der chemischen Phosphatfällung schlechten Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors ist der Nutzen der landwirtschaftlichen Verwertung allerdings fraglich. Zur Überwindung dieser Problemfelder wurden in den letzten Jahren zahlreiche Phosphorrückgewinnungsverfahren entwickelt. Dabei liegt das Augenmerk in der Regel auf einem oder mehreren der folgenden Aspekte:

- Reduzierung der Schwermetalle
- Inertisierung der organischen Schadstoffe
- Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit
- Gegebenenfalls Entwicklung eines Produkts, das Rohphosphat in der Industrie ersetzen kann

Die geeigneten Einsatzstellen zur Phosphorrückgewinnung im Abwasserreinigungsprozess wurden von Pinnekamp tabellarisch und grafisch zusammengestellt [Pinnekamp 2007]. Diese in Abbildung 3 wiedergegebene Darstellung beinhaltet die folgenden Stoffströme, deren relevante Eigenschaften sowie das auf die Zulauffracht bezogene Rückgewinnungspotenzial in Tabelle 1 wiedergegeben sind:

- Kläranlagenablauf (1)
- Prozesswässer der Schlammbehandlung (2)
- Entwässerter Klärschlamm (3)
- Klärschlammasche aus der Monoverbrennung (4)

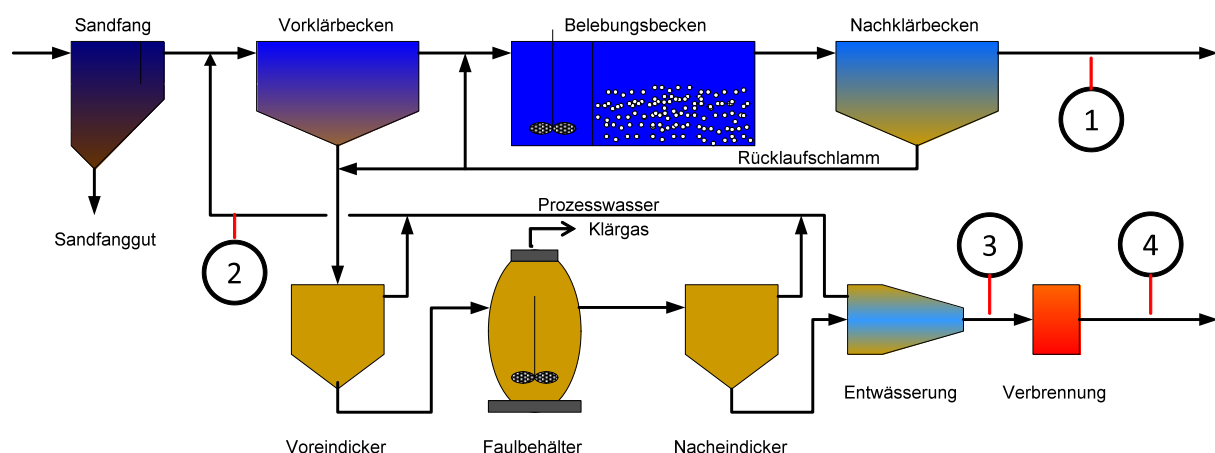


Abbildung 3: Einsatzstellen zur Phosphorrückgewinnung auf kommunalen Kläranlagen [Grafik: Pinnekamp 2007]

Tabelle 1: Charakterisierung der Einsatzstellen für Phosphorrückgewinnungsverfahren
[Pinnekamp 2007]

Einsatz- stelle*	Volumen- strom	P- Konzentration	P-Bindungsform	P-Rückgewinnungs- potenzial**
1	200 l/(E·d)	5 - 8 mg/l	gelöst	15 - 50 %
2	1 - 10 l/(E·d)	20 -100 mg/l	gelöst	~ 45 %
3	0,15 l/(E·d)	~ 10 g/kg	biologisch/chemisch gebunden	~ 85 %
4	0,03 kg/(E·d)	~ 50 g/kg	chemisch gebunden	~ 85 %

*vgl. Abbildung 3

**bezogen auf Zulauffracht der Kläranlage

In den folgenden Abschnitten werden die zu Grunde liegenden Verfahrensprinzipien sowie die darauf basierenden Techniken kurz erläutert. Eine Übersicht der verschiedenen Kategorien wird in Tabelle 2 gegeben. Die Einteilung folgt der Systematik in Abbildung 3, wobei die wässrigen Medien zusammengefasst wurden. Angesichts der zahlreichen Entwicklungen auf diesem Gebiet erhebt die hier wiedergegebene Aufzählung dabei keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit.

3.2 Ausgangsstoff Abwasser bzw. Prozesswasser

Zur Rückgewinnung von Phosphor aus der wässrigen Phase werden z. B. Fällungs- und Kristallisationsverfahren eingesetzt. Während die konventionellen Fällungsverfahren mit einem hohen Schlammanfall verbunden sind, wird bei den Kristallisationsverfahren die gezielte Bildung definierter Phosphorverbindungen induziert. Dabei wird meist aus Nebenstromwasser der Phosphor über unterschiedliche Verfahrensschritte (Verschiebung des pH-Werts, Änderung des Redoxgleichgewichtes, Temperaturänderung) zuerst in Lösung und anschließend, z. B. durch Zugabe von Impfkristallen, zum Auskristallisieren gebracht. Folgende Verfahren bzw. Verfahrensgeber bedienen sich dieser Prinzipien:

- Phostrip-Verfahren (ältestes Verfahren mit mehreren Anlagen in den USA)
[Levin 1965, Bartl 1992, Kaschka 2003]
- Ostara-Kristallisationsverfahren [Ostara 2011, Britton 2009]
- DHV Cystalactor [Giesen 2005, de Boer 2003]
- Unitika Phosnix®-Verfahren [Ueno 2001, Unitika 2010]
- Nishihara Ltd. (mit Ausnutzung von Meerwasser als Mg-Lieferant) [Hermann 2009]
- Kurita Ltd (Kurita Festbettreaktor) [Hermann 2009]
- Ebara Corp. [Hermann 2009]
- MAP Kristallisations-Verfahren (Treviso, Italien) [Cecchi 2003]
- PRISA-Verfahren [Pinnekamp 2007]
- REPHOS®-Verfahren (für eine Käserei entwickelt) [REMONDIS 2008]
- P-RoC- oder PROPHOS-Verfahren [Berg 2005]
(eine weiterentwickelte Pilotanlage soll an der Kläranlage Neuburg, Deutschland, getestet werden)
- CSIR Wirbelschichtreaktor in Südafrika [Brett 1997, Montag 2008],

- Sydney Waterboard Reactor in Australien [Montag 2008]

Eine etwas abgewandelte Technologie wird beim Magnetseparator-Verfahren ausgenutzt [Herrmann 2009]. Hier wird dem biologisch gereinigten Abwasser noch vor der P-Rückgewinnung ein Fällmittel zugegeben, um das gelöste Phosphat in eine feste Phase zu überführen. Durch Zugabe von Magnetit und einem Flockungsmittel entstehen aus den Eisen- und Aluminiumphosphaten große Flocken, die über einen Magnetabscheider abgeschieden und diskontinuierlich ausgetragen werden. Das magnetische Fe_3O_4 kann wieder recycelt werden.

Die Fällungs- und Kristallisationsverfahren sind vielfach weit entwickelt und wurden teilweise, wie das Phostrip-Verfahren, in mehreren Anlagen großtechnisch umgesetzt. Darüber hinaus bedienen sich zahlreiche im F&E- oder Pilotstadium stehende Technologien dieser Trennprinzipien. Allerdings ist das auf die Zulaufkraft bezogene Phosphorrückgewinnungspotenzial auf Werte unter 50 % begrenzt. Aufgrund dieser beschränkten Effizienz und technischer Probleme bei der Betriebsführung wurden einige Anlagen wieder stillgelegt bzw. einzelne Lösungsansätze nicht weiter verfolgt [Herrmann 2009].

Alternativ zu Fällung bzw. Kristallisation wurde über weitere Lösungsansätze berichtet. Das REM-NUT Verfahren, schon in den 1980er Jahren von der Universität Bari [Brett 1997] entwickelt und in mehreren Kläranlagen getestet, erreicht ebenfalls einen Rückgewinnungsanteil von max. 50 %. Dabei wird der Phosphor aus dem zu behandelnden Abwasser aus dem Ablauf der biologischen Stufe mittels Ionentauscher zurückgehalten und anschließend als MAP (Magnesiumammoniumphosphat) gefällt. Aufgrund einiger Schwachpunkte konnte sich das Verfahren nicht großtechnisch durchsetzen, von neu entwickelten Ionenaustauschmaterialien wird aber eine gewisse Verbesserung erwartet [Herrmann 2009].

Das PHOSIEDI-Verfahren, das im Rahmen der BMBF/BMU Förderinitiative "Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor" entwickelt wird [ISA 2011], nutzt neben der Methode des Ionenaustauschs auch die Elektrodialyse.

Mit Aktivtonerde als Adsorptionsmedium arbeitet das unter Federführung der TU Dresden entwickelte RECYPHOS-Verfahren [Herrmann 2009]. Hier wird Phosphor an Aktivkohle adsorbiert, dann mittels Natronlauge desorbiert, mit Kohlensäure neutralisiert und über Zugabe von Kalk wieder ausgefällt. Es entsteht Calciumphosphat, das als Dünger verwendet werden kann.

3.3 Ausgangsstoff Klärschlamm

Zur Separation von Phosphor aus Klärschlamm wurden ebenfalls zahlreiche technische Möglichkeiten erarbeitet. Modellhafte Bilanzierungen zeigen, dass die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm mit rund 85 % der Zulauffracht ein wesentlich größeres Rückgewinnungspotenzial als die Rückgewinnung aus dem Abwasserpfad oder den Prozesswässern bietet [ATV-DVWK 2003]. Das Prinzip von Kristallisationsvorgängen nutzen die folgenden Entwicklungen:

- AirPrex-MAP-Verfahren zur Erzeugung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) und Vermeidung störender Inkrustationen (realisiert an der Kläranlage Waßmannsdorf der Berliner Wasserbetriebe) [PCS 2011]
- PECO-Verfahren mit MAP-Fällung unter Zugabe von Meerwasser zur Kostenersparnis (auf küstennahe Standorte beschränkt) [Dockhorn 2007]
- FIX Phos-Verfahren der TH Darmstadt mit Kristallisation aus Überschussschlamm [Petzet 2011]

Mehrere Verfahren arbeiten mit einem klassischen Säureaufschluss zur selektiven Rücklösung von Phosphorverbindungen aus Klärschlamm:

- Seaborne Verfahren (realisiert an der Kläranlage Gifhorn) [Müller 2005]
- Kemira KEMICOND (zielt vorrangig auf eine Verbesserung der Schlammbehandlung statt auf die P-Rückgewinnung) [Hermann 2009]
- Stuttgarter Verfahren (Schwermetallentfrachtung des Phosphatproduktes über Komplexbildung) [Weideler 2005]

Eine Verbesserung des Aufschlusses und eine biologische Inertisierung lässt sich durch thermische Hydrolyse erreichen. Dies wird bei folgenden Prozessen ausgenutzt:

- PHOXNAN-LOPROX-Verfahren (Kombination aus Säure- und hydrothermalen Aufschluss und Abtrennung der gelösten Schwermetalle vom Phosphor mittels Nanofilter) [ISA 2011]
- Kemira KREPRO[®]-Prozess [Stendahl 2002, Hermann 2009],
- Aqua-Reci Verfahren (überkritische Wasseroxidation bei 200 bar und Separation von Phosphor aus dem Rückstand) [ATV-DVWK 2003]
- Cambi-Prozess (dient ähnlich wie das KEMICOND-Verfahren eher einer Verbesserung der Schlammbehandlung und nicht vorrangig der P-Rückgewinnung) [Sievers 2005]

Den Vorteil hoher Temperaturen kombiniert mit der Ausnutzung des Heizwertes von Klärschlamm machen sich folgende Verfahren zu Nutze:

- Mephrec-Verfahren mit reduzierender Erhitzung auf über 2.000 °C und Anreicherung der hoch schmelzenden Schwermetalle in einer Legierung (z. B. Fe, Cu, Cr, Ni) sowie Abtrennung der niedrig schmelzenden Metalle (z. B. Zn, Cd, Hg) über das Abgas [Ingitec 2011]
- ATZ-Eisenbadreaktor mit sofortiger Zersetzung organischer Bestandteile durch Einbringen in ein Metallbad über Bodendüsen und effiziente Energieausnutzung über die integrierte Nachverbrennung der Prozessgase [Mocker 2005]

3.4 Ausgangsstoff Klärschlammasche

Trotz der vielfältigen Reinigungsschritte bei der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm gewährleistet nur die Integration von thermischen Behandlungsschritten eine sichere Zerstörung organischer Schadstoffe. Außer durch die beiden bereits angeführten Verfahren wird dies natürlich auch bei der Mono- und Mitverbrennung von Klärschlamm gewährleistet. Allerdings weisen nur die Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung ausreichend hohe Konzentrationen für eine Phosphorrückgewinnung auf. Je nach Art der Phosphatfällung und Herkunft des Klärschlammes variiert der P-Gehalt in den Aschen zwischen 3 % und 10 %. Sofern Schadstoffgrenzwerte überschritten werden, dürfen solche Aschen nicht direkt als Dünger in der Landwirtschaft verwendet werden. Zudem führt die thermische Klärschlammbehandlung zunächst meist zu einer gegenüber dem Ausgangsmaterial geringeren Pflanzenverfügbarkeit der enthaltenen Phosphorverbindungen.

Zur Schwermetallentfrachtung von Klärschlammaschen und zur Verbesserung ihrer Düngewirksamkeit werden ebenfalls unterschiedliche Lösungsstrategien verfolgt. Bei nasschemischen Prozessen lässt sich der Phosphor durch verschiedene Eluationsverfahren, entweder mit Wasser, Lauge oder Säure, herauslösen. Die Säurebehandlung weist mit mehr als 90 % die größte Rücklösequote auf, allerdings werden auch zusätzlich 30 % bis 90 % der Schwermetalle herausgelöst [Herrmann 2009]. Zu deren Abtrennung wurden sowohl Ionentausch- als auch selektive Fällungsverfahren vorgeschlagen:

- BioCon-Verfahren der Fa. PM Energy mit einer inzwischen nicht mehr in Betrieb befindlichen Pilotanlage in Dänemark [Hultman 2001]
- SEPHOS-Verfahren der TH Darmstadt [Cornel 2007] mit der Weiterentwicklung SESAL [Adam 2010], welches deutlich weniger Säure benötigt
- PASCH-Verfahren der RWTH Aachen [Pinnekamp 2006]
- Eberhard Verfahren von Eberhard Recycling (CH) [Hermann 2009]

Alle diese Verfahren weisen insbesondere bei hohen Fe- und Al-Gehalten im Ausgangsstoff einen hohen Chemikalienbedarf und damit hohe Betriebskosten auf. Bis auf das BioCon-Verfahren befinden sich diese Entwicklungen noch im Labormaßstab.

Das von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung entwickelte SUSAN-Verfahren nutzt ein thermochemisches Trennprinzip, indem die in der Klärschlammasche enthaltenen Schwermetalle nach der Zugabe von Chloriden und anschließender Erhitzung im Drehrohrofen auf 1.000 °C in flüchtiger Form abgedampft werden [Kley 2005, Adam 2010]. Aufgrund einer Phasenneubildung im gereinigten, phosphorreichen Rückstand geht diese Behandlung mit einer deutlichen Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit einher. Das Verfahren, dessen Produkt nach Anreicherung mit weiteren Nährstoffen unter dem Namen Phoskraft® als Dünger zugelassen wurde, wird mittlerweile vom finnischen Technologiekonzern Outotec Oyj vertrieben.

Im bereits erwähnten ATZ-Eisenbadreaktor werden Phosphorverbindungen und schwerflüchtige Metalle durch die reduzierende Wirkung eines kohlenstoffhaltigen Metallbades von der mineralischen Schlacke getrennt. Leichtflüchtige Metalle reichern sich im Flugstaub an und sind damit ebenfalls für ein Recycling zugänglich. Die endothermen Reduktionsprozesse erfordern beim Einsatz von Klärschlammasche, im Gegensatz zu Klärschlamm, die Zugabe von weiteren kohlenstoffhaltigen Energieträgern. In beiden Fällen wird die Energie sehr effizient ausgenutzt, indem die spezielle Nachverbrennungstechnologie

des ATZ Entwicklungszentrums das entstehende Kohlenmonoxid noch im Behandlungsgefäß zu CO₂ umwandelt und die dabei frei werdende Energie mit hohem Wirkungsgrad auf das schmelzflüssige Bad übertragen wird. Der Phosphor wird anschließend selektiv reoxidiert und in eine phosphatreiche Schlacke, ähnlich dem früheren Thomasmehl, eingebunden [Mocker 2005].

Ein anderes Verfahren des Ascheaufschlusses nutzt den elektrokinetischen Effekt. Bei diesem so genannten EPHOS-Verfahren [EPHOS 2010], das die wasserlöslichen negativen Phosphationen von den positiv geladenen (Schwer)-Metallionen über ein Gleichstromfeld trennt, wurden jedoch trotz Verfahrensverbesserung nur Phosphorrückgewinnungsquoten von 7 % erreicht.

Bei dem von der Firma Inocre vertriebenen Verfahren des Bioleaching [Zimmermann 2009, Inocre 2010], welches ursprünglich aus der Erzlaugung kommt, werden Phosphat und Schwermetalle durch säurebildende Mikroorganismen aus der Klärschlammasche herausgelöst und der Phosphor durch selektive bakterielle Phosphatfällung aus der Lösung abgetrennt. Die phosphatreiche Phase wird getrocknet, so dass ein pulverförmiger Rückstand mit etwa 45 % bis 60 % Phosphat entsteht, welcher arm an Schwermetallen und frei von pathogenen Mikroorganismen ist.

Tabelle 2: Übersicht über die Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

Ausgangsstoff Abwasser und Prozesswässer	Ausgangsstoff Klärschlamm	Ausgangsstoff Klärschlammasche
<p>Kristallisations- und Fällungsverfahren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phostrip • DHV Crystalactor® • Ostara PEARL® • Unitika Phosnix® • Nishihara • Kurita Festbettreaktor • Ebara • MAP Kristallisation Treviso • CSIR Wirbelschichtreaktor • REPHOS® • P-RoC • PRISA-Verfahren • Sydney Waterboard Reaktor <p>Ionentauschverfahren</p> <ul style="list-style-type: none"> • REM NUT® • PHOSIEDI <p>Kombinations- und Sonderverfahren</p> <ul style="list-style-type: none"> • RECYPHOS • Magnetseparator 	<p>Kristallisationsverfahren</p> <ul style="list-style-type: none"> • AirPrex-MAP-Verfahren • PECO-Verfahren (mikrobielle Oxid.) • FIX Phos <p>Säureaufschluss</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stuttgarter Verfahren • Seaborne-Verfahren • Kemira KEMICOND® <p>Hydrothormaler Aufschluss</p> <ul style="list-style-type: none"> • PHOXNAN-LOPROX-Verfahren • Kemira KREPRO® • Aqua-Reci • Cambi-Prozess <p>Thermischer Aufschluss</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mephrec • ATZ-Eisenbadreaktor 	<p>Nasschemischer Aufschluss</p> <ul style="list-style-type: none"> • RÜPA-/PASCH-Verfahren • SEPHOS-Verfahren • SESAL (Weiterentwicklung von SEPHOS) • BioCon • Eberhard Verfahren <p>Thermischer Aufschluss</p> <ul style="list-style-type: none"> • SUSAN • Mephrec • ATZ-Eisenbadreaktor <p>Elektrokinese</p> <ul style="list-style-type: none"> • EPHOS <p>Biobleaching</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inocre

4 Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit der Verfahren

Wie die Aufstellung in Tabelle 2 zeigt, wurde mittlerweile eine Vielzahl an Verfahren zur Phosphorrückgewinnung entwickelt. Dabei ist zu beobachten, dass mit dem Anstieg des rückgewinnbaren Phosphoranteils der Aufwand des Verfahrens steigt. Eine vergleichende Zusammenstellung der Wirtschaftlichkeit ist bei Horn [Horn 2007, Horn 2010] zu finden. Dabei ist nach derzeitigem Stand ein Rückgewinnungsgrad von max. 65 % mit geringem Aufwand zu realisieren [Horn 2007].

Weiterhin ist festzustellen, dass die nasschemischen Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor bzw. Phosphorverbindungen im Entwicklungsstand weiter fortgeschritten sind als die thermischen Rückgewinnungsverfahren, obwohl die theoretisch mögliche Rückgewinnungsquote bei letzteren deutlich höher liegt als beim P-Recycling aus wässrigen Phasen. Einige nasschemische Verfahren arbeiten schon seit Jahren im großtechnischen Maßstab. Eine kostendeckende Rückgewinnung war aber bislang nicht möglich.

Über eine zertifizierte Düngerproduktion als marktfähiges Produkt wird nur beim Ostara-(Crystal Green®), Mephrec-, AirPrex-MAP- und SUSAN-Verfahren (Phoskraft®) berichtet. Einige andere Verfahren, wie zum Beispiel das Phostrip-Verfahren oder der CAMBI-Prozess, produzieren eher einen modifizierten Klärschlamm, der dann als Düngerersatz aufgebracht werden kann, sofern eine Restkontamination auszuschließen ist. Vermutlich werden hierfür dennoch weitere Entsorgungskosten anfallen.

Bei der Einführung eines flächendeckenden P-Recyclings sehen die meisten Experten, wie eine Umfrage im Rahmen des Forschungsprojekts PhoBe ergab [Horn 2010], die rasche Umsetzung einfacher Verfahren an vielen (auch kleineren Standorten) als wahrscheinlicher an als die Umsetzung komplexer Verfahren in zentralen Anlagen. Phosphorrückgewinnung aus der flüssigen Phase, vor allem aus Schlammwasser, wird, da leichter nachzurüsten und somit kostengünstiger, trotz des beschränkten Rückgewinnungspotenzials als besonders relevantes Verfahren eingestuft. Trotzdem wird wohl der Trend in den nächsten Jahren weiter hin zu thermischen Verfahren gehen, bei denen das anschließende P-Recycling zwar komplexer und aufwändiger ist, sie aber Rückgewinnungspotenziale von mehr als 80 % aufweisen [Pinnekamp 2007, Horn 2010]. Weitere Vorteile liegen in der simultanen stofflichen und energetischen Nutzung, der vollständigen Zerstörung organischer Schadstoffe, der deutlichen Reduzierung von Abfall und der Aufkonzentrierung von Phosphor.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Da Phosphor ein für Pflanzen und Tiere lebensnotwendiges, nicht substituierbares Element darstellt und die wirtschaftlich abbaubaren Vorräte begrenzt sind, wird schon seit Jahren nach Möglichkeiten gesucht, Phosphor aus anthropogenen Quellen zurückzugewinnen. Größtes Potenzial haben hier neben Wirtschaftsdünger, der schon weitgehend im Kreislauf geführt wird, die Stoffströme im Bereich der Abwasserbehandlung. Hierfür wurden in den letzten Jahren vielversprechende Verfahren entwickelt. Großtechnische Anlagen, die vornehmlich in Kanada, Japan, Schweden, Italien und den USA errichtet wurden, zielten nicht immer auf die Herstellung definierter Phosphorverbindungen ab. Eine Produktion zertifizierter Düngemittel gibt es dagegen beim Ostara- (Crystal Green®), Mephrec-, AirPrex-MAP- und SUSAN-Verfahren (Phoskraft®). Ein kostendeckender Betrieb wurde bislang jedoch noch nicht erreicht. Die wirtschaftliche Situation könnte sich allerdings verändert darstellen, wenn der Verbrauch, wie erwartet, steigt und die natürlichen Rohphosphate zur Neige gehen.

Unter den Phosphorrückgewinnungsverfahren wären kleine, einfache, dezentrale Lösungen, die vornehmlich Schlammwasser als Ausgangsmaterial haben, kurzfristig zu installieren. Diese weisen allerdings ein begrenztes Rückgewinnungspotenzial auf. Deutlich höhere Potenziale lassen sich mit komplexeren und eher in größerem Maßstab umzusetzenden Verfahren erschließen, die als Ausgangsmaterial Klärschlamm und insbesondere Klärschlammasche verwenden.

Bei einer Phosphorrückgewinnung, die einen thermischen Behandlungsschritt enthält, werden Bodenkontaminationen durch organische Substanzen in jedem Fall nachhaltig vermieden. Sowohl auf deutscher als auch auf europäischer Ebene ist ohnehin ein gewisser Trend zur Klärschlammverbrennung festzustellen. Aus Sicht der Ressourcenschonung sind dabei die Monoverbrennung von Klärschlamm oder thermische Sonderverfahren, wie das Mephrec-Verfahren, zu favorisieren. Sofern aus Kosten- oder Kapazitätsgründen eine Mitverbrennung in Kohlekraftwerken oder Zementwerken erfolgt, sollte trotz des möglicherweise begrenzten Potenzials eine vorherige Phosphorrückgewinnung aus Prozesswässern oder Klärschlamm erfolgen.

6 Literatur

- Adam 2010 Adam, C: Technische Möglichkeiten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen, in: VDI Fachkonferenz Klärschlammbehandlung, Technologien- Wertstoffrückgewinnung – Entwicklungen, Offenbach, 27. – 28.10.2010, S. 217 - 228
- ATV-DVWK 2003 Arbeitsbericht der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.1 Phosphorrückgewinnung, in: KA – Abwasser, Abfall 2003 (50), S. 805 - 814
- Barkowski 2006 Barkowski, D., Raecke, F., Pinnekamp, J., Köster, S., Beier, S.: Schadstoffbelastung im Klärschlamm, in: Pinnekamp, J., Friedrich, H. (Hrsg.): Klärschlamm Entsorgung: Eine Bestandsaufnahme, FiW Verlag, Aachen, 2006, S. 45 - 136
- Bartl 1992 Bartl, J., Elster, B.: Phostrip-Verfahren zur Phosphatelimination in Darmstadt-Eberstadt, awt-Abwassertechnik 1992, S. 51 - 53
- Berg 2005 Berg, U.: P-RoC – Ein Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwässern durch Abscheidung von Calciumphosphat-Mineralphasen an Tobermorit, in: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen – Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 12. – 13.12.2005, S. 77 - 101
- Brett 1997 Brett, S., Guy, J., Morse, G. K., Lester, J. N.: Phosphorous removal and recovery technologies, Selper Publications, London 1997
- Britton 2009 Britton, A. T.: P-Recovery in North America – Ostara's Pearl® Process, BALTIC21 Conference – Berlin, 28.09.2009
- Cecchi 2003 Cecchi F. et al.: Phosphate Crystallisation Process for P-Recovery applied at Treviso Municipal Wastewater Treatment Plant (Italy), Università degli Studi di Verona, 2003
- Cornel 2005 Cornel, P., Schaum, C.: Von der Phosphorelimination zur Phosphorrückgewinnung, in: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen – Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 12. – 13.12.2005, S.13 - 38
- Cornel 2007 Cornel, P., Schaum, C.: Endbericht „Untersuchung der Separation von Phosphor mittels reaktiver flüssig-flüssig Extraktion“, Max-Buchner-Forschungstiftung – Kennziffer: 2566, 2007

- de Boer 2003 de Boer, R.; Giesen, A.: Phosphate Recovery by the Crystallisation Process: Experience and Developments, in: Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall, Tagungsband, Symposium vom 06.-07.02.2003, UBA, ISA, Berlin 2003, S. 15/1 - 15/12
- Destatis 2010 Statistisches Bundesamt Produzierendes Gewerbe, Düngemittelversorgung Wirtschaftsjahr 2009/2010, Fachserie 4 Reihe 8.2, Wiesbaden 2010
- Destatis 2011 Statistisches Bundesamt, Klärschlamm entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2009, www.destatis.de/, Zugriff 07.07.2011
- Dockhorn 2007 Dockhorn, T.: Rückgewinnung von Phosphat aus Abwasser und Klärschlamm mit dem Peco-Verfahren, in: Müll und Abfall 2007, S. 380 - 386
- Durth 2005 Durth, A., Schaum, C., Meda, A., Ergebnisse der DWA-Klärschlammhebung 2003, in: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (Hrsg.): Tagungsband zur DWA-Bundes- und Landesverbandstagung, 21. – 22.09.2005, Hennef, 2005, DWA, S. 349 - 383
- Elsner 2008 Elsner, H.: Stand der Phosphatreserven weltweit, Symposium Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft, Braunschweiger Nährstofftage 10. – 11.11.2008
- Eurostat 2011 Eurostat, Allgemeine und Regionalstatistiken – Landwirtschaft – Agrarumweltindikatoren – Geschätzte Verbrauch von handelsüblichen Düngern, Code: tag00091, epp.eurostat.ec.europa.eu, Zugriff 29.07.2011
- EPHOS 2010 Elektrokinetische Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm asche – EPHOS, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, LfU/LUBW (Hrsg.), Augsburg, Karlsruhe, 2010
- Giesen 2005 Giesen, A., de Boer, R., Gaillard, A.: Practical Experience with Recovery of Phosphates from Wastewater Using Crystallisation Technology, in: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen – Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 12. – 13.12.2005, S. 103 - 116
- Gilbert 2009 Gilbert, N.: The Disappearing Nutrient, Nature, 2009 (Vol. 461), S. 716 - 718

- Hamatschek 2009 Hamatschek, E., Mocker, M., Faulstich, M.: Klärschlammverwertung: Ein wichtiger Baustein der Siedlungswasserwirtschaft, in: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Technischen Universität München e.V. (Hrsg.): Perspektiven in der Siedlungswasserwirtschaft. 37. Abwassertechnisches Seminar, Garching 2009, S.101 - 124
- Hanßen 2005 Hanßen, H., Rothsprack, J.: Perspektiven der thermischen Klärschlammverwertung, KA - Abwasser Abfall 2005 (52) Nr. 10, S. 1126 - 1133
- Herrmann 2009 Herrmann, L.: Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung, eine Bestandsaufnahme, Umwelt-Wissen Nr. 0929, Bundesamt für Umwelt, Bern 2009
- Horn 2007 von Horn, J.: Untersuchungen zur Rückgewinnung von Phosphat aus Überschussschlamm von Kläranlagen mit vermehrt biologischer Phosphatelimination, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.), Schriftenreihe 18, Rhombos-Verlag, Berlin, 2007
- Horn 2010 von Horn, J., Sartorius, C.: Technologievorausschau für Phosphorrecyclingtechnologien (Arbeitspaket 6), Projekt „Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklungen eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland“ (PhoBe) im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Fkz 02WA0807), Karlsruhe, 2010
- Hultman 2001 Hultman, B., Levin, E., Mossakowska, A., Stark, K.: Effects of wastewater treatment technology on phosphorous recovery from sludge and ashes, in: Second International Conference on Recovery of Phosphates from Sewage and Animal Wastes, Noordwijkerhout, NL, 12. – 13.03.2001
- Ingitec 2011 www.ingitec.de, Zugriff 11.07.2011
- Inocre 2010 inocre Umwelttechnik GmbH, Gewinnung von Wertstoffen – Bioleaching und Ascheaufbereitung, www.inocre.de, Zugriff 05.07.2011
- ISA 2011 BMBF-Projekthomepage zur BMBF/BMU Förderinitiative "Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor" www.phosphorrecycling.de, Zugriff 07.07.2011
- Jasinski 2011 Jasinski, M. S.: Phosphate Rock, in: U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Reston, 2011, S. 118 - 119
- Jasper 2009 Jasper, M., Lehrmann, F., Steier, K.: Stand und Perspektiven der thermischen Klärschlammbehandlung, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2009 (56), S. 1014 - 1026
- Kabbe 2010 Kabbe, C.: Perspektiven der Phosphorrückgewinnung in Deutschland – Vorstellung des Strategiepapiers, in: VDI Fachkonferenz Klärschlammbehandlung, Technologien- Wertstoffrückgewinnung – Entwicklungen, Offenbach, 27. – 28.10.2010, S. 193 - 202

- Kaschka 2003 Kaschka, E., Donnert, D.: Das Phostrip-Verfahren in Kombination mit „Aktivfiltration“, ein wirtschaftlicher Weg zur P-Rückgewinnung?, in: National History Museum – Research projects – Phosphate recovery, www.nhm.ac.uk, Zugriff 07.07.2011
- Kley 2005 Kley, G., Adam, C., Brenneis, R., Simon, F.-G.: Thermochemische Aufbereitung von Klärschlammaschen zu Phosphordüngern – Das EU-Projekt SUSAN, in: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen – Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 12. – 13.12.2005, S. 265 - 285
- Levin 1965 Levin, G. V., Shapiro, J. (1965). Metabolic uptake of phosphorus by wastewater organisms. *Journal of Water Pollution Control*, 1965 (37)
- Milieu 2010 Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land, final report, part I: Overview Report, milieu Ltd, WRc, RPA, 2010, <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/index.htm>
- Mocker 2005 Mocker, M., Faulstich, M.: P-Dünger aus Klärschlamm, Schlammaschen und Tiermehl durch Behandlung im Eisenbad, in: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen – Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 12. – 13.12.2005, S. 249 - 264
- Mongabay 2011 Mongabay Data – Commodity price series – Fertilizers – Phosphate rock, www.mongabay.com, Zugriff 11.07.2011
- Montag 2008 Montag, D.: Phosphorrückgewinnung im Bereich kommunaler Kläranlagen – eine Bestandsaufnahme 2008, in: *Wasser und Abfall 2008*, S. 14 - 17
- Müller 2005 Müller, J.: Umsetzung des Seaborne-Verfahrens auf der Kläranlage Gifhorn, in: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen – Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 12. – 13.12.2005, S. 233 - 238
- Onnen 2001 Onnen, O.: Umweltschonende Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft: P-Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit von der P-Fällung und vom Substrat, Dissertation, Universität Gesamthochschule Paderborn, 2001
- Ostara 2011 www.ostara.com, Zugriff 07.07.2011

- PCS 2011 Pullution Control Service GmbH, Leistungsspektrum – AirPrex, www.pcs-consult.de, Zugriff 07.07.2011
- Petzet 2011 Petzet, S., Cornel, P.: Prevention of Struvite Scaling in Digesters combined with Phosphorus Removal and Recovery – The FIX-Phos Process, Nutrient Recovery and Management Conference, Inside and Outside the Fence, Proceedings, Miami, Florida, USA, 09 – 12.01.2011
- Pinnekamp 2006 Pinnekamp, J., Köster, S., Beier, S., Montag, D., Gethke, K., Fehrenbach, H., Knappe, F.: Verfahren der Klärschlamm Entsorgung und Phosphorrückgewinnung, in: Pinnekamp, J., Friedrich, H. (Hrsg.): Klärschlamm Entsorgung: Eine Bestandsaufnahme, FiW Verlag, Aachen, 2006, S. 137 - 170
- Pinnekamp 2007 Pinnekamp, J., Montag, D., Gethke, K., Herbst, H.: Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers „Magnesiumammoniumphosphat – MAP“ aus Abwasser und Klärschlamm“, UBA-Texte 25/07, Dessau-Roßlau, 2007
- Quicker 2004 Quicker, P., Faulstich, M.: Perspektiven der Klärschlammverbrennung – Mono- oder Co-Verbrennung, in: Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.), Bio- und Restabfallbehandlung VIII, biologisch – mechanisch – thermisch, Tagungsband 16. Kasseler Abfallforum, Kassel, 20. – 21.04.2004, Witzenhausen 2004, S. 422 - 442
- REMONDIS 2008 REPHOS® für Flora und Fauna, in: REMONDIS® aktuell 1/2008, S. 16 - 17
- Römer 2002 Römer, W., Samie, I. F.: Eisenreiche Klärschlämme sind für das P-Recycling im Ackerbau ungeeignet, in: Wasser und Boden 2002 (54) S. 28 - 32
- Römer 2003 Römer, W., Samie, I. F., Neubert, M., Merkel, D.: P-Düngewirkung von Klärschlämmen mit unterschiedlichen Eisengehalten, in: KA – Abwasser, Abfall 2003 (50), S. 476 - 481
- Schmelz 2006 Schmelz, K.-G.: Klärschlamm mngen und Entsorgungskosten im Vergleich zum europäischen Ausland, Vortrag auf Expertentagung „Perspektiven der Klärschlammverwertung“, Bonn, 06. – 07.12.2006
- Sievers 2005 Sievers, M., Bormann, H. Ewert, W.: Klärschlammhydrolyse (CAMBI) mit anschließender Stickstoffstrippung und basischer Phosphorextraktion, in: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen – Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 12. – 13.12.2005, S. 189 - 198
- Stendahl 2002 Stendahl, K., Jäferström, S.: Phosphat Recovery from Sewage Sludge in Combination with Supercritical Water Oxidation, in: Proceedings International Conference “From Nutrient Removal to Recovery”, Amsterdam, 02. – 04.10.2002

- UBA 2011 Umweltbundesamt, Daten zur Umwelt – Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung – Zusammenstellung aus Daten des Statistischen Bundesamtes, www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de, Zugriff 29.07.2011
- Ueno 2001 Ueno, Y., Fuji, M.: Three years' operating experience and selling recovered struvite from full-scale plant, in: Environmental Technology 2001 (Vol. 22), S. 1373 - 1381
- Unitika 2010 UNITIKA Group, Corporate Social Responsibility Report 2010, www.unitika.co.jp, Zugriff 07.07.2011
- Weideler 2005 Weideler, A., Brechtel, K., Maier, W., Krampe, J., Rott, U.: Phosphorrückgewinnung als MAP mittels saurer Rücklösung aus Faulschlamm, in: Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 184, 80. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium 13.10.2005, Oldenbourg-Verlag, München, 2005, S. 59 - 71
- Weinfurtner 2005 Weinfurtner, K., Pflanzenverfügbarkeit von Stickstoff, Phosphor und Kalium (NPK) bei Sekundärrohstoffdüngern, Abschlussbericht UBA-Projekt FKZ 201 33 328, Schmallenberg, 2005
- Zimmermann 2009 Zimmermann, J., Dott, W.: Recovery of phosphorus from sewage sludge incineration ash by combined bioleaching and bio-accumulation, Proceedings of the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams, Vancouver, Kanada 10. – 13.05.2009.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

WASTE MANAGEMENT, Volume 2

Waste Management, Recycling, Composting, Fermentation,
Mechanical-Biological Treatment, Energy Recovery from Waste,
Sewage Sludge Treatment

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Luciano Pelloni.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011

ISBN 978-3-935317-69-6

ISBN 978-3-935317-69-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M. Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Janin Burbott

Erfassung und Layout: Janin Burbott, Petra Dittmann, Sandra Peters,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.