



Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall

LAGA Ad-hoc-AG

**Ressourcenschonung durch Phosphor-
Rückgewinnung**

Abschlussbericht

Juli 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
1.1	Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren	5
1.2	Bewertung der Aschen-Zwischenlagerung sowie der Potenziale des Deponierückbaus.....	5
1.3	Bewertung der Einsatzfähigkeit von rückgewonnenem Phosphor	6
1.4	Eckpunkte für eine Phosphorstrategie.....	6
2	Auftrag der 80. UMK für die LAGA Ad-hoc AG Phosphor	8
3	Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren	10
3.1	Allgemeines zur Bewertung der Phosphor-Rückgewinnung.....	10
3.2	Betrachtung der verschiedenen Stoffströme.....	11
3.2.1	Abwasser (Kläranlagenablauf).....	12
3.2.2	Prozesswasser aus der Schlammbehandlung (Schlammwasser)	12
3.2.3	Klärschlamm (nicht entwässert/ entwässert).....	13
3.2.4	Klärschlammaschen.....	14
3.2.5	Nahrungsmittelproduktion	15
3.2.6	Tierische Nebenprodukte (Tiermehlasche)	15
3.2.7	Gülle und andere Wirtschaftsdünger.....	16
3.2.8	Bewertung der Stoffströme	16
3.3	Betrachtung der Rückgewinnungsverfahren.....	19
3.3.1	Chemische Fällung, Kristallisation, Adsorption	19
3.3.2	Nasschemischer Aufschluss	20
3.3.3	Thermochemischer Aufschluss	21
3.3.4	Metallurgische Verfahren	22
3.3.5	Monoverbrennung und Pyrolyse ohne direkte Nachbehandlung	22
3.3.6	Bewertung der Rückgewinnungsverfahren	23
4	Bewertung der Zwischenlagerung und Potenziale im Deponierückbau.....	25
4.1	Bewertung der Anforderungen an die Zwischenlagerung von Klärschlammaschen	25
4.2	Bewertung der Potenziale aus dem Deponierückbau.....	26
5	Bewertung des rückgewonnenen Phosphors	29
5.1	Rechtliche Voraussetzungen für Verwendung als Düngemittel	29
5.1.1	Düngerecht	29
5.1.2	Ende der Abfalleigenschaft	29
5.2	Allgemeine Kriterien zur Herstellung und Verwendung phosphorhaltiger Düngemittel aus sekundären Phosphor-Reserven	30
5.2.1	Umwelteigenschaften.....	31
5.2.2	Düngeeigenschaften.....	33
5.3	Empfehlungen	34

6	Maßnahmen	36
6.1	Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Phosphor-Strategie	36
6.2	Vorschlag von Maßnahmen einer Phosphorstrategie	39
6.2.1	Maßnahmen zum Aufbau einer Infrastruktur von Phosphor- Rückgewinnungsanlagen	39
6.2.2	Sicherung von P-Reserven aus gelagerten Klärschlammaschen	41
6.2.3	Maßnahmen zur Produktion von hochwertigen Sekundärphosphaten, insbesondere Düngemitteln	41
6.2.4	Maßnahmen zum Absatz des Phosphor-Rezyklats	42
6.2.5	Maßnahmen im Forschungsbereich	42
6.2.6	Weitere Maßnahmen	43
6.3	Ausblick	44
	 Anhang 1: Verfahrensauswahl anhand der Anfallstelle des Stoffstroms	 45
	 Anhang 2: Verfahrensauswahl anhand des Rückgewinnungsverfahrens	 46

1 Zusammenfassung

1.1 Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren

Durch Studien und Pilotanlagen wurde die grundsätzliche Einsatzfähigkeit mehrerer Verfahren inzwischen belastbar nachgewiesen. Eine großtechnische Umsetzung erscheint bei diesen Verfahren vertretbar und wurde in ersten großtechnischen Anlagen bereits umgesetzt. Dabei wurde im Ergebnis – auch unter Nutzung der Resultate der Projekte KoMa¹ und P-Rex² – festgestellt, dass eine allgemein gültige Bewertung der Verfahren derzeit jedoch nicht möglich ist, da diese bei unterschiedlichen Stoffströmen ansetzen. Dabei erschweren die differierenden Randbedingungen vor Ort einen objektiven Vergleich ebenso, wie der unterschiedliche Entwicklungsstand der Verfahren. Auch zur Wirtschaftlichkeit sind nur begrenzt belastbare Aussagen möglich, die einen fundierten Vergleich der Verfahren noch nicht gestatten.

1.2 Bewertung der Aschen-Zwischenlagerung sowie der Potenziale des Deponierückbaus

Mit Blick auf die Notwendigkeit zum Aufbau einer Rückgewinnungs-Infrastruktur in vertretbaren Zeiträumen hält es die LAGA AG Phosphor für prioritär, eine Phosphor-Rückgewinnung direkt nach dem Anfall des Klärschlammes oder der Klärschlammaschen anzustreben. Die Zwischenlagerung dieser Aschen sollte dagegen nicht als vorrangige Maßnahme durchgeführt werden und damit nicht den Aufbau einer industriellen Phosphor-Rückgewinnungs-Infrastruktur ersetzen. Ein Rückbau bereits bestehender Asche- oder Klärschlammdeponien wird wegen der hohen Rückbaukosten und der teilweise zu geringen Phosphor-Gehalte nur in wenigen Fällen als sinnvoll eingeschätzt. Dies wäre beispielsweise gegeben, wenn andere Gründe für den Deponierückbau vorliegen, wie Grundwasserschutz oder eine Nutzung des Grundstücks. Aus den gleichen Gründen wird ein Rückbau sonstiger Deponien, wie zum Beispiel Siedlungsabfalldeponien, nur in Ausnahmefällen als zielführend bewertet.

¹ KoMa: Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz, FKZ 3713 26 301

² P-Rex: Nachhaltiges Klärschlammmanagement zur Förderung des Phosphorrecyclings und der Energieeffizienz, <http://p-rex.eu/index.php?id=13>

1.3 Bewertung der Einsatzfähigkeit von rückgewonnenem Phosphor

Recyclingphosphate können inzwischen mit ausreichend hoher Pflanzenverfügbarkeit und geringen Schadstoffgehalten, insbesondere bei Cadmium und Uran, aus Klärschlämmen und Klärschlammaschen gewonnen werden. Hierzu liegen belastbare Nachweise zu einer Reihe von Phosphor-Rückgewinnungsverfahren vor. Klärschlamm-Monoverbrennungsaschen sollten aus Vorsorgegründen und zur Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit vor der flächenbezogenen Verwertung generell aufbereitet und von Schadstoffen entfrachtet werden.

1.4 Eckpunkte für eine Phosphorstrategie

Die Eckpunkte der Phosphorstrategie lauten wie folgt:

- Die großtechnische Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung ist mit den derzeit verfügbaren Verfahren möglich und sinnvoll.
- Rechtliche Vorgaben zur Phosphor-Rückgewinnung sind sinnvoll und auch mit Blick auf die Planungssicherheit erforderlich.
- Für die Auswahl der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren werden keine Vorgaben für erforderlich erachtet, da eine große Auswahl von Verfahren zur Verfügung steht, die im Hinblick auf die jeweilige Zielsetzung der Anlage ausgewählt werden müssen.
- Eine Mitverbrennung von Klärschlamm mit relevanten Phosphorgehalten sollte zukünftig nur nach vorheriger Phosphor-Rückgewinnung möglich sein.
- Die Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung sollte zunächst bei Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 (größer 10.000 bzw. 100.000 Einwohnerwerte) und Monoverbrennungsanlagen beginnen und später sukzessive auf weitere Phosphor-Sekundärquellen (u.a. tierische Nebenprodukte) ausgeweitet werden. Bei Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 (kleiner 10.001 Einwohnerwerte) sollte zunächst unter Berücksichtigung der Umsetzungserfahrungen überprüft werden, wann Maßgaben zur Phosphor-Rückgewinnung auch unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten erforderlich sind.
- Die Lagerung von Klärschlammaschen oder der Deponierückbau sind als nachrangig zu betrachten, da die Rückgewinnung aus wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Gründen aus dem aktuellen Phosphoranfall in Kläranlagen und Verbrennungsanlagen erfolgen sollte.
- Zum großindustriellen Einstieg in die Phosphor-Rückgewinnung sollte eine freiwillige Selbstverpflichtung der Hersteller von Phosphor-Mineraldüngern mit dem

Ziel eines teilweisen Umstiegs von Phosphaterzen auf Phosphor-Sekundärquellen angestrebt werden.

- Für alle phosphorhaltigen Düngemittel einschließlich der Sekundär-Phosphor-Recyclingdünger sind stoffliche Qualitätsanforderungen und standardisierte Prüfverfahren zu entwickeln und verbindlich vorzugeben.

2 Auftrag der 80. UMK für die LAGA Ad-hoc AG Phosphor

Im Juni 2012 nahm die ACK/UMK den durch einen LAGA-Ad-hoc-Arbeitskreis erarbeiteten Bericht „Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserve“³ zur Kenntnis.

Die Phosphor-Rückgewinnung war erneut Gegenstand der 80. UMK am 7. Juni 2013. Die UMK fasste zu TOP 16: Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung folgenden Beschluss:

1. Die Umweltministerkonferenz stellt fest, dass Techniken zur Rückgewinnung von Phosphor zukünftig eine bedeutende Rolle bei der Schonung natürlicher Ressourcen und der Sicherung der Phosphorversorgung spielen werden. Die Entwicklung von Phosphor-Rückgewinnungsverfahren hat in Europa in den vergangenen Jahren ganz erheblich an Dynamik gewonnen und mittlerweile werden in einzelnen Staaten derartige Projekte umgesetzt. Dabei wurden unterschiedliche Ansätze und Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung entwickelt, jedoch fehlt ein einheitlicher Bewertungsmaßstab. Deshalb sind zusätzliche Erkenntnisse für die Entscheidungsträger erforderlich, um dasjenige Verfahren auszuwählen, das sich für den jeweiligen Einsatz eignet.

2. Die LAGA wird gebeten, unter Beteiligung der LAWA, der LABO und der Acker- und Pflanzenbaureferenten die bekannten Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung auf Grundlage aktueller Forschungsergebnisse hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit zu bewerten. Dabei sollen insbesondere auch die Wirtschaftlichkeit sowie die Ressourcen- und Energieeffizienz der Verfahren untersucht werden. Die Anforderungen an die Zwischenlagerung von Verbrennungsrückständen in Langzeitlagern sind darzustellen. Potenziale im Deponierückbau sollen anhand aktueller Erkenntnisse dokumentiert werden. Ergänzend sollen auch Düngewirkung, Pflanzenverfügbarkeit sowie die Schadstoffgehalte des gewonnenen Sekundärphosphors im Vergleich zu Rohphosphaten bewertet werden.

[...]

5. Die LAGA - unter Beteiligung der LAWA - wird gebeten, auf der Basis ihrer Bewertung der verfügbaren technischen Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung

³ <http://www.laga-online.de/servlet/is/23875/>

und der Ergebnisse des Berichtes der LAGA vom 30. Januar 2012 einen Vorschlag für eine Phosphorstrategie unter besonderer Berücksichtigung der Phosphorrückgewinnung auszuarbeiten und der Umweltministerkonferenz auf ihrer Herbstsitzung 2015 darüber zu berichten.

[...]

Auf dieser Basis fasste die 101. LAGA-Vollversammlung am 17. September 2013 unter TOP 4.3 den folgenden Beschluss:

- 1. Die LAGA-Vollversammlung richtet eine Ad-hoc-AG zur Erstellung eines Berichtes [...] unter der Federführung des ATA ein. Die Länder werden gebeten, hierzu bis spätestens 1.10.2013 die MitarbeiterInnen zu benennen und die Bereitschaft zur Obmannschaft mitzuteilen.*
- 2. Die LAGA-GS wird gebeten, LAWA und LABO sowie den Acker und Pflanzenbaureferenten den Beschluss mit der Bitte zu übermitteln, bis zum 11.10.2013 Vertreter zur Mitarbeit in der Ad-hoc-AG zu benennen.*
- 3. Der ATA wird um Vorlage des Berichtes zur 104. LAGA-VV im April 2015 gebeten.*

Der ATA setzte auf diesen Grundlagen eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe „Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung“ (Kurzbezeichnung „LAGA AG Phosphor“) unter der Obmannschaft von Baden-Württemberg ein. Die Arbeitsgruppe erarbeitete diesen Bericht unter der Mitarbeit der Länder HE, SN, RP, NI, SH, NW, BE und HB sowie Vertretern der LAWA, der LABO, der Acker- und Pflanzenbaureferenten, des BMUB und des UBA.

3 Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren

3.1 Allgemeines zur Bewertung der Phosphor-Rückgewinnung

- (1) Die Bewertung von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor (P) wird im Folgenden unter Berücksichtigung von Einsatzfähigkeit (Anwendbarkeit), Forschungsergebnissen, Wirtschaftlichkeit sowie Ressourcen- und Energieeffizienz vorgenommen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die folgenden Angaben im Wesentlichen auf Ergebnissen von Studien, Forschungsarbeiten zu Versuchsanlagen unterschiedlicher Entwicklungsreife sowie auf den Ergebnissen einzelner Pilotanlagen und großtechnischer Umsetzungen beruhen.

- (2) Die Phosphor-Rückgewinnung aus kommunalem Abwasser ist sinnvoll, da ein Rückgewinnungspotenzial von jährlich knapp 61.600 Mg P im Zulauf kommunaler Kläranlagen (siehe Tab. A) bei einem mineralischen Phosphor-Verbrauch von etwa 124.000 Mg pro Jahr⁴ in Deutschland besteht. Grundsätzlich stehen aus der kommunalen Abwasserreinigung die flüssige Phase (Abwasser und Prozesswasser aus der Schlammbehandlung), der Klärschlamm (Roh- und Faulschlamm) sowie die Klärschlammasche (nach der Monoverbrennung oder einer vergleichbaren thermischen Behandlung) als Orte der Phosphor-Rückgewinnung zur Verfügung. Sie unterscheiden sich hinsichtlich einer Vielzahl von Parametern wie Menge, Volumenstrom, Beschaffenheit und Zusammensetzung des jeweiligen Stoffstroms, Phosphorkonzentration, Phosphorbindungsform oder Rückgewinnungspotenzial. Diese Parameter müssen für jede Kläranlage bzw. jedes Abwasser separat betrachtet werden und spielen bei der Auswahl des geeigneten Rückgewinnungsverfahrens neben den wirtschaftlichen Aspekten und der Pflanzenverfügbarkeit eine bedeutende Rolle. Letztlich wird jede Kläranlage individuell betrieben und somit muss – wenn die Phosphor-Rückgewinnung auf der Kläranlage realisiert werden soll – auch bei der Wahl des geeigneten Rückgewinnungsverfahrens von einer Einzelfallbetrachtung ausgegangen werden.

- (3) Neben dem kommunalen Abwasserstrom werden die Möglichkeiten des Einsatzes von Phosphor-Rückgewinnungsverfahren bei den Stoffströmen Nahrungsmittelabfälle, inklusive deren Abwässer, tierische Nebenerzeugnisse (Tiermehl) und Wirtschaftsdünger wie Gülle oder Jauche betrachtet, soweit hierzu verfahrenstechnische Umsetzungen bekannt sind und sinnvoll erscheinen. Weitere Stoff-

⁴ Destatis, Fachserie 4, Reihe 8.2, 2014

ströme, wie z.B. Bioabfälle, werden nicht betrachtet, da diese teilweise bereits als Düngemittel verwertet werden oder zu geringe Phosphorgehalte aufweisen.

Tabelle A: Theoretisches Potenzial für Phosphor aus dem Zulauf kommunaler Kläranlagen in Deutschland

Angeschlossene Einwohner	78.239.000 E ⁵
spez. P-Fracht (Einwohner)	1,8 g P/(E·d)
angeschlossene Industrie	46.398.000 EGW ⁶
spez. P-Fracht (Industrie)	0,6 g P/(E·d)
Gesamt P-Zulauf kommunaler Kläranlagen	61.564 Mg P/a

3.2 Betrachtung der verschiedenen Stoffströme

- (1) Im Folgenden werden mögliche Ansatzpunkte für eine Phosphor-Rückgewinnung nach Stoffströmen getrennt betrachtet. Es wird dargestellt, welche Rückgewinnungspotenziale mit welchem Aufwand im jeweiligen Stoffstrom bestehen. Weitere Angaben zur Verfahrensauswahl und den einzelnen Verfahren sind in Anhang 1 (über Anfallstelle des Stoffstroms) und Anhang 2 (über Rückgewinnungsverfahren) ersichtlich.
- (2) Allen Verfahren ist gleich, dass die Schadstoffbelastung der Ausgangsstoffe maßgeblich Einfluss auf die Qualität des Rezyklats nehmen kann.

⁵ Destatis, Statistisches Jahrbuch 2014

⁶ Destatis, Fachserie Umwelt 19, 2013

3.2.1 Abwasser (Kläranlagenablauf)

- (1) Der Phosphor, der mit dem Abwasser (siehe Tab. A) über den Zulauf in die Kläranlage gelangt, wird größtenteils in der biologischen Reinigungsstufe durch Inkorporation in die Biomasse in den Belebtschlamm überführt. Dies führt dazu, dass die Konzentrationen im Kläranlagenablauf verhältnismäßig gering sind (vergl. auch Anforderungen an Ablaufwerte laut Abwasserverordnung).
- (2) Theoretisch könnte im Kläranlagenablauf eine Nachfällung z.B. mit Magnesiumsalzen durchgeführt werden, die an sich einen hohen Wirkungsgrad aufweist (vergl. Kap. 1.2.2 Prozesswasser aus der Schlammbehandlung und Kap. 1.2.3 Klärschlamm). Damit könnte fast der gesamte im Abwasser als Orthophosphat gelöst vorliegende Phosphor gefällt werden. Das zu erwartende Rezyklat würde einen vergleichsweise geringen Grad an partikulären Verunreinigungen aufweisen, da im Kläranlagenablauf kaum Schlammartikel u.ä. zu erwarten sind.
- (3) Da der Volumenstrom groß und die Ablaufwerte gering (max. 1 bzw. 2 mg/l Phosphor bei Kläranlagen der Größenklasse 5 bzw. 4 nach Vorgaben der Abwasserverordnung) sind, ließe sich im Kläranlagenablauf lediglich ein zusätzliches Rückgewinnungspotenzial von höchstens 10 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf erreichen. Daher ist an dieser Stelle eine Rückgewinnung kaum lohnenswert.

3.2.2 Prozesswasser aus der Schlammbehandlung (Schlammwasser)

- (1) Schlammwasser ist das im Schlamm enthaltene Wasser, das, je nach Abtrennungsverfahren, als Überstandswasser (Eindicker), Dekantat (Dekantierzentrifuge), Filtrat (Filteranlagen etc.), Zentrat (Zentrifugen) und Faulwasser (Faulbehälter) bezeichnet wird. Als zusammenfassender Begriff wird hier entsprechend DIN 4045 bzw. DIN EN 1085 von Prozesswasser gesprochen.
- (2) Der Volumenstrom „Prozesswasser aus der Schlammbehandlung“ ist wesentlich kleiner als der gesamte Stoffstrom Abwasser. Hier liegt der Phosphor ebenfalls gelöst als Orthophosphat vor und kann mit einem relativ hohen Wirkungsgrad z.B. mit Magnesiumsalzen gefällt werden. Da jedoch nur ein Teil des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors mit dem Schlammwasser abgetrennt wird, liegt das Rückgewinnungspotenzial in der Regel bei 5 bis 30 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf. Angemerkt werden muss, dass der Phosphorgehalt im

Schlammwasser von zahlreichen Betriebsabläufen auf der jeweiligen Kläranlage abhängig ist und somit stark schwankt. Zudem wird das Prozesswasser im Kreislauf geführt und der enthaltene Phosphor im Klärschlamm aufkonzentriert.

- (3) Eine spezielle Behandlung des Klärschlammes vor der Abtrennung des Prozesswassers durch thermische Behandlung (z.B. Thermodruckhydrolyse) könnte den Anteil an Phosphor erhöhen, der aus dem Schlamm in die wässrige Phase überführt und somit gefällt werden kann. Ob dies in der Praxis möglich ist, wird zurzeit auf ersten Demonstrationsanlagen erprobt. Die Erhöhung der Phosphorausbeute ist auch durch vorherigen chemischen Aufschluss des Klärschlammes z.B. mit Schwefelsäure möglich. Mit Steigerung der Rücklösung von Phosphor in die wässrige Phase steigen allerdings auch der technische Aufwand und somit die Kosten. Von Vorteil ist, dass beispielsweise durch Fällung und Kristallisation aus dem Prozesswasser ein relativ sauberes Rezyklat erhalten werden kann, da die meisten Partikel schon mit der Schlammwässerung abgetrennt wurden.

3.2.3 Klärschlamm (nicht entwässert/ entwässert)

- (1) Klärschlamm oder Faulschlamm können als Rohschlamm stark wasserhaltig oder bereits entwässert behandelt werden. Der Volumenstrom des nicht entwässerten Klärschlammes weist ungefähr dieselben Rückgewinnungspotenziale und Möglichkeiten wie das Schlammwasser auf, da die gängigen Rückgewinnungsverfahren für nicht entwässerten Klärschlamm auf das leicht verfügbare Phosphat abzielen. Der als Orthophosphat gelöst vorliegende Phosphor aus dem gesamten im Klärschlamm enthaltenen Wasser steht dabei der Phosphor-Rückgewinnung zur Verfügung.
- (2) Im Prinzip können hier dieselben Verfahren wie für das Prozesswasser aus der Schlammbehandlung (Fällung, Kristallisation) zum Einsatz kommen (Rückgewinnungspotenzial 5 bis 30 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf). Um höhere Rückgewinnungspotenziale von bis zu 50 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf zu erreichen muss ein chemischer oder physikalischer Aufschluss erfolgen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass das erhaltene Rezyklat, je nach vorherigem Rückgewinnungsverfahren, mit Schlammpartikeln verunreinigt sein kann und somit einer anschließenden Nachbereitung (z.B. Wäsche) zu unterziehen ist.
- (3) Bei dem Volumenstrom „entwässertes Klärschlamm“ wurde das Wasser zu 55 bis 80 % abgetrennt, so dass der zu behandelnde Volumenstrom im Vergleich zum

Schlammwasser erheblich reduziert ist. Im entwässerten Klärschlamm liegt zwar fast der gesamte auf der Kläranlage eliminierte Phosphor (abzüglich der Phosphor-Ablauffracht aus der Kläranlage und dem Phosphor-Anteil im ausgetragenen Schlammwasser (gelöstes Phosphor, Orthophosphat)) vor, dieser ist jedoch biologisch und chemisch gebunden. Somit muss vor einer Phosphor-Rückgewinnung der gebundene Phosphor aus der Schlammmatrix rückgelöst werden. Dies kann durch chemische (z.B. mit Schwefelsäure) bzw. thermische (z.B. metallurgische) Behandlung des entwässerten Klärschlammes erreicht werden. Realistisch betrachtet liegt ein Rückgewinnungspotenzial für Phosphor von 50 bzw. 80 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf vor.

- (4) Mit steigender Rückgewinnungsquote geht jedoch auch ein höherer technischer und wirtschaftlicher Aufwand einher. Erwartet werden kann, je nach Behandlung, ein relativ sauberes Rezyklat, da dieses in der Regel einer Behandlung (Säureaufschluss, thermisch) unterlag, durch die organische Schadstoffe größtenteils zerstört werden. Ob noch Schwermetalle im Rezyklat enthalten sind, ist stark vom Schadstoffgehalt des Klärschlammes und vom Rückgewinnungsverfahren abhängig. Gegebenenfalls sind entsprechende Maßnahmen (z.B. Einsatz von Komplexbildnern) zu ergreifen, um eine Rücklösung von Schwermetallen zu verhindern.

3.2.4 Klärschlammmaschen

- (1) Für die Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammmaschen müssen die Klärschlämme Monoverbrennungsanlagen zugeführt und thermisch behandelt werden, was zu einer erheblichen Reduzierung des zu behandelnden Volumens führt (Eliminierung des restlichen Wassers und des organischen Anteils). In der Klärschlammasche ist fast der gesamte im Klärschlamm bzw. im Kläranlagenzulauf (abzüglich Kläranlagenablauf und dem Anteil im Schlammwasser (gelöstes Phosphor, Orthophosphat)) enthaltene Phosphor vorhanden. Der Phosphor liegt somit in hoher Konzentration vor, ist allerdings chemisch gebunden. Dies macht die Rücklösung des Phosphors, welche durch nasschemischen oder thermochemischen Aufschluss oder auch metallurgisch erfolgen kann, technisch und wirtschaftlich aufwändig. Allerdings kann ein Rückgewinnungspotenzial von mindestens 80 %, bezogen auf den Kläranlagenzulauf, erwartet werden.

3.2.5 Nahrungsmittelproduktion

- (1) Abwässer aus der Nahrungsmittelproduktion fallen in unterschiedlichen Volumenströmen und Qualitäten bei der Herstellung und Verarbeitung von Nahrungsmitteln an und sind den industriellen Abwässern zuzuordnen. Allerdings sind diese Abwässer in der Regel von Qualität und Belastung her mit kommunalem Abwasser zu vergleichen. Sie enthalten (etwa bei Molkereiabwässern) häufig Phosphor, welcher im Zuge der Abwasseraufbereitung zurück gewonnen werden kann.
- (2) Ähnlich wie beim Volumenstrom kommunales Abwasser kann eine Fällung, z.B. mit Magnesiumsalzen, durchgeführt werden. Diese weist einen hohen Wirkungsgrad auf, so dass fast der gesamte im Abwasser als Orthophosphat gelöst vorliegende Phosphor zurückgewonnen werden kann. Der Einsatz weiterer Rückgewinnungstechniken ist denkbar. Das Rückgewinnungspotenzial sowie die Reinheit des Rezyklats hängen stark von der Qualität des Prozesswassers bzw. vom industriellen Prozess ab.

3.2.6 Tierische Nebenprodukte (Tiermehlasche)

- (1) Ein wesentlicher Stoffstrom, bei dem Phosphor dem Stoffkreislauf entzogen wird, sind auch tierische Nebenprodukte, wie beispielsweise Tiermehl oder Fleisch- und Knochenmehl aus der Verarbeitung von Material der Kategorie 2 oder 3 (gemäß Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte). Als organisches Düngemittel dürfen derzeit nur Stoffe in den Verkehr gebracht und verwendet werden, die aus Material der Kategorie 2 oder 3 hergestellt worden sind.
- (2) Aus hygienerechtlichen Gründen ist die Verwendung von Aschen aus der Verbrennung von tierischen Nebenprodukten aus Material der Kategorie 1 trotz der hohen Verbrennungstemperaturen zur Herstellung von Düngemitteln derzeit nicht zulässig. Da momentan vielfach keine Trennung von Material der Kategorien 1 und 2 stattfindet, spielt die Phosphor-Rückgewinnung bei tierischen Nebenprodukten derzeit noch keine große Rolle. Aus den tierischen Nebenprodukten der Kategorie 3 werden vornehmlich Futtermittel für Heimtiere erzeugt.
- (3) Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus tierischen Nebenprodukten setzen insbesondere bei der Aschefraktion an. Somit muss das zugelassene Material

der Kategorien 2 und 3 zunächst in Monoverbrennungsanlagen ggf. durch Mitverbrennung mit anderen phosphorreichen Materialien in geeigneten Anlage verbrannt werden. Anschließend könnten hier ähnliche Verfahren wie bei der Aufbereitung von Klärschlammmasche eingesetzt werden.

3.2.7 Gülle und andere Wirtschaftsdünger

- (1) Wirtschaftsdünger sind nach der Definition des Düngegesetzes Düngemittel, die
- als tierische Ausscheidungen bei der Haltung von Tieren zur Erzeugung von Lebensmitteln, bei der sonstigen Haltung von Tieren in der Landwirtschaft oder
 - als pflanzliche Stoffe im Rahmen der pflanzlichen Erzeugung oder in der Landwirtschaft,
- auch in Mischungen untereinander oder nach aerober oder anaerober Behandlung, anfallen oder erzeugt werden. Wirtschaftsdünger werden meist direkt auf landwirtschaftliche Flächen zur Düngung aufgebracht.
- (2) Eine Rückgewinnung von Phosphor aus Güllen aus der Tierhaltung kann in Regionen mit einer Überversorgung an Wirtschaftsdünger (Phosphor) sinnvoll sein. Verfahren zur Rückgewinnung aus Gülle stehen ebenso zur Verfügung wie die Gülleseparation. Zudem verbessert sich in der behandelten Gülle das Nährstoffverhältnis, da sie unbehandelt ein für die Pflanzenernährung ungünstiges Stickstoff-Phosphorverhältnis mit zu hohem Phosphoranteil aufweist. Eine auf den Stickstoff-Bedarf ausgerichtete Düngung kann daher zu einer Anreicherung von Phosphor im Boden führen.

3.2.8 Bewertung der Stoffströme

- (1) Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in der Prozesskette (Stoffstrom), die auf der Kläranlage stattfindet, das Rückgewinnungspotenzial an Phosphor steigt (siehe Abbildung A). Parallel dazu nimmt aber auch der technische und wirtschaftliche Aufwand zu, der betrieben werden muss, um die Rückgewinnung durchzuführen. Generell nimmt die Pflanzenverfügbarkeit mit steigender Prozesskette ab, wobei je nach Rückgewinnungsverfahren und Weiterbehandlung der Rezyklate eine hohe Pflanzenverfügbarkeit erreicht werden kann. Großtechnisch umgesetzt sind, aufgrund wirtschaftlicher und betriebsbe-

dingter Vorteile, zurzeit in erster Linie Verfahren, die bei den Stoffströmen im vorderen Teil der Prozesskette ansetzen.

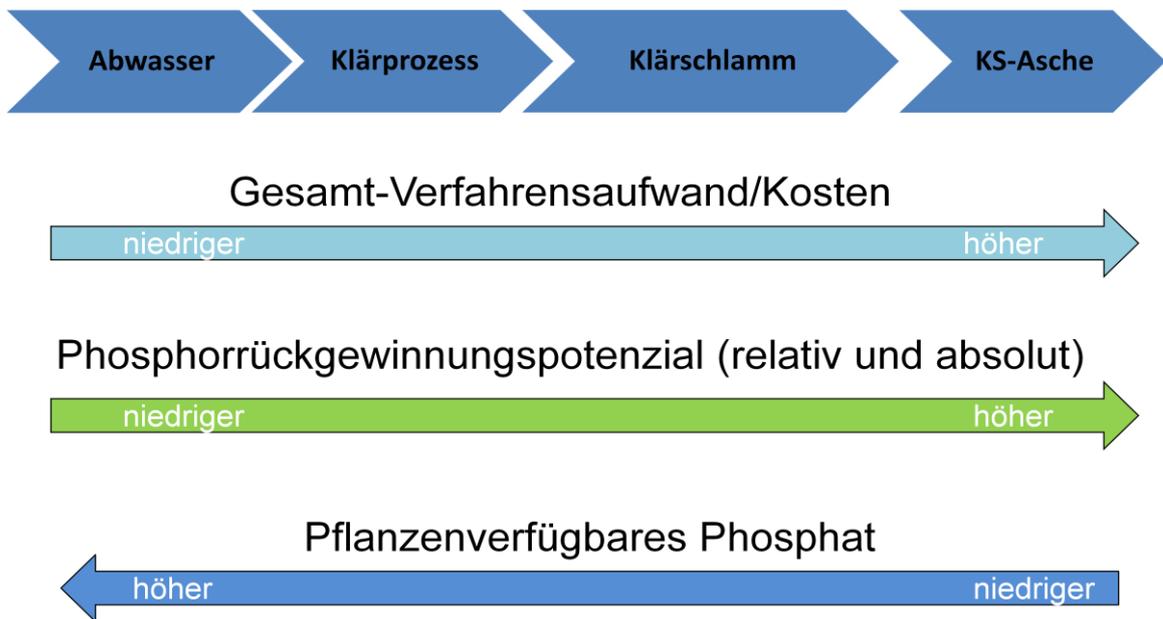


Abbildung A: Generelle Betrachtung des Aufwands, des Potenzials und der Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor-Rezyklat

- (2) In der nachfolgende Tabelle B werden die verschiedenen Stoffströme hinsichtlich der verfahrenstechnischen Phosphor-Rückgewinnungsmöglichkeiten überschlägig in Bezug auf Einsatzfähigkeit, Leistungsfähigkeit, Rezyklatqualität, Wirtschaftlichkeit, Ressourcen- und Energieeffizienz sowie technische Reife des Verfahrens bewertet.

Tabelle B: Bewertung der Phosphor-Rezyklate aus der Abwasserbehandlung

Stoffstrom (Ausgangsmaterial für P-Recycling)	Leistungsfähigkeit (Phosphor-Rückgewinnung)	Rezyklatqualität		Einsatzfähigkeit, Anwendbarkeit)	Betriebsmittelverbrauch, Energieeffizienz	Reife des Verfahrens	Kosten pro kg Phosphor
		Pflanzenerverfügbarkeit	Schadstoffabreicherung ⁷				
Abwasser (Kläranlagenablauf)	+	++	++	+	+	++	o
Prozesswasser (Schlammwasser)	++	++(+)	++(+)	+	+++	+++	ooo
Klärschlamm (nicht entwässert)	++	+++	++	+	+++	+++	oo
Klärschlamm (entwässert)	+++	+++	+++	++	++	+++	oo
Klärschlamm asche (aufbereitet)	+++	++	+++	++	++ ⁸	++	oo

+ = gering o = hoch
 ++ = mittel oo = mittel
 +++ = gut ooo = niedrig

⁷ Organische und anorganische Schadstoffe können in unterschiedlichem Maße abgereichert werden

⁸ Ausnahme: Energiegewinnung bei einzelnen Verfahren möglich

3.3 Betrachtung der Rückgewinnungsverfahren

- (1) Nachfolgend werden die verschiedenen technischen Verfahren der Phosphor-Rückgewinnung betrachtet. Es soll aufgezeigt werden, welche Vorteile und Grenzen gegeben sind, welcher Aufwand mit dem jeweiligen Verfahren verbunden ist und welche Resultate erwartet werden können.
- (2) Die einzelnen Verfahren lassen sich in die drei Gruppen Klärprozess, Klärschlamm sowie Asche unterteilen, wie Abbildung B zeigt. Verfahrensbeispiele sind in den Anhängen 1 und 2 aufgelistet.



Abbildung B: Genereller Überblick zu Möglichkeiten zur Phosphor-Rückgewinnung

3.3.1 Chemische Fällung, Kristallisation und Adsorption von gelöstem Phosphor

- (1) Voraussetzung für den Einsatz chemischer Fällungsverfahren ist das Vorhandensein von gelöst vorliegendem Phosphat (Orthophosphat). In kommunalen Kläranlagen ist dies in besonders hohem Maße bei Anlagen mit einer biologischen Phosphorelimination der Fall. Spezielle Mikroorganismen nehmen unter aeroben Bedingungen Phosphor im Übermaß auf, werden dann mit dem sich bildenden Schlamm aus dem Abwasser entfernt und geben unter anaeroben Bedingungen den Phosphor wieder in das Schlammwasser ab. Der Klärschlamm oder das Schlammwasser kann dann einer chemischen Fällung, einem Kristallisations- oder Adsorptionsverfahren unterzogen werden.

- (2) Die Behandlung erfolgt durch Anhebung des pH-Wertes z.B. mittels Luftstrippung (Eindüsung von Luft) oder durch Zugabe von Kalk oder Natronlauge. Kristallisation oder nachfolgende Fällung werden üblicherweise durch den Zusatz von Magnesium- oder Calciumsalzen ausgelöst. Der im Schlamm biologisch und chemisch gebundene Phosphor wird allerdings nicht erfasst. Als Rezyklat wird MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat) oder CAP (Calcium-Ammonium-Phosphat) erhalten, in dem, je nach Ausgangsstrom, mehr oder weniger Fremdstoffe mit gefällt werden. Das Rezyklat kann, ggf. nach weiterer Aufbereitung/Reinigung (z.B. Waschen), als vergleichsweise gut pflanzenverfügbares Düngemittel eingesetzt werden (siehe Kap. 5).
- (3) Neben der technisch und wirtschaftlich verhältnismäßig einfach durchzuführenden Rückgewinnung des gelösten Phosphors ergeben sich aus der gezielten Fällung von Phosphat operative und ökonomische Vorteile, da spontane Fällungen vermieden und somit Ablagerungen u.a. an Rohrleitungen verhindert werden. Zudem kann der Klärschlamm durch seinen geringeren Phosphorgehalt mechanisch besser entwässert werden. Durch das Verfahren können Rückgewinnungspotenziale von bis zu 30 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf erwartet werden. Höhere Rückgewinnungsquoten sind aktuell nicht möglich, da der im Schlamm biologisch und chemisch gebundene Phosphor nicht erfasst werden kann.

3.3.2 Nasschemischer Aufschluss

- (1) Um neben dem gelösten auch den biologisch und chemisch gebundenen Phosphor zurück gewinnen zu können, muss dieser ebenfalls in eine gelöste Form überführt werden. Dies ist z.B. durch einen nasschemischen Aufschluss des Klärschlammes möglich. Von Vorteil ist dabei, dass diese Verfahren auch bei Klärschlämmen angewandt werden können, bei denen eine chemische Phosphorelimination (keine ausschließlich biologische) erfolgt.
- (2) Die Überführung des Phosphors in die Flüssigphase erfolgt durch das Absenken des pH-Wertes mittels Mineralsäuren, d.h. Schwefel-, Salz- oder Phosphorsäure, oder auch durch den Einsatz von Kohlendioxid. Der Rücklösegrad ist abhängig vom pH-Wert und somit vom Säureeinsatz. Durch die saure Extraktion steigt mit der Rücklösung des Phosphors allerdings auch die Rücklösung von den im Klärschlamm enthaltenen Schwermetallen. Nach einer Abtrennung der Feststoffe

wird durch die Zugabe von Laugen wie z.B. Natronlauge oder Kalkmilch, der pH-Wert angehoben und die Fällung des sich in Lösung befindenden Phosphors kann, wie im vorangehenden Absatz (chemische Fällung, Kristallisation, Adsorption) beschrieben, durchgeführt werden. Ggf. können Komplexbildner wie Zitronensäure zugesetzt werden, um die Mitfällung von Schwermetallen zu verhindern. Möglich ist auch, die Schwermetalle anschließend von der Phosphorfraktion mittels Fällung (Sulfid / Hydroxid) oder durch Nanofiltration, Solventextraktion (Trennung eines gelösten Stoffes aus einem Flüssigkeitsgemisch) oder Ionenaustauscher zu separieren.

- (3) Zu erwarten ist ein relativ gut pflanzenverfügbares Rezyklat. Der Reinheitsgrad des Rezyklats ist je nach Verfahren verschieden. Durch die Verfahrensweise ist zu erwarten, dass auch organische Schadstoffe größtenteils abgetrennt werden. Je höher das Rückgewinnungspotenzial ist und je reiner das Rezyklat, desto mehr steigen auch die technischen und wirtschaftlichen Aufwendungen. Rückgewinnungspotenziale von bis zu 60 % aus Klärschlamm bezogen auf den Kläranlagenzulauf können erwartet werden.
- (4) Vergleichbare nasschemische Aufschlussverfahren können auch für Klärschlammaschen verwendet werden. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf können hiermit Rückgewinnungspotenziale von bis zu 90 % erreicht werden.

3.3.3 Thermochemischer Aufschluss

- (1) Der thermochemische Aufschluss ist besonders für Klärschlammaschen aus der Monoverbrennung geeignet. Er ermöglicht ebenfalls die Rückgewinnung von biologisch und chemisch gebundenem Phosphor. Die Art der Phosphorelimination auf der Kläranlage kann frei gewählt werden.
- (2) Im Verfahren werden die Aschen mit Magnesiumchlorid oder mit Natriumcarbonat vermischt und im Drehrohrofen auf etwa 1.000 °C erhitzt. Aufgrund des hohen Dampfdrucks gehen die Schwermetalle, die mit dem Reduktionsmittel eine Verbindung eingehen, in die Gasphase über und werden anschließend mit dem Abgas aus dem Prozess ausgetragen. Gleichzeitig bilden sich mineralische Phosphatphasen wie Magnesium- und Calcium-Magnesium-Phosphate aus.
- (3) Das mit dem technisch relativ aufwendigen Verfahren erhaltene Rezyklat ist vergleichsweise sauber, organische Verunreinigungen sind nicht zu erwarten. Das

Rezyklat besitzt – je nach Verfahrensdurchführung – eine mittlere bis gute Pflanzenverfügbarkeit. Rückgewinnungspotenziale von bis zu 90 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf können erwartet werden.

3.3.4 Metallurgische Verfahren

- (1) Eine Rückgewinnung von biologisch und chemisch gebundenem Phosphor kann außerdem metallurgisch erfolgen. Auch hier ist die Art der Phosphorelimination auf der Kläranlage frei wählbar. Entwässerter Klärschlamm mit mindestens 25 % Trockensubstanz oder Klärschlammasche werden mit Zement und anderen Zuschlagsstoffen zu Briquets verpresst und in einem Schmelzofen mit stehendem Schacht erhitzt. Bei Temperaturen bis zu 2.000 °C werden Schwermetalle verdampft (z.B. Cadmium, Quecksilber, Blei, Zink) oder in eine flüssige Metallphase überführt (z.B. Eisen, Chrom, Kupfer, Nickel). In der entstehenden Schlacke ist der gesamte im Klärschlamm enthaltene Phosphor enthalten.
- (2) Bei diesem Verfahren ist ein vergleichsweise sauberes Rezyklat zu erwarten. Organische Verunreinigungen sollten aufgrund der hohen Temperaturen zerstört sein. Das erhaltene Rezyklat ist dem Thomasmehl (Ca-Siliko-Phosphate) ähnlich. Das Verfahren ist zwar technisch relativ aufwendig, hat aber den Vorteil, dass auch der Energiegehalt des Klärschlammes genutzt werden kann. Rückgewinnungspotenziale für Phosphor von bis zu 90 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf können erwartet werden.

3.3.5 Monoverbrennung und Pyrolyse ohne direkte Nachbehandlung

- (1) Grundsätzlich ist es möglich, den Klärschlamm thermisch in klassischen Monoverbrennungsanlagen (Wirbelschicht, Pyrobuster, Rostfeuerung u.ä.) zu behandeln und die entstehenden Aschen, die durch die thermische Behandlung frei von organischen Schadstoffen sein dürften, dann direkt als Düngemittel einzusetzen. Wegen der geringen Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors in solchen Aschen und der fehlenden Abreicherung der nichtflüchtigen Schwermetalle sollten Klärschlamm-Monoverbrennungsaschen zukünftig nicht direkt zur Düngung, sondern als Rohstoff zur Herstellung von Phosphor-Recyclingdünger eingesetzt werden. Technologisch kann dies insbesondere über nasschemische und thermochemische Verfahren erfolgen.

- (2) Die Pyrolyse bietet eine weitere Möglichkeit der thermischen Klärschlammbehandlung. Pyrolyseanlagen haben den Vorteil, dass sie für geringere Durchsatzmengen ausgelegt werden können als Monoverbrennungsanlagen. Prozesstemperaturen von 500 °C zerstören teilweise organische Schadstoffe. Nachteilig ist, dass keine Abreicherung von Schwermetallen stattfindet. Erste Pyrolyseanlagen für Klärschlamm werden zurzeit als Demonstrationsanlagen getestet. Die entstehende Klärschlammkohle wird derzeit untersucht und ist gegenwärtig noch nicht als Düngemittel zugelassen. Möglicherweise ist auch die Pyrolyse lediglich ein Zwischenschritt zur Erzeugung eines Rohstoffs zur Herstellung von Phosphor-Recyclingdünger.
- (3) Des Weiteren können die entstehenden Klärschlammaschen oder -kohlen in den Prozess der mineralischen Düngemittelproduktion eingeschleust werden und hier mineralisches Rohphosphat ersetzen. Erste Praxisversuche mit Klärschlammaschen stehen derzeit aus.

3.3.6 Bewertung der Rückgewinnungsverfahren

- (1) Zusammenfassend ist festzustellen, dass der nasschemische Aufschluss im Schlammwasser vor allem wirtschaftliche Vorteile aufweist, die einschlägigen Verfahren am weitesten entwickelt sind und als marktreif bezeichnet werden können. Diesen Vorteilen stehen die geringen erreichbaren Rückgewinnungsquoten und die Beschränkung des Einsatzes auf die wenigen Kläranlagen mit biologischer Fällung gegenüber. Bei der Rückgewinnung aus der Asche können die höchsten Rückgewinnungsquoten erreicht werden, wobei dem ein höherer Aufwand gegenüber steht. Zusammen mit dem Rückgewinnungspotenzial steigt auch der technische und finanzielle Aufwand, der für die Phosphor-Rückgewinnung betrieben werden muss. In Anhang 1 wird ein Übersichtsschema mit den einzelnen Verfahren abgebildet.
- (2) In der nachfolgende Tabelle C werden die verschiedenen Arten der Rückgewinnungsverfahren übersichtlich hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit, der Anwendbarkeit des eingesetzten Phosphor-Fällungsverfahrens, der Leistungsfähigkeit, der Rezyklatqualität, ihrer Wirtschaftlichkeit und ihrer Ressourcen- und Energieeffizienz sowie der technischen Reife des Verfahrens bewertet.

Tabelle C: Allgemeine Kurzcharakterisierung von Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung

Verfahrensprinzip	Leistungsfähigkeit (Phosphor-Rückgewinnung)	Rezyklatqualität		Einsatzfähigkeit (Anwendbarkeit)	Betriebsmittelverbrauch, Energieeffizienz	Reife des Verfahrens	Kosten pro kg Phosphor
		Pflanzenverfügbarkeit	Schadstoffanreicherung ⁹				
Fällung, Kristallisation, Adsorption	+	++	++	++	++(+)	+++	ooo
Nasschemischer Aufschluss	++	+++	+++	+++	+	++	oo
Thermochemischer Aufschluss	+++	++	++	++(+)	+	++	o
Metallurgischer Aufschluss	+++	++	++	++(+)	++	+	o(o)

+ = gering o = hoch
 ++ = mittel oo = mittel
 +++ = gut ooo = niedrig

⁹ Organische und anorganische Schadstoffe können in unterschiedlichem Maße angereichert werden

4 Bewertung der Zwischenlagerung und Potenziale im Deponierückbau

4.1 Bewertung der Anforderungen an die Zwischenlagerung von Klärschlammaschen

- (1) Die bei der Monoverbrennung von kommunalem Klärschlamm anfallenden Verbrennungaschen sollten prioritär unmittelbar nach Anfall zu einem vermarktbareren Material aufbereitet bzw. der enthaltene Phosphor rückgewonnen werden. Ist dies begründet noch nicht möglich, d.h. werden beispielsweise im Rahmen der Übergangszeit der großtechnischen Etablierung der Rückgewinnungsverfahren größere Zwischenlagerkapazitäten benötigt, können die Aschen bei Einhaltung der erforderlichen Zuordnungskriterien im Regelfall auf einer DKII-Deponie gelagert werden. Einer solchen Zwischenlagerung auf Deponien im größeren Maßstab kommt hierbei nur eine vorübergehende Bedeutung zu, die auf das produktionstechnisch notwendige Maß beschränkt werden sollte.
- (2) Um ein Vermischen der Klärschlammaschen mit anderen Abfällen zu vermeiden, ist die Einrichtung eines Langzeitlagers mit Mono-Lagerungsbereich und möglichst eigener Sickerwassererfassung notwendig. Kann vor der Ascheeinlagerung nachgewiesen werden, dass die Asche vollständig inertisiert ist (Auslaugtest), kann die zuständige Behörde die Anforderungen an die Sickerwassererfassung entsprechend anpassen bzw. über den Bau der Sickerwassererfassung entscheiden. Der Kontakt mit Niederschlagswasser muss weitgehend verhindert werden. Die wirtschaftliche Rückholbarkeit sollte im Vordergrund stehen. Von daher haben Lösungen Vorrang, die eine solche Rückholbarkeit ermöglichen. Dies kann durch Anlieferung und Einbau beispielsweise in Big-Bags und Errichtung einer temporären Oberflächenabdichtung (mineralisch oder Kunststoffolie) erreicht werden. Diese Voraussetzungen sollten auf einer dem Stand der Technik entsprechenden Deponie in der Betriebsphase gegeben sein.
- (3) Die Möglichkeit der Langzeitlagerung (Zeitraum von mehr als drei Jahren) ist gem. § 23 Abs. 6 Deponieverordnung (DepV) in der Fassung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I Nr. 21, S. 973) grundsätzlich möglich: „Bei Aschen aus der Klärschlamm-Monoverbrennung, die nicht gemeinsam und ohne Vermischung mit anderen Abfällen zum Zwecke einer späteren Rückgewinnung des Phosphors in einem Langzeitlager gelagert werden, kann auf Antrag eine Ausnahme von der Nachweispflicht gemäß Absatz 1 Satz 2 zugelassen werden. Die Ausnahme ist auf maximal fünf Jahre zu befristen; sie kann befristet verlängert werden. Für eine

Lagerung über den 30. Juni 2023 hinaus ist eine Ausnahme gemäß Satz 1 nicht zulässig.“. Im Zuge der Novellierung der AbfKlärV sollten auch die Fristen des § 23 Abs. 6 der DepV verlängert werden.

- (4) Eindeutige Regelungen zum Eigentum und Eigentumsübergang (Betreiber der Monoverbrennungsanlage oder Deponiebetreiber) bei der Deponierung von Klärschlammasche sollten gesetzlich eindeutig geregelt werden.

4.2 Bewertung der Potenziale aus dem Deponierückbau

- (1) Das Phosphorpotenzial in deutschen Deponien wird durch die Ablagerung von Klärschlämmen und Klärschlammverbrennungaschen seit 1980 auf 350.000 Mg Phosphor geschätzt. Hierdurch könnte der bundesdeutsche Bedarf für zweieinhalb Jahre gedeckt werden¹⁰. Zusätzlich enthalten Schlacken (OBM-¹¹, LD-¹² und E-Ofenschlacke) nennenswerte Phosphorgehalte. Die vorhandenen Daten über die Wertstoffpotenziale und insbesondere zu den Phosphorgehalten in Deponien sind allerdings nicht mehr aktuell.
- (2) Klärschlamm wurde häufig gemischt mit Siedlungsabfällen abgelagert. Dies erschwert die Rückgewinnung von Phosphor. Zudem weisen die abgelagerten Klärschlämme zum Teil höhere Schwermetallkonzentrationen auf. Deshalb ist beim Recyclingprozess darauf zu achten, dass die Schwermetalle abgetrennt werden und nicht in das recycelte Phosphat gelangen.
- (3) Zum Einsatz effizienter Aufbereitungs- und Sortiertechnologien beim Rückbau von Deponien (Landfill Mining) mangelt es bisher an Erfahrungen. Auch Daten zu den Investitions- und Betriebskosten sowie zu den relevanten ökologischen Auswirkungen liegen nicht in ausreichendem Umfang vor¹³.
- (4) Zum Landfill Mining werden Erkenntnisse zurzeit in einem Forschungsvorhaben des BMBF ermittelt¹⁴. Schwerpunkt sind u.a. die Bedingungen, unter denen ein Landfill Mining ökologisch, ökonomisch und nachhaltig durchgeführt werden

¹⁰ Franke M. et al. (2011): Landfill Mining – Rohstoffpotenziale in Deponien, aus : Recycling und Rohstoffe Band 4, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 403 (S. 411-412)

¹¹ OBM: Verfahren zur Stahlerzeugung mittels eines Boden blasenden Konverters

¹² LD: Verfahren zur Stahlerzeugung mittels eines Sauerstoff-Aufblasprozesses

¹³ Fricke K. (2011): Landfill Mining – ein Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcensicherung, Müll und Abfall, 11 2013, S. 587

¹⁴ Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des Landes Nordrhein-Westfalen koordiniert durch Fa. Tönsmeier, Porta Westfalica und den Kreis Minden Lübbecke

kann. Die technischen Konzeptionen zur Bereitstellung von Sekundärrohstoffen sind ebenfalls Bestandteil des Forschungsprojektes. Genehmigungsrechtliche Anforderungen werden in einem separaten Leitfaden für spätere Anwender zur Verfügung gestellt. Ein bereits abgeschlossenes Untersuchungsvorhaben zum Landfill Mining auf einer Kreismülledeponie in Baden-Württemberg¹⁵ hat zu den Rückbaukosten ergeben, dass diese höher als erwartet sind und ein wirtschaftlicher Rückbau erst bei deutlich höheren Rohstoffpreisen aus den Wertstoff Erlösen möglich ist.

- (5) Nach einer laufenden Studie des Landes Nordrhein-Westfalen zur Phosphatrückgewinnung aus Deponien und Altablagerungen, die Ende 2015 abgeschlossen sein wird, schwanken die Phosphatgehalte der Deponate verschiedenartiger Deponien zwischen 1 g und 80 g P/kg Trockensubstanz (TS). Insgesamt zeichnet sich die in Abbildung A dargestellte Reihenfolge von hohen zu niedrigen Phosphorgehalten ab.

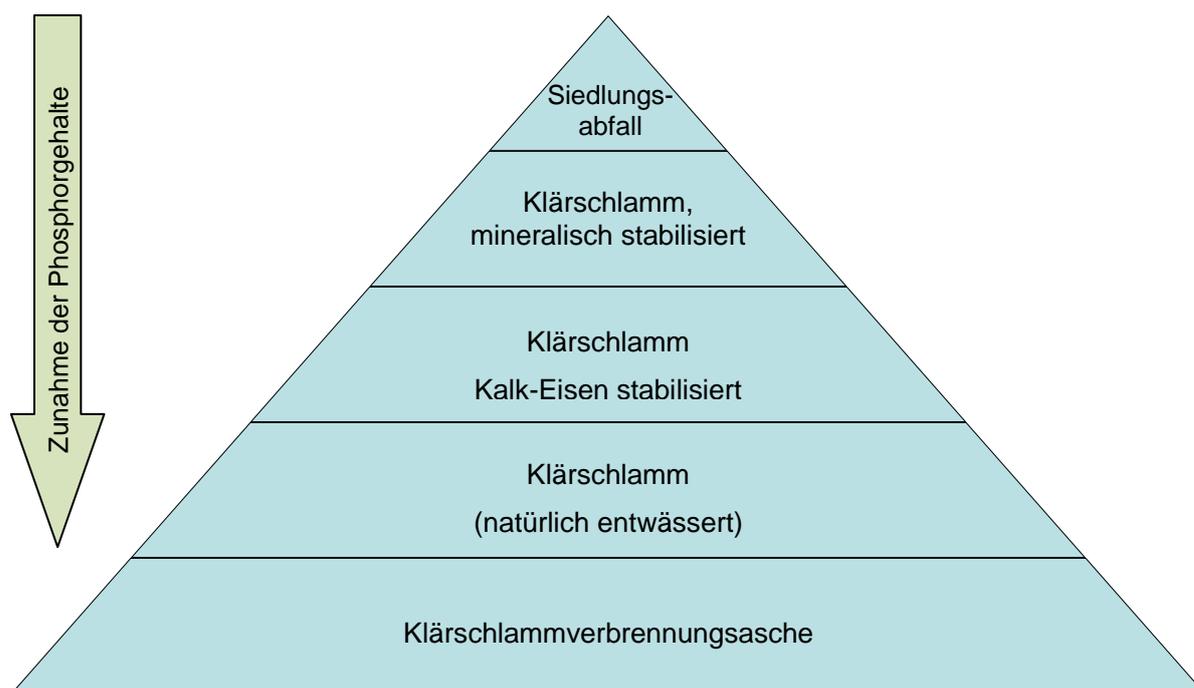


Abbildung A: Reihenfolge der Phosphorgehalte von Deponaten¹⁶

¹⁵ Gäth S. und, Nispel J. (2012): Betrachtung des Ressourcenpotenzials der Kreismülledeponie Hechingen, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

¹⁶ Forschungsvorhaben des Landes NRW durch die TU Braunschweig: Phosphatrückgewinnung aus Deponien und Altablagerungen, im Zusammenhang mit einem BMBF Forschungsvorhaben (r³) zum Deponierückbau

- (6) Die Deponate überschreiten zum Teil den Maßstab für die Aufbereitungswürdigkeit. Hierbei wird ein Wert von 20 g P/kg TS zu Grunde gelegt, wie er derzeit im Entwurf der Klärschlammverordnung angedacht ist. Bei einer Überschreitung dieses Wertes soll künftig eine Phosphor-Rückgewinnungspflicht bestehen.
- (7) Phosphor liegt in Deponien in anorganischer Form vor. Dies ist vor allem durch die lange Einlagerungszeit begründet. Schwermetallanalysen¹⁷ belegen eine erhöhte Belastung der Deponate, so dass vor einer Nutzung als Düngemittel eine entsprechende Behandlung notwendig ist. Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Einlagerungsdauer auf die Bindungsform des Phosphors und damit auf das Phosphor-Rücklösungsvermögen, zur Pflanzenverfügbarkeit des gewonnenen Phosphors sowie zur Ökonomie und Ökologie sind noch nicht abgeschlossen.
- (8) Als Rechtsgrundlage für den Deponierückbau kommt insbesondere das Abfallrecht in Betracht. Der Rückbau einer Deponie zum Zwecke der Wiederverwertung von Rohstoffen ist bislang weder im Abfallrecht noch im Bodenschutzrecht ausdrücklich vorgesehen.
- (9) Der Rückbau von Deponieabschnitten mit dem Ziel der Phosphor-Rückgewinnung, in denen phosphorhaltige Abfälle gemischt mit anderen Abfällen abgelagert wurden, ist aufgrund des diffus vorliegenden geringen Phosphorgehalts derzeit unter wirtschaftlichen Aspekten nicht zu empfehlen - es sei denn, es gibt noch andere Gründe für den Rückbau, wie z. B. den Grundwasserschutz oder die Nutzung des Grundstücks. Gesondert zu bewerten sind allerdings Klärschlamm-Monodeponien. Hier ist die Wirtschaftlichkeit einer Phosphor-Rückgewinnung im Einzelfall zu prüfen.

¹⁷ Forschungsvorhaben des Landes NRW durch die TU Braunschweig: Phosphatrückgewinnung aus Deponien und Altablagerungen, im Zusammenhang mit einem BMBF Forschungsvorhaben (r³) zum Deponierückbau

5 Bewertung des rückgewonnenen Phosphors

5.1 Rechtliche Voraussetzungen für Verwendung als Düngemittel

5.1.1 Düngerecht

- (1) Hinsichtlich der Beurteilung der Düngewirkung sowie zur Beurteilung der ordnungsgemäßen Verwertung sind das Düngerecht sowie das stoffbezogene Fachrecht (z.B. Klärschlammverordnung (AbfKlärV), ggf. Bioabfallverordnung (BioAbfV)) zu beachten.
- (2) Das Düngerecht wurde für alle Stoffe, die zum Zwecke der Düngung (gem. § 1 DüngG) in den Verkehr gebracht und eingesetzt werden, erlassen. Hiernach dürfen nur die Stoffe als Düngemittel in den Verkehr gebracht und angewandt werden, die zugelassen sind. Eine Zulassung kann auf Basis europäischer Vorschriften (hier: Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13.10.2003 über Düngemittel) oder nationaler Vorschriften (hier: Düngemittelverordnung (Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln – DüMV) vom 05.12.2012) oder auf Basis einer Zulassung in einem anderen Mitgliedstaat der Europäischen Union (EU) erfolgen.
- (3) In der deutschen Düngemittelverordnung sind im Hinblick auf die Unbedenklichkeit stoffunabhängige Regelungen und stoffspezifische Anforderungen zu Schadstoffgehalten, Einschränkungen und Auflagen zur Anwendung festgelegt. In der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 sind derartige Festlegungen nicht getroffen. In den Regelwerken der anderen EU-Mitgliedstaaten sind hierzu nur teilweise Anforderungen enthalten.

5.1.2 Ende der Abfalleigenschaft

- (1) Derzeit befinden sich bereits diverse technische Verfahren zur Nutzung der Phosphor-Ressourcen, die im Klärschlamm oder anderen phosphorhaltigen Stoffen vorkommen, in der praxisnahen Anwendung. Phosphorhaltige Düngemittel und Ausgangsstoffe für weitere Produkte hieraus werden bereits vermarktet und künftig verstärkt auf den Markt gelangen.
- (2) Die Abfalleigenschaft eines Stoffes endet nach § 5 KrWG, wenn dieser Stoff ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

1. er üblicherweise für einen bestimmten Zweck verwendet wird,
 2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
 3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
 4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.
- (3) § 5 des KrWG ermächtigt die Bundesregierung durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates die näheren Bedingungen für ein Ende der Abfalleigenschaft festzulegen. Denkbar ist, dass insbesondere für aufbereitete Aschen aus der Klärschlamm-Monoverbrennung und MAP-Materialien das Ende der Abfalleigenschaft konkretisiert wird und hierfür ggf. Anforderungen in einer Rechtsverordnung formuliert werden. Es ist davon auszugehen, dass die beiden Materialgruppen mit Primärdüngemitteln vergleichbar sind und ein abfallspezifisches Gefahrenpotenzial nicht mehr besteht. Eine Berücksichtigung in der Düngemittelverordnung führt demgegenüber nicht automatisch dazu, dass diesen Materialien das Ende der Abfalleigenschaft zuerkannt wird.
- (4) Im Rahmen der Anforderungen nach § 5 Nummer 3 und 4 KrWG kommt der Erarbeitung von Schadstoffgrenzwerten für Klärschlammaschen und Sekundärphosphate eine besondere Bedeutung zu; für Phosphor, der bei Fällungsprozessen gewonnen wird, sind ggf. auch Hygieneparameter festzulegen.

5.2 Allgemeine Kriterien zur Herstellung und Verwendung phosphorhaltiger Düngemittel aus sekundären Phosphor-Reserven

- (1) Düngemittel können zugelassen und in Verkehr gebracht werden, wenn sie wirken und schadlos sind (§ 5 DüngG). Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate oder Pflanzenhilfsmittel dürfen bei sachgerechter Anwendung die Fruchtbarkeit des Bodens, die Gesundheit von Mensch und Tier sowie Nutzpflanzen nicht schädigen und den Naturhaushalt nicht gefährden (§ 5 DüngG, §§ 3 und 4 DüMV).

5.2.1 Umwelteigenschaften

Schadstoffgehalt

- (1) Grundsätzlich ist die Qualität der phosphorhaltigen Ausgangsstoffe wie Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammaschen oder Wirtschaftsdünger für die Qualität der Düngemittel entscheidend. In ungereinigtem Abwasser und Klärschlämmen wurden bislang nach Auswertung bundes- und landesweiter Untersuchungsprogramme über 100 bekannte Schadstoffe, bisher ohne Wichtung der Relevanz für die Umwelt und das Zusammenwirken untereinander (Schwermetalle, organische Schadstoffe, Arzneimittelrückstände etc.) nachgewiesen.
- (2) Organische Schadstoffe werden bei der Verbrennung, abhängig von Verbrennungstemperatur und Verweilzeit, i.d.R. zerstört. Der Gehalt von organischen Schadstoffen in Klärschlammaschen ist daher meist weit niedriger als in Klärschlämmen.

Gehalte an Schwermetallen

- (3) Durch die Verbrennung von Klärschlamm findet eine Aufkonzentrierung von Phosphor sowie von nicht flüchtigen Schwermetallen statt. Unbehandelte Klärschlammaschen können nach einer Studie von Krüger und Adam (2014)¹⁸ eine z.T. erhebliche Anreicherung von Schwermetallen aufweisen. Die Untersuchungen zeigten, dass von den 19.000 Mg Phosphor, die derzeit in Deutschland grundsätzlich zur Rückgewinnung aus Monoverbrennungaschen zur Verfügung stehen, 12.000 Mg nicht direkt zur Verwertung als Düngemittel genutzt werden können, da sie die Grenzwerte der DüMV nicht einhalten. Eine zielgerichtete thermochemische Behandlung der Aschen kann jedoch eine signifikante Entfrachtung bei Cadmium, Kupfer, Blei und Zink bewirken. Gehalte an Arsen, Aluminium, Chrom, Eisen und Nickel werden dagegen nur geringfügig reduziert (Arnold et al. 2014)¹⁹. Beispielsweise kann durch Verlängerung der Verweilzeit in der Verbrennung, Temperaturerhöhung (soweit möglich) oder durch Umwandlung der chemischen Bindungsmechanismen, z.B. in leicht flüchtige Chloride, eine Schadstoffanreicherung erfolgen und die Mineralisierung der Klärschlammasche

¹⁸ Krüger O. und Adam C. (2014): UFOPLAN-Projekt: "Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik"; UBA-Texte 49/ 2014

¹⁹ Arnold U., Trimborn M. und Goldbach H. (2014): Effizienter Einsatz von Recycling-Phosphat in der Landwirtschaft: Pflanzenverfügbarkeit, Schadstoffe und Bewirtschaftungsmaßnahmen, INRES, Universität Bonn

verbessert werden. Nach Krüger und Adam (2014) ließe sich die Qualität der Aschen auch durch eine Trennung der bei der Verbrennung anfallenden Asche- ströme verbessern. Dadurch ließen sich die Anforderungen der Düngemittelver- ordnung bzgl. der Schwermetalle weitestgehend erfüllen.

Gehalt an Organika

- (4) Organische Schadstoffe sind überwiegend in nasschemisch gewonnenen Rezyklaten untersucht und nachgewiesen worden. Orientierende Untersuchungen der Universität Tübingen (2014)²⁰ zeigen, dass bei der Gewinnung von MAP aus Klärschlamm die organischen Schadstoffe größtenteils nicht mit gefällt werden, sondern im phosphorabgereicherten Klärschlamm verbleiben. Weitere Forschungsergebnisse (u.a. BMUB/UBA - UFOPLAN-Vorhaben „Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz“) stehen noch aus.
- (5) Klärschlammaschen aus der Wirbelschichtmonoverbrennung sind in der Regel sehr gut ausgebrannt und weisen nur einen geringen Restkohlenstoffanteil auf. Die Werte für den Glühverlust und den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) liegen im Mittel unter 1 %.
- (6) Andere Klärschlamm-Monoverbrennungsaschen, wie beispielsweise Rost- bzw. Etagenfeuerungsaschen oder Wirbelschichtvergasungsaschen weisen z.T. Werte für den Glühverlust und TOC von über 10 % auf. Das deutet darauf hin, dass die Aschen noch erhebliche Anteile von organischen Kohlenstoffverbindungen sowie vermutlich Ruß enthalten. Die teilweise zur Verbrennung mittlerer bis kleiner Klärschlammmengen verwendeten Pyrobuster erzeugen Verbrennungsaschen mit Werten für den Glühverlust und TOC, die im Bereich der Wirbelschichtver- brennungsaschen liegen²¹.
- (7) Da die nachgewiesenen Gehalte an organischen Schadstoffen in Klärschlamm- Monoverbrennungsaschen i.d.R. deutlich unterhalb der Durchschnittswerte von

²⁰ Abschlussbericht zum Projekt „Schadstoff-Screening in Klärschlamm“ (2014), Universität Tübingen

²¹ Krüger O. und Adam C. (2014), UFOPLAN-Projekt: „Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik“; UBA-Texte 49/ 2014

Klärschlamm liegen, sind diese aus Sicht des vorsorgenden Boden- und Verbraucherschutzes insgesamt als weniger kritisch einzustufen.

- (8) Für die Bewertung der Gehalte an organischen Schadstoffen gibt es derzeit für Dioxine- Furane (PCDD/-F)/ dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB) und Perfluorierte Tenside (PFT) Anforderungen aus dem Düngerecht (DüMV, Anlage 2, Tabelle 1.4). Analog können für Benzo(a)pyren (B(a)P) die Werte der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) sowie organische Halogenverbindungen (AOX) und Polychlorierte Biphenyle aus der Klärschlammverordnung herangezogen werden. Diese Leitparameter sind gegenwärtig geeignet, um die Schadstoffqualität und Eigenschaften der Aschen sowie der Phosphate aus Fällungsprozessen (Waida und Weinfurter, 2011)²² zu beurteilen.

Hygieneparameter

- (9) Ausgehend von der Tatsache, dass fast alle Klärschlämme, die keiner hygienischen Behandlung unterzogen wurden, u.a. Salmonellen enthalten können, gelangen diese Infektionserreger vermutlich auch in die Prozesskette bei nasschemischem Aufschluss des Klärschlammes. Demgegenüber sind Hygieneparameter bei Klärschlammaschen nach aktuellem Stand der Kenntnis ohne Bedeutung.

5.2.2 Düngeeigenschaften

- (1) Auf der Grundlage von wissenschaftlichen Untersuchungen sind in der DüMV Düngemitteltypen zugelassen. Aufgrund der Vielfalt von Phosphor-Ausgangsstoffen aus sekundären Quellen erscheint ein einheitliches Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Phosphor-Verfügbarkeit für eine Gleichstellung aller phosphorhaltigen Düngemittel erforderlich. Hierfür sollten standardisierte Prüfverfahren entwickelt werden, mit denen die Stoffe ihre Eignung als Düngemittel nachweisen. In den Prüfverfahren sollten u.a. folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Zusammenwirken von Phosphor und anderen Nährstoffen,
- Einfluss des Bodennährstoffgehaltes,

²² Waida, C. und Weinfurter, K.-H., (2011): Untersuchung der in der Förderinitiative erzeugten Produkte. Im Abschlussbericht: Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland (PhoBe), Aachen, Nov. 2011, S. 97-162

- Einfluss des Boden-pH-Wertes,
 - Einfluss der Pflanzenart auf die spezifische Phosphor-Aufnahme und
 - Einfluss diverser Phosphor-Bindungsformen, die die Pflanze unterschiedlich verstoffwechselt.
- (2) Weiterhin sollten alle Düngemittel für das Inverkehrbringen die Phosphor-Gehalte mit gleichen Extraktionsverfahren (Löslichkeiten) ausweisen. Hierbei sollten die Düngemittel mit drei Extraktionsstufen (entsprechend drei Löslichkeiten) gekennzeichnet werden. Vorgeschlagen werden hierfür:
- Gesamtgehalt (mineralsäurelöslich),
 - Löslichkeit in schwacher Säure (Neutral-Ammoncitrat) und
 - Löslichkeit in Wasser.
- (3) Eine verpflichtende Angabe gleicher Löslichkeiten bei allen phosphorhaltigen Düngemitteln ermöglicht einen besseren Vergleich der Düngemittel untereinander und trägt zu einer sachgerechteren Anwendung bei.

5.3 Empfehlungen

- (1) Aus Sicht des Gewässer-, Boden- und des Verbraucherschutzes muss sichergestellt werden, dass nur wirksame und schadstoffarme Düngemittel eingesetzt werden.
- (2) Für die Zulassung von Ausgangsstoffen zur Düngemittelherstellung aus sekundären phosphorhaltigen Stoffen wird vorgeschlagen, dass die folgenden Kriterien im Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen und im Austausch zwischen den zuständigen Referenten der Abfallwirtschaftsbehörden und den Acker- und Pflanzenbaureferenten diskutiert und weiterentwickelt werden.

Vorschläge für den Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen:

- Entwicklung normierter Testverfahren zum Nachweis der Pflanzenverfügbarkeit des in phosphorhaltigen Stoffen oder in Recyclingdüngern enthaltenen Phosphors und
- Anforderungen an eine Düngungseffizienz als Maß für die durch die Pflanze aufgenommene Phosphor-Menge.

Vorschläge für den Regelungsbereich der DüMV oder der AbfKlärV:

- grundsätzlicher Ausschluss von Filterstäuben und -schlämmen als Ausgangsstoff,
 - Begrenzung des Organikgehalts in Verbrennungsaschen (z.B. Maximalgehalt < 1 % TOC) und in Sekundärphosphaten zur Verringerung der organischen Schadstoffe,
 - Einführung der Kennzeichnungspflicht für das Löslichkeitsverhalten der phosphorhaltigen Stoffe bzw. Recyclingdüngemittel,
 - Anpassung des Untersuchungsumfangs für organische und anorganische Schadstoffe an den Stand des Wissens,
 - kontinuierliche Fortschreibung von Schadstoff- und Hygieneparametern für Klärschlammaschen und Sekundärphosphate nach dem aktuellen Wissensstand,
 - Festlegung von Mindestanforderungen an die sekundären phosphorhaltigen Stoffen als Ausgangsstoff für die Phosphor-Rückgewinnung und
 - Erarbeitung und Etablierung des seuchenhygienisch-mikrobiologischen Untersuchungsumfangs für nasschemisch behandelte Klärschlämme.
- (3) Solange das Ende der Abfalleigenschaft (Produktstatus) nicht abschließend geregelt ist, sollte die Anwendung von phosphorhaltigen Stoffen im Rahmen einer freiwilligen Qualitätssicherung begleitet werden. Diese freiwillige Qualitätssicherung sollte später zu einem verpflichtenden Qualitätssicherungssystem ausgebaut werden.
- (4) Es wird empfohlen, den Untersuchungsumfang für organische Schadstoffe parallel auch für nasschemische Verfahren zum Stand des Wissens weiterzuentwickeln.

6 Maßnahmen

6.1 Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Phosphor-Strategie

- (1) Ziel einer nachhaltigen Strategie ist es, die natürlichen Phosphor-Ressourcen in umfassender Weise zu schonen, indem Mineraldünger aus Rohphosphaten durch Sekundärphosphate ersetzt werden, die aus Klärschlamm, Gülle, tierischen Nebenprodukten sowie anderen Abfällen und Materialien gewonnen werden. Eine derartige Strategie sollte zugleich Regelungen beinhalten, die den Phosphorverbrauch in Landwirtschaft und Industrie auf das notwendige Maß beschränken und den Schadstoffeintrag in Böden sowie Gewässer minimieren.
- (2) Zur Ressourcenschonung trägt bei, dass Verfahren zur Erzeugung von Sekundärphosphor so gestaltet werden, dass sie einen möglichst hohen Anteil des im Ausgangsmaterial enthaltenen Phosphors gewinnen. Diese Verfahren sollten ebenso einen möglichst niedrigen Verbrauch an Betriebsmitteln und Energie aufweisen. Soweit Sekundärphosphor aus Abfällen gewonnen wird, ist die Pflicht zu einer hochwertigen Verwertung (Recycling) im Sinne der Abfallhierarchie zu beachten. Ziel ist die Gewinnung pflanzenverfügbarer Phosphor-Rezyklate.
- (3) Gegenwärtig erfolgt die Entsorgung der nicht unmittelbar zu Düngezwecken genutzten Klärschlämme überwiegend auf dem Wege der Mitverbrennung oder der Monoverbrennung. Die bei der Monoverbrennung anfallenden Aschen werden bislang meist ohne Nutzung der Phosphor-Ressourcen insbesondere durch Bergversatz, Ablagerung auf Deponien oder Verwertung im Straßenbau entsorgt. Durch diese Entsorgungswege wird eine spätere Nutzung der Aschen als Rohstoff für die Herstellung von Recyclingdüngern oder von anderen Produkten unmöglich gemacht. Vergleichbares gilt für die Entsorgung von Rückständen aus der Verbrennung von tierischen Nebenprodukten.
- (4) Eingriffe zur Förderung des Absatzes von Sekundärphosphor sind auf dem einheitlichen europäischen Binnenmarkt entsprechend den in der EU geltenden Regeln des freien Warenverkehrs vorrangig durch Regelungen auf EU-Ebene festzulegen. Nationalen Maßnahmen sind dabei enge Grenzen gesetzt.
- (5) Die Vorgaben des EU-Binnenmarkts lassen auch nationale Maßnahmen, die den Rohstoffeinsatz der phosphorverarbeitenden Industrie regulieren, nicht zu. Nationale Beiträge für eine Phosphor-Recyclingstrategie bleiben daher auf abfallwirtschaftliche Maßnahmen beschränkt, mit denen sichergestellt wird, dass phos-

phorhaltige Abfälle für eine weitere Nutzung, ggf. erst in Zukunft, verfügbar bleiben. Dies kann durch die EU-Mitgliedstaaten auch verpflichtend ausgestaltet werden²³.

- (6) Entsprechend der „Konsultativen Mitteilung der EU-Kommission zur nachhaltigen Verwendung von Phosphor“ vom 8. Juli 2013 sind auf EU-Ebene allerdings keine Rechtsakte geplant, mit denen verbindlich innerhalb festgelegter Fristen ein zu erreichender Anteil von phosphorhaltigen Produkten auf der Grundlage erneuerbarer Quellen an der Menge insgesamt in Verkehr gebrachten phosphorhaltigen Produkte festgelegt wird. Ebenso wenig sind andere Maßnahmen geplant, von denen vergleichbare Effekte für das Phosphor-Recycling erwartet werden können. Allerdings wird die Frage der mit dem Einsatz von mineralischen Phosphor-Düngern zusammenhängenden Bodenkontamination durch Cadmium und Uran in dem Papier der EU-Kommission thematisiert..
- (7) Inhaltlich – aber auch auf abfallrechtlicher Grundlage – kann dies im Rahmen der Produktverantwortung erfolgen. Schließlich umfasst diese gemäß § 23 Abs. 2 Nr. 2 KrWG auch den „vorrangigen Einsatz von verwertbaren Abfällen oder sekundären Rohstoffen bei der Herstellung von Erzeugnissen.“ Die Wahrnehmung der Produktverantwortung durch die Düngemittelproduzenten auf diesem Wege ist allerdings sehr wahrscheinlich mit relevanten Kostenbelastungen verbunden, da die Marktpreise für mineralische Phosphor-Dünger gegenwärtig deutlich unter den für die Produktion von Phosphor-Recyclingdüngern aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlamm-Monoverbrennungsaschen notwendigen Kosten liegen. Ausgehend von der Entwicklung der letzten zehn Jahre ist zu erwarten, dass dies ohne Einbeziehung der externen Umweltkosten in den Marktpreis für Phosphor-Dünger aus Rohphosphaten kurzfristig und möglicherweise auch mittelfristig so bleiben wird. Von einer marktbestimmten Bewegung in Richtung einer Ausschöpfung der Phosphor-Recyclingpotenziale wird deshalb gegenwärtig nicht ausgegangen.
- (8) Eine Ausgestaltung der Produktverantwortung über eine Abnahmeverpflichtung der Düngemittelindustrie für sekundär phosphorhaltige Stoffe (wie Klärschlamm-Monoverbrennungsaschen und andere Phosphor-Zwischenprodukte) ist zwar grundsätzlich verfassungs- und unionsrechtskonform möglich. Dies könnte aber aus gesamtwirtschaftlichen Gründen vor dem Hintergrund des gemeinsamen

²³ KoMa: Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz, FKZ 3713 26 301

Marktes auf nicht überwindbare Schwierigkeiten bei der Realisierung stoßen. Aus diesem Grunde sollte der in den Niederlanden in Übereinstimmung mit der EU-Strategie (s. EU-COM(2013) 517 final vom 8. Juli 2013) bereits verfolgte Weg freiwilliger Vereinbarungen zwischen Staat und Düngemittelindustrie gegangen werden, bei der sich letztere verpflichtet, zum Teil ihre Rohstoffbasis schrittweise von Phosphatgestein auf Sekundärrohstoffe umzustellen. Diese Vereinbarung sollte eine Selbstverpflichtung der Industrie mit einem zeitlichen Fahrplan enthalten, der steigende Einsatzmengen von sekundär phosphorhaltigen Stoffen (wie Klärschlamm-Monoverbrennungssaschen und anderen Phosphor-Zwischenprodukten) vorsieht. Dabei wäre zu prüfen, ob der Staat den Absatz der erzeugten Sekundärrohstoffdünger durch Subventionen und/oder durch Zulassung des Einsatzes dieser Düngestoffe im ökologischen Landbau fördern kann.

- (9) Die Analyse der technischen Wege der Phosphor-Rückgewinnung von Klärschlamm zeigt, dass die größten Effekte zur Sicherung des darin enthaltenen Phosphors durch Klärschlamm-Monoverbrennung mit nachfolgender Phosphor-Rückgewinnung erzielt werden können. Die konsequente Umsetzung dieses Weges hat zur Folge, dass neue Behandlungskapazitäten aufgebaut werden müssen, da die vorhandenen Monoverbrennungskapazitäten nicht ausreichen. Neben der Monoverbrennung mit nachfolgender Phosphor-Rückgewinnung gibt es auch andere Möglichkeiten der Rückgewinnung, die bislang jedoch nicht an die Rückgewinnungspotenziale der Klärschlammaschen heranreichen. Entsprechende Verfahren können mit weniger Material-Energie und Kosteneinsatz realisiert werden. Die LAGA AG spricht sich unter Abwägung aller Aspekte dafür aus, dass den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten angepasste Lösungen gefunden werden müssen und hält Festlegungen zur Vorgehensweise nicht für sinnvoll. Rechtliche Vorgaben sollten ein Rückgewinnungsziel setzen und einen Wettstreit der technischen Lösungen ermöglichen.
- (10) Analoges gilt auch für weitere phosphorhaltige Abfälle und Produkte, insbesondere Tiermehl und Überschusssgülle. Eine Gütesicherung und stoffliche Qualitätsanforderungen sind auch für phosphorhaltige Rezyklate aus diesen Quellen sinnvoll.

6.2 Vorschlag von Maßnahmen einer Phosphorstrategie

6.2.1 Maßnahmen zum Aufbau einer Infrastruktur von Phosphor-Rückgewinnungsanlagen

- (1) Die LAGA AG Phosphor vertritt den Standpunkt, dass der Einstieg in die großtechnische Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung mit den derzeit verfügbaren Verfahren möglich und sinnvoll ist.
- (2) Aus Sicht der LAGA AG Phosphor sollte zum jetzigen Zeitpunkt mit dem Aufbau einer Infrastruktur von Phosphor-Rückgewinnungsanlagen begonnen werden.
- (3) Um die Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor voranzubringen und Planungssicherheit für die Anlagenbetreiber zu erreichen, sind aus Sicht der LAGA AG Phosphor gesetzliche Regelungen zur Phosphor-Rückgewinnung notwendig, wie sie in der aktuell geplanten Novelle der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vorgesehen sind.
- (4) Die LAGA AG Phosphor kommt zum Ergebnis, dass die jeweilige Auswahl des Verfahrens zur Phosphor-Rückgewinnung hauptsächlich von den Randbedingungen vor Ort abhängen. Aus diesem Grunde sollten keine Vorgaben zur Wahl des jeweiligen Verfahrens gemacht werden.
- (5) Vielfach wird eine wirtschaftlich tragbare Phosphor-Rückgewinnung den Einsatz von Großanlagen erforderlich machen, die Klärschlämme und Aschen zentral behandeln und das gewonnene Sekundärphosphor marktgängig aufbereiten. Für die Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung sollte als erster Schritt vorrangig mit Maßnahmen bei Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 (größer 10.000 bzw. 100.000 Einwohnerwerte) und Monoverbrennungsanlagen begonnen werden.
- (6) Als Übergangszeitraum für die Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung für Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 sowie Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen hält die LAGA AG Phosphor einen Zeitraum von weniger als zehn Jahren nach in Kraft treten der entsprechenden Regelungen für ausreichend. Industrieanlagen, die kommunale Abwässer oder kommunale Klärschlämme behandeln, sind grundsätzlich einzubeziehen. Bei Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 (kleiner 10.001 Einwohnerwerte) sollte zunächst im Hinblick auf die Umsetzungserfahrungen überprüft werden, wann Maßgaben zur Phosphor-Rückgewinnung auch unter ökologischen und ökonomischen Ge-

sichtspunkten erforderlich sind. Denkbar ist, diese Klärschlämme in zentralen Phosphor-Rückgewinnungsanlagen (z. B. am Standort der Mitverbrennung oder Monoverbrennung) zu behandeln. Unabhängig von der Größenklasse der Kläranlage hält die LAGA AG Phosphor die zeitnahe Vorlage eines Konzeptes zur Phosphor-Rückgewinnung durch die Anlagenbetreiber für notwendig. Dies sollte rechtlich verankert sowie regional und überregional koordiniert werden.

- (7) Eine Mitverbrennung von Klärschlamm und anderen Materialien mit relevanten Phosphorgehalten ist zu untersagen, wenn der Anteil an Phosphor den Wert von 20 g P/kg TS überschreitet. Zu einem späteren Zeitpunkt sollte evaluiert werden, ob diese Grenze herabgesetzt werden kann. Bei der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken sind die klimapolitischen Ziele für Deutschland zu beachten („Decarbonisierung“ der Stromerzeugung bis spätestens 2050)²⁴.
- (8) Phosphor-Rückgewinnungsverfahren sollten so ausgestaltet werden, dass mindestens 50 % des im Kläranlagenzulauf enthaltenen Phosphors rückgewonnen werden kann. Zu einem späteren Zeitpunkt sollte evaluiert werden, ob diese Grenze hinaufgesetzt werden kann.
- (9) Jede Maßgabe zur Phosphor-Rückgewinnung im Stoffstrom Klärschlamm muss zur Folge haben, dass die dann anfallenden phosphorabgereicherten Schlämme einer geeigneten Entsorgung zugeführt werden. In der Regel kommt hier nur die Mitverbrennung in Frage. Im Zuge der Umsetzung der Phosphorstrategie sind die hierfür geeigneten und verfügbaren Mitverbrennungskapazitäten zu evaluieren.
- (10) Baldmöglichst sollten weitere Stoffströme wie tierische Nebenprodukte zur Phosphor-Rückgewinnung mit einbezogen werden.
- (11) Der Bund wird gebeten, den Entwurf zur Novellierung der Klärschlammverordnung, die auch Regelungen zur Phosphor-Rückgewinnung enthalten wird, zeitnah den Abstimmungen zuzuleiten.

²⁴ Entsprechend Ziffer 1, letzter Satz des Beschlusses der 83. UMK am 24.10. 2014 , zu TOP 42 (Klärschlammverwertung)

6.2.2 Sicherung von Phosphor-Reserven aus gelagerten Klärschlammaschen

- (1) Die Phosphor-Rückgewinnung sollte aus wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Gründen am Ort des Phosphoranfalls in Kläranlagen und Verbrennungsanlagen erfolgen. Die Langzeitlagerung von Klärschlammaschen und der Deponierückbau sind als nachrangig zu betrachten.
- (2) Solange keine direkte Rückgewinnung des Phosphors aus Aschen der Klärschlamm-Monoverbrennung möglich ist, sollten diese Aschen aus der Monoverbrennung für eine künftige Nutzung in Langzeitlagern zwischengelagert werden. Die in § 23 Abs. 6 der Deponieverordnung normierte Befristung der Ausnahme von der Nachweispflicht bei der Lagerung dieser Aschen, die zurzeit bis 30. Juni 2023 reicht, sollte verlängert werden. Um die Lagerung der Aschen zeitlich zu beschränken, sollte im Zusammenwirken mit der Industrie ermittelt werden, welche Zeiträume für eine Realisierung der Phosphor-Rückgewinnung aus Aschen erforderlich sind. Die Verlängerung sollte einen Zeitraum von 10 Jahren nicht überschreiten.
- (3) Zur Förderung des Phosphor-Recyclings hält die LAGA AG Phosphor eine Unterbindung der Beseitigung von Monoverbrennungsaschen auf Deponien für unabdingbar. Hierzu ist eine Anpassung der Deponieverordnung erforderlich.
- (4) Die Verwertung phosphorhaltiger Verbrennungsaschen in Deponiebau, Bergversatz und Straßenbau ist baldmöglichst zu untersagen.
- (5) An die Qualität der Klärschlamm-Monoverbrennungsaschen sollten Anforderungen definiert und festgelegt werden, die für eine Phosphor-Rückgewinnung aus der Asche erforderlich sind.

6.2.3 Maßnahmen zur Produktion von hochwertigen Sekundärphosphaten, insbesondere Düngemitteln

- (1) Für die Zulassung von Ausgangsstoffen zur Düngemittelherstellung aus sekundären phosphorhaltigen Stoffen sollten normierte Testverfahren zum Nachweis der Pflanzenverfügbarkeit sowie der Düngungseffizienz entwickelt werden.
- (2) Klärschlamm-Monoverbrennungsaschen und Sekundärphosphate aus sonstigen thermischen Prozessen sollten aus Vorsorgegründen und zur Verbesserung der

Pflanzenverfügbarkeit vor der flächenbezogenen Verwertung generell aufbereitet und von Schadstoffen befreit werden.

6.2.4 Maßnahmen zum Absatz des Phosphor-Rezyklats

- (1) Zur Förderung des Absatzes werden freiwillige Selbstverpflichtungen, ggf. auch verpflichtende Regelungen zur Nutzung von Sekundärphosphor für erforderlich angesehen.
- (2) Die LAGA AG Phosphor spricht sich für eine Selbstverpflichtung der Düngemittelindustrie zur Abnahme von Sekundärphosphaten aus und bittet den Bund, entsprechende Verhandlungen aufzunehmen.
- (3) Ein Direktabsatz von rückgewonnenem Phosphor unter Einhaltung entsprechender Qualitätsanforderungen muss möglich sein. Die LAGA AG Phosphor schlägt vor, dass sich ein Expertengremium mit den Anforderungen und mit den Verfahren unter Einbeziehung des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen befasst.
- (4) Der Bund wird gebeten, sich bei der Europäischen Kommission für eine europarechtliche Regelung zur Abnahmeverpflichtung von Phosphor-Rezyklaten einzusetzen.

6.2.5 Maßnahmen im Forschungsbereich

- (1) Es sollten zusätzliche Einsatzbereiche für Sekundärphosphate identifiziert und auf ihre Eignung geprüft werden.
- (2) Für die Nutzung von Aschen aus der Monoverbrennung von tierischen Nebenprodukten sind im Rahmen eines Forschungsprogramms tragfähige Konzepte zu entwickeln. Tierische Nebenprodukte gemäß der Kategorie 1 der Verordnung (EG) Nr.1069/2009 sollten in die Betrachtungen einbezogen werden. Die in Frage kommenden Phosphor-Rückgewinnungsverfahren sollten zunächst in Pilotanlagen auf ihre Tauglichkeit geprüft werden.

6.2.6 Weitere Maßnahmen

- (1) Aus Gründen des Boden- und Grundwasserschutzes muss bei Wirtschaftsdüngern ein Ausgleich regionaler Unter- und Überversorgung erreicht werden. Im Rahmen eines flächenübergreifenden Nährstoffmanagements, wie es bereits in einigen Nachbarländern erfolgreich umgesetzt wird, sind insbesondere Wirtschaftsdünger und Gärreste in Regionen mit einem Nährstoffüberangebot so zu behandeln, dass die Nährstoffe in transport- und lagerfähiger Form in Regionen mit Nährstoffbedarf gebracht werden können. Dabei kommt der Gewinnung von Sekundärphosphor eine wichtige Rolle zu. Hiermit kann aus pflanzenphysiologischer Sicht ein für die Düngung günstigeres Verhältnis von Phosphor zu Stickstoff erreicht werden.
- (2) Vermischungen von Klärschlämmen und anderen Materialien mit relevanten Phosphorgehalten mit anderen Abfällen und sonstigen Stoffen sind vor jeder weiteren Behandlung zu unterbinden, wenn dadurch eine Absenkung des Phosphorgehaltes eintritt, eine Erhöhung der Schadstofffracht erfolgt oder die Phosphorrückgewinnung erschwert wird (Verdünnungsverbot).
- (3) Das Stoffstrommanagement von Klärschlämmen aus unterschiedlichen Quellen und ihre Vermischung mit dem Ziel der thermischen Behandlung sind ausgehend von den für diese Stoffe jeweils geeigneten Phosphorrückgewinnungstechnologien zu gestalten. Hierfür sind geeignete Regelungen zu entwickeln.
- (4) Im Rahmen der Anforderungen an die Phosphorrückgewinnung sollte zunächst ein Verdünnungsverbot für Materialien mit Phosphorgehalten von über 2 % ausgesprochen werden. Es ist zu überprüfen, ob dieser Wert zu einem späteren Zeitpunkt herabgesetzt werden kann.
- (5) Der Bund wird gebeten, sich dafür einzusetzen, dass der Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft und der Industrie durch Optimierungsmaßnahmen weiter verringert wird.
- (6) Eine Gütesicherung (definierte Prozessbedingungen, Restorganik, pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt, Schadstoffobergrenzen, Zertifikate u.a.) für Sekundärphosphor ist einzuführen, um gleichbleibende Qualitäten zu garantieren.

6.3 Ausblick

- (1) Bei Beibehaltung der gegenwärtigen Düngepraxis in Deutschland kann theoretisch ein Marktanteil von Phosphor-Recyclingdüngern am Gesamtmarkt der mineralischen Phosphordüngemittel von 40% erreicht werden, wenn die Phosphor-Rückgewinnungspotenziale aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche ausgeschöpft werden. Werden zusätzlich noch Tiermehle und Überschussgülle zur Phosphor-Rückgewinnung eingesetzt, sind noch höhere Anteile möglich.
- (2) Die in diesem Bericht vorgeschlagene Phosphorstrategie sieht eine schrittweise Erschließung dieses Potenzials vor. Den konkreten Vorschlägen für erste Maßnahmen auf diesem Weg müssen sich deshalb ausgehend von den dabei erzielten Erfolgen weitere Schritte sowohl national als auch auf der Ebene der Europäischen Union anschließen. Als später zu realisierende nationale Möglichkeiten sind die verstärkte Einbeziehung noch ungenutzter phosphorhaltiger Abfall- und Stoffströme und die Absenkung des Grenzwertes unter 20 g P/kg TS (ab dem voraussichtlich eine Phosphor-Rückgewinnungspflicht für Klärschlämme gelten wird) zu prüfen.
- (3) Von ebenso großer Bedeutung als weitere nationale Maßnahmen ist die Erweiterung der Phosphorstrategie auf die Ebene der Europäischen Union. Erst die Umsetzung verbindlicher Maßnahmen auf dem gemeinsamen Markt für die Herstellung von Phosphor-Produkten und insbesondere von Phosphor-Mineraldüngern kann die Potenziale des Schutzes der Ressource Phosphor und der Vermeidung der mit dem Abbau des Phosphaterzes verbundenen Umweltbelastungen in größerem Umfang erschließen. Deshalb muss es das Ziel sein, auch auf Unions-ebene wirksamere Maßnahmen zur Phosphor-Rückgewinnung zu konzipieren, zu beschließen und umzusetzen.
- (4) Motivator einer Weiterentwicklung der EU-Phosphorstrategie ist ein Erfolg der konzipierten ersten Schritte der nationalen deutschen Phosphorstrategie. Die Umsetzung einer nationalen Strategie hätte Vorbildcharakter auf europäischer und internationaler Ebene. Angesichts der gegenwärtig noch hohen mit der Phosphor-Rückgewinnung verbundenen Kosten ist deshalb bei der Umsetzung der ersten Phase der Phosphorstrategie zu gewährleisten, dass möglichst rasch die vorhandenen Potenziale zur Effizienzsteigerung der eingesetzten Technologien ausgeschöpft werden.

Anhang 1: Verfahrensauswahl anhand der Anfallstelle des Stoffstroms

Ort der P-Rückgewinnung	Randbedingungen auf der Anlage		Randbedingungen der Verfahren		Produkt	
	techn. Voraussetzungen	Anlagengröße (bezogen auf EW oder Klärschlammmenge)	Verfahrensprozess (Grundlage des Verfahrens)	Rückgewinnungs-Potential (bezogen auf KA Zulauf/ auf Klärschlamm TM)	Produktart	weitere Verwendung (Direkteinsatz, Aufbereitung nötig u.ä.)
Abwasser	keine gezielte P-Elimination vorab, Flockungsreaktor und Sedimentationsbecken nach dem NKB Ausbaugröße > 50.000 EW		Nachfällung	42 % auf Zulauf	Aluminium-Magnesiumphosphat	
	Dosierstation nach der Vorklärung bzw. im Zulauf zum BB	Ausbaugröße > 10.000 EW	alkalische Fällung mit Natriumaluminat (ALTON)	80-90 %	Aluminiumphosphat	Direkteinsatz Landwirtschaft
	separater Reaktor nach der biologischen Stufe		Kristallisation	max. 37 % auf Zulauf	Calciumphosphat	Direkteinsatz Landwirtschaft
	Ionenaustauscherstufe nach der biologischen Stufe		Ionenaustausch und Kristallisation		MAP, Calciumphosphat, Magnesiumphosphat	
	Adsorptionsstufe nach der Biologie		Adsorption/Desorption und Fällung		Calciumphosphat	
	Magnetseparation nach der biologischen Stufe		Fällung		Eisen- oder Aluminiumphosphat	
	Nebenstrom bei integrierter P-Rückgewinnung		biologisch mit Rücklösung und Fällung	30 % auf Zulauf	Calciumphosphat	Phosphorindustrie
	Festbett-, Rühr- oder Schwebebettreaktor nach dem NKB		Kristallisation	40 % auf Zulauf	Calciumphosphat an Calcium-Silikat-Hydrat	Landwirtschaft, Phosphorindustrie
	Filtrationsanlage, Ionenaustauscherstufe, Elektrodionisationsstufe	Ausbaugröße > 20.000 EW	Fällung	40 % auf Zulauf; 90 % des Phosphatphosphors im Prozesswasser	MAP	Direkteinsatz Landwirtschaft
	zusätzliche Strip- und Fällreaktoren		Ionenaustausch und Elektrodialyse		Phosphorsäure	
Klärschlamm (Roh-, Faul-)	biologische Phosphatelimination; zusätzliche Reaktoren zur Fällung		Stripplung und Fällung		Struvit	
	zusätzliche Reaktoren, Filter, Absatzbecken und Fällungsreaktor		Fällung	max. 90 % auf Zulauf	MAP	Landwirtschaft
Klärschlammmasche nach der Monoverbrennung Phosphatgehalt in der Asche 3,7-10,1 % P (Mittel 7,2 % P)	zusätzliche Extraktions- und Fällungsreaktoren		nasschemischer Aufschluss mit Salz- oder Schwefelsäure und anschließende Fällung	50 % auf Zulauf	MAP	Landwirtschaft
			Extraktion und Fällung		Calciumphosphat	
			nasschemischer Aufschluss	ca. 90 % [1]	Calciumphosphat, Magnesiumphosphat auch Eisen- oder Aluminiumphosphat [1]	Landwirtschaft [1]
Nahrungsmittelproduktion			thermochemischer Aufschluss	ca. 90 % [1]	konfektioniertes Düngemittel als Granulat [1]	Landwirtschaft Phosphorindustrie [1]
			metallurgisch	ca. 90 % [1]	Thomasphosphat [1]	Landwirtschaft Düngemittelindustrie [1]
Tiermehl			Fällung		Calciumphosphat, Magnesiumphosphat	
			metallurgisch ggf. thermochemisch			
Wirtschaftsdünger (Gülle, Jauche, Gärreste)			nasschemischer Aufschluss		Calciumphosphat, Magnesiumphosphat	Landwirtschaft

Anhang 2: Verfahrensauswahl anhand des Rückgewinnungsverfahrens

Verfahrensprozess	Ort der Rückgewinnung (auf der KA, nach Monoverbrennung)	techn. Voraussetzungen (z.B. Art der Fällung)	Eigenschaften (Vor- u. Nachteile)	Verfahren (Verfahrensbeispiele)	Rückgewinnungsquote (des Verfahrensprozesses)	Reife des Verfahrens (Stand der Umsetzung der Verfahrensbeispiele)	Chemikalien Einsatz
Fällung	Schlammwasser	Strippping mit Luft und anschließende Fällung		NuResys / Belgien			
Fällung	Abwasser nach der Vorklärlung	Fällung mit alkalisch stabilisierter Tonerde (ALTON) im Verhältnis $Al_2O_3 : Na_2O = 1:1,2$	keine Aufsalzung des Abwassers, Verbesserung der Wirkung von FHM auf Acrylatbasis	EP 0383 156			Tonerden
Ionenaustausch/ Elektrodialyse	Filtrat aus der Klärschlammwässerung		kein Chemikalieneinsatz	selektiver Ionenaustausch (PHOSIEDI-Verfahren)		Technikum, Großversuch KA Rastatt [4]	ohne
Kristallisation	Faulschlammwasser			Kristallisation an Calcium-Silikat-Hydrat-Phasen (P-Roc-Verfahren/KT); Strippping und Fällung als MAP in Verbindung mit Bio-P-Fällung (Air-Prex) [4]	80 % Labor 60 % halbertechnisch	Laborversuche, Technikum	
Extraktion	Klärschlamm	Extraktion mit CO ₂ und anschließender Fällung	CO ₂ und Kalkmilch	Budenheimer Kohlensäure-Verfahren [4]	60%	Technikum	CO ₂ , Kalkmilch
massechemischer Aufschluss	Faulschlamm nach dem Faulturn; Asche nach der Monoverbrennung	Aufschluss mit Säuren oder Laugen, Extraktion, Feststofftrennung	Direkteinsatz in Landwirtschaft möglich, gute Pflanzenverfügbarkeit, schwermetallarm, Behandlung von Restwässern (Neutralisation) erforderlich [1]	Aufschluss mit Säuren oder Laugen (HCl, H ₂ SO ₄ , H ₃ PO ₄ oder NaOH), Feststofftrennung, Prozesswasserbehandlung mit dem Ziel einer Trennung Metalle/Phosphor (Fällung, Kristallisation, Flüssig-flüssig-Extraktion), Produktfällung mit Calcium/Magnesium Behälter für Aufschluss und Fällung, Mixer-Settler für Extraktion, Aggregate zur Feststofftrennung (z.B. Pasch-Verfahren/RWTH Aachen, LEACH-Phos/BSH in Bern (CH), SESAL-Phos/IWAR Tu Da, SEPHOS, P-bac/NORE) [1, 2, 3] RecöPhos Consult Deutschland [4], TetraPhos	ca. 90% [1]	Technikum, Labor [1], Großversuch KA Offenburg; [4] Produktion Sachsen-Anhalt Lützen KA Bazenheim/CH [4]	Mineralsäuren, Kalkmilch
thermochemischer Aufschluss	Asche nach der Monoverbrennung	Drehrohrofen	gute Pflanzenverfügbarkeit, schwermetallarm, Pellets oder Weiterverarbeitung zu Mehrlstoffdünger; hohe Cl-Konzentration kann Material in Rauchgasreinigung beeinträchtigen [1]	a) Zugabe von Ca- bzw. Mg-Chloriden, T > 1.000 °C im Drehrohrofen, Überführung der Phosphate in verfügbare Form (Ca- bzw. Mg-Phosphate), Überführung der Metalle als Metallchloride in die Gasphase und Abtrennung über Rauchgasreinigung, b) Behandlung Asche, T > 1.300 °C, Zugabe Koks, Sand, Abtrennung Phosphor über Gasphase als P ₄ (z.B. Rhenania, AshDec/AsiDec Umwelt AG in Leoben AT, RETERRA/Remondis, Recophos/Montanuniversität in Leoben AT) [1,2,3]	ca. 90% [1]	Technikum, Labor [1]	Chloridsalze
metallurgisch	Asche nach der Monoverbrennung	Hochofen	hohe Temperatur	T > 1.000°C Abtrennung über die Schlacke unter Zugabe von Koks und Sauerstoff zu den Klärschlammeschebriketts (z.B. Mephrec/Ingitec, ATZ-Eisenbadreaktor/München) [1,2,3]	ca. 90% [1]	Technikum [1]	

Literatur

- KA 2013 (60) Nr. 10, 11; Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm, DWA-AG KEK 1.1
- Projekttreffen UFOPLAN, 17.01.2014, "Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz (KoMa) - Zwischenergebnisse
- Tabelle Bewertungsverfahren E-Mail Fr. Roskosch vom 12.04.2014
- Material workshop "Abwasser-Phosphor-Dünger" 28./29.01.2014, BAM Berlin