

Initialstudie

**Phosphorstrategie für Bayern –
Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen und
Empfehlungen**

FÜR

**Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit**

vorgelegt von:

**Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik UMSICHT**

Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

Operativer Leiter
Dipl.-Ing. Gerold Dimaczek
An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



Oktober 2012

ABSCHLUSSBERICHT
zum Angebot Nr. AG11/1016-53010

Auftraggeber

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit
Rosenkavalierplatz 2
81925 München

Auftragnehmer

**Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT**
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg *(bis 30.06.2012 ATZ Entwicklungszentrum)*

An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg
Tel.: 09661 908-400
Fax: 09661 908-469
E-Mail: info-atz@umsicht.fraunhofer.de
Web:<http://www.umsicht-atz@fraunhofer.de>

Operativer Leiter

Dipl.-Ing. Gerold Dimaczek

Unter Mitwirkung von

Dr.-Ing. Matthias Franke
Prof. Dr. Mario Mocker
Mag. Michael Kozlik
Dipl.-Ing. (FH) Sonja Wiesgickl
Dipl.-Ing.(FH) Robert Daschner
Dipl.-Ing. Ingrid Löh
Dipl.-Ing. (FH) Rolf Jung

Beschlagwortung nach Thesaurus GEMET

Nicht erneuerbare Ressourcen, Rohstoffschutz, Recyclingpotenzial,
Technologieauswahl, Rückgewinnungsplan, Nachhaltige Entwicklung

Sulzbach-Rosenberg, Oktober 2012

Inhalt

1	Zusammenfassung	7
2	Ausgangssituation und Aufgabenstellung.....	10
2.1	Hintergrund.....	10
2.2	Notwendigkeit einer zukünftigen Phosphorrückgewinnung.....	12
2.2.1	Schadstoffausbringung durch landwirtschaftliche Klärschlammverwertung..	12
2.2.2	Volatilität des Düngemittelmarktes	13
2.2.3	Uran- und Cadmiumbelastung von Rohphosphaten und Düngemitteln.....	15
2.3	Darstellung der Vorgehensweise	19
3	Phosphorflüsse in Bayern.....	21
4	Modellszenarien zur Phosphor-Rückgewinnung	27
4.1	Ausgangssituation	27
4.2	Methodik und ausgewählte Kennparameter	28
4.3	Phosphorrückgewinnung in ländlichen Regionen (Szenario 1).....	29
4.3.1	Beschreibung Szenario 1	29
4.3.2	Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens	29
4.3.3	Vor- und Nachteile	30
4.4	Phosphorrückgewinnung in großstädtischen Regionen (Szenario 2)	32
4.4.1	Beschreibung Szenario 2	32
4.4.2	Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens	32
4.4.3	Vor- und Nachteile	32
4.5	Phosphorrückgewinnung in Ballungsräumen (Szenario 3)	34
4.5.1	Beschreibung Szenario 3	34
4.5.2	Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens	34
4.5.3	Vor- und Nachteile	34
4.6	Phosphorrückgewinnung aus Überstandswasser mit vorheriger biologischer Phosphorelimination und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk (Szenario 4-1)	36
4.6.1	Beschreibung Szenario 4-1 und 4-2	36
4.6.2	Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens	36
4.6.3	Vor- und Nachteile	37

4.7	Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm mit vorheriger biologischer Phosphorelimination und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk (Szenario 4-2)	38
4.7.1	Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens	38
4.7.2	Vor- und Nachteile	39
4.8	Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm ohne biologische Phosphorelimination und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk (Szenario 4-3)	40
4.8.1	Beschreibung Szenario 4-3	40
4.8.2	Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens	41
4.8.3	Vor- und Nachteile	41
4.9	Diskussion	42
4.9.1	Kosten der Phosphorrückgewinnung	42
4.9.2	Treibhausgas-Betrachtung der Szenarien	44
4.9.3	Potenzialerschließung der Szenarien	47
4.9.4	Zeitliche Umsetzbarkeit der Szenarien	48
5	Handlungsempfehlungen und Entscheidungsgrundlagen	50
5.1	Identifikation von Handlungsfeldern	50
5.2	Handlungsfeld: Phosphorrückgewinnung	50
5.2.1	Umsetzung Szenario 1 in ländlichen Regionen	50
5.2.2	Umsetzung Szenario 2 in großstädtischen Regionen	51
5.2.3	Umsetzung Szenario 3 in Ballungsräumen	51
5.2.4	Umsetzung Szenario 4-3 an geeigneten Standorten	52
5.2.5	Forcierung des Ausbaus der Monoverbrennungskapazitäten	52
5.2.6	Monodeponierung der Klärschlammaschen	53
5.2.7	Förderung weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	54
5.2.8	Verstärkte Nutzung tierischer Nebenprodukte (v. a. Tiermehl-Kategorie 1)	54
5.2.9	Fazit Handlungsfeld: Phosphorrückgewinnung	55
5.3	Handlungsfeld: Politische Maßnahme	56
5.3.1	Formulierung von Zielsetzungen zur P-Rückgewinnung	56
5.3.2	Rückgewinnungsgebot/-quote für Phosphor	56
5.3.3	Anreizmodell – Investitionsförderung	57
5.3.4	Anreizmodell – Produktvergütung	58
5.3.5	Beimischungspflicht von Sekundärphosphaten	58
5.3.6	Zertifikatsmodell – Ressourcenschutz	59
5.3.7	Zertifikatsmodell – Schadstoffausbringung	60

5.3.8	Besteuerung von Rohphosphat oder Phosphatabgabe	60
5.3.9	Verbot der Mitverbrennung von Klärschlamm ohne vorheriger P-Rückgewinnung.....	61
5.3.10	Fazit Handlungsfeld: Politische Maßnahmen	62
5.4	Handlungsfeld: Flankierende Maßnahmen	64
5.4.1	Fachgespräche zwischen den einzelnen Akteuren	64
5.4.2	Informations- und Monitoringplattform	65
5.4.3	Vermeidung unnötiger Phosphorabflüsse.....	65
5.4.4	Genehmigungsrechtliche Unterstützung bei der Verfahrensumsetzung.....	66
5.4.5	Förderung des ökologischen Landbaus	66
	Literaturverzeichnis	70
	Bildverzeichnis	82
	Ansprechpartner bei Fraunhofer UMSICHT	84
	Anhang	85

1 Zusammenfassung

Ausgangssituation und Veranlassung

Phosphor stellt einen für den Menschen lebensnotwendigen Rohstoff dar und findet seine Hauptanwendung als Pflanzennährstoff in der Landwirtschaft, aber auch als Zusatzstoff in der Lebens- und Futtermittelindustrie sowie in der chemischen Industrie. Da die heute bekannten, endlichen geogenen Phosphatvorräte zudem mit Cadmium und Uran belastet sind, gewinnt die Rückgewinnung von Phosphor immer mehr an Stellenwert.

Bei Versorgungsschwierigkeiten und unvorhersehbaren Preissteigerungen von Phosphorsäure und Phosphatdüngemitteln könnte der Freistaat Bayern als bedeutender Standort von Industrie und Landwirtschaft in besonderem Maße betroffen sein. Vor diesem Hintergrund hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit das ATZ Entwicklungszentrum mit der Anfertigung einer Initialstudie zur effizienten Kreislaufführung von Phosphor in Bayern beauftragt.

Phosphoreinsatz und Rückgewinnungspotenziale in Bayern

Mittels unterschiedlicher statistischer Daten wurde der jährliche Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft für Düngezwecke (Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Klärschlamm, Kompost) und zur Fertigung industrieller Waren und Güter in Bayern ermittelt. Dieser belief sich im Jahr 2010 auf etwa 68.500 Mg P. Zusätzlich wurde in einem ersten Ansatz versucht, die Phosphorflüsse in Bayern zu quantifizieren und deren Zusammenhänge gesamtsystematisch darzustellen.

In weiterer Folge wurde das Phosphorrückgewinnungspotenzial aus Stoffströmen unterschiedlicher Bereiche in Bayern betrachtet. Hierbei handelt es sich um:

- Kommunale Abwasserwirtschaft
- Tierische Nebenprodukte
- Biomasseverbrennung
- Rückstände der Lebensmittelproduktion

Die Potenzialbetrachtung ergab, dass die Bereiche Abwasserwirtschaft und tierische Nebenprodukte das größte Recyclingpotenzial für Phosphor beinhalten. Eine Aufsummierung der Einzelpotenziale zeigte, dass ca. 55 bis 70 % des 2010 in Bayern abgesetzten Mineraldüngers über Sekundärphosphate substituiert werden könnten.

Modellszenarien für eine bayernweite Phosphorrückgewinnung

Die größten Anstrengungen hinsichtlich einer künftigen Phosphorrückgewinnung werden im Bereich der kommunalen Abwasserwirtschaft unternommen. So gibt derzeit eine Vielzahl an Verfahren, die eine Rückgewinnung von Phosphor aus Überstands- und Prozesswässern, Klärschlamm oder Klärschlammmaschen ermöglichen. Jedoch sind die meisten dieser Verfahren noch nicht im großtechnischen Maßstab erprobt und die so gewonnenen Sekundärphosphate oftmals aufgrund der verfahrenstechnischen Komplexität mit Primärdüngemitteln nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig. Anhand diverser Unterscheidungskriterien wurden insgesamt sechs für Bayern erfolgversprechende Recyclingtechnologien ausgewählt und mit Hilfe von spezifischen Kenngrößen miteinander verglichen. Auf Basis dieser Rückgewinnungsverfahren wurden Modellszenarien für eine gesamt-bayerische Klärschlamm Entsorgung mit anschließender Phosphorrückgewinnung entwickelt. Für jedes einzelne Szenario wurde zusätzlich eine Treibhausgas-Betrachtung für die jeweiligen Prozessschritte Vorbehandlung des Klärschlammes, thermische Behandlung und Phosphorrückgewinnung erstellt. So konnte je ein Szenario für ländliche Regionen (Szenario 1), großstädtische Regionen (Szenario 2) und für Ballungsräume (Szenario 3) erarbeitet werden. Überdies wurde ein Szenario für eine nasschemische Rückgewinnung aus Überstandswässern oder Faulschlamm und einer anschließenden Mitverbrennung des Klärschlammes im Zementwerk konzipiert. Für dieses Modell wurden drei unterschiedliche Recyclingtechnologien betrachtet, so dass Szenario 4 insgesamt in drei Unterszenarien (4-1, 4-2, 4-3) unterschieden werden kann.

Handlungsempfehlungen und Entscheidungsgrundlagen

Abschließend wurden Handlungsmöglichkeiten erarbeitet, die als Grundlage für eine zukünftige Phosphorrückgewinnung und für ein nachhaltiges Phosphormanagement im Freistaat Bayern dienen sollen. Dabei wurden die folgenden drei übergeordneten Handlungsfelder identifiziert:

- Phosphorrückgewinnung
- Politische Maßnahmen
- Flankierende Maßnahmen

Für eine langfristige, effiziente, gesamt-bayerische Klärschlamm Entsorgung mit anschließender Phosphorrückgewinnung sollte demnach eine Kombination der Szenarien 1, 2 und 3 geprüft werden. Eine zeitnahe Umsetzung einer Rückgewinnung kann an geeigneten Standorten mit Szenario 4-3 erfolgen, wodurch eine kurzfristige Initiierung des Phosphorrecyclings in Bayern ermöglicht wird. Zusätzlich eignet sich die Schaffung von Monodeponien für Klärschlammmaschen als Phosphorlager für eine spätere Rückgewinnung. Des Weiteren ist es empfehlenswert, politische Instrumente wie ein

Rückgewinnungsgebot/ -quote, Investitionsförderungen oder Zertifikatsysteme für Sekundärphosphate zu nutzen, um eine effiziente Phosphorrückgewinnung im Freistaat zu fördern und einen Absatzmarkt für Düngemittel aus sekundären Quellen zu garantieren. Flankierende Maßnahmen können zur besseren Darstellung der vorhandenen Phosphormengen und -ströme und zur Steigerung des Rückgewinnungspotenzials dienen.

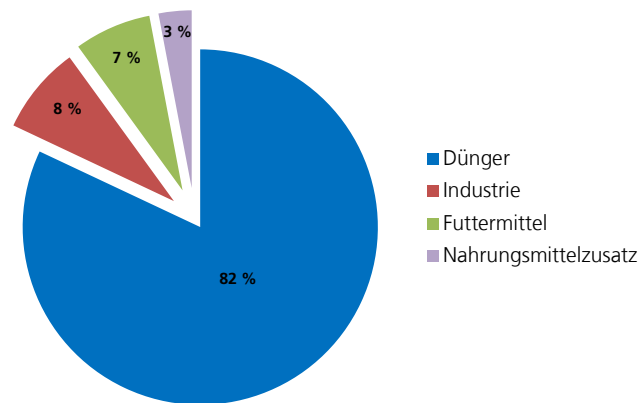
2 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

2.1 Hintergrund

Phosphor (Elementsymbol P) ist ein essenzieller Rohstoff, der in seinen hauptsächlichen Anwendungen nicht substituierbar ist. Die Verfügbarkeit von Phosphor ist somit für die heutigen und kommenden Generationen von entscheidender Bedeutung. Er steht in natürlichen abbauwürdigen Vorräten nur begrenzt zur Verfügung. Eine auf Reserven bezogene statische Reichweite lässt sich derzeit mit ca. 372 Jahren abschätzen [USGS 2012]. Die heute bekannten Reserven verteilen sich zu über 94 % auf die Länder Marokko, Irak, China, Algerien, Syrien, Südafrika und Jordanien. Dabei handelt es sich überwiegend um Sedimente, die zunehmend mit Cadmium und Uran belastet sind. Leicht zugängliche und schadstoffarme Vorräte könnten deswegen schon in etwa 50 Jahren erschöpft sein [Gilbert 2009]. Aktuelle Schätzungen prognostizieren einen Phosphor-Peak im Jahr 2033 [Cordell et al. 2009]. Dieser Peak beschreibt anhand der jährlichen Phosphorproduktion und den bekannten Reserven den Zeitpunkt, vergleichbar mit dem Peak-Öl [Hubbert 1949], wann die jährliche Produktionsmenge ihr Maximum erreicht. Es wird erwartet, dass die jährliche Fördermenge im Anschluss an den Phosphor-Peak bereits im Jahr 2033 trotz steigender Nachfrage aufgrund erhöhter Schwermetallkonzentrationen und höherer Energiekosten bei der Aufbereitung der Erze sinken wird [Cordell et al. 2009]. Allerdings ist die Annahme des Analogieschlusses zum Erdöl in Frage zu stellen, da Phosphor im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern eben nicht ersetzt oder sein Einsatz beliebig verringert werden kann. Weiterhin bergen solche Prognosen große Unsicherheiten aufgrund der teilweise unzureichenden Genauigkeit über die Verfügbarkeit der Reserven, nicht vorhersehbaren wirtschaftlichen Entwicklungen oder politischen Strategien für einen effizienteren Einsatz von Phosphor [Schröder et al. 2010].

Hinsichtlich des weltweiten Phosphorendverbrauchs zeigt sich, dass für die Produktion von Lebensmitteln über 90 % des primär aus Rohphosphaten gewonnenen Phosphors verwendet werden. Davon werden 82 % für die Produktion von landwirtschaftlichen Düngern benötigt, weitere 7 % für Additive in Futtermitteln und etwa 3 % für Nahrungsmittelzusätze (Bild 1). Die restlichen 8 % werden als Grundstoffe für die Erzeugung industrieller Produkte wie Reinigungs- und Waschmittel, Pharmazeutika oder Gusslegierungen verwendet.

Bild 1:
Weltweiter
Phosphorend-
verbrauch
prozentual nach
den jeweiligen
Einsatzgebieten
[Schröder et al.
2010]



Deutschland und somit auch Bayern besitzen keine natürlichen Phosphatvorkommen und sind deshalb zu 100 % auf Phosphatimporte angewiesen. Dies führte in den vergangenen Jahren zu umfangreichen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Phosphorrückgewinnung, die bereits 2009 in einer vom StMUG beauftragten Literaturstudie dargestellt wurden [ATZ 2009]. Als mögliche Phosphorquellen werden z. B. Klärschlamm und Klärschlammaschen, Wirtschaftsdünger sowie Tier- und Fleischknochenmehl in Betracht gezogen [Gethke et al. 2005]. Obwohl insbesondere für Abwasser, Klärschlamm und Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung vielversprechende Verfahren entwickelt wurden, sind die so gewonnenen Produkte aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten im Vergleich zur Phosphorgewinnung aus Rohphosphat noch nicht konkurrenzfähig. Dies kann sich schnell ändern, wenn, wie zu erwarten, der weltweite Düngerverbrauch und damit auch die Rohphosphatpreise in den nächsten Jahren wieder deutlich ansteigen werden.

In Bayern tragen die Landwirtschaft und die darauf aufbauende Nahrungsmittelindustrie einen merklichen Anteil zur Wertschöpfung bei. Der Freistaat wäre damit in besonderem Maße von einer weiteren Verknappung bzw. Verteuerung von Phosphor betroffen. Einer Kreislaufführung dieser Ressource kommt daher eine erhebliche Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund möchte das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG) aktiv in die Steuerung der Stoffströme eingreifen und eine gezielte Phosphorstrategie für Bayern entwickeln. In diesem Zusammenhang wurde das ATZ Entwicklungszentrum (seit dem 1. Juli 2012 in die Fraunhofer-Gesellschaft integriert) mit der Anfertigung der hier beschriebenen Initialstudie beauftragt. Mit Hilfe der dargestellten Ergebnisse sollen wesentliche Entscheidungsgrundlagen für eine effiziente Kreislaufführung des Rohstoffes Phosphor erarbeitet werden.

2.2 Notwendigkeit einer zukünftigen Phosphorrückgewinnung

2.2.1 Schadstoffausbringung durch landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

Die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm repräsentiert einen von den Kläranlagenbetreibern seit langem stark genutzten Weg der Klärschlamm Entsorgung, da neben der Entsorgung eine Kreislaufführung der im Klärschlamm enthaltenen Nährstoffe wie Phosphor oder Stickstoff möglich ist. Die Nährstoffwirkung kann jedoch in weiten Bereichen schwanken. Insbesondere die Anwendung eisenhaltiger Fällmittel im Überschuss führt zu wenig pflanzenverfügbaren Phosphatverbindungen im Klärschlamm [Römer 2006]. Klärschlamm enthält neben den Nährstoffen auch vergleichsweise hohe Schwermetallgehalte wie Blei, Kupfer oder Zink (Bild 2). Neben den Schwermetallen stellen vor allem organische Substanzen, die sowohl über Haushalts- als auch gewerbliche Abwässer eingetragen werden, die bedeutendste Schadstoffgruppe dar (Bild 3). Insbesondere für persistente Schadstoffe wie Moschus- oder zinnorganische Verbindungen konnte eine Anreicherung im Boden von klärschlammgedüngten Flächen nachgewiesen werden [LfU BW 2003].

Hinsichtlich der Bewertung der organischen Schadstoffe bestehen weiterhin große Unsicherheiten. So ist es keineswegs ausreichend, bei der Bewertung lediglich auf einen möglichen Übergang der organischen Schadstoffe in die angebaute Nahrungsmittel abzustellen, darüber hinaus ist die ökotoxikologische Wirkung in den Böden mit zu berücksichtigen. Bei der Bewertung der terrestrischen Ökotoxizität organischer Schadstoffe besteht eine große Wissenslücke. Außerdem sind zahlreiche Schadstoffe, unter anderem Arzneimittelwirkstoffe, bisher nur unzureichend auf Vorkommen und Wirkung in Böden untersucht worden.

Aus diesen Gründen sieht die bayerische Regierung eine Beendigung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung aus Vorsorgegründen und eine verstärkte Nutzung alternativer Entsorgungswege vor [LfU 2010a].

Bild 2:
Schwermetallbelastung bayerischer Klärschlämme im Jahr 2010 und 1995 [LfU 2011a]

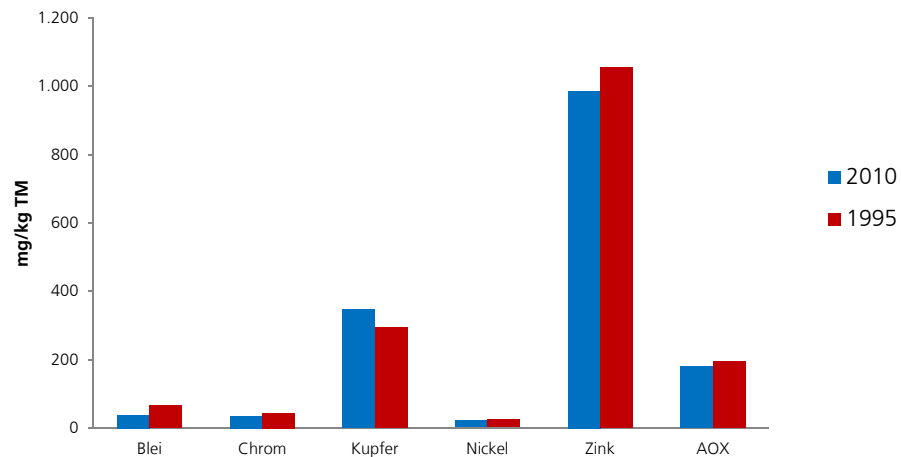
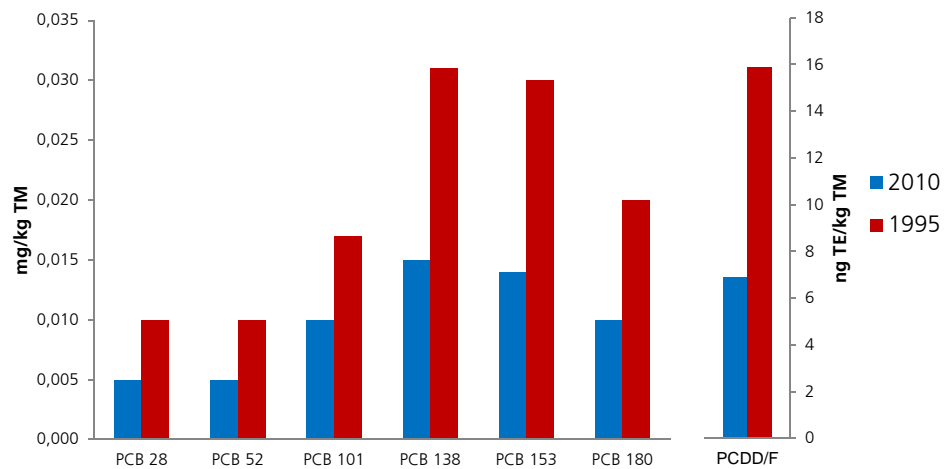


Bild 3:
Organische Schadstoffbelastung bayerischer Klärschlämme im Jahr 2010 und 1995 [LfU 2011a]

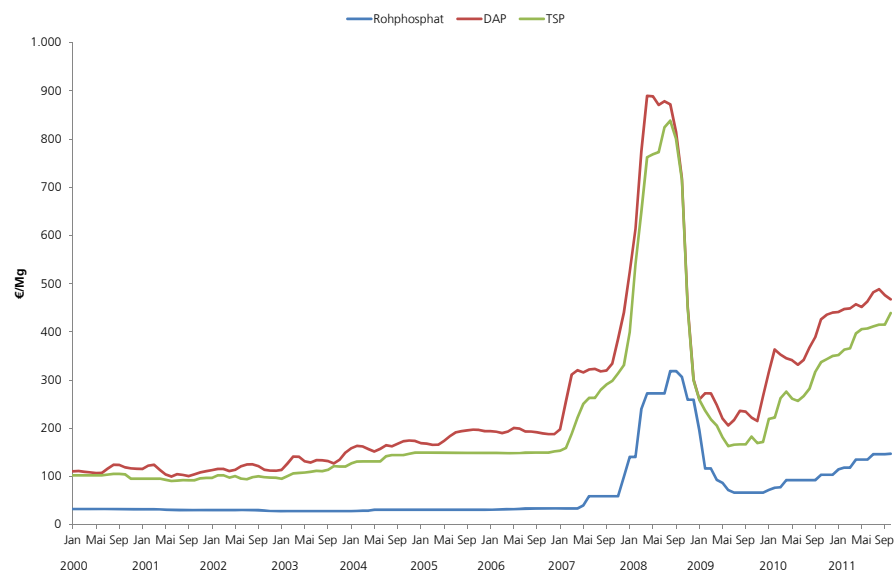


2.2.2 Volatilität des Düngemittelmarktes

Während der Phosphorbedarf in den Industrienationen stagniert, ist aufgrund der stetigen Zunahme der Bevölkerung in den Entwicklungsländern, bei gleichzeitigem wirtschaftlichen Wachstum, ein vermehrter Phosphoreinsatz zur Sicherung der Bereitstellung an hochwertigen Lebensmitteln notwendig. Der zur Bevölkerungsentwicklung überproportionale Anstieg des Nahrungs-

mittelbedarfes erfordert eine landwirtschaftliche Ertragssteigerung. Ausgehend von dem dadurch verstärkten Düngemittleinsatz wird der Phosphatverbrauch in den nächsten Jahren zunehmen. Aufgrund der weltweit steigenden Nachfrage wird sich der Wettbewerb auf den Märkten für Rohphosphat und der daraus produzierten Phosphorsäure verschärfen und sich außerdem auf die Phosphat- und Düngemittelpreise auswirken. Die Preisentwicklung ist sehr volatil und durch äußere Faktoren, beispielweise Wirtschaftskrisen und Kapazitätsengpässe stark beeinflussbar. Während die Preise für Rohphosphat, DAP (Diammoniumphosphat) und TSP (Triple-Superphosphat) bis 2007 relativ stabil waren, ist ab Mitte 2007 ein enormer Anstieg zu erkennen (Bild 4). Die Düngemittelkosten erzielten im Jahr 2008 einen Höchstwert von ca. 1.000 €/Mg DAP, was einer Verfünfachung des Preises von ca. 200 €/Mg aus den Vorjahren entspricht [World Bank 2011]. Gründe hierfür waren die verstärkte Rohphosphatnachfrage und die vollständige Auslastung der Aufbereitungsanlagen. Durch die Eröffnung neuer Minen bis 2011 wurden die vorhandenen Kapazitätsengpässe ausgeglichen, was sich wiederum positiv auf die Preisentwicklung auswirkte [Pinnekamp et al. 2011]. Die Nachfrage an Rohphosphat und die begrenzt verfügbaren und schwer zugänglichen Reserven werden auch zukünftig einen Anstieg der Rohphosphatpreise und den daraus produzierten Düngemitteln bewirken.

Bild 4:
Preisentwicklung von
Rohphosphat, DAP
und TSP im Zeitraum
2000 bis 2011
[World Bank 2011]



In Deutschland stieg der Absatz von Mineraldüngern im Wirtschaftsjahr 2010/2011 (1. Juli 2010 bis 30. Juni 2011) um 13 % gegenüber dem vorherigen Jahr an, wobei der Absatz der Phosphatmengen aufgrund des Mehraufwands je Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche um 21,8 % gestiegen ist. Insgesamt wurden in Deutschland Phosphatdünger mit einem Nährstoffgehalt von rund 125.000 Mg P an Endverbraucher oder landwirtschaftliche Organisationen verkauft. In Bayern wurden davon ca. 19.549 Mg P für die Düngung eingesetzt. Während im Jahr 2010 ein Kilogramm P in Bayern noch 2,31 € kostete, lag dieser Reinnährstoffpreis im Wirtschaftsjahr 2010/2011 im Durchschnitt bei 2,61 €/kg P [Lfl 2011].

2.2.3 Uran- und Cadmiumbelastung von Rohphosphaten und Düngemitteln

Abhängig vom Ablagerungsraum weisen Phosphaterze, die als Grundlage zur Herstellung von Phosphorsäure und in weiterer Folge von phosphathaltigen Düngemitteln dienen, unterschiedliche Schadstoffe wie Uran, Cadmium und Arsen auf. Im Vergleich mit Rohphosphaten sedimentären Ursprungs weisen Phosphorite aus magmatischen Lagerstätten deutlich geringere Uran- und Cadmiumgehalte auf.

Derzeit beträgt der Anteil von Uran im Rohphosphat, das in Deutschland vorwiegend zum Einsatz kommt, durchschnittlich 100 bis 130 mg U/kg Rohphosphat [Bundestag 2009], wobei zukünftig mit einem vermehrten Abbau uranbelasteter Rohphosphate gerechnet werden muss, da schadstoffarme Lagerstätten zur Neige gehen. Aus amerikanischen Phosphatlagerstätten sind Urangelhalte von bis zu 399 mg U/kg Rohphosphat bekannt [Römer et al. 2010]. In Bild 5 sind die Urangelhalte von Rohphosphaten aus unterschiedlichen Lagerstätten der Erde in mg U/kg Rohphosphat dargestellt. Phosphate aus der magmatischen Lagerstätte in Kola/Russland weisen die geringsten Urangelhalte von weniger als 15 mg U/kg Rohphosphat auf. Im Gegensatz dazu stehen sämtliche aus sedimentären Lagerstätten gewonnenen Phosphorite, die je nach Herkunftsland zwischen 50 und 150 mg U/kg Rohphosphat aufweisen [Römer et al. 2010].

Bild 6 zeigt den Urangelhalt unterschiedlicher phosphathaltiger Düngemittel [Römer et al. 2010]. Durch die hohe chemische Affinität von Uran zu Phosphor erhöht sich bei der Aufbereitung von Rohphosphat zu (Triple-) Superphosphat der Urangelhalt von ursprünglichen 13 bis 75 mg U/kg Rohphosphat auf 85 bis 191 mg U/kg Dünger [Knolle 2009]. Maximalwerte von bis zu 1.126 mg U/kg Dünger wurden in P-Düngern in den Niederlanden nachgewiesen [Birke et al. 2009]. Die in Deutschland eingesetzten Phosphatdüngemittel enthalten in Abhängigkeit des Urangelhaltes und der Aufschlussmethode des Rohphosphates Konzentrationen von 20 bis 200 mg U/kg Dünger [Dittrich & Klose 2008]. Laut Angaben des Julius Kühn-Instituts liegt

der durchschnittliche Urangelgehalt bei 124 mg U/kg P [Bundestag 2009]. Basierend auf statistischen Daten wurde in der Literatur für den Zeitraum von 1950 bis 2010 ein jährlicher düngemittelbedingter Uraneintrag auf landwirtschaftliche Nutzflächen in Deutschland von durchschnittlich 114 Mg U/a angegeben [Kratz et al. 2011]. Aufgrund der stark gesunkenen P-Düngung ist mittlerweile auch der jährliche Uraneintrag stark zurückgegangen und lässt sich derzeit unter Beibehaltung der durchschnittlichen Belastung von 124 mg U/kg P auf etwa 15,5 Mg U/a abschätzen.

Schon seit längerem existieren Technologien zur Aufbereitung von Rohphosphat, um schwermetallfreie und uranarme Phosphorsäure zu produzieren [Schipper et al. 2005]. Dabei findet ein Aufschluss der Rohphosphate mit Kohlenstoff bei Temperaturen über 1.500 °C statt. Folglich wird elementarer Phosphor in die Gasphase überführt und anschließend in Wasser kondensiert und zu Phosphorsäure oxidiert. Hierbei handelt es sich um einen sehr energieintensiven Behandlungsschritt. Daher wird derzeit auf eine Trennung der Schwermetalle mittels Kohlenstoffaufschluss verzichtet. Alternativ ist es möglich, Rohphosphat mit Phosphorsäure zu behandeln, wofür jedoch vorgereinigte Phosphorsäure benötigt wird, welche nur begrenzt aus magmatischen Lagerstätten in Russland, Finnland und Südafrika zur Verfügung steht.

Bild 5:
Urangelgehalte von Rohphosphaten aus unterschiedlichen Lagerstätten der Erde [verschiedene Quellenangaben in Römer et al. 2010]

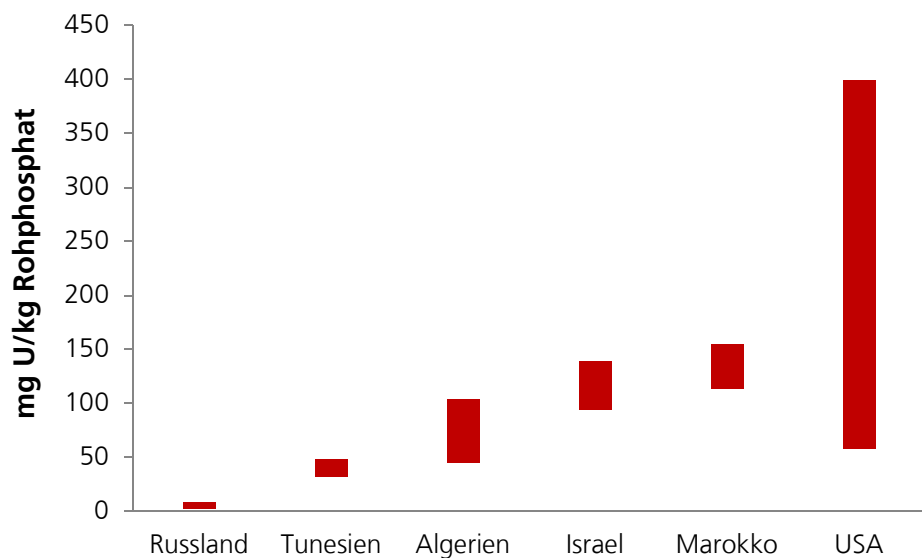
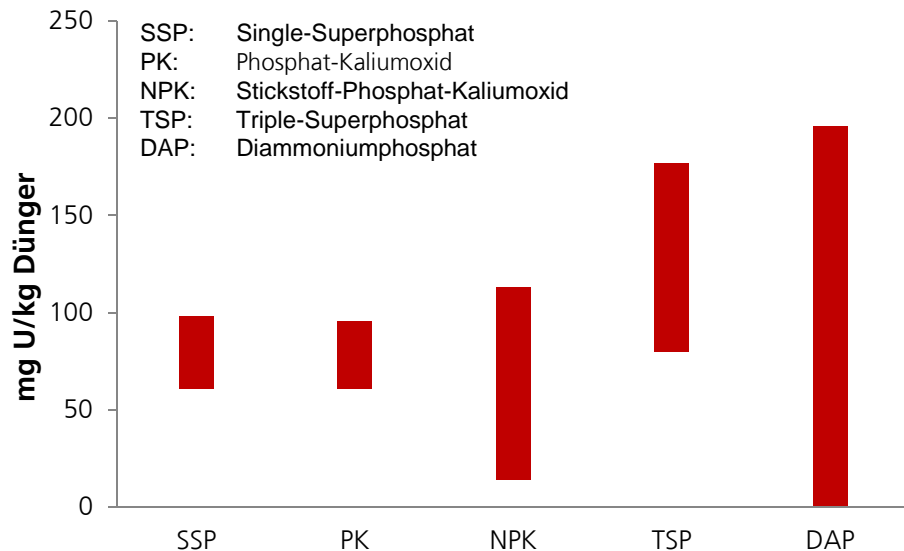


Bild 6:

Urangehalte von verschiedenen phosphathaltigen Düngemitteln [verschiedene Quellenangaben in Römer et al. 2010]



Neben dem Fremdeintrag in die Umwelt ausgehend von belasteten Phosphatdüngern, stammt Uran in heimischen Böden und Gewässern aus uranhaltigen Gesteinen [UBA 2011]. Natürliche geologische Uranquellen in Bayern sind in erster Linie Granite der Böhmisches Masse (Fichtelgebirge) und Keupersandsteine der Germanischen Trias (Mittelfranken).

Während über die Düngung ein mittlerer Eintrag von 10 bis 22 g U/ha landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF) gemessen werden kann, liegt der Urangehalt, der durch Ernte oder Bodenerosion ausgetragen wird, bei unter 1 g U/ha LF [Knolle 2009]. Durch die Anreicherung von Uran über die Düngerzugabe werden mittlerweile auch in Grundwässern Urangehalte von $1,6 \pm 2,8 \mu\text{g/l}$ bis max. $19,5 \mu\text{g/l}$ gemessen [Knolle 2009].

Ein Grenzwert für Düngemittel liegt derzeit nicht vor, obwohl das Ausbringen von uranhaltigen mineralischen Phosphatdüngern mittlerweile eine der flächenhaft relevantesten technogenen Uranquellen darstellt [Knolle 2009]. Aus strahlenschutztechnischer Sicht ist dies vernachlässigbar, jedoch weist Uran humantoxische Eigenschaften auf, was sich über die Aufnahme belasteter Nahrungsmittel – vor allem von Trinkwasser – negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken kann. Aus diesem Grund wird eine Aufnahme von Uran als Schadstoff in der Düngemittelverordnung gefordert, um eine weitere Kontamination von Trinkwasser in Deutschland durch den Einsatz uranbelasteter Düngemittel zu verhindern [Ekardt & Schnug 2009].

Auch die Problematik von Verunreinigungen mit Cadmium in phosphorhaltigen Lagerstätten nimmt immer mehr zu. Während magmatische Phosphorlagerstätten nur geringfügig mit Cadmium belastet sind ($< 6 \text{ mg Cd/kg P}$), weisen aus sedimentären Lagerstätten gewonnene Phosphaterze häufig hohe Konzentrationen an Cadmium auf. Je nach Vorkommen wurden Cadmiumgehalte von 4 bis 106 mg Cd/kg P [Moncef 2005], bzw. 20 bis 375 mg Cd/kg Rohphosphat ermittelt [BAFU 2009a]. Für Deutschland wurde von 1950 bis 2010 durch die Ausbringung phosphorhaltiger Düngemittel ein mittlerer jährlicher Input an Cadmium auf landwirtschaftlich genutzte Flächen von 22 Mg Cd/a errechnet [Kratz et al. 2011].

Deutschland besitzt keine eigenen Phosphatreserven und ist daher auf Importe aus dem Ausland angewiesen. Im Jahr 2010 stammten 83 % der bundesweiten Einfuhren aus Israel [DERA 2011]. Nach Angaben von ICL Fertilizers [ICL 2010] sind durchschnittlich ca. 31 mg Cd/kg P in dem aus Israel eingeführten Rohphosphat enthalten. Hohe Cd-Gehalte finden sich vor allem in afrikanischen Lagerstätten, mit Ausnahme Südafrika [Moncef 2005]. Der Grenzwert in Düngemitteln ab einem Gehalt von 2,2 % P wurde in Deutschland gemäß der Düngemittelverordnung mit 22 mg Cd/kg P festgelegt [DüMV 2008]. In der Europäischen Düngemittelverordnung wurde bisher noch kein Grenzwert für eine Cadmiumbelastung phosphorhaltiger Düngemittel definiert [MaRess 2010].

Cadmium wird über verunreinigtes Oberflächenwasser (Cd aus Bremsbelägen oder Reifen, Luftverschmutzung oder Cd-haltigen Verzinkungen [WasserBerlin 2008]) oder durch Cd-haltigen Phosphordünger im Boden angereichert oder in den Klärschlamm eingetragen.

Die mittleren Uran- und Cadmiumgehalte der unterschiedlichen Phosphatprodukte sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1:
Mittlere
Schadstoffgehalte
unterschiedlicher
Phosphatprodukte
[BAFU 2009a,
Dittrich & Klose
2008, Knolle
2009, Kratz et al.
2011, Römer et al.
2010]

	U	U	Cd	Cd	U	U	Cd
	[mg/kg Rohphosphat]				[mg/kg Dünger]		
Quelle	Römer et al. 2010	Dittrich & Klose 2008	Dittrich & Klose 2008	BAFU 2009a	Knolle 2009	Kratz et al. 2011	Kratz et al. 2011
Roh- phosphat magmatisch	15	10-28	0,1-1,3	0,1-10			
Rohphosphat sedimentär	29-296	23-180	2-92	20-375			
(Triple-) Super- phosphat					85-191	98	25
NP-, PK- Dünger					89-96	61	7
NPK-Dünger					14	33	7
Klärschlamm					4-32		
Wirtschafts- dünger (Gülle, Mist)					< 2		

2.3 Darstellung der Vorgehensweise

Zunächst waren die in einer bereits früher vom ATZ Entwicklungszentrum erarbeiteten Potenzialstudie enthaltenen Daten für das StMUG zu aktualisieren und zu ergänzen [ATZ 2009]. Dabei wurden unterschiedliche phosphathaltige Stoffströme identifiziert und hinsichtlich ihres Phosphorpotenzials bewertet. Parallel zur Aktualisierung der Literaturstudie wurde der Phosphorbedarf im Freistaat Bayern differenzierter ermittelt, da Phosphor in Bayern neben dem landwirtschaftlichen Einsatz als Düngemittel auch Anwendung in der Industrie findet. unternommen.

Vor einer Umsetzung einer Phosphorstrategie auf Landesebene waren neben den bereits vielfach vorliegenden Untersuchungen, Potenzialberechnungen und Bewertungen verfahrenstechnischer Varianten zur Phosphorrückgewinnung grundsätzliche konzeptionell-strategische Überlegungen unter Berücksichtigung regionaler Gegebenheiten anzustellen. Da vor allem Klärschlämme bzw. Klärschlammaschen aus der kommunalen Abwasserbehandlung das größte Potenzial hinsichtlich einer Rückgewinnung von

Phosphor aufweisen, hat die Entwicklung eines auf Phosphorrückgewinnung ausgerichteten Konzeptes der Klärschlamm Entsorgung für Bayern oberste Priorität. Daher wird in der Erarbeitung der Handlungsempfehlungen für ein nachhaltiges Phosphormanagement in Bayern sich auf die Phosphorrückgewinnungsverfahren im Bereich der kommunalen Abwasserwirtschaft beschränkt. So können beispielsweise Klärschlammbehandlung, Entwässerung, gegebenenfalls Trocknung und thermische Behandlung an unterschiedlichen Standorten, mit differierenden Durchsätzen in mehr oder weniger zentral bzw. dezentral konzipierten Anlagen bewerkstelligt werden. Bei den Aschen ist sowohl eine dezentrale Rückgewinnung in Kombination mit kleineren Verbrennungsanlagen als auch eine Sammlung und Behandlung der Verbrennungsrückstände an wenigen oder nur einem Standort in Bayern denkbar.

Für andere phosphorhaltige Substanzen wie Tiermehle bietet sich eine gemeinsame thermische Behandlung mit Klärschlamm spätestens dann an, sobald dafür eine flächendeckende Infrastruktur geschaffen wurde. Weiterhin wurden kurzfristig zu realisierende Handlungsansätze aufgezeigt, beispielsweise eine rückholbare Lagerung derzeit bereits anfallender Klärschlammaschen anstatt der üblichen Entsorgung im Deponiebau oder im Bergversatz.

Nach der Darstellung und Bewertung von Behandlungsmöglichkeiten phosphorhaltiger Stoffströme wurden Strategieempfehlungen erarbeitet. Diese können, müssen aber nicht zwangsläufig für verschiedene Anfallorte und -mengen phosphorhaltiger Verbindungen unterschiedlich ausfallen. Schließlich wurden politische Maßnahmen, beispielweise Förderinstrumente zur Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung, aufgezeigt.

3 Phosphorflüsse in Bayern

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, liegt die Hauptanwendung der importierten Phosphorprodukte im Einsatz von Mineraldüngern in der Landwirtschaft. Im Wirtschaftsjahr 2010/11 wurden in Bayern mineralische Düngemittel mit einem Phosphorgehalt von 19.549 Mg P abgesetzt [Destatis 2011a]. Diese entspricht wieder der in den Jahren vor der Wirtschaftskrise abgesetzten Menge an Mineraldüngern (2007/08 waren es 19.252 Mg P). Eine wesentlich höhere Phosphormenge (42.716 Mg P) wurde darüber hinaus mit Wirtschaftsdüngern (Gülle, Jauche und Stallmist) im Jahr 2010 ausgebracht. Zusätzlich wurden im selben Jahr teilweise nicht unbeträchtliche Mengen phosphorhaltiger Chemikalien für industrielle Anwendungen importiert. So waren mit der Einfuhr von 10.688 Mg Phosphorsäure und Polyphosphorsäure [Destatis 2011b] ein Input von etwa 3.380 Mg P in die bayerische Industrie verbunden. Diese werden vorwiegend in der chemischen Industrie für die Erzeugung von Reinigungs- und Waschmitteln, sowie in der Ernährungs- und Futtermittelindustrie benötigt. Die Fraktion, die zur Erzeugung von Reinigungs- und Waschmitteln dient, ging in den letzten Jahren, aufgrund der strengeren Vorschriften vieler Länder bezüglich der Verunreinigung von Oberflächengewässern mit Phosphor, zurück [Schröder et al. 2010]. Des Weiteren wurden geringere Mengen phosphorhaltiger Chemikalien nach Bayern importiert, die hauptsächlich als chemische Grundstoffe für Pharmazeutika, Weichmacher, Flammschutzmittel, Chlorierungsmittel, Betonlöser, Rostumwandler oder als Bestandteil von Gusslegierungen benötigt werden (Tabelle 2).

In Bild 7 wurde in einem ersten Schritt näherungsweise der Phosphorhaushalt im „System Bayern“ dargestellt. Dieses setzt sich in der folgenden Betrachtung aus den Subsystemen Kommunale Abwasserbehandlung, Landwirtschaft Viehhaltung und Landwirtschaft Pflanzenbau, Biomasseverwertung, Futtermittelindustrie, Chemische Industrie und Abfluss in Oberflächengewässern zusammen. Prozesse wie beispielsweise Abwasserreinigung oder Verwertung von tierischen Nebenprodukten führen zu einem Transport und Verlagerung von Stoffen oder Gütern und somit des Phosphors. Als Datengrundlage wurden verschiedene statistische Erhebungen zu den einzelnen Stoffströmen wie Klärschlamm, Wirtschaftsdünger oder tierische Nebenprodukte verwendet, welche in weiterer Folge als Grundlage für die Potenzialbetrachtung im Anhang dienen. Da für keines der Subsysteme genaue Mengen in der Literatur für die einzelnen Phosphorflüsse angegeben sind, wurden die dargestellten Phosphormengen im Allgemeinen als Produkt der Güter- oder Stoffmengen und den jeweiligen Phosphorkonzentrationen gemittelt. Die Mengenangaben beziehen sich mit Ausnahme der Subsysteme Biomasseverwertung (z. T. 2005) und Abfluss in Oberflächengewässern (2007) auf das Jahr 2010. Für ein konsistentes Gesamtbild wäre allerdings ein

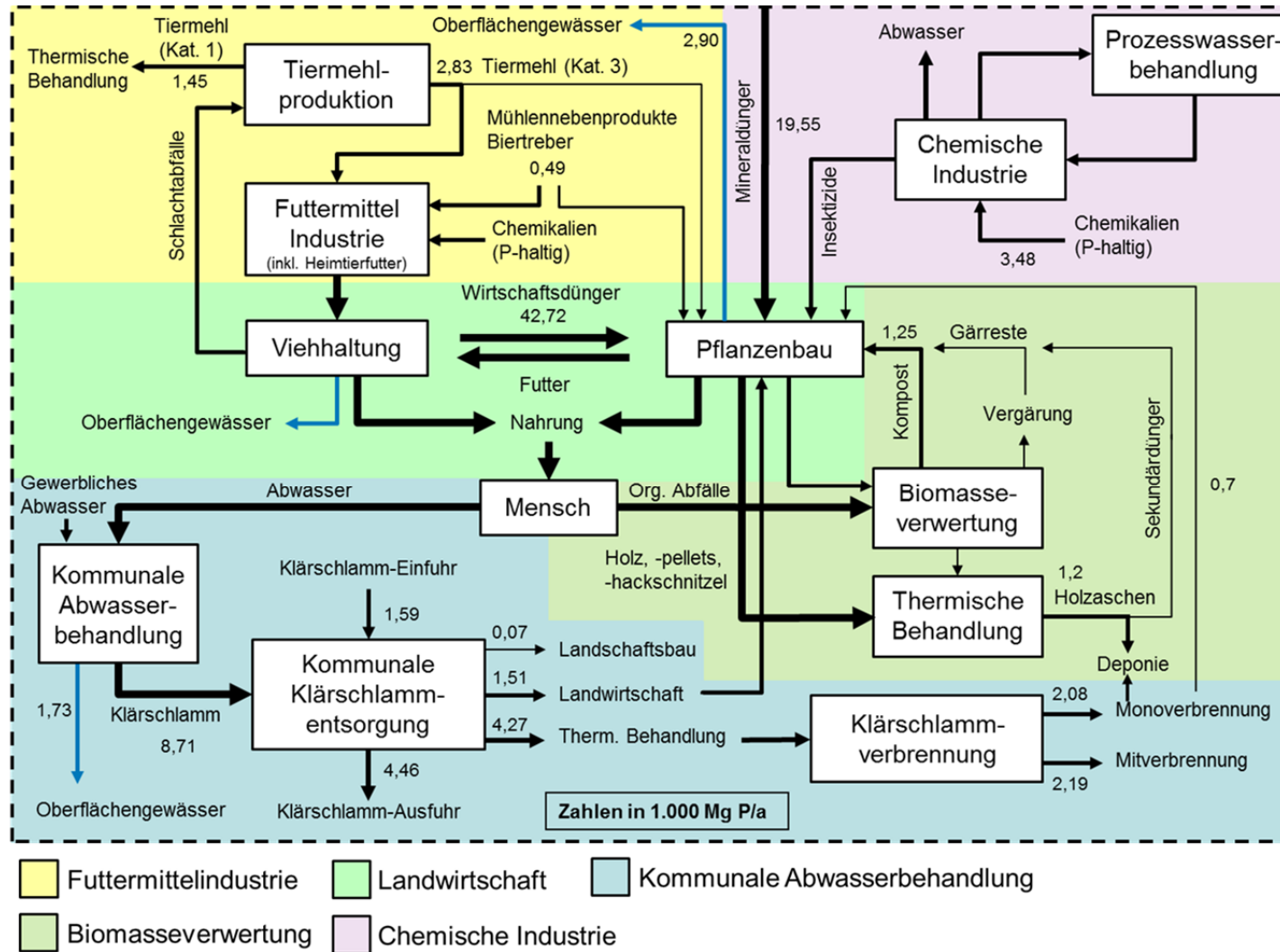
einheitliches Bezugsjahr wünschenswert, was aufgrund der Datenlage nicht möglich war.

Tabelle 2:
Darstellung des
Phosphoreinsatzes
in Bayern 2010

	Menge Mg/a	Phosphorfracht Mg P/a
Phosphoreinsatz Landwirtschaft		
Wirtschaftsdünger FM ¹	44,5 Mio.	42.716
Mineraldüngerabsatz [als P ₂ O ₅]	44.735	19.549
Klärschlamm (Landwirtschaft TM ²)	51.488	1.506
Bio- und Grünschnittkompost (inkl. Gartenbau usw.)	589.139	1.253
Phosphoreinsatz Industrie		
(Poly-)Phosphorsäure	10.688	3.380
Ester der Phosphorsäure und ihre Salze, andere	743	- ³
Insektizide, Grundlage von Phosphorverbindungen	303	- ³
Phosphortrichloridoxid	125	25
Ferrophosphor	76	21
Phosphorpentachlorid	69	30
Diphosphorpentaoxid	40	17
Phosphorchlorid und -chloridoxid	10	- ³
Phosphortrichlorid	4	0,9
Phosphor	2	2
Phosphorsulfid, einschl. Phosphortrisulfid	0,4	0,1
Thiophosphorsäureester und ihre Salze	0,3	- ³
Summe des Phosphoreinsatzes		68.500

¹Frischmasse, ²Trockenmasse, ³keine nähere Bestimmung des P-Gehaltes möglich

Bild 7:
Phosphor-
stofffluss-
modell für
Bayern
(Pfeilstärke
schematisch
für Größe der
Stoffmenge,
Subsysteme
farblich
hinterlegt)



Den größten Umsatz an Phosphor weist die Landwirtschaft auf. Diese stellt den Mittelpunkt des Systems dar und interagiert mit sämtlichen anderen Subsystemen. Durch die Stoffströme Wirtschaftsdünger und pflanzliches Futter findet im Subsystem Landwirtschaft zwischen den Bereichen Landwirtschaft Viehhaltung und Landwirtschaft Pflanzenbau eine bedeutende Kreislaufführung des Phosphors statt und kann somit den Großteil des benötigten Phosphors selbst decken. Ferner gelangt über den Import von Mineraldüngern jährlich eine beträchtliche Menge Phosphor in das System. Dieser bildet zusammen mit Hofdünger die Grundlage für die inländische Erzeugung von pflanzlichen und tierischen Nahrungsmitteln. Laut der Nährstoffeintragsmodellierung durch MONERIS-Bayern wurden im Jahr 2007 insgesamt 6.500 Mg P in bayerische Gewässer eingetragen. Davon ist eine Menge von 2.900 Mg P auf den unmittelbaren Eintrag von *landwirtschaftlichen Flächen* zurückzuführen [LfU 2009a].

Ein Teil des Phosphors aus dem Subsystem Landwirtschaft Viehhaltung wird über Schlachtabfälle und gefallene Nutztiere in das Subsystem Futtermittelindustrie transferiert. Dieses besteht aus den beiden Prozessen *Verarbeitung tierischer Nebenprodukte* und *Erzeugung von Futtermitteln*. Über die Erzeugung von Tiermehlen der Kategorie 3 aus dem Prozess *Verarbeitung tierischer Nebenprodukte* und der anschließenden Verwertung als Heimtierfutter- oder Düngemittel gelangt ein kleiner Teil dieses Phosphorstroms wieder zurück in das Subsystem Landwirtschaft und wird somit im Kreislauf geführt. Phosphor im Stoffstrom Tiermehl der Kategorie 1 wird über die thermische Behandlung mit anschließender Deponierung der Aschen dagegen in ein P-Lager überführt. Des Weiteren werden Nebenprodukte aus der Lebensmittelindustrie wie Birtreber und Mühlennebenprodukte direkt als Futter- oder Düngemittel weiterverwertet.

Über die Nahrungsaufnahme und in weiterer Folge durch die Ausscheidung von Urin und menschlichen Exkrementen gelangt ein beträchtlicher Teil des Phosphors in das Subsystem Kommunale Abwasserbehandlung. Über die Verwertungsprozesse *Landschaftsbau* und *Thermische Behandlung* findet eine Lagerung des Phosphors statt. Hingegen wird Phosphor über den Prozess *landwirtschaftliche Verwertung* im Nährstoffkreislauf gehalten, was jedoch aus Vorsorgegründen und der verstärkten Nutzung alternativer Entsorgungswege in Bayern abnimmt [LfU 2010a]. Über die Einleitung gereinigter Abwässer der kommunalen Kläranlagen in die Gewässer geht eine Menge von 1.730 Mg P aus dem System verloren [LfU 2009a].

Über den Import von außerhalb des Systems gelangen Chemikalien bzw. Grundstoffe für Chemikalien und damit 3.480 Mg P in das Subsystem Chemische Industrie. Diese Menge beinhaltet auch den Teil, der für die Produktion von nichtlandwirtschaftlichen Gütern wie Reinigungs- und

Waschmittel aufgebracht wird. Das Subsystem Chemische Industrie führt zudem landwirtschaftliche Nutzgüter wie Herbizide und Insektizide in das Subsystem Landwirtschaft ein. Diesbezüglich können keine genauen Phosphormengen angegeben werden, da diese Daten aus unternehmerischen Gründen der Geheimhaltung unterliegen. Über industrielle Prozesswasseraufbereitung ist es möglich, einen Teil des in der chemischen Industrie eingesetzten Phosphors rückzugewinnen. Zudem wird bereits vereinzelt in der Lebensmittelindustrie Phosphor aus industriellen Abwässern recycelt [Pinnekamp et al. 2011].

Das Subsystem Biomasseverwertung umfasst die Stoffgruppen organische Speiseabfälle, Gartenabfälle, Kompost, Grüngut, sowie Holzaschen und Gärreste aus der Energiegewinnung. Diese stammen aus den Prozessen *thermische Behandlung von Biomasse* und *Kompostierung von Bio- und Grünabfällen*. Ein Teil des Phosphors geht über die Verwertung der Komposte und Gärreste als Düngemittel in die Landwirtschaft zurück. Holzaschen werden aufgrund ihres hohen Säurebindungsvermögens in der Forstwirtschaft als Bodenverbesserer genutzt. Zyklon- oder Feinstflugaschen, die als gefährliche Abfälle gelten, bilden in diesem Subsystem ein P-Lager aus.

Weniger als die Hälfte des Nährstoffbedarfs wird als Primärdünger von außerhalb des Systems bezogen. Somit ist die Landwirtschaft auch gleichzeitig Haupt-Importeur von Phosphor. Die Chemische Industrie stellt im betrachteten System den zweitwichtigsten Importeur und Verarbeiter von Phosphor dar. Jedes Subsystem zeichnet sich durch einen Verlust an Phosphor über Oberflächengewässer nach außerhalb aus. Dieser ist im Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung am größten. Ebenso geht Phosphor über den Prozess *Erosion* von landwirtschaftlichen Nutzflächen verloren. Das Subsystem mit dem größten P-Lager stellt die kommunale Abwasserbehandlung dar. Durch gezielte Überführung des Klärschlammes in den Prozess *Monoverbrennung von Klärschlamm* ließe sich bei anschließender Rückgewinnung von Phosphor aus den Aschen das größte Potenzial aus einem einzigen Stoffstrom erschließen.

Bei der Stoffstromanalyse handelt es sich um ein iteratives Verfahren, wodurch das System aufgrund vorhandener Daten und Erkenntnisse weiter angepasst werden kann und zusätzliche Güterflüsse berücksichtigt werden können [BAFU 2009b]. Bei der Auswertung der Daten wurde keine Unsicherheitsanalyse vorgenommen. Da sämtliche Messgrößen mehr oder weniger mit Unsicherheiten belastet sind, lässt das dargestellte Modell Spielraum für mögliche Interpretationen. Für eine detailschärfere Bild des heimischen Phosphorhaushaltes muss zusätzlich die Lebensmittelindustrie in das System einbezogen werden, da über den Export und Import von tierischen und pflanzlichen Lebensmitteln Phosphor ins System eingetragen

wird bzw. dieses verlässt. Dieser Aspekt fand während der Bearbeitung des Projektes aufgrund des zeitlichen Aufwandes keine Berücksichtigung. Zudem empfiehlt es sich, die jeweiligen Subsysteme im Einzelnen sukzessive zu verfeinern, um sämtliche Prozesse eines Subsystems zu erfassen und in weiterer Folge das System vollständig zu beschreiben.

Das in Bild 7 dargestellte Phosphorflussmodell stellt somit eine erste Annäherung dar. Es zeigt grob die jeweiligen Stoffflüsse und die damit verbundenen Phosphormengen innerhalb eines Subsystems auf. Um gezielt gegen Systemverluste agieren zu können und eine umfassende Kreislaufführung von Phosphor zu ermöglichen, bedarf es zukünftig eines detaillierten Modells zum bayerischen Phosphorhaushalt, das jährlich mit den neuesten Daten aktualisiert werden sollte.

Da vor allem Klärschlämme bzw. Klärschlammaschen das größte Potenzial hinsichtlich einer Rückgewinnung von Phosphor aufweisen, wird nachfolgend die Phosphorrückgewinnung nur im Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung weiter betrachtet.

4 Modellszenarien zur Phosphor-Rückgewinnung

4.1 Ausgangssituation

Bei der Entwicklung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung erwies sich Deutschland in den letzten Jahren als Innovationsmotor. Dies bestätigt auch die Vielfalt der unterschiedlichen technologischen Ansätze zum Recycling von Phosphor aus Abwässern, Klärschlamm oder Klärschlammaschen, die auf heimische Forschungsprojekte zurückzuführen sind. Vor allem die Tatsache, dass sämtliche Rückgewinnungsverfahren derzeit keine wirtschaftlich rentablen Ergebnisse erzielen konnten, begünstigt und verstärkt die Maßnahmen und Anstrengungen weiterer FuE-Arbeiten. Die große Anzahl an Recyclingverfahren und deren unterschiedliche Ausgangsstoffe sowie Ansätze zur Rückgewinnung von Phosphor sind in Bild 8 dargestellt. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich beispielsweise hinsichtlich ihrer Ausgangsstoffe, der Prozessführung (Säureaufschluss, thermischer Aufschluss usw.), Rückgewinnungseffizienz oder Pflanzenverfügbarkeit der rückgewonnenen Produkte. Anhand ausgewählter Kennparameter und definierter Voraussetzungen wurden für eine modellhafte Phosphorrückgewinnung im Freistaat sechs Verfahren ausgewählt, die sich hinsichtlich ihres Ausgangsstoffes sowie der Prozessführung unterscheiden (siehe Kapitel 4.2).

Bild 8:

Verfahren zur P-Rückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung gegliedert nach den Stoffgruppen Abwasser & Prozesswässer, Klärschlamm und Klärschlammasche

Abwasser & Prozesswässer	Klärschlamm	Klärschlammasche
Kristallisation / Fällung <ul style="list-style-type: none"> Phostrip DHV-Crystalactor® Ostara PEARL® Unikata Phosnix® Nishihara Kurita Festbettreaktor Ebara MAP Kristallisation Treviso CSIR Wirbelschichtreaktor REPHOS® P-RoC PRISA-Verfahren Sydney Waterboard Reaktor 	Kristallisation <ul style="list-style-type: none"> AirPrex MAP-Verfahren PECO-Verfahren (biol.) FIX Phos Säureaufschluss <ul style="list-style-type: none"> Stuttgarter Verfahren Seaborne-Verfahren Kemira KEMICOND® Hydrothermaler Aufschluss <ul style="list-style-type: none"> PHOXNAN LOPROX Kemira KREPRO® Aqua Reci Cambi-Prozess 	Nasschemischer Aufschluss <ul style="list-style-type: none"> RÜPA (PASCH) SEPHOS SESAL (Weiterentwicklung von SEPHOS) BioCon Eberhard-Verfahren RecoPhos
Ionenaustausch <ul style="list-style-type: none"> REM NUT® PHOSIEDI 	Thermischer Aufschluss <ul style="list-style-type: none"> Mephrec ATZ-Eisenbadreaktor 	Thermischer Aufschluss <ul style="list-style-type: none"> SUSAN Mephrec ATZ-Eisenbadreaktor
Sonder- und Kombiverfahren <ul style="list-style-type: none"> RECYPHOS Magnetseparator 		Elektrokinese <ul style="list-style-type: none"> EPHOS Bioleaching <ul style="list-style-type: none"> Inocre

4.2 Methodik und ausgewählte Kennparameter

Es wurden Kennparameter definiert, anhand derer die Rückgewinnungstechnologien bewertet und untereinander verglichen werden konnten, um die Anzahl der zu betrachtenden Verfahren einzuschränken. Ziel ist es, aus der in Bild 8 dargestellten Vielfalt ein oder mehrere für Bayern relevante und erfolgversprechende Verfahren zu charakterisieren, die kurz- bis langfristig umsetzbar sind. Anhand der folgenden Unterscheidungsmerkmale können die Verfahren klar voneinander abgegrenzt werden, was als Grundlage zur Auswahl der betrachteten Verfahren herangezogen wurde:

- Ausgangsstoff (Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammasche)
- Prozessführung (Kristallisation, Säureaufschluss, thermischer Aufschluss)
- Notwendige Betriebsführung der Kläranlage (z.B. biologische P-Elimination)
- Investitions- und Betriebskosten
- Betriebsmittelbedarf und Komplexität des Verfahrens
- Rückgewinnungseffizienz
- Pflanzenverfügbarkeit des gewonnenen Produktes
- Entsorgungspflicht für Rückstände
- Zulassungs- und Kennzeichnungspflicht des Produktes nach DÜMV

Die jeweiligen Angaben basieren auf den Ergebnissen der Anlagenentwickler. Zur Vereinfachung wurde bei der Darstellung des Betriebsmittelbedarfs für unterschiedliche Behandlungsmengen auf eine mögliche Abweichung des spezifischen Bedarfs an Chemikalien verzichtet. Zudem wurde bei der Auswahl der betrachteten Rückgewinnungsverfahren Rücksicht auf Projekte genommen, die sich derzeit in Bayern in der Planungsphase zur großtechnischen Umsetzung befinden bzw. Verfahren, die bereits in Deutschland im Pilotmaßstab und darüber hinaus realisiert wurden.

Auf Basis dessen wurden sechs verschiedene Rückgewinnungsverfahren für eine nähere Betrachtung ausgewählt. Dabei handelt es sich um je ein Kristallisationsverfahren aus den Stoffgruppen Abwasser & Prozesswasser sowie Klärschlamm, je ein Säureaufschlussverfahren aus den Stoffgruppen Klärschlamm und Klärschlammasche, sowie je ein thermisches Aufschlussverfahren aus den Stoffgruppen Klärschlamm und Klärschlammasche. Zusätzlich wurde für jedes dieser Verfahren eine Treibhausgas-Betrachtung (THG) inklusive der vorhergehenden Prozesskette (Transport, Entwässerung, Trocknung und eventuelle thermische Behandlung von Klärschlamm) erstellt, wodurch ein zusätzliches Unterscheidungscharakteristikum generiert wurde. Des Weiteren ist die Auswahl eines Verfahrens von der vorhandenen Menge des jeweiligen Ausgangsstoffes und der damit resultierenden Ausbaugröße

der Rückgewinnungsanlage abhängig. Anhand der ausgewählten Verfahren wurden folgende Szenarien definiert:

- Phosphorrückgewinnung in ländlichen Regionen
- Phosphorrückgewinnung an großstädtischen Regionen
- Phosphorrückgewinnung in Ballungsräumen
- Phosphorrückgewinnung und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk

Die drei ersten Szenarien unterscheiden sich in erster Linie im Rückgewinnungsverfahren, der Klärschlammmenge und der Ausbaugröße der Anlage. Für das vierte Szenario (Phosphorrückgewinnung und anschließende Mitverbrennung des Klärschlammes im Zementwerk) wurde drei Unterszenarien (4-1, 4-2, 4-3) ausgewiesen, wobei die Randbedingungen in den beiden ersten Unterszenarien dieselben sind. Lediglich die Rückgewinnungsverfahren per se variieren.

4.3 Phosphorrückgewinnung in ländlichen Regionen (Szenario 1)

4.3.1 Beschreibung Szenario 1

Der auf kleinen bis mittelgroßen ländlichen Kläranlagen anfallende Nassschlamm wird einer größeren zentralen Kläranlage angedient, um die zu behandelnde Klärschlammmenge und letztendlich den Phosphoroutput zu vergrößern. Zudem bietet dieses Konzept den Kläranlagen unter 10.000 EW eine alternative Möglichkeit zur herkömmlichen Klärschlamm Entsorgung. Am zentralen Standort wird der Klärschlamm mechanisch entwässert, auf 65 % TM getrocknet und anschließend in einer Monoverbrennung thermisch behandelt. Die dabei freiwerdende Verbrennungsenergie kann über eine Mikrogasturbine zur Stromerzeugung genutzt werden, um die Energieautarkie des Prozesses zu gewährleisten. Dieses Konzept ist in der bayerischen Abwasserwirtschaft unter dem Begriff „Straubinger Modell“ bekannt [Buchmeier 2006]. Zur Rückgewinnung des Phosphors werden die mineralischen Rückstände der Verbrennung nasschemisch aufbereitet.

4.3.2 Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens

Beim betrachteten Verfahren handelt es sich um ein nasschemisches Verfahren, das die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen mittels Säureaufschluss ermöglicht. Dazu wird der in den Aschen enthaltene Phosphor mit verdünnter Salzsäure rückgelöst und die vorliegenden Metalle mittels Solventextraktion entfernt, welche als Metallhydroxide ausfallen. Anschließend fällt unter Zugabe von Calciumoxid und Natronlauge der im Raffinat gelöste Phosphor als Calciumhydrogenphosphat aus. Mithilfe einer

Extraktionsmittel-aufbereitung können die benötigten Reextraktions-chemikalien zum Teil im Kreislauf geführt werden [Pinnekamp et al. 2010].

4.3.3 Vor- und Nachteile

Da es sich bei der betrachteten Phosphorrückgewinnungstechnologie um ein nasschemisches Verfahren handelt, wirken der Ausbaugröße der Anlage mit Sicherheit limitierende Faktoren entgegen. Dies begründet sich vor allem in den benötigten Reaktoren, Rührwerken und Chemikalienvorlagebehältern, die an das Platzangebot der jeweiligen Kläranlage angepasst werden müssen. Zudem können bei der Säurebehandlung großer Aschenvolumina Probleme mit der Handhabbarkeit auftreten, da hierfür großdimensionierte Rührwerke benötigt werden, was eine gleichmäßig effiziente Rücklösung des Phosphors erschweren kann. Ist jedoch das Platzangebot an der jeweiligen Kläranlage groß genug, ist es denkbar, mittels einer zweistraßig angeordneten Phosphorrückgewinnung eine größere Menge an Asche zu behandeln.

Nach den derzeitigen Erkenntnissen ist der hohe Verbrauch an Betriebsmitteln, insbesondere Salzsäure, der entscheidende Kostenfaktor. Daher muss die Senkung des Chemikalieneinsatzes für eine wirtschaftlich tragbare Umsetzung des Verfahrens als unbedingt notwendig erachtet werden. Dies lässt sich bei einer Realisierung der Anlage in Versuchen vor Ort erneut prüfen, um eine Optimierung der Rückgewinnung anstreben zu können.

Die nasschemische Rückgewinnung von Phosphor aus Aschen im Kontext von Szenario 1 erweist sich für den Freistaat als eine sinnvolle Möglichkeit an Standorten einer Klärschlammmonoverbrennung mit einem Durchsatz unter 5.000 Mg TM/a.

Tabelle 3:
Darstellung
spezifischer
Kennparameter von
Szenario 1

Empfohlene Verfahren für	Kläranlagen über 100 000 EW in ländlichen Regionen (z. B. Straubing)
Derzeitiger Verfahrensmaßstab	Halbtechnisch
Inputmaterial	Klärschlammasche, Tiermehlasche
Empfohlene Inputmenge	< 5 000 Mg TM/a
Empfohlene Transportdistanz	< 30 km (im Fall von Nassschlamm) < 50 km (im Fall von entwässertem Schlamm)
Effizienz des Verfahrens	90 %
Spezifische Kosten [Pinnekamp et al. 2010, Sartorius & Tettenborn 2011]	4,5 €/kg P – 5,5 €/kg P
THG-Emission (ohne Transport) [eigene Berechnungen]	34,50 kg CO ₂ -Äq/kg P
Betriebsmittelbedarf [Pinnekamp et al. 2010, eigene Berechnungen]	sehr hoch 1 200 kg HCl (30 Gew.-%)/Mg Asche 330 kg CaO/Mg Asche 250 kg NH ₃ (25 Gew.-%)/Mg Asche 2 kg Extraktionsmittel (Alamine 336)/Mg Asche
Zentralität	semizentral
Gewonnenes Produkt	Calciumhydrogenphosphat (CaHPO ₄)
P-Pflanzenverfügbarkeit [Waida 2011]	85,2 % P ₂ O ₅ -citrsl.
Entsorgungspflicht pro Mg Asche für [Pinnekamp et al. 2010]	600 kg Laugungsrückstand ASN: 19 02 05* 250 l Reextraktionsabwasser ASN: 19 02 07* 20 kg Reextraktionsrückstand ASN: 19 02 05* 10 m ³ Prozessabwasser (Indirekteinleiterqualität)

4.4 Phosphorrückgewinnung in großstädtischen Regionen (Szenario 2)

4.4.1 Beschreibung Szenario 2

Mechanisch entwässerter Klärschlamm wird einer zentral gelegenen großstädtischen Kläranlage angedient, um die zu behandelnde Klärschlammmenge und letztendlich den Phosphoroutput zu vergrößern. Am zentralen Standort wird der Klärschlamm auf 85 % TM getrocknet und anschließend brikettiert. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Klärschlamm zusammen mit Tiermehl zu verpressen. In einem Schmelzofen erfolgt die Schmelzvergasung der Briketts. Das gewonnene Gas wird zu Synthesegasqualität aufbereitet und in einem BHKW verstromt. Die abgestochene Schlacke wird mittels Wasserbad granuliert, aufbereitet und kann im Anschluss daran als Düngemittel verwendet werden.

4.4.2 Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens

Beim betrachteten Verfahren handelt es sich um ein schmelzmetallurgisches Verfahren mit dem Ziel der stofflichen und energetischen Verwertung von P-haltigen Abfällen wie Klärschlamm oder tierischen Nebenprodukten. Daher handelt es sich um kein klassisches Phosphorrückgewinnungsverfahren, sondern um eine innovative Entsorgungsmöglichkeit von Klärschlamm bei gleichzeitiger Rückgewinnung eines nährstoffreichen und schwermetallarmen Phosphatdüngemittlersatzes.

Zunächst wird der getrocknete Klärschlamm brikettiert und anschließend unter Zugabe von Koks und Sauerstoff bei Temperaturen von bis zu 2.000 °C in einem Schmelzofen vergast. Das dabei entstehende heizwertreiche Ofengas kann nach einer Aufbereitung zur energetischen Verwertung genutzt werden. Schwermetalle werden in einer getrennt abgestochenen Metalllegierung gebunden bzw. verdampfen und werden in der Gasreinigung abgeschieden. Die flüssige Schlacke wird bei 1.450 °C abgestochen und im Wasserbad granuliert und kann nach einer mechanischen Aufbereitung direkt als Phosphordünger eingesetzt werden [Ingitec 2009].

4.4.3 Vor- und Nachteile

Die Vorteile des Szenarios liegen darin begründet, dass in einem einzigen Schritt sowohl das stoffliche als auch das energetische Potenzial der P-haltigen Abfallstoffe erschlossen werden kann. Dies trägt sowohl zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit als auch der THG-Betrachtung des Verfahrens, aufgrund einer Gutschrift von CO₂-Äquivalenten für die Strom- und Wärmeerzeugung im BHKW, bei. Zudem lassen sich Abfallströme unterschiedlicher Materialeigenschaften zusammen behandeln. Durch die Annahme von Abfall, die Verstromung von Synthesegas und den Verkauf von Dünger und Roheisen, das bei der Behandlung zusätzlich als Produkt anfällt,

bestehen erfolgsversprechende Aussichten auf einen wirtschaftlich wettbewerbsfähigen Betrieb der Phosphorrückgewinnung. Ein energetisch optimales Ergebnis kann aber nur erreicht werden, wenn für die Trocknung des Klärschlammes eine nutzbare Abwärmequelle zur Verfügung steht, da die Abwärme aus der Schmelzvergasung für die Trocknung des Klärschlammes auf Trockenmassegehalte von 85 % nicht ausreichend ist. Zudem entsteht im Gegensatz zu Szenario 1 kein reines Phosphatprodukt, sondern eine schwermetallfreie Schlacke mit Nährstoffgehalten ähnlich von Thomasmehl, einem Nebenprodukt der Stahl- und Eisenerzeugung. Dadurch ist ein direkter Einsatz des Rezyklats als Beimischung zu Primärphosphaten in der Düngemittelindustrie nicht möglich. Für eine erfolgreiche Vermarktung des Sekundärdüngemittels ist somit die Bildung eines neuen Absatzmarktes notwendig.

Sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht stellt sich dieses Szenario als potenziell vorteilhaft dar und sollte im Falle einer erfolgreichen Umsetzung im Pilotmaßstab primär für einen Ausbau der Phosphorrückgewinnung angedacht werden. Jedoch muss für eine optimale Nutzung des Verfahrens eine genügend große Klärschlammmenge als Energieträger zur Verfügung stehen.

Tabelle 4:
Darstellung
spezifischer
Kennparameter von
Szenario 2

Empfohlene Verfahren für	Großstädtische Kläranlagen ohne Monoverbrennung über 100 000 EW (z. B. Nürnberg)
Derzeitiger Verfahrensmaßstab	Halbtechnisch
Inputmaterial	Klärschlammmasche, Tiermehlasche
Empfohlene Inputmenge	10 000 – 15 000 Mg TM/a
Empfohlene Transportdistanz	< 50 km
Effizienz des Verfahrens	90 %
Spezifische Kosten* [Jardin 2010]	7,6 €/kg P – 9,1 €/kg P
THG-Emission (ohne Transport) [eigene Berechnungen]	1 kg CO ₂ -Äq/kg P (mit Abwärmequelle) 13,48 kg CO ₂ -Äq/kg P (ohne Abwärmequelle)
Betriebsmittelbedarf [Ingitec 2009, eigene Berechnungen]	moderat - hoch 330 kg O ₂ /Mg Briketts TM 70 kg Koks/Mg Briketts TM
Zentralität	semizentral
Gewonnenes Produkt	Phosphatreiche Schlacke (ähnlich Thomasmehl)
P-Pflanzenverfügbarkeit [Waida 2011]	93,5 % P ₂ O ₅ -citrsl.
Entsorgungspflicht für	Rückstände der Rauchgasreinigung

*Bei den spez. Kosten handelt es sich um die Gesamtkosten für entwässerten Klärschlamm ohne Verkaufserlöse für die P-haltige Schlacke

4.5 Phosphorrückgewinnung in Ballungsräumen (Szenario 3)

4.5.1 Beschreibung Szenario 3

Mechanisch entwässerter Klärschlamm wird einer zentral gelegenen Kläranlage im Ballungsraum angedient, um die zu behandelnde Klärschlammmenge und letztendlich den Phosphoroutput zu vergrößern. Am zentralen Standort wird der Klärschlamm auf 45 % TM getrocknet und anschließend in einer Monoverbrennung thermisch behandelt. Die dabei freiwerdende Verbrennungsenergie kann über eine Dampfturbine zur Stromerzeugung genutzt werden, um die Energieautarkie des Prozesses zu gewährleisten. Die bei der Monoverbrennung entstehende Prozesswärme kann zur Trocknung des Klärschlammes genutzt werden. Zur Rückgewinnung des Phosphors werden die mineralischen Rückstände zusammen mit Magnesium- oder Calciumchlorid pelletiert und in einem Drehrohrofen thermisch behandelt. Die schwermetallfreie Asche kann anschließend aufbereitet und als Düngemittel ausgebracht werden.

4.5.2 Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens

Beim betrachteten Verfahren handelt es sich um ein thermisches Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammaschen. Unter Zugabe einer wässrigen Magnesium- oder Calciumchlorid-Lösung wird die Asche pelletiert und in einem Drehrohrofen bei ca. 850 bis 1.000 °C behandelt. Dabei erfolgt weitestgehend eine Entfrachtung der Asche von Schwermetallen, die über die Abgasreinigung ausgetragen werden. Die schwermetallfreie Asche wird pelletiert und kann anschließend direkt als landwirtschaftlicher Phosphatdünger verwendet werden. Bei Bedarf können dem Düngemittel weitere Nährstoffe wie Kalium oder Stickstoff zugegeben werden [BAFU 2009a].

4.5.3 Vor- und Nachteile

Der Vorteil dieses Verfahrens zur Rückgewinnung von Phosphor ist die Flexibilität der Ausbaugröße. So ist es möglich, den Drehrohrofen für große als auch für geringe Kapazitäten auszulegen, wodurch sich dieses Szenario auch für geringere Aschemengen anbieten würde. Jedoch empfiehlt es sich, die Ausbaugröße des Drehrohrofens großen Aschemengen anzupassen, da es eine vergleichsweise unkomplizierte Verfahrenstechnik darstellt. Bei der Schwermetallentfrachtung der Aschen entstehen in geringen Mengen hochkonzentrierte Filterstäube, die entweder als gefährliche Abfälle deponiert werden müssen, oder in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung des Klärschlammes als Ausgangsmaterial für eine Wertstoffrückgewinnung wie Kupfer oder Zink dienen können. Ein entscheidendes Kriterium werden der hohe Energiebedarf des Verfahrens und die Korrosionsfestigkeit der Anlage gegenüber chlorhaltigen Abgasen sein, was sich bei zunehmenden Korrosionserscheinungen als kostentreibender Faktor herausstellen kann.

Zusätzlich ist anzumerken, dass für das anfallende Düngemittel, je nach Chemismus des Inputmaterials, eine Kennzeichnungspflicht nach der Düngemittelverordnung für das Element Nickel bestehen kann. Wie in Szenario 2 fällt auch bei diesem Verfahren kein reines Phosphatprodukt an, welches in der Düngemittelindustrie zu Primärphosphaten beigemischt werden könnte. Dieses Szenario erscheint vorteilhaft für zentrale Standorte einer Klärschlammmonoverbrennung, an der Mengen über 20.000 Mg TM/a durchgesetzt werden.

Tabelle 5:
Darstellung
spezifischer
Kennparameter von
Szenario 3

Empfohlene Verfahren für	Ballungsräume (z. B. München)
Derzeitiger Verfahrensmaßstab	halbtechnisch
Inputmaterial	Klärschlammasche, Tiermehlasche
Empfohlene Inputmenge	> 20 000 Mg TM/a
Empfohlene Transportdistanz	< 50 km
Effizienz des Verfahrens	90 %
Spezifische Kosten [Jardin 2010, Pinnekamp et al. 2011]	0,8 – 2,6 €/kg P
THG-Emission (ohne Transport) [eigene Berechnungen]	18,49 kg CO ₂ -Äq/kg P
Betriebsmittelbedarf [Ingitec 2009, eigene Berechnungen]	moderat 156 kg (Ca, Mg)Cl ₂ /Mg Asche
Zentralität	zentral
Gewonnenes Produkt	Ca-Mg-Phosphat
P-Pflanzenverfügbarkeit [Waida 2011]	> 88 % P ₂ O ₅ -citrsl.
Entsorgungspflicht für	schwermetallige Filterstäube

4.6 Phosphorrückgewinnung aus Überstandswasser mit vorheriger biologischer Phosphorelimination und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk (Szenario 4-1)

4.6.1 Beschreibung Szenario 4-1 und 4-2

Die Szenarien 4-1 und 4-2 unterscheiden sich lediglich im eigentlichen Rückgewinnungsverfahren, während die Randbedingungen in beiden Szenarien identisch bleiben. Als Voraussetzungen sind Kläranlagen mit einer vermehrten biologischen Phosphorelimination (Bio-P) und einer anaeroben Schlammstabilisierung erforderlich. Dies liegt darin begründet, dass die betrachteten Verfahren Phosphor über den Einsatz von Laugen rücklösen. Unter alkalischen Bedingungen geht hauptsächlich biologisch gebundener Phosphor in Lösung, wohingegen chemisch gebundener Phosphor nur durch sauren Aufschluss gelöst wird [Weideler et al. 2005]. Die anaerobe Schlammstabilisierung ist notwendig, da der für die Fällung von Magnesium-Ammonium-Phosphaten (MAP) benötigte Stickstoff in Form von Ammoniak im Faulschlamm gebunden vorliegt, während bei der aeroben Stabilisierung Stickstoff zu NO_x oxidiert und in die Atmosphäre ausgast.

Nach Rückgewinnung des Phosphors wird der Klärschlamm mechanisch entwässert, auf über 85 % TM getrocknet und im Zementwerk mitverbrannt. Neben einer energetischen Verwertung findet zudem eine stoffliche Verwertung des Klärschlammes als Klinkerphase im Zement statt. Voraussetzung für ein energetisch optimales Ergebnis ist das Vorhandensein einer Abwärmequelle zur Trocknung des Klärschlammes. Alternativ besteht die Möglichkeit, den entwässerten Klärschlamm an das Zementwerk zu transportieren und erst vor Ort zu trocknen, da generell in Zementwerken der Wärmestrom aus der Klinkerkühlung produktionsintern kaum genutzt wird. Diese Option ist derzeit im Zementwerk in Karlstadt realisiert. Diese Möglichkeit muss jedoch für den jeweiligen Standort separat geprüft werden, da mit einer zentralen Trocknung von Klärschlamm ein beträchtlicher Transport von Wasser einhergeht und der Umgang mit entwässertem Klärschlamm an Zementwerken aus hygienischer und emissionstechnischer Sicht problematisch erscheinen kann.

4.6.2 Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens

Für die Phosphornutzung wird Überstandswasser aus dem Vor- und Nacheindicker sowie das Schlammwasser aus der maschinellen Schlammwässerung genutzt [BAFU 2009a]. Eine Filtrationsanlage (z.B. Tuchfilter) sorgt für die Entfernung störender Schlammpartikel. Den nährstoffreichen Schlammwässern wird als Fällmittel Magnesiumoxid (MgO) und zur Einstellung des pH-Wertes Natronlauge (NaOH) zugegeben, wodurch Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) auskristallisiert und aufgrund seiner

hohen Dichte am Boden des Reaktors sedimentiert. Das MAP wird aus dem Kristallisationsreaktor ausgeschleust und anschließend getrocknet [Montag 2008a].

4.6.3 Vor- und Nachteile

Aufgrund der geringen Rückgewinnungseffizienz von nur 30 % des Phosphorzulaufes eignet sich die Phosphorrückgewinnung aus Überstandswässern als Interims- und Initiaillösung ehe eine wirtschaftliche Umsetzung großtechnischer Anlagen zur effizienten Rückgewinnung des Phosphors aus Klärschlamm oder Klärschlammaschen möglich ist.

Da das betrachtete Rückgewinnungsverfahren auf eine vermehrte biologische Phosphorelimination in Kombination mit einer anaeroben Schlammstabilisierung angewiesen ist, beschränkt sich das Potenzial dieses Szenarios derzeit auf nur einen Bruchteil der bayerischen Kläranlagen. Für eine effiziente Rückgewinnung wäre eine Umstellung der Kläranlagen von chemischer Phosphorelimination auf Bio-P notwendig. Zur Einhaltung des Phosphorgrenzwertes im Ablauf einer Kläranlage wäre möglicherweise zusätzlich eine chemische Fällung des Phosphors im Zulauf zur Nachklärung zwingend. Des Weiteren müssen aus verfahrenstechnischen Gründen zusätzliche Eindickervolumina an den Kläranlagen geschaffen werden, da die Aufenthaltszeiten des Überschussschlammes für eine verbesserte Rücklösung des Phosphors länger bemessen sind [Montag 2008a].

Die Vorteile dieses Szenarios liegen in der kurzfristigen Umsetzbarkeit des Rückgewinnungsverfahrens, der positiven THG-Betrachtung und in der Substitution fossiler Brennstoffe bei der Mitverbrennung des Klärschlammes im Zementwerk.

Tabelle 6:
Darstellung
spezifischer
Kennparameter von
Szenario 4-1

Empfohlene Verfahren für	Kläranlagen mit betriebseigener Faulung
Derzeitiger Verfahrensmaßstab	halbtechnisch
Inputmaterial	Überstandswasser
Empfohlene Ausbaugröße	> 20 000 EW
Voraussetzungen	Bio-P, anaerobe Schlammstabilisierung
Effizienz	30 %
Spezifische Kosten [Montag 2008a, Pinnekamp 2011]	7,72 – 8,92 €/kg P
THG-Emission [eigene Berechnungen]	-27,08 kg CO ₂ -Äq/kg P
Betriebsmittelbedarf [Montag 2008a, eigene Berechnungen]	Gering 45,7 kg MgO/Mg TM 10 kg NaOH/Mg TM
Zentralität	dezentral
Gewonnenes Produkt	MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat)
P-Pflanzenverfügbarkeit [Waida 2011]	k.A.
Entsorgungspflicht für	keine Rückstände

4.7 Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm mit vorheriger biologischer Phosphorelimination und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk (Szenario 4-2)

4.7.1 Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens

Dieses Verfahren wurde ursprünglich entwickelt, um betriebstechnische Probleme im Bereich der Schlammbehandlung wie störende MAP-Inkrustationen in Rohrleitungen von Bio-P Anlagen zu vermeiden. Das Verfahrensprinzip beruht dabei auf einer Luftstrippung, mit der CO₂ aus dem Faulschlamm entfernt wird. Durch den Anstieg im pH-Wert kristallisiert unter Zudosierung von Magnesiumchlorid (MgCl₂) Magnesium-Ammonium-Phosphat aus. Das ausgefällte MAP und der Faulschlamm müssen mittels Hydrozyklon oder Airliftreaktor voneinander getrennt werden. Die MAP-Kristalle werden gewaschen und können anschließend als Düngemittel ausgebracht werden [BAFU 2009a].

4.7.2 Vor- und Nachteile

Aufgrund der geringen Rückgewinnungseffizienz von maximal 45 % des Phosphorzulaufes eignet sich die Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm als Interims- und Initiallösung ehe eine wirtschaftliche Umsetzung großtechnischer Anlagen zur effizienten Rückgewinnung des Phosphors aus Klärschlamm oder Klärschlammaschen möglich ist.

Da das betrachtete Rückgewinnungsverfahren auf eine vermehrte biologische Phosphorelimination in Kombination mit einer anaeroben Schlammstabilisierung angewiesen ist, beschränkt sich das Potenzial dieses Szenarios derzeit auf nur einen Bruchteil der bayerischen Kläranlagen. Für eine effiziente Rückgewinnung wäre eine Umstellung der Kläranlagen von chemischer Phosphorelimination auf Bio-P notwendig. Zur Einhaltung des Phosphorgrenzwertes im Ablauf einer Kläranlage wäre möglicherweise zusätzlich eine chemische Fällung des Phosphors im Zulauf zur Nachklärung zwingend.

Die Reduktion von Phosphor im Faulschlamm wirkt sich positiv auf die Schlammmentwässerung aus, da Phosphate ansonsten die wasserbindenden Eigenschaften des Schlammes erhöhen. Neben dem Vorteil einer wesentlich verbesserten Schlammmentwässerung werden Inkrustationserscheinungen in Rohrleitungen und Pumpen vermieden. Da eine Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm derzeit noch nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig erscheint, müssen die Aspekte einer erleichterten und kosteneffizienten Betriebsführung der Bio-P Kläranlage in den Vordergrund gestellt werden.

Weitere Vorteile dieses Szenarios liegen in der kurzfristigen Umsetzbarkeit des Rückgewinnungsverfahrens, der Einsparung von Emission und in der Substitution fossiler Brennstoffe bei der Mitverbrennung des Klärschlammes im Zementwerk.

Tabelle 7:
Darstellung
spezifischer
Kennparameter von
Szenario 4-2

Empfohlene Verfahren für	Kläranlagen mit betriebseigener Faulung
Derzeitiger Verfahrensmaßstab	großtechnisch
Inputmaterial	Faulschlamm
Empfohlene Ausbaugröße	> 20 000 EW
Voraussetzungen	Bio-P, anaerobe Schlammstabilisierung
Effizienz	max. 45 %
Spezifische Kosten	k. A.
THG-Emission [eigene Berechnungen]	16,61 kg CO ₂ -Äq/kg P
Betriebsmittelbedarf [Ewert 2011]	sehr gering 4,5 kg MgCl ₂ /m ³ Faulschlamm
Zentralität	dezentral
Gewonnenes Produkt	MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat)
P-Pflanzenverfügbarkeit [Waida 2011]	98,8 % P ₂ O ₅ -citrl.
Entsorgungspflicht für	keine Rückstände

4.8 Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm ohne biologische Phosphorelimination und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk (Szenario 4-3)

4.8.1 Beschreibung Szenario 4-3

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Unterszenarien 4-1 und 4-2 ist für die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm mit anschließender Mitverbrennung im Zementwerk in Szenario 4-3 keine biologische Phosphorelimination notwendig, da in dem angedachten Verfahren Phosphor mittels einer starken Säure rückgelöst wird. Wie zuvor bedarf es jedoch auch hier einer anaeroben Schlammstabilisierung.

Nach Rückgewinnung des Phosphors wird der Klärschlamm mechanisch entwässert, auf über 85 % TM getrocknet und im Zementwerk mitverbrannt. Neben einer energetischen Verwertung findet zudem eine stoffliche Verwertung des Klärschlamms als Klinkerphase im Zement statt. Voraussetzung für ein energetisch optimales Ergebnis ist das Vorhandensein einer Abwärmequelle zur Trocknung des Klärschlamms.

4.8.2 Beschreibung des angedachten Rückgewinnungsverfahrens

Der im anaerob stabilisierten Faulschlamm enthaltene Phosphor wird mit Schwefelsäure (H_2SO_4) rückgelöst und die flüssige Phase von den Feststoffen durch eine Kammer-filterpresse abgetrennt. Zur Fällung des Phosphors als MAP wird der pH-Wert mit Natronlauge (NaOH) auf ca. 8,5 angehoben. Um zu vermeiden, dass dabei die ebenfalls rückgelösten Ca-, Fe-, und Al-Ionen mit Phosphor zu unlöslichen Verbindungen reagieren, werden diese Kationen zuvor mit Zitronensäure komplexiert. Im optimalen pH-Bereich von 8,5 wird die MAP-Fällung durch Zugabe von Magnesiumoxid (MgO) begünstigt [Weideler 2008].

4.8.3 Vor- und Nachteile

Der große Vorteil gegenüber Szenario 4-1 und 4-2 ist, dass keine Verfahrensumstellung auf eine vermehrte biologische Phosphorelimination notwendig ist. Zudem können mit Szenario 2 etwa 55 bis 65 % der gesamten Phosphorfracht im Zulauf einer Kläranlage recycelt werden. In Folge dessen ließe sich kurzfristig ein größeres Potenzial in Bayern erschließen als mit den zuvor betrachteten nasschemischen Verfahren aus Überstandswasser oder Faulschlamm. Durch die Mitverbrennung des Klärschlammes lässt sich auch in diesem Szenario ein Teil der fossilen Brennstoffe im Zementwerk substituieren. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht wirkt sich jedoch der hohe Betriebsmittelbedarf nachteilig auf die Verfahrensbewertung aus.

In Verbindung mit der Mitverbrennung des Klärschlammes im Zementwerk erweist sich dieses Szenario in kurz- bis mittelfristiger Hinsicht als sinnvolle Initiallösung ehe eine effizientere Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm oder Klärschlammaschen etabliert werden kann.

Tabelle 8:
Darstellung
spezifischer
Kennparameter von
Szenario 4-3

Empfohlene Verfahren für	Kläranlagen mit betriebseigener Faulung
Derzeitiger Verfahrensmaßstab	Pilotanlage
Inputmaterial	Faulschlamm
Empfohlene Ausbaugröße	> 20 000 EW
Voraussetzungen	anaerobe Schlammstabilisierung
Effizienz	55 - 65 %
Spezifische Kosten	k. A.
THG-Emission (ohne Transport) [eigene Berechnungen]	-8,91 kg CO ₂ -Äq/kg P (mit Abwärmequelle) 29,47 kg CO ₂ -Äq/kg P (ohne Abwärmequelle)
Betriebsmittelbedarf [Steinmetz et al. 2011]	hoch 11 l Zitronensäure (50 Gew.-%)/m ³ Faulschlamm 8 l H ₂ SO ₄ (78 Gew.-%)/m ³ Faulschlamm 7 l NaOH (50 Gew.-%)/m ³ Faulschlamm 1,5 kg MgO (92 Gew.-%)/m ³ Faulschlamm
Zentralität	dezentral
Gewonnenes Produkt	MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat)
P-Pflanzenverfügbarkeit [Waida 2011]	58,9 % P ₂ O ₅ -citrsl.
Entsorgungspflicht für	Überstand nach der MAP-Fällung

4.9 Diskussion

4.9.1 Kosten der Phosphorrückgewinnung

Aus technischer Sicht bedarf eine langfristig vollständige Erschließung des Phosphorpotenzials in Bayern in den Bereichen Abwasserwirtschaft und tierischer Nebenprodukte einer effizienten und wirtschaftlich rentablen Verfahrenstechnik sowie einer Gewinnung von gut pflanzenverfügbaren und schadstofffreien Sekundär-phosphaten. Jedoch kann derzeit keines der in den Szenarien betrachteten effizienten Rückgewinnungsverfahren (Rücklöseraten von 90 %) aus Klärschlamm(-aschen) mit der Produktion von Düngemittel aus Rohphosphaten wettbewerbsfähig konkurrieren. Dieser Konflikt zwischen Verfahrensaufwand und Betriebs- und Investitionskosten ist das größte Hemmnis für eine schnelle Umsetzung einer Phosphorrückgewinnung. Daher ist es ratsam, aufgrund der in der Regel höheren Kosten dieser effizienten Recyclingtechnologien zunächst auf weniger effiziente, dafür im Vergleich kostengünstigere nasschemische Verfahren zurückzugreifen, um im Freistaat

Bayern kurzfristig eine Phosphorrückgewinnung zu etablieren. Synergieeffekte wie Kosteneinsparungen bei der Klärschlammbehandlung auf Bio-P Kläranlagen können zusätzliche Anreize bilden.

In Bild 9 werden die Szenarien anhand der spezifischen Kosten der betrachteten Rückgewinnungsverfahren in €/kg P und der Höhe des Betriebsmittelbedarfs verglichen. Im Falle nicht vorhandener Literaturwerte bezüglich der Kosten wurden diese aufgrund der Verfahrenstechnik als relative Kosten geschätzt. Die geringen spezifischen Kosten in Szenario 3 sind zu hinterfragen, da diese trotz hohem Energiebedarf des Verfahrens leicht oberhalb bzw. sogar unter dem Marktpreis von Rohphosphat liegen (Stand Januar 2012: 1,2 €/kg P). Es ist unklar welche Zusatznutzen in die Kostenschätzung einbezogen wurden, um die Konkurrenzfähigkeit mit herkömmlichen Düngemitteln zu erreichen [Horn et al. 2011].

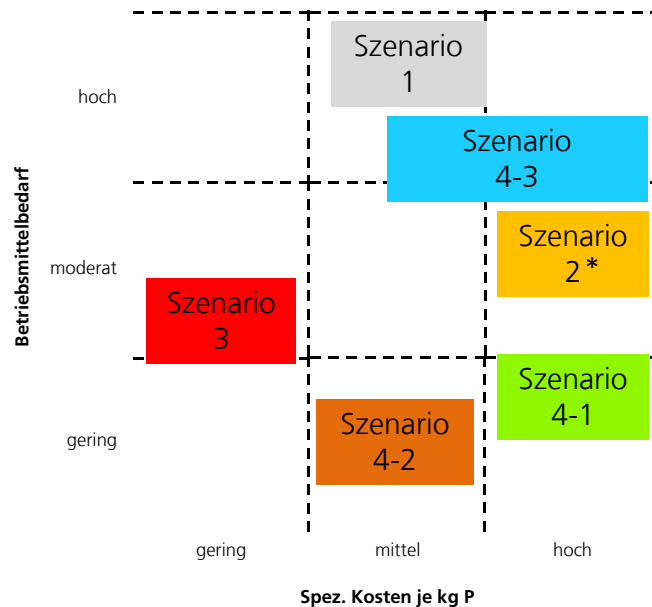
In Szenario 1 wirkt sich der hohe Betriebsmittelbedarf des Rückgewinnungsverfahrens negativ auf die spezifischen Kosten aus. Diese liegen jedoch im Vergleich mit den anderen Szenarien im Mittelfeld, wodurch bei einer Senkung des Betriebsmittelbedarfs eine Chance für eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Realisierung gegeben sein kann.

Das in Szenario 2 betrachtete Verfahren trägt laut Verfahrensentwickler zur Senkung der Klärschlamm Entsorgungskosten bei. In einer Machbarkeitsstudie für eine bayerische Kläranlage der Größenklasse 5 wurde in einer GuV-Rechnung unter besonderer Berücksichtigung der standortspezifischen Gegebenheiten gezeigt, dass je nach Erlös für das gewonnene Rezyklat eine Verringerung der betriebsinternen spezifischen Entsorgungskosten um 17 bis maximal 50 % erreicht werden kann.

Für die Szenarien 4-2 und 4-3 sind keine Literaturangaben zu den Kosten verfügbar. Es ist aber davon auszugehen, dass die spezifischen Kosten in Szenario 4-3 verfahrensbedingt höher anzusetzen sind, als in Szenario 4-1 und 4-2, da der hohe Bedarf an Säuren und Komplexbildnern als kostentreibender Faktor angesehen wird.

Bild 9:

Vergleich der spezifischen Kosten je kg P und des Betriebsmittelbedarfs der Rückgewinnungsverfahren basierend auf unterschiedlichen Literaturangaben der Verfahrensentwickler



* inkl. Kosten für thermische Klärschlammbehandlung

Erlöse aus dem Düngemittelverkauf oder der Klärschlammabnahme sind in den Kosten nicht berücksichtigt, wodurch bei erfolgreicher Umsetzung einer bayernweiten Phosphorrückgewinnung mit einer Verringerung der spezifischen Kosten zu rechnen ist. Zudem fördern Lerneffekte während des Betriebs der Rückgewinnung eine Kostensenkung. Zu erwarten ist, dass diese je nach Verfahrensart unterschiedlich ausfallen. So ist bei nasschemischen Verfahren aufgrund des geringen Innovationsgrades mit geringeren Lerneffekten als bei thermischen Verfahren zu rechnen. Mit Hilfe dieser Lerneffekte können die Verfahren kostengünstiger gestaltet und das recycelte Phosphat schneller wettbewerbsfähig werden [Sartorius & Tettenborn 2011]. Daher ist es ratsam, mittelfristig in die Technologien der thermischen Verfahren einzusteigen, um Lern- und Skaleneffekte für eine Kostendegression seitens der Technologie bei gleichzeitig steigenden Rohphosphatkosten zu nutzen, um in weiterer Folge frühzeitig die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren garantieren zu können.

4.9.2 Treibhausgas-Betrachtung der Szenarien

Für jedes einzelne Szenario wurde zusätzlich zu den Kennparametern aus Literaturangaben die Treibhausgasemission (THG) der gesamtheitlichen Phosphorrückgewinnung betrachtet. Neben dem eigentlichen Recyclingverfahren wurden die in Bild 10 angeführten Vorbehandlungsschritte berücksichtigt.

Bild 10:
Die für die
Treibhausgas-
Betrachtung der P-
Rückgewinnung
herangezogenen
Prozessschritte



In Bild 11 ist für jedes Szenario die THG-Emission in kg CO₂-Äquivalente/kg P dargestellt. Die zur Berechnung herangezogenen Daten beruhen auf dem aktuellen deutschen Strom-/ Wärmemix und auf Angaben der Verfahrenshersteller zu notwendigen Vorbehandlungsschritten (Trocknung, Monoverbrennung usw.), technischen Merkmalen der Phosphorrückgewinnung (Rührwerke, Pumpen usw.) und dem Bedarf an Chemikalien. Zusätzlich wurde zur Quantifizierung der Angaben auf Umweltdatenbanken wie GEMIS Version 4.5 und GaBi Version. 4.126 zurückgegriffen. Da bei der Ergebnisauswertung die Treibhausgas-Emission auf die produzierte Menge Sekundärphosphor bezogen wird, ist eine vergleichende Darstellung gegen ein Referenzszenario „derzeitige Entsorgung von Klärschlamm“ nicht zielführend, da bisher noch kein Phosphor rückgewonnen wird. Allgemein gilt, dass mit steigender Effizienz des Verfahrens die Komplexität, zum Teil der Bedarf an Chemikalien und somit auch die Emission an Treibhausgasen zunimmt.

Hinsichtlich der Emission von Treibhausgasen stellen sich Szenario 4-1 und 4-2 als optimale Lösung dar, da der Betriebsmittelbedarf beider Rückgewinnungsverfahren gering ist, keine entsorgungspflichtigen Rückstände anfallen und zusätzlich eine Substitution von fossilen Brennstoffen bei der Mitverbrennung im Zementwerk stattfindet. Berücksichtigt wurden die Prozessschritte Transport, mechanische Entwässerung, Trocknung und Phosphorrückgewinnung auf Trockenmassegehalte von 85 %, Transport (angenommene Transportdistanz von 100 km inkl. Leerfahrten) und Mitverbrennung im Zementwerk.

Dieselben Prozessschritte liegen den Berechnungen zu Szenario 4-3 zugrunde. Da allerdings für das betrachtete nasschemische Verfahren ein beträchtlicher Bedarf an Chemikalien wie Schwefel- und Zitronensäure besteht, ergeben sich im Vergleich mit den beiden anderen Unterszenarien höhere THG-Emissionen.

Die THG-Emissionen der Szenarien 4-1, 4-2 und 4-3 lassen sich durch die Einbindung von ansonsten ungenutzter Abwärme, welche bezüglich des Treibhausgaspotenzials als neutrale Energiequelle angesehen werden kann, beträchtlich vermindern. Selbst das ungünstige Szenario 4-3 würde dann, wie in Bild 11 dargestellt, zu einer Klimaentlastung gegenüber der Verwendung

mineralischer Phosphordünger führen. Auf eine diesbezügliche Variation der Szenarien 4-1 und 4-2 wurde allerdings aufgrund des geringen Rückgewinnungspotenzials dieser Szenarien für Bayern (siehe Kapitel 4.9.3) verzichtet.

Szenario 2 weist von den effizienten Rückgewinnungsverfahren (Rückgewinnungsraten von 90 %) die beste THG-Betrachtung auf. Dies liegt vor allem in der Gutschrift für die Umsetzung des Synthesegases im BHKW begründet. Ist zudem noch eine geeignete Abwärmequelle zur Trocknung des Klärschlammes auf 85 % TM gegeben, kann eine annähernd klimaneutrale Klärschlammensorgung bei gleichzeitiger Rückgewinnung von Phosphor erreicht werden. Aufgrund der Verwertung der Klärschlammengen direkt auf der Kläranlage wurde bei der THG-Betrachtung der Prozessschritt Transport nicht weiter betrachtet. Es wurden lediglich die Prozessschritte mechanische Entwässerung und Trocknung auf 85 % TM, Klärschlammvergasung, Strom- und Wärmeerzeugung im BHKW, Gasreinigung und Phosphorrückgewinnung berücksichtigt.

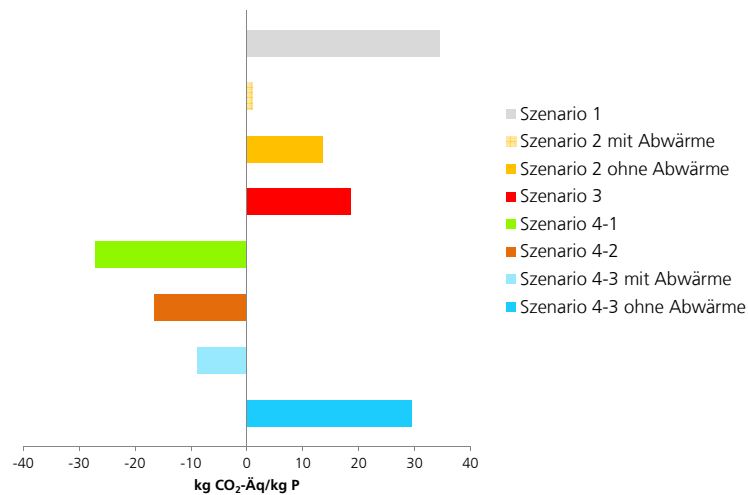
Die höchsten Treibhausgas-Emissionen ergaben sich in Szenario 1 für die Prozessschritte mechanische Entwässerung und Trocknung auf 65 % TM, Monoverbrennung auf der Kläranlage, Stromerzeugung in einer Mikrogastrurbine und Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage. Die Prozesswärme der Verbrennung wird vollständig zur Trocknung des Klärschlammes verwendet. Die schlechte THG-Betrachtung ist vor allem auf den hohen Bedarf an Salzsäure, Ammoniak und Calciumoxid zurückzuführen. Wird eine Senkung des Betriebsmittelbedarfs erreicht, ist demzufolge auch mit einer Verbesserung der THG-Betrachtung zu rechnen. Zusätzlich könnte eine Einbindung von ungenutzter Abwärme auch zu einer Stromgutschrift führen.

Szenario 3 liegt bei den Treibhausgas-Emissionen im Mittelfeld. Die betrachteten Prozessschritte umfassen mechanische Entwässerung und Trocknung auf 45 % TM, Monoverbrennung auf der Kläranlage, Stromerzeugung in einer Dampfturbine und Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage.

Prinzipiell würde auch bei den Szenarien 1 und 3 die Einbindung ungenutzter Abwärme zu einer Verringerung der THG-Emissionen führen. Im Gegensatz zu den Szenarien 2 und 4 sind die thermischen Verwertungsprozesse jedoch noch nicht primär auf den Aspekt einer möglichst klimaneutralen Energiebereitstellung sondern im Hinblick auf eine möglichst energieeffiziente Klärschlammensorgung ausgerichtet. Im Szenario 1 bestehen mittelfristig F- und E-Ansätze zur Erhöhung des Wirkungsgrades der Verstromung, wodurch allerdings eine standortspezifische Neuauslegung der Anlagen durchsätze erforderlich wird. Die in Szenario 3 praktizierte Verbrennung des

Klärschlamm in einer großtechnischen Wirbelschichtanlage wird üblicherweise auf Trockenmassenanteile um 45 % TM ausgelegt. Bei einer Heizwert-erhöhung des Brennstoffs durch Abwärmeeinbindung sind in bestehenden Anlagen somit Restriktionen durch die Ausgestaltung von Kessel und Turbine zu beachten. Im Falle des Neubaus von Verbrennungsanlagen sollte jedoch die Nutzung von Niedertemperatur-abwärme zur Klärschlamm-trocknung und eine in der Folge verbesserte Auskopplung von Strom und/oder Prozessdampf bei der Verfahrensauslegung beachtet werden.

Bild 11:
Vergleichende
Darstellung der THG-
Betrachtung sämtlicher
Szenarien



4.9.3 Potenzialerschließung der Szenarien

Die Potenzialberechnungen im Anhang zeigen, dass in Bayern maximal 70 % des Mineraldüngerabsatzes über Sekundärphosphate substituiert werden könnten. Das größte Potenzial erschließt sich demnach über die Bereiche Abwasserwirtschaft und tierischer Nebenprodukte. Die in diesem Kapitel ausgearbeiteten Szenarien sollen helfen, dieses Potenzial vollständig zu erschließen, wobei gewisse Restriktionen berücksichtigt werden müssen.

Wie viel Phosphor schlussendlich rückgewonnen werden kann, hängt von der zur Verfügung stehenden Klärschlammmenge und der Rückgewinnungseffizienz der Recyclingverfahren ab. Diese ist bei Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm(-aschen) am höchsten, womit 90 % des im Zulauf einer Kläranlage befindlichen Phosphors rückgewonnen werden können (siehe Szenario 1 bis 3). Nasschemische Aufschlussverfahren (Szenario 4) zeichnen

sich, wie in Kapitel 4.9.1 beschrieben, zwar durch eine hohe Kosteneffizienz aus, sind aber was die Rückgewinnungsrate betrifft deutlich ineffizienter im Vergleich zu Recyclingverfahren mit thermischen Behandlungsschritten. Demzufolge können maximal 65 % des Phosphors rückgewonnen werden. Ein zusätzliches Kriterium ist die Menge an Ausgangsmaterial, die für eine Rückgewinnung zur Verfügung stehen muss. Nach aller Voraussicht ließe sich mit Szenario 2 die größte Menge an Klärschlamm behandeln, da kurzfristig keine neuen Monoverbrennungskapazitäten geschaffen werden müssen. Des Weiteren ist die für das Szenario empfohlene Menge von 10.000 bis 15.000 Mg TM/a häufig auf landkreisübergreifender Ebene zu erfassen, wodurch keine allzu großen Transportentfernungen notwendig werden.

Das geringste Potenzial wird über Szenario 4-1 und 4-2 erschlossen, da beide Rückgewinnungsverfahren auf Kläranlagen mit einer vermehrten biologischen Phosphorelimination (Bio-P) angewiesen sind. Nach Auskunft des Bayerischen Landesamts für Umwelt betreiben derzeit nur 13 Kläranlagen in Bayern ausschließlich eine biologische Phosphorelimination, wobei bei 6 Anlagen eine zusätzliche Fällung mit Eisensalzen angenommen wird [LfU 2012b]. Da überdies eine betriebseigene Faulung für die Rückgewinnung notwendig ist, sinkt das Rückgewinnungspotenzial mit Hilfe von nasschemischen Verfahren basierend auf Rücklösung des Phosphors mittels Laugen auf nahezu null. Daher wäre für einen Ausbau von Szenario 4-1 und 4-2 eine massiv angelegte Umstellung der Kläranlagen auf Bio-P notwendig, wodurch eine Einhaltung der Phosphorgrenzwerte im Ablauf der Kläranlagen problematisch erscheinen könnte.

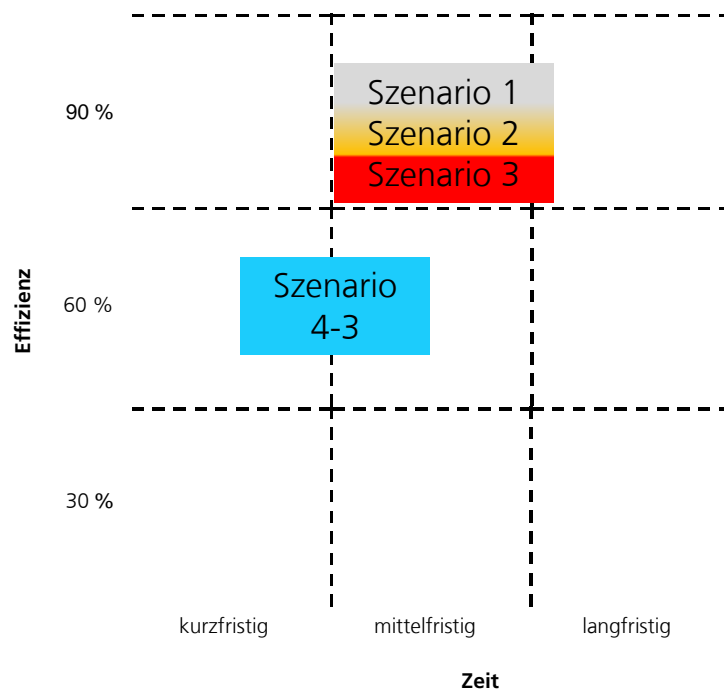
Im Bereich der nasschemischen Verfahren zeichnet sich Szenario 4-3 als das mit dem größten Rückgewinnungspotenzial aus. Unter Annahme eines täglichen einwohner-spezifischen Klärschlammanfalls von 30 g TM/(EW·d) ließe sich auf den 36 bayerischen Kläranlagen der Größenklasse 5 mit einer Gesamtausbaugröße von 12,34 Mio. EW [LfU 2010b], abzüglich der Menge an Klärschlamm, die in Monoverbrennungsanlagen verwertet wird, ein Potenzial von knapp 1.500 Mg P/a erschließen.

4.9.4 Zeitliche Umsetzbarkeit der Szenarien

Wie schnell ein Szenario umgesetzt werden kann, hängt vor allem vom Entwicklungsstand, der Wirtschaftlichkeit und der Komplexität des Rückgewinnungsverfahrens ab. Unter diesen Aspekten wurde die zeitliche Umsetzung der einzelnen Szenarien abgeschätzt und in Bild 12 im Vergleich mit der Effizienz der Rückgewinnungsverfahren dargestellt. Szenario 4-2 ist wegen des bereits erfolgreich umgesetzten Betriebs der Recycling-technologie an einer Kläranlage der Größenklasse 5 am kurzfristigsten zu realisieren, während die in Szenarien 1, 2, 3 und 4-1 betrachteten Verfahren erst im halbtechnischen Maßstab erprobt wurden und somit erst mittelfristig

verwirklicht werden können. Das Rückgewinnungsverfahren aus Szenario 4-3 befindet sich derzeit im Pilotbetrieb an einer Kläranlage der Größenklasse 5 und ließe sich in Bayern bei erfolgreichem Abschluss kurz- bis mittelfristig etablieren.

Bild 12:
Vergleich der zeitlichen Umsetzbarkeit und Effizienz des Rückgewinnungsverfahrens basierend auf unterschiedlichen Literaturangaben der Verfahrensentwickler



5 Handlungsempfehlungen und Entscheidungsgrundlagen

5.1 Identifikation von Handlungsfeldern

Die in den folgenden Unterkapiteln erarbeiteten möglichen Handlungsempfehlungen sind in die drei Handlungsfelder Phosphorrückgewinnung, politische Maßnahmen und flankierende Maßnahmen gegliedert und sind Ansatzpunkte für ein künftig nachhaltiges Phosphor-management im Freistaat Bayern.

Welche der betrachteten Handlungsmöglichkeiten für Bayern und Deutschland gelten und wie deren Bedeutungen untereinander gewichtet werden, ist im Anschluss an Kapitel 5 dargestellt (Bild 15). Zudem kann in Bild 16 eine Zuordnung der verschiedenen Handlungsempfehlungen zu den Handlungsebenen EU, Deutschland und Bayern entnommen werden.

5.2 Handlungsfeld: Phosphorrückgewinnung

5.2.1 Umsetzung Szenario 1 in ländlichen Regionen

Der Vorteil von Szenario 1 liegt in der Möglichkeit, auch geringe Mengen an Klärschlamm zu erfassen ($< 5.000 \text{ Mg TM/a}$), was sich vor allem für ländlich geprägte Regionen Bayerns als günstig erweist. Als Grundlage für dieses Szenario dient das sogenannte „Straubinger Modell“, wodurch kleinen bis mittelgroßen Kläranlagen ein alternatives Klärschlamm-entsorgungskonzept geboten wird. Als entscheidender Nachteil wird allerdings der derzeitige hohe Betriebsmittelbedarf erachtet, wodurch die THG-Betrachtung im Vergleich mit den anderen Szenarien negativ bewertet werden muss. Zusätzlich stellt der hohe Chemikalienverbrauch einen kostentreibenden Faktor dar. Die entscheidende Voraussetzung für eine Umsetzung von Szenario 1 ist ein Ausbau der Monoverbrennungskapazitäten.

Auch hier sollte die Umsetzung einer Pilot- und Demonstrationsanlage erste Erfahrungen und eventuellen Optimierungsbedarf hinsichtlich des Betriebsmittelverbrauchs aufzeigen. Als weiterführende Forschungsarbeit wäre der Einsatz von Mikroorganismen zur Aufbereitung der Klärschlammaschen als Alternativverfahren zu überprüfen. Die Umsetzung von Szenario 1 ist für Regionen empfehlenswert, deren Klärschlamm mittels Szenario 2 nicht wirtschaftlich erfasst und behandelt werden kann.

5.2.2 Umsetzung Szenario 2 in großstädtischen Regionen

Szenario 2 erscheint als das aussichtsreichste Modell für eine Umsetzung einer landesweiten Phosphorrückgewinnung, da gleichzeitig das stoffliche als auch das energetische Potenzial von Klärschlamm genutzt werden kann. Bei geeigneter Standortwahl kann bei vorhandener Abwärmequelle für die Trocknung des Klärschlammes eine annähernd klimaneutrale THG-Betrachtung erreicht werden. Zusätzlich ist laut Verfahrensentwickler eine Reduzierung der spezifischen Klärschlamm Entsorgungskosten im Vergleich mit den jetzigen Verwertungswegen möglich. Nachteilig erweist sich die aufwändige und für Kläranlagenbetreiber unübliche schmelzmetallurgische Verfahrenstechnik, wodurch zusätzlich geschultes Personal an den Anlagenstandorten notwendig sein wird.

Für eine mittelfristige Umsetzung des Szenarios ist die Planung und Förderung einer Pilot- und Demonstrationsanlage des betrachteten Szenarios zweckmäßig. Zusätzlich sollten weiterführend geeignete Standorte in Bayern aufgezeigt werden, die eine für die Trocknung des Klärschlammes auf 85 % TM ausreichende Abwärmequelle und die empfohlene Klärschlammmenge von 10.000 bis 15.000 Mg TM/a aufweisen.

5.2.3 Umsetzung Szenario 3 in Ballungsräumen

Das in Szenario 3 betrachtete Verfahren zeichnet sich durch dessen Flexibilität bei der Ausbaugröße aus. So ist es möglich, größere Mengen Klärschlamm (> 20.000 Mg TM/a) verfahrenstechnisch relativ unkompliziert zu behandeln, da der Umgang mit der notwendigen Technik aus der Zementindustrie bekannt ist. Zudem fallen im Vergleich mit Szenario 1 nur geringe Mengen an schwermetallbelasteten Rückständen an. Jedoch ist auch in Szenario 3 der Ausbau der Monoverbrennungskapazitäten erforderlich. Des Weiteren findet nur eine unzureichende Entfrachtung des Elements Nickel aus den Aschen statt, wodurch der gewonnene Sekundärdünger bei zu hohen Nickelgehalten nach der Düngemittelverordnung kennzeichnungspflichtig wird. Verfahrenstechnisch ist zudem das Korrosionsverhalten der Anlage kritisch zu betrachten, da bei der Schwermetallentfrachtung chloridreiche Ofengase die Peripherie stark beanspruchen können, was sich nachteilig auf Kosten und Betriebsführung auswirken kann.

An einem geeigneten Standort in Bayern sollte mit Hilfe einer Pilot- und Demonstrationsanlage das Rückgewinnungsverfahren weiter erprobt und optimiert werden. Zudem ist es ratsam, auf Basis des Pilotprojektes die Wirtschaftlichkeit und das Korrosionsverhalten der Ofengase detaillierter zu bewerten.

5.2.4 Umsetzung Szenario 4-3 an geeigneten Standorten

Szenario 4-3 stellt einen möglichen Ansatz für eine kurzfristig umsetzbare Phosphorrückgewinnung dar, da keine zusätzlichen Monoverbrennungskapazitäten geschaffen oder umfassende Verfahrensumstellungen seitens der Kläranlagenbetreiber erfolgen müssen. Zudem findet bei gleichzeitiger Kreislaufführung der Ressource Phosphor eine Substitution von fossilen Brennstoffen im Zementwerk statt. Im Vergleich mit den in Szenario 4-1 und 4-2 betrachteten Rückgewinnungsverfahren weist jenes in Szenario 4-3, zum Teil bei den Kosten der THG-Betrachtung und des Betriebsmittelbedarfs, die höchste Rückgewinnungseffizienz auf.

Für eine schnelle Etablierung einer großtechnischen Phosphorrückgewinnung sollten geeignete Kläranlagen mit betriebseigener Schlammstabilisierung und ungenutzter Abwärme für eine Rückgewinnung nach Szenario 4-3 überprüft werden. Als mögliche Standorte kommen Kläranlagen im unmittelbaren Einzug von Müllverbrennungsanlagen oder energieintensiven Industriebetrieben (z. B. Zementwerke, Energieversorgung, Nahrungs- und Lebensmittelindustrie, Papierherstellung usw.) mit ungenutzter Abwärme in Frage. Beispielhaft wäre eine Einbindung ungenutzter Wärme aus naheliegenden Müllheizkraftwerken an Kläranlagen zur Trocknung des Klärschlammes zu überprüfen. Für weiterführende Überlegungen erweist sich der vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit entwickelte Energie-Atlas Bayern als hilfreiches Instrument, um weitere mögliche Standorte zur Umsetzung von Szenario 4-3 aufzuzeigen [StMUG 2012].

Die Ergebnisse aus dem Pilotbetrieb in Baden-Württemberg können helfen, das Verfahren hinsichtlich des Betriebsmittelbedarfs zu optimieren [Kneisel & Laux 2012]. Da jedoch nur maximal 65 % des im Zulauf befindlichen Phosphors rückgewonnen werden können, sollte das hier betrachtete Szenario als Übergangslösung dienen, ehe eine effiziente Rückgewinnung aus Klärschlamm (-aschen) nach den Szenarien 1, 2 und 3 möglich ist.

5.2.5 Forcierung des Ausbaus der Monoverbrennungskapazitäten

Um Phosphor aus Klärschlammaschen rückgewinnen zu können, muss verhindert werden, dass die Phosphorgehalte im Verbrennungsprodukt unnötig verdünnt und die Schadstoffkonzentrationen zusätzlich erhöht werden. Hohe Phosphorausbeuten lassen sich demzufolge durch die Monoverbrennung der Klärschlämme erzielen. Die derzeitige Entsorgung von kommunalen Klärschlämmen in Kraftwerken ist zwar aus energetischer und ökologischer Sicht vorteilhaft, jedoch geht der Phosphor durch diese Art der thermischen Behandlung unwiderruflich verloren, während bei einer Monoverbrennung der Phosphor als Reststoff weiterhin genutzt werden kann. Bei der Verbrennung von Klärschlamm in der Müllverbrennung ist eine

Rückgewinnung von Phosphor aus den Aschen aufgrund der gering vorliegenden P-Konzentration wirtschaftlich nicht tragfähig [MaRes 2010]. Die Rückgewinnung des Phosphors aus den Klärschlammmonoaschen ist derzeit die effektivste Methode des Phosphorrecyclings. Durch die Möglichkeit der Zwischenlagerung der Verbrennungsrückstände stellt diese Art der Klärschlammbehandlung außerdem die Grundlage für eine spätere Phosphorrückgewinnung dar.

Um die Etablierung der Monoverbrennung in Bayern verstärkt voran zu treiben, ist es notwendig, politische Maßnahmen als Handlungsinstrument, beispielsweise strenge Auflagen bei der Mitverbrennung, einzusetzen aber auch ausreichende Kapazitäten für die Zwischenlagerung der Klärschlamm- aschen sicher zu stellen.

5.2.6 Monodeponierung der Klärschlammaschen

Neben der Forcierung des Ausbaus von Monoverbrennungskapazitäten ist die Deponierung der anfallenden Aschen für ein späteres P-Recycling empfehlenswert. Daher ist die Verpflichtung der Monodeponierung von Aschen ab einem bestimmten Phosphorgehalt zu prüfen und die Deponierung dieses Verbrennungsrückstandes genehmigungsrechtlich zu erleichtern.

Die anfallenden Monoaschen können beispielsweise langjährig in separaten Kompartimenten auf Reststoffdeponien abgelagert werden, die einen späteren Rückbau der Aschen für die Rückgewinnung des Phosphors ermöglichen. Entscheidend für die Gewährleistung einer fachgerechten obertägig rückholbaren Ablagerung ist die Qualität der Aschen. Genaue Informationen über die Beschaffenheit der Rückstände aus der Monoverbrennung sind über die Ermittlung des Eluatverhaltens und der Untersuchung der chemischen Stabilität der Aschen im Langzeitverhalten möglich. Da der notwendige Deponieraum für diese Art der Ablagerung nur begrenzt zur Verfügung steht, müssen alternative Ablagerungsmöglichkeiten genutzt werden. Potenzielle Zwischenlagerungsmöglichkeiten können ehemalige Lagerstätten im Tagebau sein. Vor der Verfüllung relevanter Tongruben müssen diese unter Berücksichtigung des Umwelt- und Grundwasserschutzes untersucht werden, um mögliche Risiken ausschließen zu können.

Ist die Ablagerung von Monoaschen in Tongruben aufgrund möglicher Gefährdung des Grundwassers und der Böden nicht zu befürworten, können sich unter Berücksichtigung von Flächenumwidmungsplänen neue Lagerstätten für die Aschen ergeben. Durch die Bundeswehrreform und die damit verbundene Schließung einiger Standorte stehen eventuell nicht weiter genutzte Bunker für die Zwischenlagerung der Monoaschen zur Verfügung. Auch ist zu prüfen, ob es Potenziale in Form von leerstehenden Hallen und Speichern in Industriezonen gibt.

Sobald geeignete Verfahren zur P-Rückgewinnung in Zukunft wirtschaftlich und effektiv einsetzbar sind, können die Aschelager rückgebaut und die Monoaschen aus den Zwischenlagerstätten rückgeholt werden.

5.2.7 Förderung weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Bisher wurden zahlreiche vom Bund und Ländern geförderte Forschungsvorhaben im Bereich der Entwicklung von P-Rückgewinnungsverfahren durchgeführt. Durch die Förderung zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es möglich, den bisherigen Stand der Wissenschaft des Phosphorrecyclings voranzutreiben. Weitere Entwicklungsarbeiten sind vor allem auch im Bereich der Rückholungsmöglichkeiten und der Vermeidung der Phosphormengen in Produktionsabfällen oder Nebenprodukten erforderlich. Außerdem ist eine umfassende Betrachtung und Analyse aller relevanten Stoffflüsse unter Einbeziehung der gesamten Wertschöpfungskette für die Etablierung und Weiterentwicklung geeigneter P-Rückgewinnungsverfahren hinsichtlich der geschlossenen Kreislaufführung notwendig.

Eine zeitnahe Einführung und Umsetzung von P-Rückgewinnungsverfahren als Stand der Technik mit ausreichender Marktdurchdringung wird durch gezielte Fördermaßnahmen und Förderstrategien begünstigt. Zu diesem Zweck ist die Einrichtung eines Expertenrates für die permanente Evaluierung dieser Förderstrategien zu empfehlen. Für die fachliche Begleitung sollen sowohl unabhängige Fachexperten als auch Anlagenbetreiber herangezogen werden. Durch die Überprüfung bereits existierender Verfahren mit Hilfe festgelegter spezifischer Beurteilungskriterien wie beispielsweise Wirtschaftlichkeit, Rückgewinnungsquoten und Pflanzenverfügbarkeit können negative Betriebserfahrungen und technische Probleme gelöst werden und zu einer Optimierung der P-Rückgewinnungsverfahren beitragen.

Damit die Phosphorrückgewinnung zukünftig auch einen wichtigen Bestandteil der nachhaltigen Klärschlammverwertung einnimmt, sollten durch die Schaffung zusätzlicher Förderprogramme Anreize für die Integration von P-Rückgewinnungsverfahren in den Regelbetrieb von bestimmten Abwasserbehandlungsanlagen geschaffen werden.

5.2.8 Verstärkte Nutzung tierischer Nebenprodukte (v. a. Tiermehl-Kategorie 1)

Die für eine Phosphorrückgewinnung in Frage kommenden Kategorien sind Tiermehle der Kategorie 1 mit 3,1 % P und Fleischknochenmehle der Kategorie 3 mit 6,1 % P [Gethke et al. 2005]. Fleisch- und Knochenmehle der Kategorie 1 werden in Deutschland ohne die Nutzung des Phosphors zur Energiegewinnung in Stahlwerken, Zementwerken und Heizkraftwerken verwendet. Tiermehl der Kategorie 2 und 3 wird als organisches Düngemittel

auf unbestelltem Ackerland eingesetzt. Das Tiermehl der Kategorie 3 findet außerdem Anwendung im Bereich der Heimtierfuttermittelproduktion. Tiermehle besitzen neben einem hohen Phosphorgehalt auch einen wesentlichen Anteil an verfügbarem Stickstoff, der hier das entscheidende Düngepotenzial bildet. Die Ausbringung von Tiermehl der Kategorie 2 auf landwirtschaftlich genutztem Grünland ist nicht gewünscht, um eine Aufnahme durch Tiere sicher zu verhindern [MLR 2009]. Angesichts dieser Problematik und unter der Berücksichtigung der bisherigen Verwendung als Bodenverbesserungs- und Düngemittel sind P-Rückgewinnungsgebote aus Knochen- und Tiermehl für die Herstellung hochwertiger Düngemittel vorstellbar. Die alternativen Verwendungsformen, vor allem von Kategorie 3 Materialien, stellen jedoch einen konkurrierenden Verwertungsweg für eine spätere P-Rückgewinnung dar. Die Produktion von Heimtierfutter trägt erheblich zur Wertschöpfung der Futtermittelindustrie bei, womit die Nutzung dieses Stoffstroms zu Zwecken der Phosphorrückgewinnung schwierig und kostenintensiv sein dürfte. Daher sollte zunächst eine verstärkte Nutzung von Tiermehl der Kategorie 1 für die Phosphorrückgewinnung etabliert werden.

Aufgrund des hohen Phosphorgehalts der tierischen Nebenprodukte würde sich eine thermische Behandlung in Monoverbrennungsanlagen mit anschließender Phosphor-rückgewinnung aus den Aschen anbieten. Hier wäre auch eine Behandlung der Tiermehle zusammen mit Klärschlämmen denkbar. Durch die intensive Nutzung tierischer Nebenprodukte wird das P-Rückgewinnungspotenzial deutlich gesteigert. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Vermeidung der energetischen Verwertung der Tiermehle in Mitverbrennungsanlagen. Durch geeignete Gesetzesadaptionen, beispielsweise des Verbots einer Mitverbrennung von bestimmten Stoffen in Abhängigkeit vom Phosphorgehalt können diese ursprünglichen Verwertungsmöglichkeiten unterbunden werden.

5.2.9 Fazit Handlungsfeld: Phosphorrückgewinnung

Phosphorrecycling ist nicht nur ökologisch, sondern langfristig auch ökonomisch sinnvoll, da es zur Verringerung der Abhängigkeit von Importressourcen führt und zugleich die langfristige Sicherstellung der Phosphorversorgung gewährleistet.

Für die Rückholung und Erfassung möglichst großer Phosphormengen aus den Klärschlämmen und Klärschlammaschen sind vor allem die Szenarien 1 bis 3 relevant. Voraussetzung für die Optimierung und Umsetzung dieser drei Verfahren ist die Förderung von Demonstrationsanlagen an geeigneten Standorten in Bayern. Als kurzfristig umsetzbare Variante erweist sich Szenario 4-3, für das trotz eingeschränkter Rückgewinnungseffizienz einige im Hinblick auf die Energieverwendung interessante Standorte existieren. In Anbetracht der Effektivität der P-Rückgewinnung aus Monoaschen ist im

Allgemeinen jedoch die Monoverbrennung mit anschließender Zwischenlagerung der Verbrennungsrückstände in Bayern forciert zu etablieren. In Fachgesprächen sollen die Möglichkeiten der Aschedeponierung und eventuelle Problematiken erörtert werden, um die Ablagerung der Aschen genehmigungsrechtlich zu erleichtern. Ein nachhaltiges Phosphormanagement sollte zudem auch andere Stoffströme, beispielsweise tierische Nebenprodukte oder Gülle, sofern keine direkte landwirtschaftliche Verwertung erfolgen soll, in die Betrachtung einbeziehen. Um diese zusätzlichen Phosphorquellen systematisch zu nutzen und eventuell mögliche Verbesserungen in der bisherigen Verwendungspraxis zu erreichen, sind hier ebenfalls Fachgespräche unter den relevanten Akteuren erforderlich. Damit zukünftig eine zunehmende Integration der Phosphorrückgewinnung in Bayern stattfindet, ist es weiterhin sinnvoll, bereits existierende Verfahren durch Fördermaßnahmen in ihrer Funktionsweise zu optimieren und neue Entwicklungen zu unterstützen.

5.3 Handlungsfeld: Politische Maßnahme

5.3.1 Formulierung von Zielsetzungen zur P-Rückgewinnung

Vom Freistaat Bayern wurden vor dem Hintergrund einer absehbaren Phosphorverknappung erste wichtige Schritte in Richtung einer echten Kreislaufwirtschaft unternommen. Als gestaltendes Mitglied des Ad-hoc Arbeitskreises der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall zum Thema Phosphorrückgewinnung trägt Bayern entscheidend zur bundesweiten Diskussion in Sachen Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung bei.

Es erscheint nun ratsam, rasch einen politischen Fahrplan mit klaren Zielsetzungen zur Phosphorrückgewinnung zu erarbeiten, idealerweise als Kabinetts- und Landtagsbeschluss. Einprägsame und greifbare Ziele, die als Anhaltspunkte und Orientierung dienen, sind bislang weder auf Bundes- noch auf Landesebene definiert. Die Ziele würden einen permanenten Abgleich zwischen der Ist- und der Soll-Situation ermöglichen, wodurch gezielt denkbaren Hindernissen entgegensteuert werden kann.

5.3.2 Rückgewinnungsgebot/-quote für Phosphor

Die Einführung eines Rückgewinnungsgebots von Phosphor in der Abwasserwirtschaft würde sich als das effektivste Mittel für die Initiierung einer Phosphorrückgewinnung erweisen. Zugleich würde das Gebot einen Innovationsschub im Hinblick auf die technische Verfahrensentwicklung der Rückgewinnungstechnologien hervorrufen. Zukünftig wäre eine Erweiterung des Gebots auf ähnlich mengenrelevante phosphorhaltige Stoffströme wie Tiermehle oder Gärrückstände denkbar, sofern keine direkte landwirt-

schaftliche Verwertung erfolgen soll. Dennoch garantiert ein alleiniges Rückgewinnungsgebot nicht die Entstehung eines Sekundärrohstoffmarktes. Zum einen findet keine Kostendeckung der Verfahren statt, wodurch die gewonnenen Sekundärphosphate nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig sind und zum anderen wird ohne definierte Qualitätsstandards keine öffentliche Akzeptanz gegenüber Sekundärdüngemitteln geschaffen.

Die Randbedingungen für ein Rückgewinnungsgebot müssen sehr sorgfältig geprüft werden. Zum einen bedarf es einer Definition und Adaption der gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie einer Verfügbarkeit von aussichtsreichen und effizienten Rückgewinnungsverfahren. Darüber hinaus müssen die gewonnenen Sekundärphosphate klare Qualitätsmerkmale wie eine hohe Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor und eine geringe Schadstoffbelastung wie Schwermetalle und organische Schadstoffe aufweisen. Da eine wirtschaftlich rentable Rückgewinnung derzeit noch nicht möglich ist, sollte eine Ausweisung und Zuordnung der Mehrkosten erfolgen. Da es sich im Fall von Klärschlamm um Abfall handelt, sollte die Zuständigkeit hierfür bei den Abfallentsorgungspflichtigen liegen. Zusätzlich ist die Bestimmung einer Rückgewinnungsquote zweckmäßig, die sich am Stand der Technik und den konkreten Massenströmen mit bekannter Zusammensetzung und Herkunft orientiert. Mit der Aussprache einer verbindlichen Recyclingquote können effiziente technische Entwicklungen im Bereich der Phosphorrückgewinnung gefördert werden.

5.3.3 Anreizmodell – Investitionsförderung

Alternativ zu einem Rückgewinnungsgebot könnte die Phosphorrückgewinnung über Anreizmodelle gefördert werden. Analog zum Marktanzreizprogramm für erneuerbare Energien im Wärmemarkt [BMU 2011] wären Investitionszuschüsse bzw. vergünstigte Darlehen für die Etablierung von Rückgewinnungsverfahren aus phosphorhaltigen Stoffströmen denkbar. Diese Unterstützung freiwilliger Maßnahmen vermeidet somit mögliche Akzeptanzprobleme strenger staatlicher Vorgaben, bedarf aber der Bereitstellung ausreichender Haushaltsmittel.

Wie auch bei Rückgewinnungsgebot bzw. -quote sind definierte Qualitätskriterien für die zurückgewonnenen Phosphorverbindungen nötig. Weiterhin sollte die Förderung an Effizienzkriterien der Rückgewinnungsverfahren gekoppelt werden. Die Höhe der Förderung sollte die Preisdifferenz zu konventionellen Phosphordüngern ausgleichen, damit die Sekundärphosphate zu wirtschaftlich attraktiven Konditionen angeboten werden können. Um der Volatilität des Rohphosphatpreises Rechnung zu tragen und eine mögliche Überförderung auszuschließen, ließe sich die staatliche Unterstützung eventuell an einen geeigneten Preisindex koppeln. Trotz eines gegenüber konventionellen Düngern attraktiven Preises wird auch durch dieses

Anreizmodell als alleinige Maßnahme noch nicht zwingend ein Absatzmarkt geschaffen, so dass hier ebenso flankierende Maßnahmen erforderlich sind.

5.3.4 Anreizmodell – Produktvergütung

Anreize zur Umsetzung von Rückgewinnungsverfahren könnten ebenso über eine garantierte (Mindest-)Vergütung für die erzeugten Sekundärphosphate gesetzt werden. Ein Absatzmarkt könnte bei diesem ans Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) angelehnten Modell über eine Abnahmepflicht der phosphorverarbeitenden Industrien geschaffen und eventuelle Mehrkosten wie beim EEG auf alle Abnehmer umgelegt werden. Zur Vermeidung von Unterfinanzierung oder Überförderung sollte ein derartiges Modell einer Evaluierung in kurzen Abständen unterzogen werden bzw. auch hier die Vergütungsstruktur an geeignete Preisindices gekoppelt sein.

Eine Eigenschaft der Produktvergütung ist, dass etablierte, bewährte Verfahren mit hohem Output finanziell begünstigt werden. Um auch innovative Verfahren, die in der Erprobungs- und Etablierungsphase häufiger durch Anlagenstillstände, Umbauten und dergleichen gekennzeichnet sind, angemessen zu unterstützen, ist eine Kombination mit Maßnahmen wie der Innovationsförderung sinnvoll.

5.3.5 Beimischungspflicht von Sekundärphosphaten

Um zu garantieren, dass rückgewonnenes Phosphat tatsächlich in der Düngemittelindustrie zur Herstellung von Mineraldüngern verarbeitet wird, ließe sich eine Mindestquote für die Nutzung von Sekundärphosphat in Primärdüngern formulieren. Folglich würde ein Markt für Sekundärphosphat entstehen und der Schadstoffgehalt in Primärdüngern würde durch die Beimischung geringer belasteter Rezyklate verdünnt werden.

Eine verbindliche Beimischungsquote würde zunächst höhere Düngerpreise zur Folge haben, da die entstehenden Mehrkosten für die Industrie auf die Produkte umgeschlagen werden. Sowohl die Dünger als auch die damit produzierten landwirtschaftlichen Erzeugnisse unterliegen jedoch den Regulativen der Marktwirtschaft, so dass nicht zwangsläufig auch höhere Endverbraucherpreise resultieren.

Wie die Rückgewinnungsquote muss sich eine Beimischungsquote am Stand der Technik und dem bestehenden Rückgewinnungspotenzial orientieren. Zugleich sind für eine Beimischung von Sekundärphosphat geeignete Mengen mit definierter Qualität für eine Nutzung als Düngemittel Voraussetzung. Nachteilig an der Beimischungspflicht wäre deshalb, dass sich verfahrensbedingt nicht alle Recyclingprodukte als Zusätze in der Düngemittelindustrie eignen, da wie beispielsweise in Szenario 2 und 3 keine reinen Phosphate

anfallen, sondern schwermetallarme und nährstoffreiche Aschen oder Schlacken. Für derartige Stoffe können regionale Verwertungswege zur Vermarktung der Sekundärphosphate erschlossen werden und auf die Beimischungsquote angerechnet werden.

Eine erfolgsversprechende Vorgabe der Mindestquote müsste beispielsweise im Rahmen der EU-Düngemittelverordnung geschehen, da 95 % der in Deutschland gehandelten Düngemittel dieser Verordnung unterliegen [MaRes 2010]. Da die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung außerhalb Deutschlands nicht in Frage gestellt wird und somit keine europaweite Phosphorrückgewinnung in absehbarer Zeit etabliert wird, ist eine kurzfristige europäische Regelung mit Einführung einer Beimischungspflicht nicht zu erwarten.

5.3.6 Zertifikatsmodell – Ressourcenschutz

Die gewünschte vermehrte Verwendung von Phosphordüngern aus sekundären Quellen muss nicht zwingend über eine physische Beimischungspflicht in der Düngemittelindustrie sichergestellt werden, sondern könnte stattdessen auch über ein Zertifikatsmodell erreicht werden. Derartige Modelle sollen üblicherweise eine Lenkungswirkung zu den wirtschaftlichsten Umsetzungsmaßnahmen entfachen.

In diesem Fall würden frei handelbare Zertifikate für eine bestimmte Menge an ausgebrachtem Sekundärphosphat erteilt werden, wobei wiederum Qualitätskriterien und die tatsächliche Düngewirkung zu berücksichtigen wären. Die Produzenten bzw. Inverkehrbringer von Düngemittel wären verpflichtet, am Ende jeder Handelsperiode eine bestimmte Anzahl an Zertifikaten für den Sekundärrohstoffeinsatz nachzuweisen. Sofern die Hersteller keine eigenen Beimischungen vornehmen, wofür natürlich ebenfalls Zertifikate erteilt würden, müssten sie gegebenenfalls hohe Preise für fehlende Zertifikate zahlen, was die Verwendung sekundärer Phosphate von anderen Akteuren oder an anderen Orten zusätzlich attraktiv werden lässt. Dies könnte insbesondere das Zusammenspiel lokaler Anbieter und Abnehmer des zurückgewonnenen Phosphors fördern und würde auch solche Sekundärprodukte begünstigen, die sich technisch nicht zur Beimischung zu konventionellen Düngern eignen.

Die zu fordernden Zertifikate orientieren sich dabei an der Absatzmenge konventioneller Dünger sowie dem technisch kurz-, mittel- und langfristig erschließbaren Rückgewinnungspotenzial. Dementsprechend sollten die Vorgaben im Einklang mit den durch die Politik vorgegebenen Zielen (s.o.) in jeder folgenden Handelsperiode ambitioniert gesteigert werden.

Eventuelle Mehrkosten des Sekundärrohstoffeinsatzes würden wie bei der Beimischungspflicht in die Kostenstruktur der landwirtschaftlichen Produktion eingehen und unterliegen somit den Preisbildungsmechanismen des Marktes.

Eine generelle Verteilung der global begrenzten Ressource Phosphor über ein Zuteilungssystem auf Basis von Zertifikaten oder ähnlichem wäre wegen der komplexen internationalen Verflechtungen und der Einzelinteressen von Nationen mit großen Lagerstätten wohl kaum durchsetzbar.

5.3.7 Zertifikatsmodell – Schadstoffausbringung

Ein Zertifikatsmodell könnte ebenso die Schadstoffbelastung ausgebrachter Phosphordünger begrenzen, beispielsweise indem den Inverkehrbringern Schadstofffrachten gemäß ihren derzeitigen Marktanteilen und der aktuellen Belastung handelsüblicher mineralischer Dünger zugestanden werden. Sofern die Belastung der Importe mit Uran, Cadmium oder sonstigen Schadstoffen steigt, wären gleichbleibende oder wachsende Marktanteile nicht mehr durch die verteilten „Verschmutzungsrechte“ in Bezug auf das Schutzgut Boden abgedeckt. Um weitere Erlöse zu erzielen, dürften nur noch gering belastete Düngemittel veräußert werden, wie es Sekundärphosphate in der Regel darstellen. Da alternativ auch eine Schadstoffentfernung aus Primärdüngern möglich wäre, würde dieses Modell nicht zwingend eine Förderung der Phosphorrückgewinnung nach sich ziehen, sondern die jeweils kostengünstigere Variante bevorzugen. Andererseits könnten Inverkehrbringer von Sekundärphosphaten durch den Verkauf nicht benötigter Schadstoffzertifikate zusätzliche Erlöse erzielen.

Derzeit liegen keine konkreten Daten für Bayern vor, die einen direkten Zusammenhang zwischen der Uran- und Cadmiumbelastung heimischer Böden und Gewässer und der Ausbringung phosphathaltiger Düngemittel belegen. Für eine zukünftige Argumentation hinsichtlich eines Zertifizierungssystems in Form einer Schadstoffabgabe müssen weiterführende Forschungsarbeiten angeregt werden, die eine Korrelation von Düngung und Uran- und/oder Cadmiumbelastung von landwirtschaftlichen Nutzflächen und Gewässern erlauben.

5.3.8 Besteuerung von Rohphosphat oder Phosphatabgabe

Eine Besteuerung von Rohphosphaten im Kontext einer Umweltgebühr zur Vermeidung umweltschädlicher Handlungen würde direkt beim Import von Phosphat ansetzen. Als Argumente für eine Phosphatabgabe ließen sich der Schadstoffeintrag auf landwirtschaftliche Flächen durch Phosphatdüngemittel und der ressourcenschonende Umgang mit einem nicht substituierbaren Rohstoff ableiten. Ein Steuersystem für Phosphate bzw. Phosphatdünger wurde bereits 1984 in Schweden und 1996 in Dänemark eingeführt. Die

Etablierung einer solchen Rohstoffsteuer würde Anreize für eine standortoptimierte Düngung setzen, was ein Überdenken jahrzehntelanger Handlungs-routinen bei der Düngung zur Folge haben könnte. Des Weiteren würde eine Gebühr auf Rohphosphate den Sekundärphosphatmarkt fördern, da so Anreize für das Inverkehrbringen von schadstofffreien, sekundärphosphat-haltigen Düngemitteln geschaffen werden [MaRes 2010].

Eine solche Steuer oder Abgabe wäre grundsätzlich nur auf europäischer Ebene zu befürworten, da es durch die zwangsläufig resultierende Erhöhung der Düngemittelpreise bei einer deutschlandweiten Verteuerung zu einer möglichen Wettbewerbsverzerrung der heimischen landwirtschaftlichen Produktion kommen könnte. Der notwendige politische Konsens innerhalb der EU wird kurzfristig nicht erreichbar sein, da dem Thema Phosphor nicht in allen EU-Ländern dieselbe Bedeutung zukommt wie in Deutschland.

5.3.9 Verbot der Mitverbrennung von Klärschlamm ohne vorheriger P-Rückgewinnung

Die Rückgewinnung aus Klärschlammaschen aus der Monoverbrennung ist die effektivste Recyclingmethode für Phosphor. Da aber derzeit nur etwa die Hälfte des in Bayern thermisch behandelten Klärschlammes in die Monoverbrennung geht, steht die Phosphorrückgewinnung aus Aschen in Konkurrenz mit der Mitverbrennung von Klärschlamm in Hausmüllverbrennungsanlagen, Zement- und Kohlekraftwerken. Eine Möglichkeit wäre, ein Verbot für die Verdünnung phosphathaltiger Stoffströme zu erlassen, womit letztendlich mehr Ausgangsmaterial für eine Rückgewinnung zur Verfügung stehen würde. Wird Phosphor aus dem Klärschlamm rückgewonnen, kann dieser im Anschluss im Zementwerk mitverbrannt werden. Dies könnte zu einer vermehrten Nachfrage an phosphatarmem Klärschlamm führen, zumal Phosphor im Zement als Klinkerbestandteil unerwünscht ist. Ferner kann die Zementindustrie auf günstige Ersatzbrennstoffe zurückgreifen, solange dadurch die Kostenstruktur nicht beeinflusst wird. Jedoch stellt ein solches Verbot keinen zwingenden Anreiz für die tatsächliche Etablierung einer Phosphorrückgewinnung dar. Zudem ist eine Mitverbrennung von Klärschlamm angesichts der landwirtschaftlichen Vorsorgegründe sinnvoll und erwünscht, da ein kurzfristiges Verbot zu einer Zunahme der stofflichen, bodenbezogenen Verwertung führen könnte, was der bayerischen Zielsetzung widersprechen würde.

Daher ist im Falle eines Verbots neben dem Ausbau der Monoverbrennungs- und Rückgewinnungskapazitäten eine frühzeitige Ankündigung und schrittweise Umsetzung des Verbots notwendig. Um Anreize hin zu einer erhöhten Monoverbrennung zu setzen, wäre eine juristische Überprüfung eines Einbezugs der Klärschlammmonoverbrennung in die Einspeisevergütung nach EEG zu erwägen [MaRes 2010]. Für explizit diese Thematik empfiehlt es

sich, Fachgespräche mit den betroffenen Akteuren wie der Zementindustrie zu führen. Diese sollen die politische Durchsetzbarkeit und die Bereitschaft der Industrie sowie die Auswirkungen einer solchen Maßnahme aufzeigen.

5.3.10 Fazit Handlungsfeld: Politische Maßnahmen

Erste Priorität sollte die Definition einer im politischen Konsens gestalteten Zielsetzung sein, die permanent überprüft werden kann. Ähnlich dem Ausstieg aus der Atomenergie oder dem Ausbau der erneuerbaren Energien kann eine zeitlich limitierte Vorgabe für das Erreichen eines nachhaltigen Phosphormanagements zielführend sein. In dem aktuell erschienenen Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) wird die Phosphorproblematik konkretisiert und die Notwendigkeit einer Überprüfung von Handlungsmöglichkeiten auf Bund/Länder-Ebene verdeutlicht [ProgRess 2012]. Jedoch wird eine vollständige Abkehr von den landwirtschaftlichen und landschaftsbaulichen Verwertungswegen für Klärschlamm, wie es in der Schweiz seit 2006 der Fall ist, nicht gefordert. Einen wichtigen Punkt spricht ProgRess im Hinblick auf den Phosphoreinsatz in der heimischen Landwirtschaft und Industrie an. Beispielhaft soll der Einsatz von Phosphatdüngemitteln in der Landwirtschaft durch standortoptimierte und bedarfsgerechte Dünge- und Anbausysteme ressourcenschonender gestaltet werden. Des Weiteren muss eine Substitution des Phosphors in Reinigungsmitteln angestrebt werden.

Bezogen auf eine erfolgreiche Umsetzung des Phosphorrecyclings müssen schrittweise politische und wirtschaftliche Steuerinstrumente eingeführt werden, die eine Rückgewinnung bis zum Zeitpunkt der eigenständigen Wirtschaftlichkeit der Verfahren unterstützen und ermöglichen. Dabei ist es unumgänglich, dass einzelne Instrumente kombiniert werden, um so die Effizienz und Nachhaltigkeit des Phosphorrecyclings sicherzustellen. Für eine mittelfristige Initiierung der Rückgewinnung ist die Etablierung eines Rückgewinnungsgebots mit sukzessiver Anpassung einer Recyclingquote an den Stand der Technik vorstellbar. Kurzfristig könnte die Förderung von Investitionen in Rückgewinnungstechnologien entsprechende Aktivitäten auf freiwilliger Basis auslösen, was aber die öffentlichen Haushalte stark belasten würde. Da allerdings noch keine Verwertung der Sekundärphosphate als Düngemittel garantiert ist, müssen zusätzliche Anreize für die Abnahme der Rezyklate geschaffen werden. Diesbezügliche Möglichkeiten wären ein Zertifikatsmodell für die Verwendung der Rezyklate, eine Abnahmepflicht verbunden mit einer garantierten Produktvergütung oder eine Beimischungspflicht als strenge marktregulative Maßnahme. Flankierend wirkt ein Verbot der Mitverbrennung von Klärschlamm ohne vorherige Rückgewinnung des Phosphors, welches das Rückgewinnungspotenzial deutlich erhöhen würde, aber kurzfristig keine Lenkungswirkung in weniger wünschenswerte Verwertungswege ausüben darf.

In Bild 13 und Bild 14 wird die subjektiv eingeschätzte Lenkungswirkung der einzelnen politischen Maßnahmen gewichtet und im Vergleich mit der öffentlichen und politischen Akzeptanz dargestellt. Die angedachte Lenkungswirkung einer politischen Maßnahme nimmt in den folgenden Grafiken mit sinkender Zahl ab.

Die Beimischungspflicht erweist sich als die wirkungsvollste Maßnahme um zu garantieren, dass das recycelte Phosphat in der Düngemittelindustrie eingesetzt wird. Jedoch ist die politische Akzeptanz auf europäischer Ebene kurz- bis mittelfristig als kaum gegeben einzuschätzen. Eine Beimischung wird ebenso durch Recycling-Zertifikate im Sinne des Ressourcenschutzes ermöglicht. Zudem dürfte eine solche Maßnahme unter dem Aspekt des Umwelt- und Ressourcenschutzes eine hohe öffentliche Akzeptanz mit sich bringen.

Bild 13:

Einschätzung der Lenkungswirkung (8 entspricht der größten Lenkungswirkung) und der öffentlichen Akzeptanz der möglichen politischen Maßnahmen

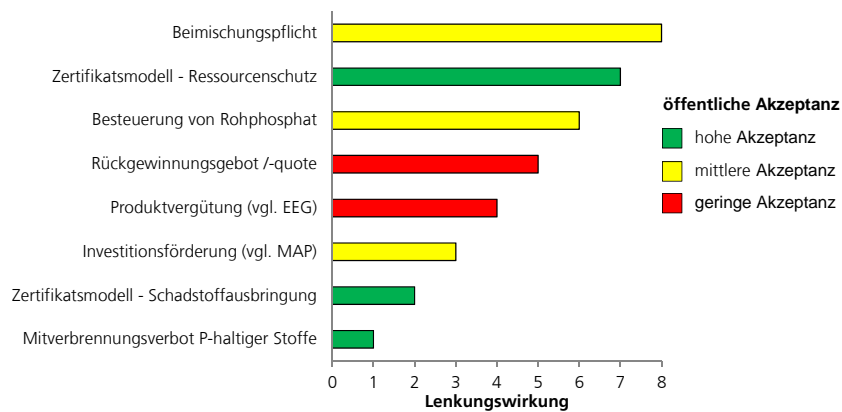
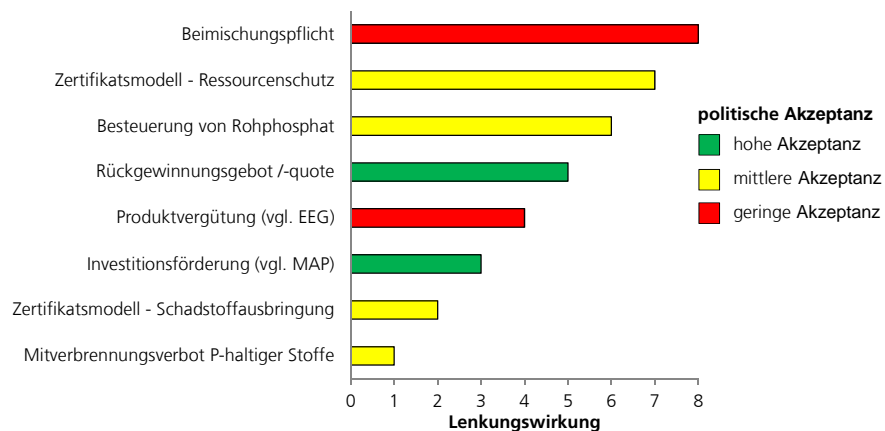


Bild 14:

Einschätzung der Lenkungswirkung (8 entspricht der größten Lenkungswirkung) und der politischen Akzeptanz der möglichen politischen Maßnahmen



Auch durch die Besteuerung von Rohphosphaten wird ein sparsamerer Einsatz von phosphathaltigen Düngemitteln und somit eine Förderung von Phosphatdüngern aus sekundären Quellen ermöglicht. In der Öffentlichkeit ist die Akzeptanz von Steuern jedoch als mittel bis gering einzustufen. Die Etablierung eines Rückgewinnungsgebots/-quote bewirkt zwar unumstößlich eine Rückgewinnung von Phosphor, fördert aber nicht automatisch einen Absatzmarkt für Sekundärphosphate. Ein Rückgewinnungsgebot ist auf politischer Ebene ein geeignetes Instrument um ein Phosphorrecycling zu initiieren, jedoch werden die so entstehenden Mehrkosten eine geringe öffentliche Akzeptanz bewirken. Ein ähnliches Bild zeigt eine mögliche Produktvergütung nach EEG-Vorbild. Auch hier wird die Rückgewinnung von Phosphor nicht zwingend gefördert und wegen der Verteilung der Mehrkosten auf die gesamtheitliche phosphatverarbeitende Industrie dürfte die Akzeptanz sowohl in der Öffentlichkeit als auch in der Politik eher gering ausfallen. Mit Hilfe einer finanziellen Unterstützung der Anlagenbetreiber in Form einer Investitionsförderung wird ein Anreiz für eine Phosphorrückgewinnung gesetzt. Für die Öffentlichkeit steht das Bereitstellen von Haushaltsmitteln meist in Verbindung mit einer Erhöhung der Abgaben, wodurch eine solche Maßnahme eher auf wenig Akzeptanz treffen dürfte. Eine geringe instrumentelle Lenkungswirkung weisen Zertifikate hinsichtlich einer Schadstoffausbringung durch Phosphordünger auf, da die Förderung von Sekundärdüngemitteln durch eine Schadstoffentfrachtung der Rohphosphate verhindert werden kann. Maßnahmen im Zeichen des Umweltschutzes dürften jedoch allgemein eine hohe öffentliche Akzeptanz bewirken. Den geringsten Einfluss auf die Rückgewinnung von Phosphor hat ein Mitverbrennungsverbot von phosphathaltigen Stoffen, da in diesem Fall auf anderweitige Entsorgungswege zurückgegriffen werden kann, wodurch auch die politische Akzeptanz niedriger eingestuft wird als jene der Öffentlichkeit.

5.4 Handlungsfeld: Flankierende Maßnahmen

5.4.1 Fachgespräche zwischen den einzelnen Akteuren

Um die Durchsetzbarkeit, Lenkungswirkung und Akzeptanz der möglichen Handlungsmaßnahmen zu eruieren, bedarf es weiterführender multilateraler Fachgespräche zwischen den jeweiligen Akteuren einer zukünftigen Phosphorrückgewinnung. Fragestellungen zur Umsetzbarkeit und Lenkungswirkung können auf rein politischer Ebene diskutiert werden, jedoch sollten im Vorfeld die Akzeptanz und die notwendigen Voraussetzungen einer Maßnahme im Detail mit den Betroffenen geklärt werden. Als Themen können dabei die gemeinsame Behandlung unterschiedlicher phosphorhaltiger Stoffströme, die regionale und industrielle Verwertung sekundärer Düngemittel oder der Einsatz von Klärschlamm im Zementwerk nach einer Rückholung des Phosphors sein. Direkt die Landwirtschaft betreffende Fragen wie die

Akzeptanz von Düngemitteln aus sekundären Quellen sollen weiterführende Handlungsmöglichkeiten aufweisen. Dies beinhaltet auch eine optimierte Verwertung der Phosphormengen in Wirtschaftsdüngern zur Reduzierung des Mineraldüngereinsatzes.

5.4.2 Informations- und Monitoringplattform

Für die Etablierung eines nachhaltigen Phosphormanagements ist es unabdingbar, die genauen Phosphor-Stoffströme zu identifizieren und diese zu einem konsistenten Gesamtbild zu vereinen. Mit der vorliegenden Initialstudie wurde ein wichtiger erster Ansatzpunkt geschaffen, der als Grundlage für eine künftige detaillierte und umfassende Stoffstromanalyse in Bayern dienen kann. Allerdings erweist sich die Datenlage als unzureichend – zum Teil aufgrund unterschiedlicher Bezugsjahre – und ist zuweilen mit großen Unsicherheiten behaftet.

Um den ganzheitlichen Phosphorhaushalt im Bundesland erfassen zu können, bedarf es gegebenenfalls einer Informationspflicht hinsichtlich der Charakterisierung und Quantifizierung von Phosphorflüssen in phosphatverarbeitenden Wirtschaftszweigen (Chemische Industrie, Lebensmittelindustrie, Düngemittelhersteller und -händler, Landwirtschaft, Abwasserwirtschaft, Metallindustrie). Im Falle von firmeninternen Daten und Statistiken, die der Geheimhaltung unterliegen, wäre eine anonymisierte Erfassung und Aufbereitung der Daten über die jeweils übergeordneten Branchenverbände denkbar. Dies setzt verständlicherweise eine vollständige Kooperation der verschiedenen Akteure aus Wirtschaft und Politik voraus. Des Weiteren ist die Schaffung eines Internetportals über die Thematik Phosphor mit öffentlichkeitswirksamen Informationen empfehlenswert. Diese Informationsplattform hätte den Sinn, wichtige Informationen bezüglich Stand der Technik, aktueller Vorhaben im In- und Ausland, Rückgewinnungspotenziale, Hintergrundinformationen und ähnlichem zu bündeln.

5.4.3 Vermeidung unnötiger Phosphorabflüsse

Auf Basis von Informationen der Stoffstromanalysen lassen sich unnötige Phosphor-Systemverluste identifizieren, denen es durch gezieltes Handeln entgegenzuwirken gilt. So kann das Rückgewinnungspotenzial gesteigert und der Gewässereutrophierung entgegengewirkt werden.

Durch die Erweiterung strengerer Phosphorgrenzwerte im Ablauf einer Kläranlage auf Anlagen der Größenklassen 1 bis 3 ist eine Steigerung der Sekundärphosphatgewinnung zu erzielen. Ein weiterer Schritt zur Steigerung der Ressourceneffizienz in industriellen Produktionen ist die Vermeidung unnötiger Phosphorabflüsse aus Fertigungsprozessen durch Prozesswasseraufbereitung bei gleichzeitiger Phosphorrückgewinnung.

5.4.4 Genehmigungsrechtliche Unterstützung bei der Verfahrensumsetzung

Für eine möglichst zeitnahe Umsetzung der Phosphorrückgewinnung bedarf es einer Hilfestellung bei der behördlichen Genehmigung von Rückgewinnungsverfahren. Zielführend kann hier eine Hilfestellung für ein rasches und sorgfältiges Genehmigungsverfahren insbesondere kleinerer Verbrennungsanlagen sein. Anlagen mit einem Durchsatz von bis zu 3 Mg/h nicht gefährlicher Abfälle lassen sich zwar im vereinfachten Verfahren gemäß § 19 BImSchG genehmigen, wegen ihrer bisher geringen Verbreitung liegen aber vermutlich bei lokalen Behörden, Fachplanern und selbst bei den Anlagenbauern nicht immer umfängliche Erfahrungen über die Genehmigungsprozedur vor. Vorstellbar wäre ein Leitfaden in Form eines best-practice Beispiels von der Planung bis zur Genehmigung einer Rückgewinnungsanlage. Zusätzlich soll die Zusammenarbeit und Koordination zwischen den einzelnen Akteuren gefördert werden.

5.4.5 Förderung des ökologischen Landbaus

Der ökologische Landbau zeichnet sich durch ein nachhaltiges und umweltverträgliches Wirtschaften aus, mit dem Ziel, einen möglichst geschlossenen Nährstoffkreislauf zu erreichen, bei gleichzeitigem Verzicht auf chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel und Wachstumsregulatoren oder leicht lösliche mineralische Düngemittel [BMELV 2012a]. Diese besondere Form der Landwirtschaft ist durch die EG-Öko-Basisverordnung Nr. 834/2007 geregelt, welche den Einsatz von typischen Phosphatdüngemitteln wie (Triple-) Superphosphat, teilaufgeschlossenes Rohphosphat oder Dicalciumphosphat untersagt. Somit trägt der Öko-Landbau zur Einsparung von mineralischen Düngemitteln und somit auch zum Ressourcenschutz bei.

Aktuelle Umfragen im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) zeigten, dass der Konsum von Bio-Produkten in Deutschland im Vergleich mit 2010 gleich geblieben ist, jedoch in Zukunft mit einem Anstieg der Biolebensmittelnachfrage zu rechnen ist [Ökobarometer 2012]. Diese Umstellung in den Ernährungsgewohnheiten der Bürger stellt eine Chance dar, die ökologische Landwirtschaft zu forcieren und den ressourcenschonenden Einsatz von Phosphatdüngemitteln zu ermöglichen. Zusätzlich wäre zu überprüfen, ob sekundär gewonnenes Phosphat als Düngemittel nach der EG-Öko-Basisverordnung zulässig ist, was vermutlich einen Imagegewinn von Sekundärphosphat aus der Abwasserwirtschaft oder der Produktion tierischer Nebenprodukte zur Folge hätte.

Bild 15:
 Priorisierung des Handlungsbedarfs auf den Ebenen Bayern und Deutschland

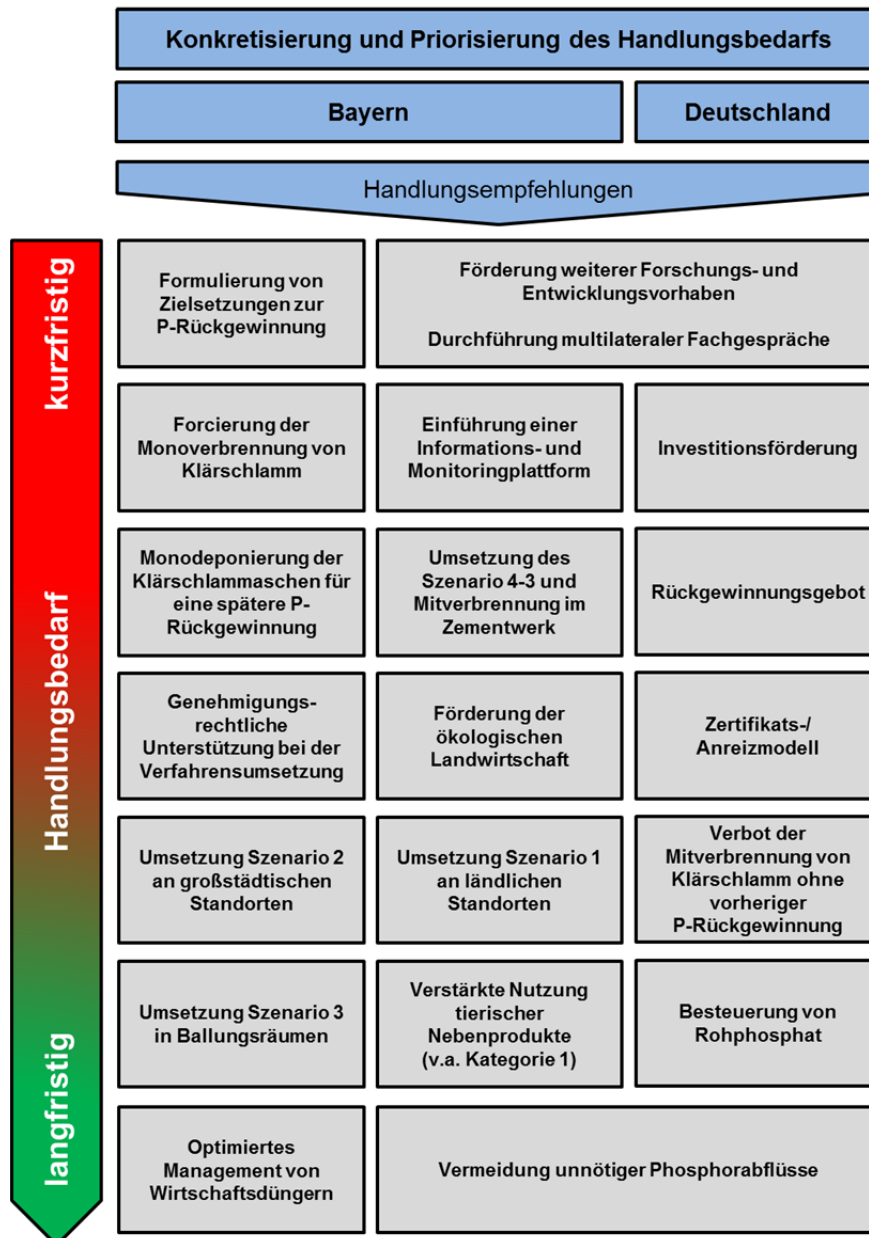




Bild 16:
Handlungsmöglichkeiten auf den Ebenen EU, Deutschland und Bayern

Grundsätzliche Darstellung der Handlungsebenen			
Handlungsfeld	Europäische Union	Deutschland	Bayern
Umsetzung Szenario 2 an großstädtischen Standorten	✗	✓	✓
Umsetzung Szenario 1 an ländlichen Standorten	✗	✓	✓
Umsetzung Szenario 3 in Ballungsräumen	✗	✓	✓
Umsetzung Szenario 4-3 und Mitverbrennung im Zementwerk	✗	✓	✓
Forcierung des Ausbaus der Monoverbrennungskapazitäten	✗	✓	✓
Monodeponierung der Klärschlammaschen für eine spätere P-Rückgewinnung	✗	✓	✓
Förderung weiterer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben	✓	✓	✓
Verstärkte Nutzung tierischer Nebenprodukte (v.a. Kategorie 1)	✗	✓	✓
Optimiertes Management von Wirtschaftsdüngern	✗	✓	✓
Formulierung von Zielsetzungen zur P-Rückgewinnung	✓	✓	✓
Einführung eines Rückgewinnungsgebots von Phosphor aus Klärschlämmen	✓	✓	✗

	Umsetzung des Handlungsfeldes ist möglich		Umsetzung des Handlungsfeldes ist nicht möglich
---	---	--	---

Grundsätzliche Darstellung der Handlungsebenen			
Handlungsfeld	Europäische Union	Deutschland	Bayern
Anreizmodell – Investitionsförderung (vgl. MAP)	✓	✓	✓
Anreizmodell – Produktvergütung (vgl. EEG)	✓	✓	✗
Einführung einer Beimischungsquote für Sekundärphosphate	✓	✗	✗
Zertifikatsmodelle – positiv/negativ (Ressourcenschutz)	✓	✓	✗
Besteuerung von Rohphosphat (Phosphatabgabe)	✓	✓	✗
Verbot der Mitverbrennung von Klärschlamm ohne vorheriger P-Rückgewinnung	✗	✓	✗
Durchführung multilateraler Fachgespräche	✓	✓	✓
Einführung einer Informations- und Monitoringplattform	✓	✓	✓
Vermeidung unnötiger Phosphorabflüsse	✓	✓	✓
Genehmigungsrechtliche Unterstützung bei der Verfahrensumsetzung	✗	✗	✓
Förderung der ökologischen Landwirtschaft	✓	✓	✓

	Umsetzung des Handlungsfeldes ist möglich		Umsetzung des Handlungsfeldes ist nicht möglich
---	---	--	---

Literaturverzeichnis

- ATZ 2009 Quellen, Mengen, Pflanzenverfügbarkeit von Phosphorverbindungen in biogenen Abfällen und Reststoffen – Ermittlung von Substitutionspotenzialen für mineralische P-Dünger, Literaturstudie für das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg, 2009, 45 S.
- BAFU 2009a Bundesamt für Umwelt BAFU: Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung: Eine Bestandsaufnahme, Umwelt-Wissen Nr. 0929, Bundesamt für Umwelt, 2009, Bern, 196 S.
- BAFU 2009b Bundesamt für Umwelt BAFU: Phosphorflüsse der Schweiz: Stand, Risiken und Handlungsempfehlungen, Umwelt-Wissen Nr. 0928, 161 S.
- Birke et al. 2009 Birke, M., Rauch, U., Lorenz, H.: Uranium in stream and mineral water of Federal Republic of Germany, Environ Geochem Health, Springer-Verlag, 2009, S. 693-706
- BMELV 2010 Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2010, Bonn, 2010
<http://berichte.bmelv-statistik.de/EQB-1002000-2010.pdf> (Abgerufen im Dezember 2011)
- BMELV 2012a Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Ökologischer Landbau in Deutschland, Stand Januar 2012,
<http://www.bmelv.de/SharedDocs/Standardartikel/Landwirtschaft/Oekolandbau/OekologischerLandbauDeutschland.html#doc377838bodyText1> (Abgerufen im März 2012)
- BMELV 2012b Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Charta für Landwirtschaft und Verbraucher, Stand Januar 2012,
http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/ChartaLandwirtschaftVerbraucher.pdf?__blob=publicationFile (Abgerufen im März 2012)

- BMG 2011 Bundesministerium für Gesundheit: DART Deutsche Antibiotika-Resistenzstrategie, Stand April 2011, http://www.bmg.bund.de/fileadmin/dateien/Publikationen/Gesundheit/Broschueren/Deutsche_Antibiotika_Resistenzstrategie_DART_110331.pdf (Abgerufen im Mai 2012)
- BMU 2011 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt, Stand 11. März 2011
- Buchmeier 2006 Buchmeier, J.: Entsorgung dezentraler Kläranlagen: Das „Modell Straubing“. In: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Neue Entsorgungswege für den bayerischen Klärschlamm – Technische Möglichkeiten und Erfahrungsberichte, Augsburg, 2006, S. 55-64
- Buer & Montag 2003 Buer, T., Montag, D.: Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung im Abwasserbereich. In: Tagungsband zum Symposium „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall“, UBA, Berlin, 06.-07.02.2003, S. 12/1-12/20
- Bundestag 2009 Deutscher Bundestag, Bundestags-Drucksache, Uran in Phosphatdüngemitteln-Uran im Düngemittel-, Bodenschutz- und Wasserrecht, Drucksache 16/11539, 05.01.2009
- Cluster-Initiative 2008 Cluster-Initiative Forst und Holz in Bayern: Ergebnisse der Cluster-Studie 2008, Weihenstephan 2008, 175 S.
- Cordell et al. 2009 Cordell, D., Drangert, J.O., White, S.: The story of phosphorus: Global food security and food for thought, Global Environmental Change 19, S. 292-305, 2009
- Cornel & Schaum 2005 Cornel, P., Schaum, C.: Von der Phosphorelimination zur Phosphorrückgewinnung. In: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen – Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 12.-13.12.2005, S. 13-38

DERA 2011	Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: DERA Rohstoffinformationen – Deutschland Rohstoffsituation 2010, Hannover, 2011 http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-07.pdf;jsessionid=9A2C5D9FBAD4F021943C25A507EE6821.1_cid297?__blob=publicationFile&v=7 (Abgerufen im Januar 2012)
Destatis 2011a	Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe – Düngemittelversorgung, Wirtschaftsjahr 2010/2011, Fachserie 4, Reihe 8.2, Wiesbaden, 2011
Destatis 2011b	Statistisches Bundesamt: schriftliche Auskunft (Statistik) zu bundeslandspezifischen Warenimporten 2010
Destatis 2011c	Statistisches Bundesamt: Viehhaltung der Betriebe Landwirtschaftszählung / Agrarstrukturhebung 2010, Fachserie 3 Reihe 2.1.3, Wiesbaden, 2011
Dittrich & Klose 2008	Dittrich, B., Klose, R.: Bestimmung und Bewertung von Schwermetallen in Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen und Kultursubstraten, Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 3, 2008, S. 12
DüMV 2008	Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008 Teil I Nr. 60, Bonn 2008
Ekardt & Schnug 2009	Ekardt, F., Schnug, E.: Legal aspects of uranium in environmental compartments. In: De Kok, L. J., Schnug, E.: Loads and fate of fertilizer derived uranium, Backhuys, Leiden, S. 209-216
Ewert 2011	Ewert, W.: Phosphorrückgewinnung durch Abscheidung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP), Beitrag zur Konferenz „7. Klärschlammstage Fulda“, 29-31. März 2011
FNR 2007	Fachagentur nachwachsender Rohstoffe (FNR): Leitfaden Bioenergie, Gülzow, 2007 http://fnr-server.de/cms35/fileadmin/biz/pdf/leitfaden/datensammlung/ (Abgerufen im März 2012)

- Gethke et al. 2005 Gethke, K., Herbst, H., Montag, D., Pinnekamp, J.: Potenziale des Phosphorrecyclings aus Klärschlamm und phosphathaltigen Abfallströmen in Deutschland, KA – Abwasser, Abfall, Jg. 52, Nr. 10, S. 1114-1119, 2005
- Gilbert 2009 Gilbert, N.: The Disappearing Nutrient, Nature, Vol. 461, S. 716-718, 2009
- Harms & Meyer 2006 Harms, K., Meyer, K.: Antibiotikarückstände in Gülle, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL (Hrsg.): Schweinegülle – Quelle für potentiell unerwünschte Stoffe? 5. Kulturlandschaftstag, Schriftenreihe 12 2006, S. 15-20
- HelmholtzZentrum 2007 HelmholtzZentrum München: Antibiotika und Antibiotikaresistenzen, FLUGS-Fachinformationsdienst, Stand: Januar 2007, <http://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/FLUGS/PDF/Themen/Krankheitsbilder/Antibiotika.End.pdf> (Abgerufen im April 2012)
- Herden et al. 2007 Herden, H., Lohe, G., Kühnel, J., Moser, C.: Zusammensetzung und Eigenschaften von Rostaschen aus verschiedenen Müllheizkraftwerken, Müll und Abfall 2, S. 75-79, 2007
- Hermann & Coldau 2004 Hermann, T., Coldau, K.: Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlammmentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, 3. Überarbeitete Auflage (08/2004), <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2827.pdf> (Abgerufen im November 2011)
- Horn et al. 2011 von Horn, J., Sartorius, C., Tettenborn, F.: Technologievorausschau für Phosphorrecyclingtechnologien. In: Pinnekamp, J. (Hrsg.): Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe) – Abschlussbericht des Teilvorhabens der BMBF/BMU Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“, Aachen, 2011 http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_rokdownloads&view=file&Itemid=67&id=73&lang=de
- Hubbert 1949 Hubbert, M.K.: Energy from fossil fuels, Science, Vol. 109, S. 103-109, 1949
- ICL 2010 ICL Fertilizers Deutschland GmbH: persönliche Mitteilung von Josef Lindenmeier

- InfraServ 2006 InfraServ Gendorf: Klärschlammverbrennung im Werk Gendorf, http://www.regierung.niederbayern.bayern.de/presse/klaerschlamm/vortrag_merk.pdf (Abgerufen im Januar 2012)
- Ingitec 2009 Ingenieurbüro für Gießereitechnik GmbH (Ingitec): Abschlussbericht „Metallurgisches Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen und Filterstäuben als Voraussetzung für die wirtschaftliche Erzeugung eines hochwertigen Phosphor-Düngemittels aus Abfällen, Leipzig, 2009, 70 S.
<http://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-24557.pdf> (Abgerufen im Dezember 2012)
- Jardin 2010 Jardin, N.: P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche. In: Verein zur Förderung des Instituts WAR – Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. – WAR – (Hrsg.): Klärschlammfäulung und -verbrennung: Das Behandlungskonzept der Zukunft? Schriftenreihe WAR 204, 85. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik, Darmstadt, 13.04.2010, S. 93-106
- Kaltschmitt 2009 Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse, Springer Verlag, Berlin, 2009, 1032 S.
- Kern et al. 2008 Kern, J., Engels, C., Heinzmann, B., Lengemann, A.: Landwirtschaftliche Qualitätsansprüche an rückgewonnenen Phosphor, Poster zum Symposium „Ressourcenschonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft“, Braunschweig, 10.-11. November 2008
http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_koordinierend/bs_naehrstofftage/phosphor_landwirtschaft/Poster_Kern.pdf (Abgerufen im Januar 2012)
- Kneisel & Laux 2012 Kneisel, M., Laux, D.: Rückgewinnung von Phosphor in Baden-Württemberg, Wasser und Abfall, Nr. 3, S. 19-22, 2012
- Knolle 2009 Knolle, F.: Ein Beitrag zu Vorkommen und Herkunft von Uran in deutschen Mineral- und Leitungswässern, Dissertation TU Braunschweig, 2009, 161 S.
- Kratz et al. 2011 Kratz, S., Godlinski, F., Schnug, E.: Heavy Metal Loads to Agricultural Soils in Germany from the Application of Commercial Phosphorus Fertilizers and Their Contribution to Background Concentration in Soils, in: Merkel, B., Schipek, M. (Hrsg.): The New Uranium Mining Boom, Springer Berlin Heidelberg (Springer Geology) 2012, S. 755-762

- LfL 2004 Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Fachliche Überprüfung und Neubewertung von Wirtschaftsdüngern, Gemeinschaftsprojekt TUM LS Tierhygiene und dem LfL, 2003/04
- LfL 2006 Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Güllen von viehhaltenden Betrieben des Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen-(BDF)-Programm, 2006
- LfL 2008 Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Biertreber – Futterwert, Konservierung und erfolgreicher Einsatz beim Wiederverkäufer, Freising-Weißenstephan, 2008
- LfL 2010 Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft: Versuchsbericht S 12/3, Verdauungsversuche mit Eiweißfutter - Nebenprodukte des Mälzerei- und Brauereigewerbes, Grub, 2010
- LfL 2011 Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für ländliche Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Agrarinformatik: Entwicklung des Verbrauchs und der Kosten mineralischer Nährstoffe von 1990/91 bis 2010/11
- LfU BW 2003 Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Schadstoffe in klärschlammgedüngten Ackerböden Baden-Württembergs, Karlsruhe, 2003, LfU, Bodenschutz 14
- LfU 2009a Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit: Bewirtschaftungspläne für den bayerischen Anteil der Flussgebietseinheit Donau/ Flussgebietseinheit Main, 2010
<http://www.lfu.bayern.de/wasser/wrrl/bewirtschaftungsplaene/index.htm> (Abgerufen im November 2011)
- LfU 2009b Bayerisches Landesamt für Umwelt: Merkblatt „Verwertung und Beseitigung von Holzaschen“, Augsburg, 2009, 19 S.
http://www.lfu.bayern.de/abfall/doc/merkblatt_holzaschen.pdf (Abgerufen im Januar 2012)
- LfU 2010a Bayerisches Landesamt für Umwelt: Sonderauswertung zur Abfallbilanz 2009 Klärschlamm, Augsburg, 2010, 12 S.
http://www.lfu.bayern.de/abfall/ausschreibungen/doc/sonderauswertung_klaerschlamm2009_ba.pdf (Abgerufen im Juni 2011)

- LfU 2010b Bayerisches Landesamt für Umwelt: Abwasserentsorgung in Bayern, Schutz von Fließgewässern und Seen, Augsburg, 2010, 37 S.
http://www.lfu.bayern.de/presse/pm_detail.htm?ID=466 (Abgerufen im Dezember 2011)
- LfU 2011a Bayerisches Landesamt für Umwelt: Schriftliche Mitteilung von Hr. Müller zu Schadstoffgehalten und Mengenangaben von Klärschlamm im Jahr 2010
- LfU 2011b Bayerisches Landesamt für Umwelt: Hausmüll in Bayern, Bilanzen 2010, Augsburg, 2011, 88 S.
<http://www.abfallbilanz.bayern.de/doc/KSDaten.pdf> (Abgerufen im Januar 2012)
- LfU 2011c Bayerisches Landesamt für Umwelt: Schriftliche Mitteilung von Hr. Zimmer zur hergestellten Tiermehlmenge in Bayern im Jahr 2010
- LfU 2011d Bayerisches Landesamt für Umwelt: Thermische Klärschlamm-entsorgungsanlagen – Standorte, technische Daten und Emissionen, Augsburg 2011
http://www.lfu.bayern.de/abfall/behandlung_zur_beseitigung/thethermis_klaerschlammensorgungsanlagen/index.htm
- LfU 2011e Bayerisches Landesamt für Umwelt: Klärschlammensorgung in Bayern – Planungshilfe für Kommunen, Augsburg, 2011, 74 S.
<http://www.lfu.bayern.de/abfall/abfallgruppen/index.htm> (Abgerufen im April 2012)
- LfU 2012a Bayerisches Landesamt für Umwelt: Schriftliche Mitteilung von Hr. Müller zum Phosphorgehalt bayerischer Klärschlämme gewichtet nach Ausbaugröße im Jahr 2010
- LfU 2012b Bayerisches Landesamt für Umwelt: Schriftliche Mitteilung von Hr. Köllner zur Anzahl an Bio-P Kläranlagen in Bayern im Jahr 2012
- LfU 2012c Bayerisches Landesamt für Umwelt: Thermische Behandlungsanlagen für Klärschlamm
http://www.lfu.bayern.de/abfall/abfallgruppen/thermische_behandlung/index.htm (Abgerufen im April 2012)

- LK NRW 2011 Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen: Hinweise zum Einsatz von Wirtschaftsdüngern, organischen und organisch-mineralischen Düngern, 2011
<http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/basisinfos/wirtschaftsduenger-pdf.pdf> (Abgerufen im März 2012)
- MaRess 2010 Werland, S., Bleischwitz, R.: Elemente einer Ressourcenpolitik für ein nachhaltiges Phosphormanagement und eine Reduktion der Phosphorimporte, Wuppertal, 2010, ISSN 1867-0237
- MLR 2009 Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg: Merkblatt zur Verwendung von Tiermehl als organisches Düngemittel und Bodenverbesserer in der Landwirtschaft, 2009, https://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1238503/-LRALB_Merkblatt_Tiermehl_alsD%FCnger_090209.pdf (Abgerufen im April 2012)
- Moncef 2005 Moncef, M.: The issue of cadmium in phosphate fertilizers, AFA 18th Intern. Annual Technic. Conference & Exhibition, 5-7 July 2005, Casablanca, Marokko, 14. S
- Montag 2008a Montag, D.: Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung – Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunalen Kläranlagen, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der RWTH Aachen, Aachen, 2008, 189 S.
- Ökobarometer 2012 Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN): Ökobarometer 2012, repräsentative Bevölkerungsbefragung im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), http://www.oekolandbau.de/fileadmin/redaktion/dokumente/journalisten/Oekobarometer2012_Sheets_BA.pdf (Abgerufen im April 2012)
- Pinnekamp et al. 2007 Pinnekamp, J., Montag, D., Gethke, K., Herbst, H.: Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers „Magnesiumammoniumphosphat – MAP“ aus Abwasser und Klärschlamm“, UBA-Texte, 25/07, ISSN 1862-4804, Dessau-Roßlau, 2007

- Pinnekamp et al. 2010 Pinnekamp, J., Doetsch, P., Rath, W., Grömping, M., et al.: Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm – Abschlussbericht des Teilvorhabens der BMBF/BMU Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“, Aachen 2010 http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_rokdownloads&view=file&Itemid=67&id=72%3Aabschlussbericht-pasch&lang=de (Abgerufen im August 2011)
- Pinnekamp et al. 2011 Pinnekamp, J., Weinfurter, K., Sartorius, C., Gäth, S., et al.: Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe) – Abschlussbericht des Teilvorhabens der BMBF/BMU Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“, Aachen, 2011 http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_rokdownloads&view=file&Itemid=67&id=73&lang=de (Abgerufen im Dezember 2011)
- ProgRess 2012 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess), Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.02.2012, Berlin, 2012 http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/progress_bf.pdf (Abgerufen im März 2012)
- Reichenberger et al. 2008 Reichenberger, H.-P., Gleis, M., Quicker, P., Mocker, M., Faulstich, M.: Feste Rückstände aus Verbrennungsanlagen, Teil I, Müll und Abfall, Heft 8, S. 386-393, 2008
- Römer 2006 Römer, W.: Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch, J. Plant. Nutr. Soil Sci. 169, S. 826-832, 2006
- Römer et al. 2010 Römer, W., Gründel, M., Güthoff, F.: U-238, U-235, Th-232 und Ra-226 in einigen ausgewählten Rohphosphaten, Phosphatdüngern, Boden- sowie Pflanzenproben aus einem P-Düngungsversuch, Journal für Kulturpflanzen, 62 (6), S. 200-210, 2010

- Sartorius 2011 Sartorius, C., Tettenborn, F.: Zukunftschancen durch Entwicklung von Phosphorrecyclingtechnologien für Deutschland. In: Pinnekamp, J. et al. (Hrsg.): Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe) – Abschlussbericht des Teilvorhabens der BMBF/BMU Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“, Aachen, 2011
http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_rokdownloads&view=file&Itemid=67&id=73&lang=de (Abgerufen im Dezember 2011)
- Schaumann 2010 Schaumann, G., Schmitz, K. W. (Hrsg.): Kraft-Wärme-Kopplung, 4. vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg, Springer Verlag, 2010
- Schicker 2003 Schicker, C.: Ablagerung von Asche aus der Biomasseverbrennung, Diplomarbeit, FH Augsburg, 2003
- Schipper et al. 2005 Schipper, W.J., Lijmbach, A.C.M., Klapwijk, A., Rulkens, W.H., Temmik, B.G., Potjer, B., Kiestra, F.D.G: Phosphatrecycling im Phosphorprozess, 38. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft, 11.2.2005 in Aachen, Nr. 74/1-74/5, 2005
- Schröder et al. 2010 Schröder, J.J., Cordell, D., Smit, A.L., Rosemarin, A.: Sustainable Use of Phosphorus, EU Tender ENV.B.1/ETU/2009/0025, Plant Research International, part of Wageningen UR, Wageningen, 2010, 124 S.
- Schultheiß et al. 2010 Schultheiß, U., Döhler, H., Schwab, M.: Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft – jährliche Anfallmengen in der Bundesrepublik Deutschland, Landtechnik, Nr. 5 , S. 354-356, 2010
- SRU 2002 Sachverständigenrat für Umweltfragen: Umweltgutachten 2002, für eine neue Vorreiterrolle, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart, 2002, 550 S.
- SRU 2004 Sachverständigenrat für Umweltfragen: Umweltgutachten 2004, Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, 2004, 669 S.
- Statistik Bayern 2009 Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung: Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Bayern 2007, München, 2009

- Statistik Bayern 2011 Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung: Tag des deutschen Bieres am 23. April, Pressemitteilung vom 20. April 2011, München, 2011
- Steinmetz et al. 2011 Steinmetz, H., Preyl, V., Meyer, C.: Großtechnische In-situ-Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen, Vortrag zur Konferenz „Internationales Symposium Re-Water Braunschweig“, 21.-22. November 2011
- Terytze et al. 2007 Terytze K., Vogel I.: Kupfer und Zink im Spannungsfeld Nährstoff-Schadstoff bei der landwirtschaftlichen und landbaulichen Nutzung von Klärschlämmen, KTBL (Hrsg.): Perspektiven der Klärschlammverwertung, Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung, KTBL-Schrift 453, S. 23-40, 2007
- StMUG 2012 Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit: Internetportal Energie-Atlas Bayern, <http://www.energieatlas.bayern.de/energieatlas.html> (Abgerufen im März 2012)
- UBA 2011 Umweltbundesamt: „Rund um das Trinkwasser“, Broschüre, 2. Auflage, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4083.html> (Abgerufen im Januar 2012)
- USGS 2012 U.S. Geological Survey: Mineral commodity summaries 2012 <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf> (Abgerufen im März 2012)
- Waida 2011 Waida, C.: Untersuchung der in der Förderinitiative erzeugten Produkte. In: Pinnekamp, J. et al. (Hrsg.): Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe) – Abschlussbericht des Teilvorhabens der BMBF/BMU Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“, Aachen, 2011 http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_rokdownloads&view=file&Itemid=67&id=73&lang=de (Abgerufen im Dezember 2011)
- WasserBerlin 2008 Kompetenzzentrum Wasser Berlin: Spurenstoffe in Mischwassereinleitungen, Report, Berlin, 2008, 138 S.

- Weideler et al. 2005 Weideler, A.; Brechtel, K.; Maier, W.; Krampe, J.; Rott, U.: Phosphor-Rückgewinnung als MAP mittels saurer Rücklösung aus Faulschlämmen. In: Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser und Klärschlamm und Reduzierung der Rückbelastung – Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasser-wirtschaft, Band 184. 80. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium 13.10.2005, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, S. 59-71, 2005
- Weideler 2008 Weideler, A.: Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP), Wasser und Abfall, Heft 1-2, S. 23-26, 2008
- Wiesgickl 2010 Wiesgickl, S.: Erstellung eines regionalen Konzeptes zur Verwertung von Klärschlamm unter Heranziehung ökologischer Aspekte, Diplomarbeit, HAW Amberg-Weiden, August 2010, 120 S.
- World Bank 2011 World Bank Commodity Price Data (Pink Sheet), annual prices, 1960 to present
<http://econ.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/EXTDEC/EXTDECPROJECTS/0,,contentMDK:21574907~menuPK:7859231~pagePK:64165401~piPK:64165026~theSitePK:476883,00.html> (Abgerufen im November 2001)

Bildverzeichnis

Bild 1:	Weltweiter Phosphorendverbrauch prozentual nach den jeweiligen Einsatzgebieten [Schröder et al. 2010].....	11
Bild 2:	Schwermetallbelastung bayerischer Klärschlämme im Jahr 2010 und 1995 [LfU 2011a]	13
Bild 3:	Organische Schadstoffbelastung bayerischer Klärschlämme im Jahr 2010 und 1995 [LfU 2011a]	13
Bild 4:	Preisentwicklung von Rohphosphat, DAP und TSP im Zeitraum 2000 bis 2011 [World Bank 2011]	14
Bild 5:	Urangehalte von Rohphosphaten aus unterschiedlichen Lagerstätten der Erde [verschiedene Quellenangaben in Römer et al. 2010].....	16
Bild 6:	Urangehalte von verschiedenen phosphathaltigen Düngemitteln [verschiedene Quellenangaben in Römer et al. 2010].....	17
Bild 7:	Phosphorstoffflussmodell für Bayern (Pfeilstärke schematisch für Größe der Stoffmenge, Subsysteme farblich hinterlegt)	22
Bild 8:	Verfahren zur P-Rückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung gegliedert nach den Stoffgruppen Abwasser & Prozesswässer, Klärschlamm und Klärschlammasche	27
Bild 9:	Vergleich der spezifischen Kosten je kg P und des Betriebsmittelbedarfs der Rückgewinnungsverfahren basierend auf unterschiedlichen Literaturangaben der Verfahrensentwickler.....	44
Bild 10:	Die für die Treibhausgas-Betrachtung der P-Rückgewinnung herangezogenen Prozessschritte.....	45
Bild 11:	Vergleichende Darstellung der THG-Betrachtung sämtlicher Szenarien.....	47
Bild 12:	Vergleich der zeitlichen Umsetzbarkeit und Effizienz des Rückgewinnungsverfahrens basierend auf unterschiedlichen Literaturangaben der Verfahrensentwickler.....	49
Bild 13:	Einschätzung der Lenkungswirkung (8 entspricht der größten Lenkungswirkung) und der öffentlichen Akzeptanz der möglichen politischen Maßnahmen	63
Bild 14:	Einschätzung der Lenkungswirkung (8 entspricht der größten Lenkungswirkung) und der politischen Akzeptanz der möglichen politischen Maßnahmen	63
Bild 15:	Priorisierung des Handlungsbedarfs auf den Ebenen Bayern und Deutschland.....	67
Bild 16:	Handlungsmöglichkeiten auf den Ebenen EU, Deutschland und Bayern	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittlere Schadstoffgehalte unterschiedlicher Phosphatprodukte [BAFU 2009a, Dittrich & Klose 2008, Knolle 2009, Kratz et al. 2011, Römer et al. 2010]	19
Tabelle 2:	Darstellung des Phosphoreinsatzes in Bayern 2010	22
Tabelle 3:	Darstellung spezifischer Kennparameter von Szenario 1	31
Tabelle 4:	Darstellung spezifischer Kennparameter von Szenario 2	33
Tabelle 5:	Darstellung spezifischer Kennparameter von Szenario 3	35
Tabelle 6:	Darstellung spezifischer Kennparameter von Szenario 4-1	38
Tabelle 7:	Darstellung spezifischer Kennparameter von Szenario 4-2	40
Tabelle 8:	Darstellung spezifischer Kennparameter von Szenario 4-3	42

Ansprechpartner bei Fraunhofer UMSICHT

**Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik UMSICHT
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg**

Operativer Leiter
Dipl.-Ing. Gerlod Dimaczek
An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg

Telefon: 09661 908-400

Fax: 09661 908-469

E-Mail: info-atz@umsicht.fraunhofer.de

Internet: www.umsicht.fraunhofer.de

Ihre Ansprechpartner für diesen Bericht:

Name	Telefon	E-Mail
Dr.-Ing. Matthias Franke	09661 908-438	matthias.franke@umsicht.fraunhofer.de
Prof. Dr. Mario Mocker	09661 908-417	mario.mocker@umsicht.fraunhofer.de