

Kurzbericht

zum Forschungsvorhaben:

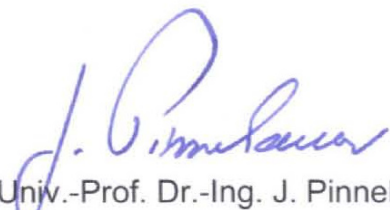
„Phosphorrecycling – Rückgewinnung von industriell bzw.
landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen
aus Abwasser und Klärschlamm“

AZ IV - 9 - 042 423

für das






Aachen, 31. Mai 2007


Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
(Projektleiter)

Projektbeteiligte

Projektkoordinator		
	Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp	<ul style="list-style-type: none"> – Stand der Phosphorelimination bei der Abwasserreinigung in NRW sowie Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und aus Prozesswässern der Schlammbehandlung (Studie) – Studie zur thermischen Klärschlamm-entsorgung in Deutschland sowie Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Asche – Empfehlungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für eine großtechnische Umsetzung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung Technische Untersuchungen zur Phosphorrückgewinnung aus: <ul style="list-style-type: none"> – Fällschlamm – Klärschlamm-Asche – Prozesswässern – Faulschlamm
Projektpartner		
	Bauhaus Universität Weimar, Professur Siedlungswasserwirtschaft Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Londong	<ul style="list-style-type: none"> – Einsatzmöglichkeiten und Anforderungen an Recyclingprodukte (Studie) – Phosphatrücklösung aus Schlammern der vermehrten biologischen Phosphorelimination – Chemische Grundlagen zur Kristallisation und Fällung von Phosphatprodukten (Studie) – Phosphorrückgewinnung mittels Kristallisation von Calciumphosphat im Rührreaktor
	Lehr- und Forschungsbereich Anorganische und Analytische Chemie, Umweltanalytik, Umwelttechnologie und Chemisch-physikalische Recyclingtechnologie der FH Aachen Prof. Dr. rer. nat. Günter Heil	<ul style="list-style-type: none"> – Phosphorrückgewinnung aus Fällschlammern der chemischen Phosphorelimination – Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm-Asche – Empfehlungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für eine großtechnische Umsetzung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung
	INRES Lehr- und Forschungsbereich Pflanzenernährung der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn Prof. Dr. H. Goldbach	<ul style="list-style-type: none"> – Phosphordüngewirkung im Topfversuch

	<p>Lehr- und Forschungsgebiet für Kokeiweesen, Brikettierung und Thermische Abfallbehandlung der RWTH Aachen Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Heil</p>	<p>– Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche</p>
	<p>Institut für Anlagen- und Verfahrenstechnik der Fachhochschule Köln Prof. Dr.-Ing. G. Braun</p>	<p>– Phosphorrückgewinnung mittels Kristallisation von Calciumphosphat im Rührreaktor</p>
	<p>Deutsche Projekt Union GmbH</p>	<p>– Empfehlungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für eine großtechnische Umsetzung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung</p>

Inhalt

Verzeichnis der Tabellen	IV
1 Veranlassung und Ziele	1
2 Vorgehensweise	3
3 Ergebnisse	5
3.1 Allgemeines	5
3.2 Studien zu Verfahren der Phosphorrückgewinnung	5
3.3 Technische Untersuchungen	6
3.3.1 Allgemeine Hinweise zur Phosphorrücklösung aus Klärschlamm	6
3.3.2 Phosphorrückgewinnung aus Fällschlämmen	6
3.3.3 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche	7
3.3.4 Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung	8
3.3.5 Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm	9
3.3.6 Kristallisation von Calciumphosphat	10
3.4 Untersuchung der Phosphordüngewirkung im Topfversuch	10
3.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	11
4 Zusammenfassung	15

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1:	Übersicht der Maßstäbe und Betriebsweisen der untersuchten Ansätze	3
Tabelle 3.1:	Zusammenstellung der Kostendaten für ein Phosphorrecycling aus den Stoffströmen Asche, Prozesswasser der Schlammbehandlung und Abwasser	12
Tabelle 3.2:	Netto-Jahreskosten und Phosphorrückgewinnungspotentiale unterschiedlicher Szenarien für NRW.....	14

1 Veranlassung und Ziele

Das Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen hat mit dem Schreiben vom 15.01.2003 vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) den Auftrag erhalten, wissenschaftlich die Phosphorrückgewinnung von industriell bzw. landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen aus Abwasser und Klärschlamm zu untersuchen.

Ziel des Vorhabens war es, die im Abwasser und im Schlamm enthaltenen Phosphorverbindungen in hoch konzentrierter und wieder verwertbarer Form zurück zu gewinnen, um den Phosphorkreislauf weitgehend und auf möglichst kurzem Wege zu schließen.

In Deutschland haben sich die chemische Fällung und die vermehrte biologische Phosphorelimination als Verfahren zur Entfernung von Phosphor aus dem Abwasser etabliert. Die Verwertung des anfallenden Klärschlammes erfolgt bisher in der Landwirtschaft bzw. im Landschaftsbau. Zur Entsorgung wurde der Klärschlamm deponiert bzw. spätestens ab Juni 2005 verbrannt. Im Zuge der schärferen Grenzwerte für eine stoffliche Klärschlammverwertung wird in Zukunft die Verbrennung von Klärschlamm einen Entsorgungspfad mit wachsender Bedeutung darstellen.

Ausgehend von dem Ziel, Phosphor zurück zu gewinnen, ergaben sich aus der derzeitigen Situation der Abwasser- und Schlammbehandlung zunächst drei verschiedene Ansätze für das Phosphorrecycling, die untersucht und optimiert werden sollten:

- Ansatz 1: Rückgewinnung von Phosphor aus dem Überschussschlamm der biologischen Phosphorelimination
- Ansatz 2: Rückgewinnung von Phosphor aus dem Fällschlamm der chemischen Phosphorelimination
- Ansatz 3: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche

Das Projekt war in zwei Projektphasen gegliedert:

- Phase 1: Versuche im kleinen technischen Maßstab bzw. Labormaßstab
- Phase 2: Betreiben einer halbtechnischen Versuchsanlage auf einer Kläranlage des Wupperverbandes, basierend auf den Ergebnissen der Versuche aus Phase 1
Entwicklung des Konzeptes und der Planungsgrundlagen für die Großtechnik durch ein Ingenieurbüro

Das Ziel der Phase 2, ein betriebsstabiles Verfahrenskonzept zur Phosphorrückgewinnung aus dem Überschussschlamm großtechnisch auf der Kläranlage Burg (Wupperverband) umzusetzen, konnte nicht erreicht werden. Die technischen Versuche haben gezeigt, dass sich ein stabiler Anlagenbetrieb mit reproduzierbaren Ergebnissen und vertretbaren Aufwendungen an Personaleinsatz, Anlagen- und Steuerungstechnik sowie Hilfsstoffen großtechnisch nicht reali-

sieren lässt. Eine Umsetzung anderer Verfahren auf der Kläranlage Burg konnte aufgrund des Entwicklungsstandes der Verfahren bzw. der technischen Rahmenbedingungen der Kläranlage vor Ort nicht durchgeführt werden. Gründe hierfür waren, dass auf der Kläranlage Burg zu diesem Zeitpunkt eine Betriebsweise mit ausschließlich vermehrter biologischer Phosphorelimination nicht zu realisieren und eine Arbeitsmehrbelastung durch noch nicht großtechnisch einsetzbare Technik dem Klärwerkpersonal nicht zuzumuten war.

Mit der Änderungsanzeige vom 18.10.2004 wurde in Absprache mit dem MUNLV NRW die Neuausrichtung der Forschungsarbeiten in der Phase 2 mit folgenden Untersuchungspunkten festgelegt:

1. Errichtung und Betrieb einer Technikumsanlage zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung
2. Errichtung und Betrieb einer Technikumsanlage zur Phosphorrückgewinnung aus Faulschlämmen mittels Säureaufschluss und anschließender MAP-Fällung
3. Rückgewinnung durch Kristallisation sowie die Erstellung einer Studie über die Bildung amorpher und kristalliner Kalziumphosphate im aufgeschlossenen Schlamm

Durch den Wegfall des Baus der großtechnischen Versuchsanlage auf der KA Burg (Wupperverband) konnte der geplante Arbeitspunkt „Erstellung eines technischen Entwurfs für die Realisierung einer großtechnischen Anwendung durch das Ingenieurbüro Deutsche Projekt Union GmbH (DPU) aus dem bestehenden Antrag nicht durchgeführt werden. Anstelle dieses klärtechnischen Entwurfes wurde die Erstellung einer Studie, die alle untersuchten Verfahrensvarianten aus den vom MUNLV geförderten Projekten zur Phosphatrückgewinnung hinsichtlich ihres Umsetzungspotentials und insbesondere der hierfür erforderlichen Investitionen, bau-, maschinen- und elektrotechnischen Maßnahmen beinhaltet, festgelegt. Diese Studie wurde in Zusammenarbeit der Hochschulen und mit Unterstützung der DPU hinsichtlich marktrelevanter Kostenansätze erstellt.

2 Vorgehensweise

Die in Kapitel 1 dargestellten Forschungsansätze zur Phosphorrückgewinnung wurden in unterschiedlich konzipierten Versuchsanlagen federführend am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen bzw. der Bauhaus Universität Weimar, Professur Siedlungswasserwirtschaft untersucht. Die verwendeten Versuchsanlagen-Maßstäbe, Betriebsweisen und Anlagendurchsätze sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Tabelle 2.1: Übersicht der Maßstäbe und Betriebsweisen der untersuchten Ansätze

	Ansatz	Maßstab	Betriebsweise/ Durchsatz	Kapitel
Phase 1	Rückgewinnung aus Überschussschlamm	kleiner technischer Maßstab	kontinuierlicher Betrieb $V_{BB} = 1.100 \text{ L}$	Teil D Kap. 4
	Rückgewinnung aus Fällschlamm	Labormaßstab	Batchversuche je 25 g Fällschlamm	Teil C Kap. 2
	Rückgewinnung aus Asche	Labormaßstab	Batchversuche je 25 g Asche	Teil C Kap. 3
Phase 2	Rückgewinnung aus Prozesswässern der Schlammbehandlung (PRISA-Verfahren)	halbtechnischer Maßstab	Kläranlage: kontinuierlicher Betrieb mit 350 L/ h Schlammbehandlung kontinuierlich, 250 L ÜSS/ d MAP-Fällung: Batchbetrieb, 50 L bzw. 400 L	Teil C Kap. 4
	Rückgewinnung aus Faulschlamm (Stuttgarter Verfahren)	Labormaßstab halbtechnischer Maßstab	Batchbetrieb Aufschluss: 80 g entwässerter Faulschlamm Komplexierung/ Fällung: 50 mL Prozesswasser Batchbetrieb Aufschluss: 850 L Faulschlamm Komplexierung/ Fällung: 50 L Prozesswasser	Teil C Kap. 5
	Kalziumphosphat-Kristallisation	kleiner technischer Maßstab	kontinuierlicher Betrieb mit 70 L ÜSS/ d	Teil D Kap. 6

Ziel dieser Untersuchungen war es, die Machbarkeit verschiedener Ansätze zur Phosphorrückgewinnung zu beleuchten sowie verfahrenstechnische Grundlagen für eine großtechnische Umsetzung zu ermitteln.

Ergänzend zu den dargestellten technischen Untersuchungen wurden folgende Studien angefertigt: Die Beschreibung des

- „Stand der Phosphorelimination bei der Abwasserreinigung in NRW sowie Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und aus Prozesswässern der Schlammbehandlung“ (Teil A) sowie
- die „Studie zur thermischen Klärschlamm Entsorgung in Deutschland sowie Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Asche“ (Teil B)

dienen der Einordnung der versuchstechnisch erprobten Ansätze der Phosphorrückgewinnung in den derzeitigen Stand der Phosphorelimination bzw. der Gegenüberstellung mit anderen bekannten Verfahren zum Phosphorrecycling.

Mittels der

- Studie über „Einsatzmöglichkeiten und Anforderungen an Recyclingprodukte“ (Teil D) sowie
- der „Untersuchung der Phosphordüngewirkung im Topfversuch“ (Teil E)

kann abschließend eine Bewertung der zurückgewinnbaren Sekundärphosphorprodukte erfolgen.

Die ermittelten Betriebsdaten des Versuchsanlagenbetriebs fließen in die „Empfehlungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für eine großtechnische Umsetzung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung“ (Teil F) ein.

3 Ergebnisse

3.1 Allgemeines

Der Hauptgrund für die Elimination von Phosphor aus dem Abwasser ist in seiner Eigenschaft als Nährstoff begründet. Bei zu hohen Phosphorgehalten in einem Gewässer besteht die Gefahr der Eutrophierung. Aus diesem Grund wurde übereinstimmend zu der europäischen Richtlinie über die Behandlung kommunalen Abwassers RL 91/271/EWG (EU-RL, 2003) auf Bundesebene das Abwasserabgabengesetz durch die Aufnahme der Parameter Stickstoff und Phosphor novelliert (ATV, 1997; IMHOFF, 1990). Heute ist die Phosphorelimination Stand der Technik und wird in NRW auf nahezu allen Kläranlagen >10.000 E zur Einhaltung der geforderten Grenzwerte betrieben.

In den letzten Jahren ist das Phosphorrecycling in den Blickpunkt des wissenschaftlichen Interesses getreten. Gründe hierfür sind einerseits die erhebliche Erschöpfung der bekannten und erschlossenen Phosphaterzlagerstätten und der in den Schwellen- und Entwicklungsländern steigende Phosphorbedarf. In Westeuropa werden ca. 80 % des importierten Phosphors in der Düngeindustrie benötigt (RICHARDS und JOHNSTON, 2001). Für diesen Bereich existieren keine Phosphatsubstitute, die einen Einsatz von Rohphosphaten verzichtbar machen würden. Daher kommt einer Kreislaufführung des Phosphors eine wachsende Bedeutung zu, um so zumindest einen Teil des Mineraldüngerbedarfs der Landwirtschaft auf Ressourcen schonende Weise zu decken.

3.2 Studien zu Verfahren der Phosphorrückgewinnung

Es existieren mehrere Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung. Bislang wurden nur die Nebenstrom-Kristallisation (DHV Crystalactor[®]), das Phostrip-Verfahren und das Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm der Berliner Wasserbetriebe, das noch keine Gewinnung eines separaten Fällschlammes beinhaltet, großtechnisch umgesetzt. Die übrigen Verfahren befinden sich noch im Entwicklungsstadium.

Ein Großteil der Verfahren zeichnet sich durch eine komplexe und somit aufwendige Verfahrenstechnik aus, die häufig als zusätzliche Verfahrensstufe vollständig neu zu errichten ist (z. B. der LOPROX-Prozess mit Phosphorrückgewinnung durch Nanofiltration oder die Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm). Ein komplexer und hoher Aufwand bedeutet auch hohe Anforderungen an das Betriebspersonal. Auch der Bedarf an Chemikalien zur Rückgewinnung des Phosphors ist bei einigen Verfahren (z. B. der KREPRO-Prozess, das Kemicond-Verfahren mit Phosphorrückgewinnung oder das Seaborne-Verfahren) als sehr hoch einzuordnen.

Elf der 13 beschriebenen Verfahren erzeugen Produkte, die sowohl der Phosphorindustrie angedient als auch direkt in der Landwirtschaft eingesetzt werden können. Das beim KREPRO-Prozess entstehende Produkt findet keine Verwendung in der phosphorverarbeitenden Industrie

und die mit Kalksilikophosphat angereicherte Schlacke, die bei der Klärschlammbehandlung im Eisenbad mit Phosphorrückgewinnung anfällt, kann nur landwirtschaftlich verwertet werden.

Zur Phosphorrückgewinnung aus Asche wurden vier Verfahren beschrieben. Das BioCon-Verfahren wurde vor einigen Jahren im Labormaßstab erforscht, eine Weiterentwicklung erfolgte nach Wissen der Verfasser seitdem nicht. Das Sephos- und das PASCH-Verfahren sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeit und werden im halbtechnischen Maßstab optimiert. Die erste großtechnische Pilotanlage zur Phosphorrückgewinnung aus Asche soll ab 2007 in Eferding (Österreich) nach dem im EU-Projekt SUSAN entwickelten Verfahren den Probebetrieb aufnehmen und jährlich 18.000 Mg Mehrnährstoffdünger produzieren.

3.3 Technische Untersuchungen

3.3.1 Allgemeine Hinweise zur Phosphorrücklösung aus Klärschlamm

Laborversuche zur gezielten Phosphatlösung haben gezeigt, dass mit biologischen Verfahren (anaerobe Rücklösung, enzymatische Rücklösung) ein gutes Ergebnis für Überschussschlamm aus Bio-P-Anlagen besteht (bis zu 40 % P-Rücklösung). In allen anderen untersuchten Verfahren war die Rücklösung entweder schlechter (Ultraschall < 10 %, Erhitzen < 10 %, Gefrieren < 20 %) oder die Ergebnisse für andere Schlämme waren besser (Säurebehandlung Faulschlamm > 90 % P-Rücklösung). Die Rücklöseverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Verfahrenstechnik bzw. des Verfahrensaufwandes und beim Rückgewinnungspotential sehr stark. Aufwändige Verfahren haben dabei meistens ein höheres Rückgewinnungspotential als weniger komplexe Verfahren. Eine Verfahrensbeurteilung sollte jeweils unter Berücksichtigung des Standortes der geplanten Anlage sowie ggf. vorhandener bau- bzw. maschinentechnischer Infrastruktur getroffen werden.

3.3.2 Phosphorrückgewinnung aus Fällschlamm

Ziel der Labor-Untersuchungen war es, die Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung aus Fällschlamm mittels Laugung und anschließender gezielter Fällung mit einem magnesiumhaltigen Fällmittel zu überprüfen. Durch eine Umfrage bei Wasserverbänden und großen Kläranlagen in NRW wurden als bevorzugte Fällmittel zur Phosphorelimination im kommunalen Abwasserreinigungsprozess Eisen-(III)-Chlorid und Eisen-(II)-Chlorid ermittelt. Neben diesen Fällmitteln werden in NRW oftmals zusätzlich aluminiumhaltige Fällmittel zur Blähschlammbekämpfung eingesetzt. Hierbei wurden gleichwertig Natriumaluminat, Polyaluminiumchlorid und Aluminiumsulfat genannt. Als Resultat dieser Befragung wurden für die Untersuchungen zur Phosphorrückgewinnung drei Fällschlämme durch den Einsatz der Fällmittel Eisen-(III)-Chlorid, Natriumaluminat (Natal[®]-7) und einer Kombination aus Aluminiumchlorid und Eisen-(III)-Chlorid (Pollfloc[®]-AFS 80) produziert.

Bei der Zusammensetzung der Fällschlämme fiel auf, dass der mit Pollfloc[®]-AFS 80 und der mit Natral[®]-7 produzierte Schlamm einen etwa gleich hohen Gehalt an Phosphor aufwiesen. Das Fällmittel Eisen-(III)-Chlorid band die spezifisch geringste Menge Phosphor in den Fällschlamm ein. Die Verhältnisse der Metall- und Erdalkaligehalte der Fällschlämme sind analog zu den Gehalten der wirksamen Substanzen in den Fällmitteln.

Bei der Laugung getrockneter Fällschlämme lässt sich mit Salzsäure ab einer Konzentration von 4,5 % innerhalb einer Stunde bei Umgebungstemperatur nahezu der gesamte im Fällschlamm gebundene Phosphor lösen. Anzumerken ist jedoch, dass bei dieser Säurekonzentration auch ein Großteil der im Schlamm gebundenen Metalle, Erdalkali und Schwermetalle in Lösung gehen. Mit höherer Säurekonzentration steigt auch die Freisetzung dieser Stoffe.

Der nächste verfahrenstechnische Schritt eines Phosphorrückgewinnungskonzeptes aus Fällschlamm ist die Filtration der Laugungslösung. Hierbei konnte nur mit sehr geringen Filtrationsgeschwindigkeiten gearbeitet werden, da die Laugungslösung zum Verkleben der Filtrationsapparatur neigte. Dadurch erwies sich die Trennung als schwierig und konnte nicht vollständig durchgeführt werden. Aufgrund der gravierenden Betriebsprobleme die bei der Fest-Flüssig-Trennung auftraten, wurden die Versuche an dieser Stelle abgebrochen. Die Phosphorrückgewinnung aus Fällschlamm durch chemische Phosphorelimination mittels Laugung und gezielter Ausfällung ist als großtechnisch nicht umsetzbar zu bezeichnen.

3.3.3 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche

Erster Schritt der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche ist der nasschemische Aufschluss (Laugung). Die labormaßstäblichen Untersuchungen wurden mit Schwefelsäure, Salzsäure, Natronlauge, Ammoniak und Wasser durchgeführt. Bei der Laugung mit Natronlauge, Ammoniak und Wasser können nur unwesentliche Mengen der Phosphorverbindungen gelöst werden. Damit der Phosphor aus der Asche quantitativ gelöst werden kann, müssen Salzsäure oder Schwefelsäure höherer Konzentration verwendet werden. Insgesamt lassen sich die Phosphorverbindungen bei einer Temperatur von 30 bis 40 °C nahezu vollständig in Lösung bringen. Neben Phosphor und Eisen werden auch Aluminium, Calcium und weitere Metalle gelöst.

Zur Abtrennung von Eisen aus der Laugungslösung wurde die Solventextraktion angewandt, mit der das gelöste Eisen fast vollständig aus chloridischen Lösungen abgetrennt werden kann. Von den untersuchten Komplexbildnern Tributylphosphat (TBP), Tri-(C₈C₁₀)amin (Alamine[®] 336) und Isoamylalkohol, drei handelsübliche Extraktionschemikalien die auch zur Reinigung von Nassphosphorsäure eingesetzt werden, ist Alamine[®] 336 die Chemikalie, die in Kerosinverdünnung am besten geeignet ist.

Zur Abtrennung von Schwermetallen wurden unterschiedliche Ionenaustauscherharze untersucht. Bei den Harzen handelte es sich um stark basische Anionenaustauscher auf der Basis quarternärer Amine sowie stark und schwach saure Kationenaustauscher auf Sulfon- und

Carbonsäurebasis. Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich mit stark basischen Anionenaustauscherharzen lediglich Cadmium vollständig aus der chloridhaltigen Laugungslösung abtrennen lässt. Für Kupfer, Zink und Blei ergeben sich nur unvollständige Abtrennungen. Bei der Verwendung von stark sauren Austauschharzen vom Typ Sulfonsäure (S 100 Na) wird keines der untersuchten Metalle abgetrennt, ebenso bei schwach sauren Austauschharzen (CNP 80) vom Typ Carbonsäure.

Nach der Metallabtrennung verbleibt eine saure Lösung, die neben HCl hauptsächlich aus Aluminium-, Calcium-, Magnesium- und Phosphorverbindungen besteht. Durch Anhebung des pH-Wertes der Lösung fällt ab einem pH-Wert von $\text{pH} = 2$ ein weißer Niederschlag aus. Bei der Verbindung handelt es sich um Aluminiumphosphat. Die Fällung ist bei einem pH-Wert von $\text{pH} = 5$ vollständig abgeschlossen. Der Gehalt an P_{ges} im Recyclingprodukt beträgt zwischen 10 und 16 %. Eine Rückgewinnung von Phosphor aus Aschen der Klärschlammmonoverbrennung ist damit grundsätzlich möglich. Das Produkt enthält weniger organische und anorganische Schadstoffe als Klärschlamm. Ein direkter Einsatz zur Pflanzenernährung ist aufgrund der Bindungsform des Phosphors voraussichtlich nicht zielführend.

3.3.4 Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung

Zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung wurden Versuche im halbtechnischen Maßstab an einer kontinuierlich bzw. semi-kontinuierlich betriebenen Schlammbehandlungsanlage sowie batchweise betriebenen MAP-Kristallisationsanlagen durchgeführt.

Die Phosphatphosphorrücklösung im Voreindicker ist der erste Verfahrensschritt und war bei einer Eindickzeit von drei Tagen und täglich zweimaliger Umwälzung des Eindickerinhaltes am höchsten. Eine Zugabe von geringen Mengen vorgeklärten Abwassers (ca. 9:1 Verhältnis Schlamm zu Abwasser) kann zur Verbesserung der Phosphatrücklösung führen. Mehr als 20 % des Phosphorgehaltes des zugeführten Überschussschlammes können so ins Überstandswasser des Voreindickers überführt werden.

Unter Berücksichtigung der Phosphatphosphorfrachten aus dem Nacheindicker stehen insgesamt 31 % des Phosphors aus dem Kläranlagenzulauf für eine Rückgewinnung im Prozesswasserstrom zur Verfügung. Durch die Integration der Filtrate bzw. Zenträte einer maschinellen Schlammwässerung kann die rückgewinnbare Phosphatfracht nochmals gesteigert werden.

Die MAP-Kristallisation lässt sich unter optimierten Bedingungen mit stabilen Rückgewinnungsgraden betreiben. Hohe Stickstoff-Phosphor-Verhältnisse $> 6:1$ begünstigen die Kristallisation ebenso wie hohe Nährstoffkonzentrationen im Prozesswasser. Der pH-Wert sollte zwischen $\text{pH} = 9$ und $9,5$ liegen. Als Fällmittel ist technisches Magnesiumoxid (MgO) einzusetzen, das nicht lange offen gelagert werden kann, da ansonsten Minderungen der Reaktivität auftreten. Die Reaktionszeiten sind sehr gering und betragen maximal 30 bis 45 Minuten. Die

Prozesswässer sollten möglichst feststofffrei sein, da der Kristallisationsprozess sonst gestört wird und Produktverunreinigungen auftreten können. Als verfahrenstechnische Ausgestaltung können separate Misch- und Sedimentationsbecken, SB-Reaktoren oder Beutelfiltersysteme eingesetzt werden.

Hinsichtlich der im MAP enthaltenen Schadstoffe bestehen aufgrund der vorliegenden Ergebnisse keine Bedenken, das Recyclingprodukt zu Dünge Zwecken in der Landwirtschaft einzusetzen. Sowohl die Konzentrationen an relevanten Schwermetallen als auch an einschlägigen organischen Schadstoffen sind geringer als im Klärschlamm und halten derzeit gültige Grenzwerte sehr sicher ein. Ebenfalls die strikteren Grenzwerte der diskutierten BMU-Novelle 2007 zur Klärschlammverordnung werden von den mittleren Konzentrationen der analysierten MAP deutlich unterschritten.

3.3.5 Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm

Die zur Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm notwendige Laugung der entwässerten Faulschlamm (ca. 27 % TR) wurde in einem schwefelsäurehaltigen Medium zunächst im Labormaßstab durchgeführt. Dabei wurde der pH-Wert mit Schwefelsäure auf $\text{pH} = 2$ eingestellt. Neben Phosphor werden bei der Laugung auch Aluminium, Eisen, Magnesium und Calcium aus dem Faulschlamm rückgelöst. Lediglich 50 % des im Faulschlamm gebundenen Phosphors lassen sich rüchlösen. Bei der Ermittlung der Laugungszeit wurde ersichtlich, dass die Konzentration an Phosphatphosphor im Filtrat nach etwa ein bis zwei Stunden nicht mehr wesentlich ansteigt. Die an die Laugung anschließende Vakuum-Filtration (Büchnerfilter) erbrachte nur sehr mäßige Filtrationszeiten.

Um die gelösten Metalle – vor allem das rückgelöste Aluminium – zu komplexieren, um bei einer Anhebung des pH-Wertes Ausfällungen von Aluminiumphosphat zu vermeiden, wurden verschiedene Komplexbildner getestet. Bei Einsatz von Natriumcitrat-Dihydrat wurden die besten Ergebnisse erzielt. Zur Abtrennung von Eisen aus der Laugungslösung wurde die mit dem Komplexbildner vermischte Rohlaugung mit Schwefelwasserstoff gesättigt und danach mit Natronlauge auf einen pH-Wert von $\text{pH} = 6$ eingestellt, so dass Eisensulfid ausfiel und abgetrennt werden konnte. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Verwendung von ausreichenden Mengen des Komplexbildners Natriumcitrat-Dihydrat nahezu sämtlicher Phosphatphosphor in Lösung bleibt. Bei einem Aluminiumgehalt von $0,7 \text{ g Al/L}$ in der Rohlaugung waren dazu $20 \text{ g Natriumcitrat-Dihydrat}$ pro Liter Rohlaugung notwendig. Bei der Bestimmung der Restgehalte an Eisen wurden bei einem pH-Wert von $\text{pH} = 6$ noch größere Mengen an Eisen nachgewiesen. Um eine vollständige Elimination von Eisen aus der Lösung zu erreichen, muss der pH-Wert bis auf $\text{pH} = 7$ angehoben werden.

Für die Magnesiumphosphatfällung wurden die Fällmittel Magnesiumoxid (MgO) und Magnesiumchlorid ($\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$) erprobt. Es wurde festgestellt, dass zu hohe Dosierungen des Komplexbildners die Ausfällung des Magnesiumphosphats verhindern. Bei den Untersuchungen

zum optimalen Dosierungsverhältnis des Komplexbildners stellte sich heraus, dass maximal 6 bis 10 g Natriumcitrat-Dihydrat/ L eingesetzt werden dürfen. Bei der Untersuchung der Zusammensetzung der Fällprodukte zeigt sich, dass dann die reinste Magnesiumphosphatverbindung gewonnen werden konnte, wenn die Eisenfällung bei einem pH-Wert von $\text{pH} = 7$ stattfand und als Fällmittel für die Magnesiumphosphatfällung Magnesiumchlorid genutzt wurde.

Die halbtechnischen Versuche zur Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm basierten auf den Ergebnissen der Versuche im Labormaßstab. Aufgrund der Handhabung und der Gefährlichkeit einzelner Chemikalien wurden bei diesen Versuchen als Fällmittel für die Eisenfällung Natriumsulfid und für die Magnesiumphosphatfällung Magnesiumoxid genutzt.

Zu diesem Verfahren muss angemerkt werden, dass ein erheblicher technischer Aufwand betrieben sowie große Mengen an Chemikalien dosiert werden müssen, um eine relativ geringe Menge an Phosphor bezogen auf den Phosphorgehalt im Ausgangsstoff rückzugewinnen zu können. Dieser hohe Aufwand ist mit hohen Kosten verbunden. Aufgrund der verfahrenstechnischen Komplexität konnten die Versuche nur im Batchbetrieb durchgeführt werden. Des Weiteren war es nicht möglich, reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Aus diesen Gründen wird das untersuchte Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm als großtechnisch nicht umsetzbar bewertet.

3.3.6 Kristallisation von Calciumphosphat

Im Überschussschlamm liegt ein gutes Ionenverhältnis für eine Calciumphosphatfällung vor. Aus diesem Grund wurde die Kristallisation von Calciumphosphat im Rührreaktor im kleinen technischen Maßstab untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Übersättigung im Überschussschlamm bei der anaeroben Rücklösung so hoch ist, dass es zu einer spontanen Fällung von Calciumphosphat kommt. Bei dem Einsatz von Impfmateriale lagert sich nur ein geringer Teil des ausfallenden Calciumphosphates an das Impfmateriale an, so dass das untersuchte Verfahren derzeit noch nicht praxisreif ist. Hierzu bedarf es weiterer umfangreicher Optimierungen.

Die Calciumphosphatfällung aus Überschussschlamm von Bio-P-Anlagen ist eine gute Möglichkeit zur praktischen Umsetzung auf Kläranlagen mit vergleichsweise kleinem verfahrenstechnischen Aufwand. Das Rückgewinnungspotential kann verbessert werden, wenn die Rücklösung bei einem pH-Wert von $\text{pH} = 4$ durchgeführt wird.

3.4 Untersuchung der Phosphordüngewirkung im Topfversuch

In mehrmonatigen Topfversuchen mit Rotklee und Weidelgras wurde die Düngewirkung verschiedener Sekundärphosphorprodukte aus der Abwasserentsorgung untersucht. Die phosphorreichen Substrate zeigen ein weites Spektrum in Bezug auf ihre P-Düngewirkung. Sie reicht dabei von niedrig (Fe gefällte Produkte) und mittel (NaAl gefälltes Produkt) bis hin zu

einem hohen (Mg und Ca gefällte Produkte) Mineraldüngeräquivalent. Eine Fällung mit Mg ist damit einer NaAl- oder Fe-Fällung vorzuziehen. Die Wirkung von Ca gefällten Düngephosphaten sollte in weiteren Versuchen getestet werden. Es zeigte sich, dass die Dünger der MAP-Fällung hinsichtlich der Zusammensetzung und Düngewirkung inhomogen sind. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich ihrer Aufreinigung. Weitere Vegetationsversuche vorzugsweise mit Mg-gefällten Düngern unterschiedlicher Herkunft müssen durchgeführt werden, um Rückschlüsse auf einen optimierten Herstellungsprozess ziehen zu können.

Damit haben Pflanzenversuche und chemische Untersuchungen gezeigt, dass einige Produkte, die bei der Phosphatrückgewinnung entstehen (MAP, Calciumphosphat), direkt in der Landwirtschaft eingesetzt werden könnten. Für die Akzeptanz der Produkte in der Landwirtschaft werden die technischen Möglichkeiten der Ausbringbarkeit mit herkömmlichen landwirtschaftlichen Maschinen sowie der Preis die entscheidenden Faktoren sein, die über eine Verbreitung entscheiden.

Für den Einsatz in der Phosphatindustrie bzw. in der Düngemittelindustrie spielt die chemische Zusammensetzung eine entscheidende Rolle. Für die Phosphatindustrie ist beispielsweise ein hoher Eisenanteil inakzeptabel, in der Düngemittelindustrie sind hohe Schwermetallkonzentrationen unerwünscht.

3.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zur Ermittlung der Kosten wurden zum einen die beiden im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten und für grundsätzlich als durchführbar bewerteten Varianten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche sowie den Prozesswässern der Schlammbehandlung (PRISA) herangezogen, zum anderen das Verfahren der Nachfällung zur Phosphorrückgewinnung im Ablauf einer kommunalen Kläranlage, das im abgeschlossenen Forschungsvorhaben „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Machbarkeit in NRW und Untersuchungen zu zentralen und dezentralen Verfahren“ (AZ IV-9-042420) untersucht wurde.

Die Kostenermittlungen für die Verfahren PRISA und Nachfällung wurden für eine Kläranlagengröße von 100.000 E durchgeführt. Für die Rückgewinnung aus der Klärschlammasche von Monoklärschlammverbrennungsanlagen wurde ein Anschlussäquivalent von ca. 1,5 Mio. E ermittelt, was einer Verbrennungskapazität von ca. 26.000 Mg TS /a entspricht.

Je nach Anschlussgröße einer Kläranlage schwanken die Kosten, d. h. bei größeren Kläranlagen kann ein Recycling einwohnerspezifisch günstiger umgesetzt werden als bei einer kleineren Kläranlage. Insbesondere die Rückgewinnung aus Asche erfordert sehr große zentrale Anlagen. Im Gegensatz dazu kann das PRISA-Verfahren auch auf kleineren Kläranlagen (dezentral) eingesetzt werden. Die Kosten des PRISA-Verfahrens sind stark abhängig

vom Vorhandensein freier und nutzbarer Beckenvolumina im Bereich der Schlammbehandlung wie z. B. Eindicker oder Prozesswasserspeicher. Die direkte Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom über eine Nachfällung erscheint nur für besondere Rahmenbedingungen wie z. B. große Beckenreserven im Bereich der Nachklärung wirtschaftlich.

In der Tabelle 3.1 sind die Kostendaten zusammengestellt. Sehr deutlich sind die erheblichen Unterschiede in den Investitionskosten zu erkennen. Das PRISA-Verfahren weist die geringsten absoluten Investitionskosten auf.

Tabelle 3.1: Zusammenstellung der Kostendaten für ein Phosphorrecycling aus den Stoffströmen Asche, Prozesswasser der Schlammbehandlung und Abwasser

	Einheit	Klärschlamm- asche	Prozesswasser (PRISA) vollständiger Anlagenneubau	Prozesswasser (PRISA) Nutzung von vorh. Becken (50%)	Abwasser (Nachfällung)
absolute Kosten					
Investitionskosten	€	11.026.720	1.635.397	1.200.080	3.732.549
Kapitalkosten	€/a	1.246.573	149.194	115.669	338.342
Betriebskosten	€/a	3.604.834	65.372	65.372	213.917
Brutto-Jahreskosten	€/a	4.851.407	214.566	181.041	552.259
Erlöse	€/a	- 418.500	- 23.652	- 23.652	- 26.609
Netto-Jahreskosten	€/a	4.432.907	190.914	157.389	525.650
spezifische Kosten					
Investitionskosten	€/kg P _{recycelt}	13,17	69,14	50,74	140,28
Brutto-Jahreskosten	€/(kg P _{recycelt} • a)	5,80	9,07	7,65	20,75
	€/(E • a)	3,08	2,15	1,81	5,52
Erlöse	€/kg P _{recycelt}	-0,50	-1,00	-1,00	-1,00
	€/(E • a)	-0,27	-0,24	-0,24	-0,27
Netto-Jahreskosten	€/kg P _{recycelt}	5,30	8,07	6,65	19,75
	€/(E • a)	2,82	1,91	1,57	5,26
Anmerkungen					
Endprodukt		AI-P	MAP	MAP	MP
Erlös	€/kg P _{recycelt}	0,5	1	1	1
recyclbare P-Fracht	kg P/a	837.000	23.652	23.652	26.609

Die Rückgewinnung aus der Asche stellt produktspezifisch mit 5,30 €/kg P_{recycelt} Netto-Jahreskosten das günstigste Verfahren dar. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Schlammensorgung durch eine Entsorgung in Monoverbrennungsanlagen gegenüber einer Mitverbrennung erheblich teurer wird. Die Kosten für eine Verbrennung von Klärschlamm in

einer Monoverbrennung betragen 190 bis 870 €/Mg, wohingegen die Kosten einer Mitverbrennung mit 190 – 270 €/Mg (EON, 2006) geringer sind.

Die produktspezifischen Netto-Jahreskosten von 8,07 bzw. 6,65 €/kg P_{recycelt} für das PRISA-Verfahren liegen um einen Faktor von ca. 1,5 bzw. 1,25 über den Produktkosten eines Recyclings aus Klärschlammasche, je nach Verfügbarkeit von nutzbarem Beckenvolumen.

Die höchsten produktbezogenen Netto-Jahreskosten mit 19,75 €/kg P_{recycelt} wurden für die Nachfällung ermittelt. Dies ist auf den geringen Rückgewinnungsgrad und die hohen Investitionskosten zurückzuführen.

Die einwohnerspezifischen Jahres-Nettokosten (inkl. Erlöse) sind aufgrund der geringen Investitions- und Betriebskosten beim PRISA-Verfahren am geringsten (1,57 bis 1,91 €/(E•a)). Bei der Nachfällung, die einen ähnlich hohen Rückgewinnungsgrad aufweist wie das PRISA-Verfahren, sind diese Kosten mit 5,26 €/(E•a) am höchsten.

Diese Kostenbetrachtungen zeigen, dass mit Umsetzung des PRISA-Verfahrens eine Phosphorrückgewinnung zu Nettokosten von < 2,00 €/(E•a) umgesetzt werden kann. Für die Rückgewinnung aus der Asche ist aufgrund fehlender Erfahrungen aus dem Anlagenbau und Betrieb derartiger Anlagen noch mit ca. 3,00 €/(E•a) zu rechnen. Aufgrund vorhandener Optimierungspotentiale können hier noch Kostensenkungen erwartet werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Machbarkeit in NRW und Untersuchungen zu zentralen und dezentralen Verfahren“ (AZ IV-9-042420) wurden drei Szenarien zur Umsetzung eines Phosphorrecyclings für Nordrhein-Westfalen erarbeitet. Auf Basis dieses Abschlussberichtes wurden eine Ermittlung der Phosphorrecyclingpotentiale und der damit verbundenen Netto-Jahreskosten durchgeführt. Für NRW sind auf Basis der jährlichen Datenerhebung zum Stand der Abwasserbehandlung (Stand 2005) folgende Ausbaugrade in Abhängigkeit der Kläranlagengrößen festzustellen:

- Gesamtausbaugröße aller kommunalen Kläranlagen in NRW: 35.611.178 E
- Kläranlagen mit einer Ausbaugröße > 20.000 E: 32.928.612 E (ca. 32,9 Mio. E)
- Kläranlagen mit einer Ausbaugröße zwischen 20.000 E und 100.000 E: 9.929.997 E (ca. 9,9 Mio. E)
- Kläranlagen mit einer Ausbaugröße > 100.000 E: 22.998.615 E (ca. 23 Mio. E)

Für die einzelnen Szenarien ergeben sich damit folgende Randbedingungen:

Szenario 1: Phosphor-Nachfällung mit Magnesium zur Phosphorrückgewinnung

Da dieses Verfahren sehr kostenintensiv ist, werden Anlagen mit einer Ausbaugröße von > 100.000 E berücksichtigt. Für NRW ergibt sich ein Erfassungsgrad von 65 %.

Szenario 2: PRISA-Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung

Dieses Verfahren kann auf jeder Anlage mit anaerober Schlammbehandlung eingesetzt werden. Dies sind i. d. R. meist Anlagen > 20.000 E. Hieraus ergibt sich ein möglicher Erfassungsgrad für NRW von 92 %.

Szenario 3: Phosphorrückgewinnung aus den Klärschlammaschen der Klärschlammmonoverbrennungsanlagen

Dieses sehr aufwendige und teure Verfahren ist in NRW begrenzt einsetzbar aufgrund der derzeitigen maximalen Kapazitäten der Monoverbrennungsanlagen, die einer Klärschlammmenge von ca. 15,2 Mio. E entsprechen. Dies entspricht einem Erfassungsgrad für NRW von ca. 43 %.

In der Tabelle 3.2 sind für die erläuterten Szenarien die Randbedingungen eines Phosphorrecyclings aufgeführt und die entsprechenden Netto-Jahreskosten und Phosphorrückgewinnungspotentiale dargestellt. Für das PRISA-Verfahren wurden die spezifischen Jahres-Nettokosten von 1,91 €/E•a für einen Neubau ohne Nutzung vorhandener Beckenvolumina und von 1,57 €/E•a für einen Neubau mit Nutzung vorhandener Beckenvolumina zu 1,74 €/E•a gemittelt.

Tabelle 3.2: Netto-Jahreskosten und Phosphorrückgewinnungspotentiale unterschiedlicher Szenarien für NRW

	Einheit	Nachfällung	PRISA	Elution von KS-Asche
Randbedingungen				
Kläranlagengröße	E	> 100.000	> 20.000	278.000
Angeschlossene Einwohnerwerte	Mio. E	23,0	32,9	15,2
Erfassungsgrad	%	65	92	43
spezifische Nettokosten (inkl. Erlöse)	€/E•a	5,26	1,74	2,82
Menge P _{recycelt} (einwohnerspezifisch)	kg P/(E•a)	0,27	0,24	0,53
Kosten und Potentiale				
Jahreskosten	Mio. €/a	121,0	57,3	42,7
Phosphorpotentiale	Mg P/a	6.120	7.788	8.066

Die Abschätzung der Kosten und Potentiale einer Phosphorrückgewinnung zeigen, dass für NRW eine Ausrüstung der bestehenden Monoverbrennungsanlagen die wirtschaftlichste Form eines Phosphorrecyclings darstellt. Der Einbau von Nachfällungsanlagen auf Kläranlagen mit einer Anschlussgröße > 100.000 E stellt keine wirtschaftliche Möglichkeit für ein Phosphorrecycling dar. Das PRISA-Verfahren ist deutlich kostengünstiger als die Nachfällung zu betreiben und weist des Weiteren ein noch höheres Rückgewinnungspotential auf.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Phosphorrecycling – Rückgewinnung von industriell bzw. landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen aus Abwasser und Klärschlamm“ (AZ IV - 9 - 042 423) wurden in Studien Phosphorpotentiale ermittelt sowie verfügbare Verfahrenstechniken zur Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammaschen recherchiert und beschrieben. Der Entwicklungsstand der unterschiedlichen Verfahrenstechniken ist zum größten Teil der Labormaßstab. Einige Anlagentechniken sind im halbtechnischen Maßstab bereits erprobt und einige wenige wie z. B. das Seaborne-Verfahren und das SUSAN-Verfahren werden derzeit großtechnisch umgesetzt.

Neben den Studien wurden wissenschaftliche Untersuchungen und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Phosphorrückgewinnung aus Überschussschlamm (Anlagen ohne chemische Phosphorelimination), Fällschlamm der Nachfällung, Klärschlammaschen aus Monoverbrennungsanlagen, Prozesswässern der Schlammbehandlung (PRISA) sowie anaerob stabilisiertem Klärschlamm durchgeführt. Diese Versuche haben gezeigt, dass:

- eine Phosphorrückgewinnung aus dem Fällschlamm der Nachfällung mit Eisen oder Aluminium mit einem vertretbaren verfahrenstechnischen Umfang nicht umsetzbar ist.
- die Rückgewinnung aus anaerob stabilisierten Schlämmen mittels Säureaufschluss technisch durchführbar ist, aber die Rückgewinnungspotentiale mit ca. 40 % deutlich hinter den Erwartungen von mehr als 80 % zurück bleiben. Des Weiteren ist diese Verfahrenstechnik sehr aufwendig und störanfällig.
- die Rückgewinnung aus dem Überschussschlamm einer Kläranlage mit einer ausschließlichen biologischen Phosphorelimination mittels eines Calcium-Kristallisators möglich ist, aber noch zusätzlicher weiterer Untersuchungen bedarf, da die Prozesskinetik noch nicht vollständig erforscht ist.
- das Verfahren mit dem größten Recyclingpotential die Rückgewinnung aus Klärschlammaschen von Monoverbrennungsanlagen ist. Dieses Verfahren ist ähnlich komplex wie die Rückgewinnung aus dem anaerob stabilisiertem Klärschlamm, jedoch deutlich einfacher zu betreiben und die Ergebnisse sind reproduzierbar. Das Phosphorrückgewinnungspotential kann mit ca. 85 % der Phosphorfracht im Zulauf einer kommunalen Kläranlage bzw. mit $1,5 \text{ g}/(\text{E}\cdot\text{d})$ abgeschätzt werden.
- die Rückgewinnung aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung einer Kläranlage mit ausschließlicher biologischer Phosphorelimination sehr stabile und reproduzierbare Betriebsergebnisse geliefert hat. Hier war es möglich, vom Labormaßstab ausgehend eine Anlage im halbtechnischen Maßstab zu errichten und erfolgreich zu betreiben. Das Phosphorrückgewinnungspotential kann mit ca. 35 % der Phosphorfracht im Zulauf einer kommunalen Kläranlage bzw. mit bis zu $0,6 \text{ g}/(\text{E}\cdot\text{d})$ abgeschätzt werden.

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Betrieb der Versuchsanlagen wurden ein Anlagen-Upscaling durchgeführt und in einer weiteren Studie die Investitions- und Betriebskosten für die Verfahrenstechniken Rückgewinnung aus der Asche, dem Prozesswasser der Schlammbehandlung (PRISA) und dem Abwasser (Nachfällung) abgeschätzt und gegenübergestellt. Ausgehend von diesen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden Potentiale und Kosten unterschiedlicher Szenarien der Phosphorrückgewinnung für Nordrhein-Westfalen näher betrachtet. Hierbei wurden die Nachfällung mit Magnesiumoxid im Ablauf der Nachklärung in Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von > 100.000 E, die Behandlung der Prozesswässer der Schlammbehandlung für Kläranlagen ab einer Anschlussgröße von > 20.000 E und die Rückgewinnung von Phosphor aus den Klärschlammaschen aller Monoverbrennungsanlagen in NRW in die Betrachtungen mit einbezogen. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche mit ca. 8.000 Mg P /a das größte Potential hat, gefolgt von der Rückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung (PRISA) mit 7.800 Mg P /a. Die Jahreskosten betragen inkl. der Erlöse für das Phosphorrecycling aus der Asche ca. $2,82$ €/(E•a) bzw. $5,30$ €/kg P_{recycelt} und für das PRISA-Verfahren $1,74$ €/(E•a) bzw. $7,36$ €/kg P_{recycelt} .

Die Untersuchung der Produkte des Phosphorrecyclings umfasste auch die Ermittlung der Düngewirkung. Es konnte nachgewiesen werden, dass einige Produkte der Phosphatrückgewinnung wie z. B. MAP und Calciumphosphat direkt in der Landwirtschaft eingesetzt werden können. Die technischen Möglichkeiten der Ausbringbarkeit mit herkömmlichen landwirtschaftlichen Maschinen sowie der Preis werden die entscheidenden Faktoren sein, die über eine Verbreitung entscheiden. Für den Einsatz in der Phosphatindustrie bzw. in der Düngemittelindustrie spielt die chemische Zusammensetzung eine entscheidende Rolle. So sind beispielsweise für die Phosphatindustrie hohe Eisenanteile und in der Düngemittelindustrie hohe Schwermetallkonzentrationen unerwünscht.

Dieses Forschungsvorhaben konnte aufzeigen, dass der Stoffstrom Abwasser mit seinen Teilströmen Wasser, Klärschlamm und Asche eine Ressource für den Mangelstoff Phosphor darstellt. Die derzeit im wissenschaftlichen Fokus stehenden Verfahrenstechniken befinden sich noch in der Entwicklungs- bzw. Optimierungsphase. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch auf, dass der im Abwasser enthaltene Phosphor mit einem vertretbaren Aufwand recycelt werden kann, auch wenn derzeit die Kosten für Phosphordünger mit ca. 1 €/kg P deutlich unter den Recyclingkosten von $5 - 10$ €/kg P liegen.