

# Phosphor- Rückgewinnungs- strategie Baden- Württemberg



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

## **Impressum**

Herausgeber:  
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg  
Kernerplatz 9  
70182 Stuttgart  
Tel.: 0711/ 126 - 0  
Fax: 0711/ 126 - 2377  
Internet: <http://www.um.baden-wuerttemberg.de>  
E-Mail: [poststelle@um.bwl.de](mailto:poststelle@um.bwl.de)

Redaktion:  
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg  
Referat 46 „Siedlungsabfallwirtschaft, Abfalltechnik“

Stand: Oktober 2012

## Inhaltsverzeichnis

1	Notwendigkeit der Phosphor-Rückgewinnung .....	4
2	Rahmenbedingungen zur Phosphor-Rückgewinnung .....	5
2.1	Phosphorbedarf von Baden-Württemberg .....	5
2.2	Klärschlamm als relevanter Phosphorlieferant .....	6
2.3	Klärschlamm Entsorgung in Baden-Württemberg .....	7
3	Konzept der Phosphor-Rückgewinnungsstrategie .....	9
4	Aufbau von Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammaschen .....	10
4.1	Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm .....	11
4.2	Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche .....	11
4.3	Anforderungen an den rückgewonnenen Phosphor .....	12
5	Beteiligte .....	12
6	Weitere Vorgehensweise .....	13
7	Literatur .....	15

## 1 Notwendigkeit der Phosphor-Rückgewinnung

Um ausreichend Nahrungsmittel für die wachsende Weltbevölkerung produzieren zu können, ist es wichtig, die Landwirtschaft ausreichend mit Phosphor zu versorgen. Allerdings ist die Weltwirtschaft zur Gewinnung von Phosphor aus Phosphatgestein gänzlich abhängig von den natürlichen Lagerstätten, vergleichbar mit Erdöl. Im Gegensatz zu Erdöl, das langfristig durch andere Energieträger ersetzt werden kann, gibt es für Phosphor keine alternativen Quellen. Die weltweite Produktion an Nahrungsmitteln kann durch einen Mangel an Phosphor zukünftig gefährdet werden, wenn nicht Maßnahmen dagegen ergriffen werden.

Eine Prognose, wie lange die Phosphorreserven ausreichen, ist derzeit schwierig. Unsicherheiten bestehen hinsichtlich Qualität und Menge der noch nicht erschlossenen Phosphorvorkommen und dem zukünftigen weltweiten Bedarf an Phosphor. Einige Fachleute gehen bei gleichbleibendem Verbrauch davon aus, dass die Reserven an Phosphor noch 300 bis 400 Jahre ausreichen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass aus den bekannten Lagerstätten der vorhandene Phosphor zu 100 % gewonnen werden kann und der Bedarf an Phosphor konstant bleibt. Andere Fachleute rechnen unter Berücksichtigung der wachsenden Weltbevölkerung damit, dass in 40 bis 80 Jahren der zunehmende Bedarf an Phosphor nicht mehr gedeckt werden kann. In Abbildung 1 wird die Reichweite der weltweiten Phosphorreserven auf der Basis von

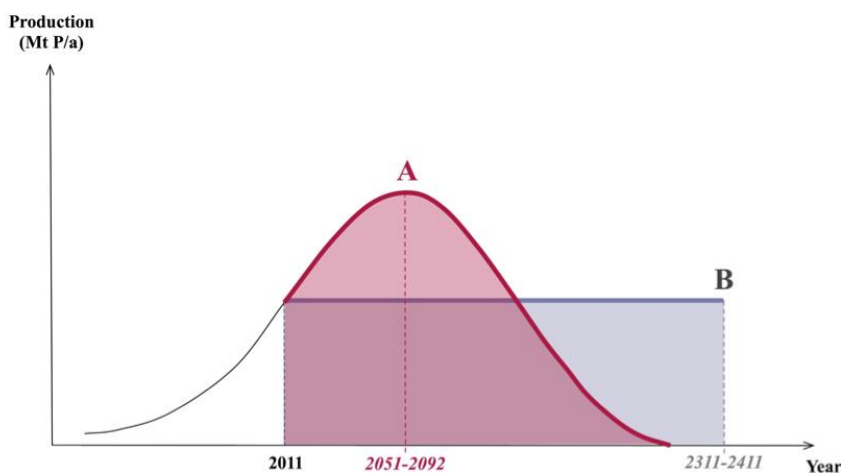


Abbildung 1: Reichweite der weltweiten Phosphorreserven [1]

zwei unterschiedlichen Annahmen aufgezeigt. Annahme A geht davon aus, dass die Produktion an Phosphor zwischen 2051 und 2092 ihren Höhepunkt erreicht, um den zunehmenden Bedarf an Phosphor zu decken. Demnach ist mit einer Verknappung und damit einhergehenden Preissteigerungen von Phosphor auf dem Weltmarkt zu rechnen. Wenn, wie in Annahme B dargelegt, der Phosphorbedarf konstant bleibt, reichen die Phosphorreserven noch mindestens 300 Jahre.

In den nächsten Jahren wird keine akute Verknappung von Phosphor erwartet. Längerfristig kann es jedoch zu Engpässen des Rohstoffes und Preissteigerungen auch wegen politischer Unsicherheiten in den Lieferländern kommen. Die überwiegende Rohphosphat-Förderung konzentriert sich aufgrund von geologischen Voraussetzungen auf die Länder China, USA, Marokko, Russische Föderation, Israel und Tunesien.

In der Diskussion um die Gewinnung von Rohphosphaten ist auch zu berücksichtigen, dass der Abbau von Rohphosphaten mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden ist. Da zunehmend auch ungünstigere Lagerstätten mit höheren Verunreinigungen der Phosphate erschlossen werden, ist damit zu rechnen, dass damit einhergehende Umweltbelastungen bei der Ausbringung der Dünger weiter zunehmen können. In diesem Zusammenhang wird auch auf mögliche Verunreinigungen mit Uran verwiesen. Vor diesem Hintergrund ist daher schon lange vor dem Auslaufen der Phosphorreserven ein Einstieg in die Rückgewinnung von Phosphor erforderlich.

## **2 Rahmenbedingungen zur Phosphor-Rückgewinnung**

Die Phosphorversorgung für Baden-Württemberg kann langfristig nur ökologisch und wirtschaftlich verträglich sichergestellt werden, wenn Phosphorimporte zumindest teilweise durch Phosphor-Rückgewinnung ersetzt werden.

### **2.1 Phosphorbedarf von Baden-Württemberg**

Etwa 90 % des importierten Phosphors werden in Baden-Württemberg als phosphathaltiges Düngemittel in der Land- und Forstwirtschaft sowie im Gartenbau eingesetzt, was einer Menge von etwa 11.000 t pro Jahr Phosphor (P) entspricht [9]. Laut Schätzungen des Umweltbundesamtes liegt der zusätzliche Phosphorbedarf für Futtermittel bei mindestens 5 % des importierten Phosphors. Der Phosphorabsatz in den Bereichen

Lebensmittelindustrie, Wasch-, und Reinigungsmittel, Flammschutzmittel und Trinkwasserversorgung kann nur schwierig abgeschätzt werden, dürfte aber im unteren einstelligen Prozentbereich im Vergleich zum Gesamtbedarf liegen. Bei den Berechnungen wird dieser Teil mit 5 % angesetzt. Somit kann der gesamte Phosphorbedarf für Baden-Württemberg mit etwa 12.000 t Phosphor pro Jahr angegeben werden

Im Wirtschaftsjahr 2010/2011 betragen die Kosten je t Phosphat ( $P_2O_5$ ) durchschnittlich 980 € und es ist abzusehen, dass die Preise weiter steigen werden. Die derzeitigen Ausgaben für Phosphatdünger in der Landwirtschaft in Baden-Württemberg lassen sich auf etwa 25 Mio. €/a beziffern. In den letzten Jahren wurde aufgrund stark gestiegener Preise von Phosphatdünger der Einsatz weiter optimiert und dadurch reduziert. Deshalb ist nicht damit zu rechnen, dass der Bedarf an Phosphor für die Landwirtschaft langfristig weiter abgesenkt werden kann.

## 2.2 Klärschlamm als relevanter Phosphorlieferant

Bei Betrachtung der organischen Siedlungsabfälle als Sekundärrohstoffquelle für Phosphor liegt das weitaus größte Potenzial beim Klärschlamm, wie in Abbildung 2

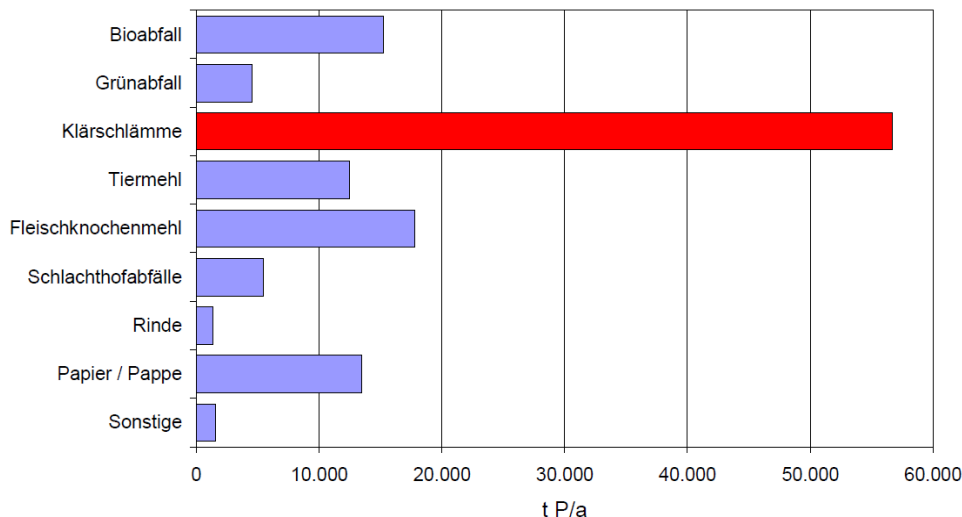


Abbildung 2: Phosphorpotenzial der organischen Siedlungsabfälle in Deutschland [4]

ersichtlich. Täglich gelangen über Reinigungsmittel und menschliche Ausscheidungen pro Person rund zwei Gramm Phosphor in das Abwasser, die zur Vermeidung von Umweltschäden in den Kläranlagen herausgefiltert werden müssen. Im Jahr 2010

wurden den kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg etwa 10.000 t Phosphor zugeführt, wovon 88,5 % aus dem Abwasser entnommen und im Klärschlamm gespeichert wurden. Dabei fielen bei den kommunalen Kläranlagen etwa 247.000 t Klärschlamm (Trockenmasse) an. Damit enthielt der im Jahr 2010 anfallende kommunale Klärschlamm mit einem durchschnittlichen Phosphoranteil von 3,6 % etwa 8.900 t Phosphor. Unter der aus heutiger Sicht realistischen Annahme einer Rückgewinnungsquote von 70 % könnten pro Jahr 6.200 t Phosphor aus dem Klärschlamm gewonnen werden. Damit ließe sich der gesamte Bedarf an Phosphor in Baden-Württemberg theoretisch zu etwa 52 % von aus Klärschlamm gewonnenem Phosphor decken.

### **2.3 Klärschlamm Entsorgung in Baden-Württemberg**

Klärschlämme enthalten eine Vielzahl organischer Schadstoffe, deren Untersuchung von der Klärschlammverordnung bislang nur teilweise gefordert wird und die sich in Böden und Grundwasser anreichern können. Deshalb hält das Umweltministerium Baden-Württemberg die Klärschlammverwertung als Düngemittel auf Böden trotz der Regelungen der Klärschlammverordnung für nicht vertretbar und rät seit über zehn Jahren aus Vorsorgegründen zur thermischen Klärschlammverwertung.

Durch ein gemeinsames Vorgehen des Landes und der Stadt- und Landkreise konnte in Baden-Württemberg der Verbrennungsanteil bei der Klärschlammverwertung auf 90 % im Jahre 2010 gesteigert werden. Von den im Jahr 2010 im Land anfallenden 247.000 t (Trockenmasse) kommunalen Klärschlämmen wurden in der Landwirtschaft nur noch etwa 7.000 t und im Landschaftsbau etwa 15.000 t verwertet. Rund 222.000 t wurden energetisch verwertet und ein Rest von ca. 2.000 t einer sonstigen Entsorgung, im Wesentlichen der Kompostierung und Substratherstellung, zugeführt.

Die thermische Verwertung von Klärschlamm aus Baden-Württemberg erfolgt derzeit in drei Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen, zwei Klärschlammvergasungsanlagen und in einer Papierfabrik in Baden-Württemberg. Darüber hinaus werden Klärschlämme in Kohlekraftwerken und Zementwerken in und außerhalb Baden-Württembergs mitverbrannt.

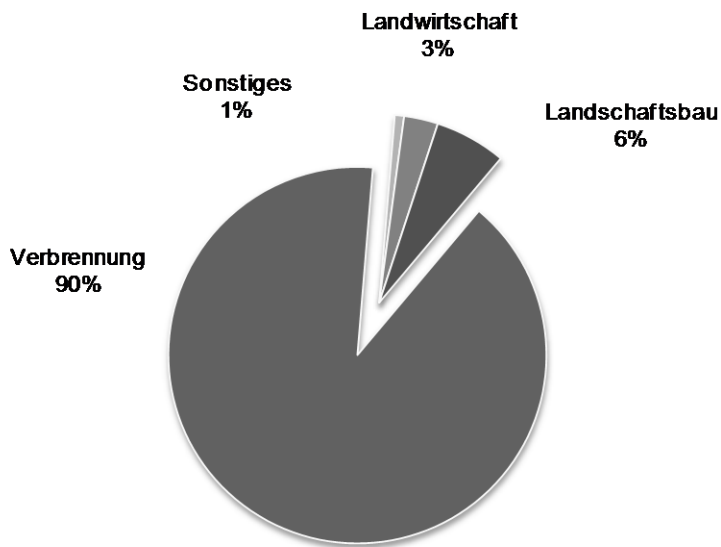


Abbildung 3: Klärschlamm Entsorgung in Baden-Württemberg 2010 [5]

Der aus Vorsorgegründen sinnvolle Verzicht auf eine bodenbezogene Klärschlammverwertung hat zur Folge, dass der im Klärschlamm enthaltene Phosphor nicht genutzt und dem Phosphorkreislauf entzogen wird. Deshalb setzt Baden-Württemberg auf Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammmasche. Ziel ist es, Phosphor zu gewinnen, der weitgehend frei von organischen und anorganischen Schadstoffen ist.

In verschiedenen Forschungsprojekten wurde und wird intensiv nach Lösungen gesucht, um den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor als Sekundärrohstoffdünger oder als Rohstoff für die Phosphatindustrie nutzen zu können. Mittlerweile stehen einsatzfähige Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung zur Verfügung. Das Umweltministerium Baden-Württemberg ist entschlossen, weiter zu diesen Arbeiten beizutragen und hat deshalb auch die Errichtung einer ersten großtechnischen Pilotanlage im Land zur Phosphor-Rückgewinnung gefördert. Die Anlage auf der Kläranlage des Abwasserzweckverbandes ‚Raum Offenburg‘ konnte nach umfangreichen Forschungs- und Planungsarbeiten 2011 in Betrieb genommen werden.



### 3 Konzept der Phosphor-Rückgewinnungsstrategie

Das Umweltministerium Baden-Württemberg hat sich entschlossen, für das weitere Vorgehen eine Strategie zur Rückgewinnung von Phosphor zu entwickeln, das in Abbildung 4 schematisch dargestellt wird.

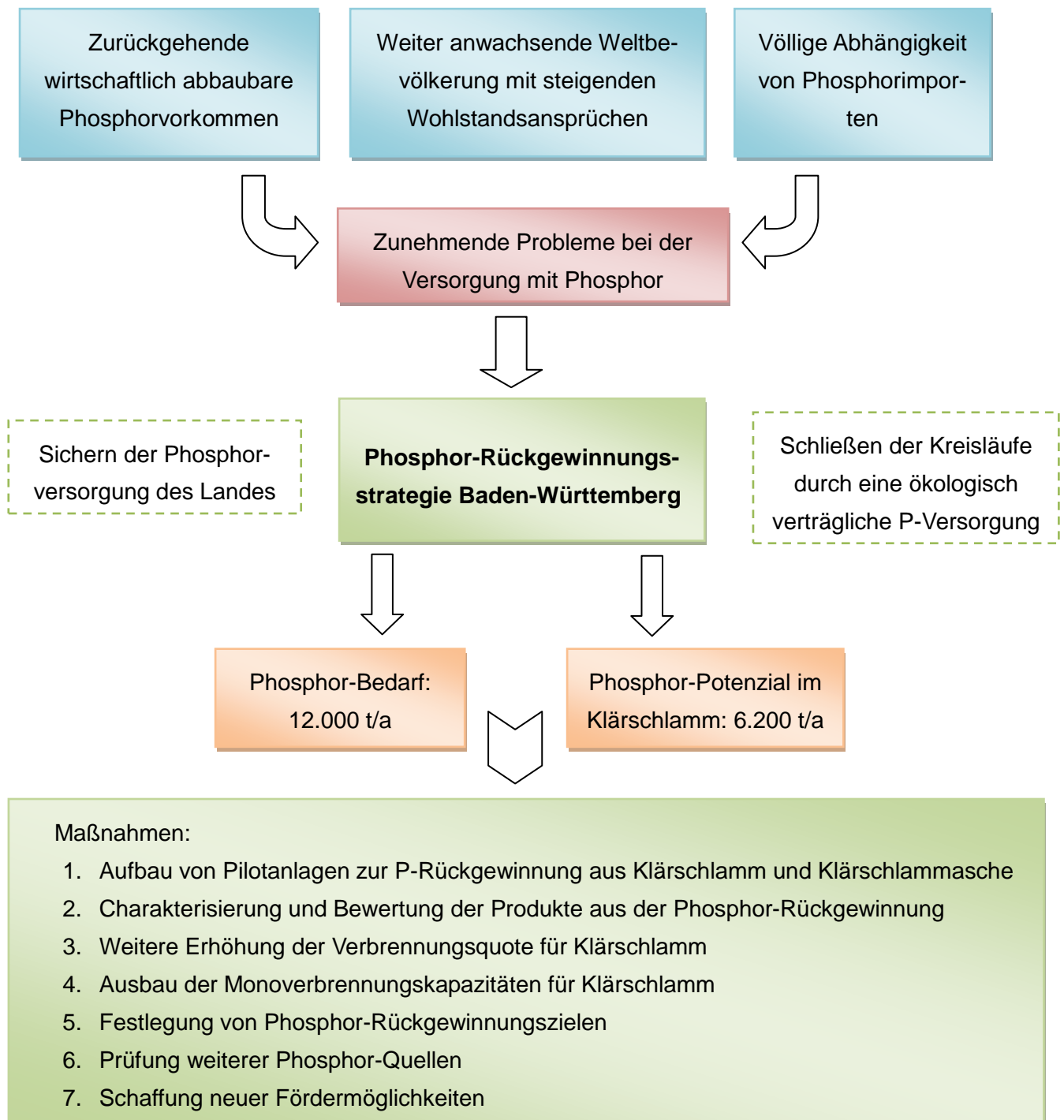


Abbildung 4: Konzept der Phosphor-Rückgewinnungsstrategie Baden-Württemberg

#### 4 Aufbau von Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammmaschen

Ziel der Phosphor-Rückgewinnungsstrategie Baden-Württemberg ist es, langfristig Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung zu errichten und zu betreiben. Dabei beschränkt sich die Strategie in ihrer ersten Stufe auf die Stoffströme Klärschlamm und Klärschlammmasche, da diese das höchste Phosphor-Rückgewinnungspotenzial aufweisen. Für die unterschiedlichen Möglichkeiten der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm zeichnen sich je nach Ausgangsstoff nach aktuellem Kenntnisstand folgende Rückgewinnungspotenziale ab:

Tabelle 1: Rückgewinnungsquoten im Abwasser und Klärschlamm (mod. Tabelle nach [11])

<b>Ausgangsstoff</b>	<b>Technisch mögliche Rückgewinnung (in % der Zulaufmenge)</b>
Kläranlagenablauf	max. 50 %
Schlammwasser	45%
Entwässerter (Faul-) Schlamm	70%
Klärschlammmasche	80%

Der wirtschaftliche Betrieb von Anlagen zur Rückgewinnung von Phosphor ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Aufgrund von steigenden Weltmarktpreisen für Phosphaterze kann sich dies jedoch mittelfristig ändern und die Verfahren können zunehmend wirtschaftlich konkurrenzfähig werden. Die produktspezifischen Kosten für rückgewonnenen Phosphor (P) liegen laut Literaturangaben [12] je nach Verfahren zwischen 3 und 12 € pro kg. Für Phosphor aus Rohphosphat muss nach derzeitiger Marktlage etwa 2 € pro kg Phosphor (P) bezahlt werden. Allerdings sind diese Angaben nur eingeschränkt zu verwenden, da unter anderem die Qualität der unterschiedlichen Rückgewinnungsprodukte (z. B. Löslichkeit im Boden, Düngewirkung, Schadstoffgehalte) und die Erlöse aus dem Verkauf der Rückgewinnungsprodukte nicht berücksichtigt werden. Auch können die verfügbaren Daten aufgrund stark unterschiedlicher Rahmenbedingungen sowie der fehlenden Standardisierung nicht verglichen werden. Um die Datenlage zu verbessern, können (und müssen) an Pilotanlagen wertvolle Hinweise zu Verfahrenskosten und Qualität der Phosphor-Rückgewinnungsprodukte erarbeitet werden.

Bei der Entwicklung von Rückgewinnungsverfahren für Phosphor aus Klärschlamm muss auch die Struktur der kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg berücksichtigt werden. Die 36 größten Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von über 100.000 Einwohnerwerten entfernen etwa 40 % des gesamten, eliminierten Phosphors aus dem Abwasser. Kläranlagen mit einer Ausbaugröße unter 10.000 Einwohnerwerten tragen in der Summe nur 11 % des eliminierten Phosphors bei.

#### **4.1 Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm**

Die am erfolgversprechendsten erscheinenden technischen Ansätze, um den Phosphor aus Klärschlamm zurückzugewinnen, sind zurzeit Fällung oder Adsorption aus Schlammwasser oder Faulschlamm. Die technische Machbarkeit eines dieser Verfahren konnte bei MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat) im größeren technischen Maßstab auf der Kläranlage des Abwasserzweckverbandes Raum Offenburg nachgewiesen werden. Dort läuft seit November 2011 eine großtechnische Anlage zur Rückgewinnung von Phosphor nach dem ‚Stuttgarter Verfahren‘. Mit der Pilotanlage wird derzeit ein in etwa 5.000 Einwohnerwerten entsprechender Teilstrom des Klärschlammes behandelt. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass kommunaler Klärschlamm von Kläranlagen mit simultaner Phosphat-Elimination mit Eisensalzen verwendet werden kann und keine Verfahrensumstellung seitens der Abwasserreinigung erforderlich ist. Das erzeugte Produkt MAP kann nach bisherigen Erkenntnissen direkt als Mehrnährstoffdünger in der Landwirtschaft verwendet werden. Bisher gemessene Schwermetallgehalte von MAP sind als unkritisch zu bewerten und liegen größtenteils unter den Gehalten von Rohphosphaten. Rund 70 % Phosphor kann bezogen auf die der Anlage zugeführte Phosphorfracht zurückgewonnen werden. Ein weiterer Vorteil des ‚Stuttgarter Verfahrens‘ ist, dass die Technologie auch bei kleinen Kläranlagen eingesetzt werden kann.

#### **4.2 Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche**

Soweit Phosphor nicht bereits in der Kläranlage oder mit Hilfe anderer Verfahren zurückgewonnen wird, bietet nach derzeitigem Stand die P-Rückgewinnung aus der Verbrennungsasche von Monoverbrennungsanlagen das höchstmögliche Rückgewinnungspotenzial. Es existieren Verfahren, die aus der Asche bis zu 90% (bezogen auf den Kläranlagenzulauf 80 %) des Phosphors gewinnen können. Vorteil der Rückgewin-

nung aus der Klärschlammasche ist, dass hohe Phosphorkonzentrationen in einem gut lager- und transportfähigen Stoffstrom an zentralen Standorten vorliegen. Verfahren für Klärschlammaschen bedürfen im Hinblick auf die Nährstoffverfügbarkeit im Boden (Düngewirkung) noch der Optimierung.

Hohe Rückgewinnungsquoten für Phosphor sind zu erzielen, wenn die Verbrennung des Klärschlammes in Monoverbrennungsanlagen bedeutend ausgebaut und die Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen oder Kraftwerken sowie die anderweitige energetische und stoffliche Nutzung beispielsweise in Zementwerken ohne vorherige P-Rückgewinnung verringert wird.

Bisher gibt es in Baden-Württemberg keine Anlage zur großtechnischen Rückgewinnung von Phosphor aus der Klärschlammasche. Erste Konzeptionen dazu werden derzeit jedoch erarbeitet.

#### **4.3 Anforderungen an den rückgewonnenen Phosphor**

Langfristig können sich Rückgewinnungsverfahren nur etablieren, wenn Phosphor zurückgewonnen wird, der auch von der Landwirtschaft und der Düngemittelindustrie nachgefragt wird. Deshalb muss darauf geachtet werden, dass nur qualitativ hochwertiger Phosphor rückgewonnen wird. Rechtsgrundlage für das Inverkehrbringen von rückgewonnenem Phosphor ist die Düngemittelverordnung (DüMV). Zu berücksichtigen sind dabei Ertragswirkung (P-Gehalte), P-Löslichkeit (Sofortwirkung/Depotwirkung), Schadstoffgrenzwerte, Hygieneanforderungen sowie die erforderliche technische Aufbereitung (Fällmittel, Granulierung, Abrieb, Oberfläche, Härte, Korngröße) [11].

### **5 Beteiligte**

Zur Umsetzung der Phosphorstrategie sind neben dem Umweltministerium und dem Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz auch der Städtetag, der Gemeindetag, der Landkreistag, die DWA Baden-Württemberg sowie die Betreiber von Kläranlagen und Monoverbrennungsanlagen gefragt.

## 6 Weitere Vorgehensweise

Ziel ist der schrittweise Aufbau von Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung auf der Basis einer verlässlichen Datengrundlage zu Produkteigenschaften (Düngewirkung und Schadstoffgehalte), wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und verfügbarer Anlagentechnik. Hierzu wird vorgesehen:

- I. Aufbau von Pilotanlagen zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche. Beide Ansätze sollen gleichwertig behandelt werden.
  - Errichtung von Anlagen zur Rückgewinnung aus der Klärschlammasche beispielsweise für KS-Monoverbrennungsanlagen Stuttgart, Karlsruhe, Ulm
  - Errichtung weiterer Anlagen zur Rückgewinnung aus dem Klärschlamm auf Kläranlagen, vorrangig auf großen Kläranlagen; Fortführung und Weiterentwicklung des Pilotvorhabens auf der Kläranlage Offenburg
- II. Erarbeitung von Aussagen zu den Eigenschaften der Produkte aus der Phosphor-Rückgewinnung (Löslichkeit im Boden und Pflanzenverfügbarkeit, Schadstoffgehalte, weitere technische Eigenschaften für die Anwendung) und Bewertung der Produkte vor dem Hintergrund der aktuellen und zukünftigen rechtlichen Regelungen zu Düngemitteln
- III. Erarbeitung eines Vertriebskonzepts für den rückgewonnenen Phosphor
  - Konzept zum Absatz in der Landwirtschaft und in der Düngemittelindustrie
- IV. Öffentlichkeitsarbeit
  - Wissenstransfer an die Betreiber der Kläranlagen (Workshops, Tagungen)
  - Unterrichtung der Öffentlichkeit durch Presse und Fachbeiträge
- V. Weitere Erhöhung der Verbrennungsquote für Klärschlamm
  - Steigerung der Quote von 90 % im Jahr 2010 auf 95 % im Jahr 2015
- VI. In Abhängigkeit der Ergebnisse aus I. Ausbau der Monoverbrennungskapazitäten für Klärschlamm bzw. Ausbau der Kapazität von Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm
- VII. Festlegung von Phosphor-Rückgewinnungszielen mit einer schrittweisen Anhebung der Rückgewinnungsquoten

- VIII. Prüfung weiterer Maßnahmen wie der Phosphor-Rückgewinnung aus anderen Quellen und die Zwischenlagerung Phosphor-haltiger Verbrennungsaschen
- IX. Schaffung neuer Fördermöglichkeiten (EFRE,...)

## 7 Literatur

- [1] Cordell D., White S., Lindström T.: Peak phosphorus: the crunch time for humanity, *The Sustainable Review*, 2011
- [2] Van Kauwenbergh S.: *World Phosphate Rock Reserves and Resources*, International Fertilizer Development Center, Alabama, 2010
- [3] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: *Kommunales Abwasser - Lagebericht 2011*, Stuttgart, 2011
- [4] Fricke K., Bidlingmaier W.: *Phosphatpotenziale qualitativ hochwertiger organischer Siedlungsabfälle, Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser*, RWTH Aachen, Umweltbundesamt, Berlin, 2003
- [5] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: *Abfallbilanz 2010*, Stuttgart, 2011
- [6] Meyer C, Preyl V., Steinmetz H.: *Großtechnische In-situ-Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen*, Tagungsband zum 3. Internationalen Symposium „Re-Water Braunschweig“ Implementierung und Realisierung, Fördergesellschaft an der TU Braunschweig e. V. (Hrsg.), Band 81, S. 45-58, Braunschweig, 2011
- [7] Weideler, A.: *Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)*, Dissertation, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Band 202, 165 S., 69 Abb., 15 Tab., Stuttgart, 2009
- [8] Wave GmbH: *Studie zum Phosphorrecycling aus kommunalem Abwasser in Baden-Württemberg – Möglichkeiten und Grenzen*, Stuttgart, 2003
- [9] Statistisches Bundesamt: *Produzierendes Gewerbe – Düngemittelversorgung*, Fachserie 4, Reihe 8.2, 8 S., Wiesbaden, 2011
- [10] *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess)*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 2012
- [11] *Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven*, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012
- [12] Everding W., Montag D., Pinnekamp J.: *Ergebnisse und Schlussfolgerungen der BMBF-Förderinitiative „Phosphorrecycling“*, 45. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft in Essen, GWA 230, 20/1-20/15, Aachen, 2012