

13. Bundesweites Phosphor-Rückgewinnungskonzept für Klärschlamm und Klärschlammmaschen aus der Monoverbrennung

Wibke Everding, Johannes Pinnekamp, Aachen

1 Einleitung

In Rahmen des Begleitprojekts PhoBe „Phosphorrecycling – ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Rückgewinnungskonzepts für Deutschland“ der BMBF-BMU Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ wurde ein Phosphorrückgewinnungskonzept erstellt, welches in diesem Beitrag zusammengefasst dargestellt wird. Grundlage für das Konzept sind die ebenfalls im Projekt PhoBe aus einer Bilanz ermittelten phosphorreichen Stoffströme (Gethke, 2011) sowie die durchgeführte Kostenabschätzung von Phosphorrückgewinnungsverfahren (Everding und Pinnekamp, 2011). Besonderes Augenmerk wird auf die gemeinsame oder getrennte Behandlung der Stoffströme sowie den Anfallort und die Einbindung in bestehende Infrastruktur gelegt.

2 Geeignete Stoffströme für eine Phosphorrückgewinnung

Die in Tabelle 1 aufgeführten Stoffströme sind nach der o.g. Bilanz theoretisch für eine Phosphorrückgewinnung und somit für das Rückgewinnungskonzept von Bedeutung. Da nicht jeder theoretisch zur Verfügung stehende Stoffstrom auch für die Phosphorrückgewinnung geeignet ist, wird in den Kapiteln 2.1 bis 2.4 auf die Einsatzmöglichkeiten der Stoffströme und ihre Potenziale im Einzelnen eingegangen.

Tabelle 1: Phosphorreiche Stoffströme (Gethke, 2011)

Nummer (aus der Bilanz)	Bezeichnung/Stoffstrom	P-Menge
		[Mg P/a]
5	Abwasser Düngemittelindustrie	9.508
14A	Abwasser aus der sonstigen Industrie, Direkteinleitung	4.075
14B	Abwasser aus der sonstigen Industrie, Indirekteinleitung	451
14C	Abwasser aus der Nahrungsmittelindustrie, Direkteinleiter	451
19A	Wirtschaftsdünger zur Düngung	227.000
19B	Wirtschaftsdünger zur Energiegewinnung	132.000
21A	Gärrückstände zur Düngung	160.622
21B	Gärrückstände zur Entsorgung	40.155
23	Kommunales Abwasser	54.171
25	Gereinigtes Abwasser zu den Gewässern	8.127
26A	Klärschlamm zur landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion	14.393
26B	Klärschlamm zur Entsorgung	35.932

2.1 Industrielle Abwässer

Nach Aussage der zwei größten Phosphordüngemittelhersteller in Deutschland, wird das in der Produktion anfallende Abwasser zum Teil intern als Prozesswasser wieder verwendet. Für das Konzept wird angenommen, dass eine Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Düngemittelindustrie vor Ort aus Gründen der internen Wiederverwendung des Abwassers und des relativ geringen Phosphormengenstroms nicht sinnvoll ist. Eine industrielle Abwasserreinigung und Phosphorelimination finden nach Auskunft der Düngemittelhersteller nicht statt, so dass die Abwässer ohne Vorreinigung als Indirekteinleiter mit einer ermittelten Fracht von 9.508 Mg P/a (Nr. 5) dem Stoffstrom kommunales Abwasser angerechnet wird.

Die für das Rückgewinnungskonzept ebenfalls relevante Industrie wird in „Nahrungsmittel- sowie sonstige Industrie“ (14A - C) unterteilt. In der Nahrungsmittelindustrie fallen beispielsweise in der Milch- und Kartoffelverarbeitung Abwässer mit einem hohen Phosphorgehalt an. Bei der Humana Milchindustrie GmbH in Altentreptow wurde das REPHOS-Verfahren im großtechnischen Maßstab implementiert, und das gewonnene MAP (Magnesiumammoniumphosphat) wird als sogenanntes REPHOS-Produkt als Düngemittel vermarktet (Ristow et al., 2009). Die Abwässer der Nahrungsmittelindustrie und der sonstigen Industrie werden in einen Direkt- und Indirekteinleiterstrom unterteilt. Der Direkteinleiterstrom der Nahrungsmittelindustrie umfasst eine Phosphorfracht von 451 Mg P/a (Nr. 14A), die in den Vorfluter eingeleitet wird. Eine Indirekteinleitung zur kommunalen Kläranlage existiert bei der Nahrungsmittelindustrie nach der erstellten Bilanz nicht. Die Direkteinleitung der sonstigen Industrie in die Vorflut wird ebenfalls mit 451 Mg P/a (Nr. 14B) angegeben. Der Indirekteinleiterstrom der sonstigen Industrie umfasst insgesamt 4.075 Mg P/a (Nr. 14A) und ist im Verhältnis zu dem Phosphorstrom des kommunalen Abwassers relativ gering. Da die Industriebetriebe geographisch meist sehr verstreut in Deutschland vorliegen und bisher keine weiteren Projekte nach dem Vorbild der

Humana Milchindustrie in Deutschland bekannt sind, wird ebenso wie bei der Düngemittelindustrie angenommen, dass die Abwässer aus der Indirekteinleitung der sonstigen Industrie der kommunalen Kläranlage angedient werden und somit im Phosphorrückgewinnungskonzept nicht einzeln berücksichtigt werden. Die Abwässer aus der Direkteinleitung werden aus den oben genannten Gründen im Konzept nicht weiter berücksichtigt.

2.2 Kommunales Abwasser

Gemäß des Statistischen Bundesamtes waren im Jahr 2007 78.112.000 Einwohner und 46.398.000 Einwohnergleichwerte an kommunale Kläranlagen in Deutschland angeschlossen (Destatis, 2009b). Ausgehend von einer spezifischen Phosphorfracht von 1,9 g P/(E·d) beträgt die jährlich durch den Menschen auf kommunalen Kläranlagen zur Phosphorrückgewinnung zur Verfügung stehende Phosphormenge ca. 54.171 Mg P/a. Insgesamt steht mit der Düngemittel- und der sonstigen Industrie sowie dem Abwasser aus den Haushalten im Zulauf der kommunalen Kläranlagen eine rückgewinnbare Phosphormenge von 67.754 Mg P/a zur Verfügung.

Diese Mengenangabe deckt sich mit den realen Messungen aus dem „22. Leistungsvergleich Kommunaler Kläranlagen 2009“, in dem eine P_{ges} -Fracht im Zulauf der Kläranlagen von 65.897 Mg P/a angegeben wird (DWA, 2010). Eine Phosphorrückgewinnung aus dem Kläranlagenablauf in Form einer Nachfällung hat sich in der Vergangenheit aufgrund der geringen P-Konzentrationen und hohen Investitionskosten als unwirtschaftlich erwiesen und wird als Verfahren der Phosphorrückgewinnung nach unserem Kenntnisstand nicht betrieben. Für Kläranlagen, die aus Gründen des erhöhten Gewässerschutzes hohe Anforderungen an die Phosphorgrenzwerte als Auflage haben (z.B. in Trinkwassereinzugsgebieten), könnte beispielsweise eine Nachfällung zusätzlich oder gegebenenfalls anstelle eines Filters eingesetzt werden. Da dies häufig kleinere Kläranlagen betrifft, könnten nur sehr geringe Mengen an Phosphor rückgewonnen werden. In dem Konzept wird daher angenommen, dass die Phosphormenge von 8.127 Mg P/a (Nr. 25) aus dem Stoffstrom „gereinigtes Abwasser zu den Gewässern“ einer Phosphorrückgewinnung nicht zur Verfügung stehen.

Ein weiterer zur Phosphorrückgewinnung geeigneter Stoffstrom stellt das Schlammwasser auf kommunalen Kläranlagen dar. Bereits heute werden - jedoch nicht in Deutschland - der DHV-Crystalactor[®] und OSTARA PEARL[™] Prozess im großtechnischen Maßstab mit Erfolg angewendet. Da die Schlammwassermenge und Phosphorkonzentrationen im Schlammwasser der kommunalen Kläranlagen für Deutschland nicht ohne weiteres quantitativ erfasst werden können und die genannten Verfahren in der Förderinitiative nicht untersucht wurden, wird der Stoffstrom Schlammwasser für das Rückgewinnungskonzept nicht weiter betrachtet. Die Phosphormengen werden jedoch über den Klärschlamm konzeptionell berücksichtigt.

2.3 Wirtschaftsdünger und Gärrückstände

Der Begriff Wirtschaftsdünger umfasst die Stoffströme Jauche (flüssige Exkrementen), Gülle (tierische Ausscheidungen inkl. Einstreu) und Festmist (Einstreu mit Exkrementen). Nach der erstellten Bilanz werden in Deutschland jährlich 227.000 Mg P/a in Form von Wirtschaftsdünger zu Düngezwecken genutzt und 132.000 Mg P/a befinden sich im Wirtschaftsdünger der als Substrat der Biogasproduktion zur Energiegewinnung angedient wird. Der flüssige Stoffstrom (Gülle und Jauche) der der Biogasproduktion angedient wird besitzt ein Phosphorpotenzial von ca. 82.000 Mg P/a. (Gethke, 2011)

Der Gärrückstand aus den Biogasanlagen geht zu 80% mit 160.622 Mg P/a in die Düngung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion und die restlichen 20% 40.155 Mg P/a werden der Abfallentsorgung angedient. In dem Konzept werden nur die Stoffströme betrachtet, die bisher noch nicht aufgrund des hohen Nährstoff- bzw. Phosphorgehalts als Düngemittel genutzt werden. Grundsätzlich wäre auch eine Phosphorrückgewinnung aus den Wirtschaftsdüngern möglich, die bereits zur Düngung ausgebracht werden, bspw. um das Volumen zu reduzieren und den Nährstoff aufzukonzentrieren.

Da in der Förderinitiative keine Verfahren entwickelt und betrachtet wurden, die eine Phosphorrückgewinnung aus Gülle oder der flüssigen Phase der Gärrückstände vorsieht, wird in diesem Konzept nur das Potenzial einer Phosphorrückgewinnung aus diesen Stoffströmen vorgestellt, jedoch nicht die Einbindung in die Infrastruktur konzipiert.

2.4 Klärschlamm

In den kommunalen Kläranlagen wird im Zuge der Abwasserreinigung der im Abwasser gelöste Phosphor in der biologischen Reinigungsstufe in die Mikroorganismen durch Inkorporation eingeschlossen und darüber hinaus durch Fällmittel chemisch gebunden. Der belebte Schlamm wird als Überschussschlamm dem Abwasserreinigungsprozess entzogen und größtenteils einer anaeroben Klärschlammbehandlung zugeführt. Durch die Überführung des Phosphors aus dem Abwasser in den Klärschlamm stellt dieser den potenziell größten Stoffstrom zur Phosphorrückgewinnung auf kommunalen Kläranlagen dar. Die Menge des auf kommunalen Kläranlagen anfallenden Klärschlammes ist seit Jahren relativ konstant und betrug im Jahr 2008 2.054.102 Mg/a (Trockenmasse) (Destatis, 2009a). In Abbildung 1 ist die prozentuale Verteilung der unterschiedlichen Klärschlamm-entsorgungswege für Deutschland für die Jahre 1983 bis 2008 dargestellt. Insgesamt gingen 2008 52,5% in die thermische Entsorgung, 28,6% in die Landwirtschaft, 16,1% in den Landschaftsbau, 0,1% wurden deponiert und 2,7% wurden anderweitig verwertet. Der Anteil an deponiertem Klärschlamm sank von 1983 mit einem Anteil von 54% bis 2004 auf 4%. Seit dem Inkrafttreten des Deponierungsverbots durch die TA Siedlungsabfall im Jahr 2005, für Stoffe mit einem organischen Anteil von > 5% ist der Anteil des deponierten Klärschlammes bis 2008 auf 0,1% gesunken. Der Anteil an Klärschlamm für die thermische Entsorgung/Verwertung stieg seit 1998 mit 19% kontinuierlich auf 52,5% im Jahr 2008 an.

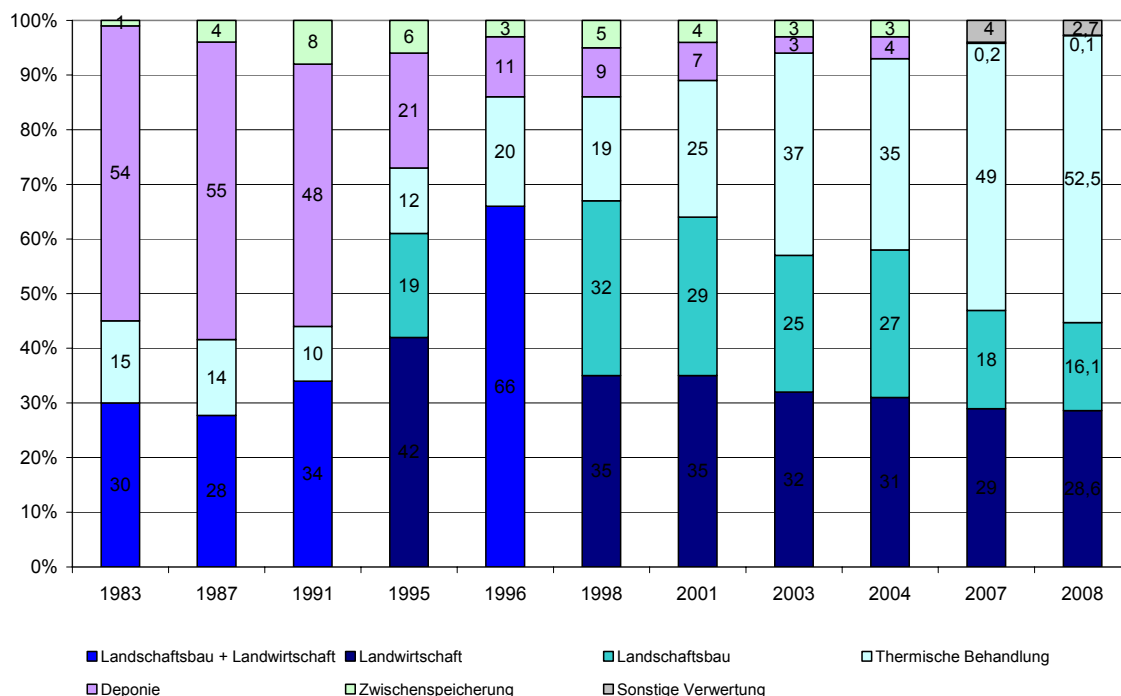


Abb. 1: Entwicklung der Klärschlammbehandlungswege von 1983 - 2008 in Deutschland (Destatis, 2009a; Jasper et al., 2009)

Die Statistik gibt zwar eine prozentuale Verteilung der Klärschlammbehandlungswege für gesamt Deutschland an, jedoch unterscheiden sich die Behandlungswege in den einzelnen Bundesländern stark voneinander. In Mecklenburg-Vorpommern beispielsweise werden ca. 86% der Klärschlämme in der Landwirtschaft verwertet und lediglich 2,3% thermisch entsorgt wo hingegen in Baden-Württemberg nur ca. 2,2% in die Landwirtschaft verbracht und 86,7% thermisch entsorgt werden. In Berlin und Hamburg wird der gesamte Klärschlamm thermisch entsorgt (Destatis, 2009a).

Die thermische Klärschlammbehandlung schließt die Mono-, Mit- und Müllverbrennung sowie die Mitverbrennung in Zementwerken ein. Eine prozentuale Aufteilung des jeweiligen Verbrennungsanteils wurde durch eine Umfrage der DWA ermittelt. Demnach wurde 2008 44% (475.000 Mg/a) des Klärschlammes in Monoverbrennungsanlagen verwertet, 44% gingen in die Mitverbrennung in Stein- und Braunkohlekraftwerke, 9% in die Zementindustrie und 3% in die Müllverbrennung. (Lehrmann, 2010a)

Eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche ist nur sinnvoll, wenn die Klärschlämme in Monoverbrennungsanlagen verbrannt werden. Bei der Klärschlammmitverbrennung wird ein geringer Anteil des phosphorreichen Klärschlammes mit phosphorarmen Stoffströmen vermengt, so dass das Phosphorrückgewinnungspotenzial sinkt und die produktspezifischen Kosten [€/kg P] steigen. Resultierend daraus, wird bei der Erstellung des Rückgewinnungskonzeptes für den Stoffstrom der thermischen Behandlung nur Klärschlammmasche aus Monoverbrennungsanlagen zur Phosphorrückgewinnung berücksichtigt.

Unter der Annahme, dass die jährlich 475.000 Mg in den Monoverbrennungsanlagen verbrannten Klärschlämme einer Phosphorrückgewinnung zugeführt werden, können

bei einem Phosphorgehalt im Klärschlamm von 24,5 g P/kg TR ca. 11.900 Mg P/a einer Rückgewinnung angedient werden.

Die landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme dienen größtenteils aufgrund der hohen Nährstoffkonzentrationen als Düngemittel oder Bodenverbesserungsmaterial und stehen einer klassischen Phosphorrückgewinnung nicht zur Verfügung, da sonst im Vorfeld der für die Landwirte nützliche Phosphor entzogen würde. Sie tragen jedoch als Langzeitdünger durch die Kreislaufführung zur Ressourcenschonung bei. Die Klärschlämme zur landschaftsbaulichen und sonstigen Verwertung sowie die Klärschlämme zur Deponierung und thermischen Entsorgung stehen einer Phosphorrückgewinnung vor der jeweiligen Verwertung bzw. Entsorgung zur Verfügung.

Im Rahmen der Förderinitiative „Kreislaufführung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor“ wurden als Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm die Verfahren PHOXNAN und FIX-Phos entwickelt und erforscht. Die in Monoverbrennungsanlagen verwerteten Klärschlämme stehen erst nach der Verbrennung in Form von Asche zur P-Rückgewinnung zur Verfügung. In der Förderinitiative wurden das PASCH-, SESAL-Phos-Verfahren sowie der direkte Aufschluss von Klärschlamm-Asche zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsaschen entwickelt.

Das Phosphorpotenzial des Klärschlammes beträgt insgesamt ca. 50.325 Mg P/a. Werden die landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme abgezogen, könnten noch ca. 35.043 Mg P/a in einem technischen Prozess rückgewonnen werden.

3 Phosphorrückgewinnungskonzept für Deutschland

3.1 Methodik

Das Phosphorrückgewinnungskonzept für Deutschland beschränkt sich auf die Stoffströme Klärschlamm bzw. Klärschlamm-Asche, da diese nach der Reinigung des kommunalen Abwassers das höchste Phosphorrückgewinnungspotenzial aufweisen. Der Klärschlamm-Asche kommt dabei eine Schlüsselrolle zuteil, da hier die höchsten Phosphorkonzentrationen in einem gut lager- und transportfähigen Stoffstrom an zentralen Standorten vorliegen. Eine P-Rückgewinnung aus der wässrigen Phase wäre aus dem Schlammwasser im Nebenstrom oder des Kläranlagenablaufs möglich, die jedoch wie bereits beschrieben mengenmäßig zu gering sind. Bei der abschließenden Betrachtung wird der Stoffstrom Wirtschaftsdünger mengenmäßig in das Konzept eingebunden.

In Abbildung 2 sind die Standorte der Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Deutschland dargestellt. Insgesamt werden in Deutschland (Stand Anfang 2011) 19 kommunale und 7 industrielle Klärschlammmonoverbrennungsanlagen (KMV) betrieben, wobei in einigen Anlagen auch Rechengut und Fette von Kläranlagen mitverbrannt werden. Die 19 kommunalen Anlagen werden für das Rückgewinnungskonzept in drei unterschiedliche Anlagengrößen unterteilt (Abbildung 2). Die erste Gruppe erfasst alle KMV mit einem Klärschlammumsatz von < 20.000 Mg TR/a

(acht Anlagen), die zweite Gruppe zwischen 20.000 bis 40.000 Mg TR/a (sieben Anlagen) und die dritte Gruppe ≥ 40.000 Mg TR/a (vier Anlagen). Die Verbrennungsanlagen werden nicht explizit in Klärschlammverbrennungs- und Klärschlammvergasungsanlagen unterteilt. In Abbildung 2 ist die Konzentrierung der Verbrennungsanlagen auf den Westen und Süden Deutschlands gut zu erkennen. Diese Anordnung spiegelt die industriellen Schwerpunktregionen (höhere Schadstoffbelastungen der Schlämme) sowie die politische Einstellung der einzelnen Bundesländer zur landwirtschaftlichen und thermischen Klärschlammmentsorgung wider. Bereits 2001 beschloss die bayerische Staatsregierung den „Ausstieg“ aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung der sich wenige Jahre später die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg anschlossen (Spitznagel, 2011).

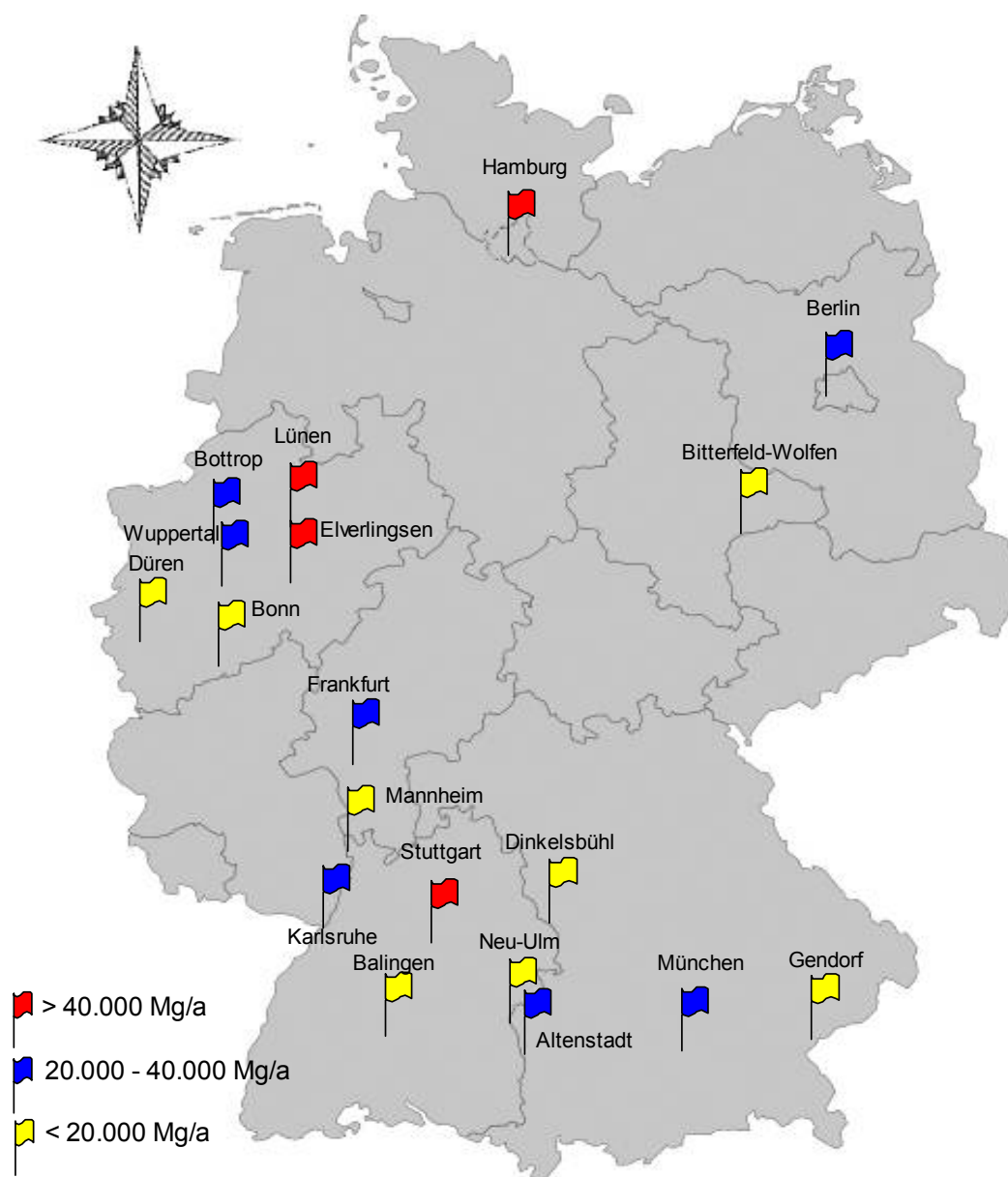


Abb. 2: Klärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland (Standorte nach Lehrmann, 2010a)

Die Mitverbrennung von Klärschlamm begann erst im Jahr 1995, hatte aber bereits 2004/2005 die Verbrennungskapazität der Monoverbrennung überstiegen und beträgt heute ca. 700.000 Mg TS/a. Die Kapazitäten der Monoverbrennung betragen 2006 ca. 510.000 Mg TS/a. Den Einbruch im Jahr 2007 ist durch die Stilllegung der Klärschlammvergasungsanlage Schwarze Pumpe mit einer Kapazität von 30.000 Mg/a zu erklären. Die Zunahme in 2008 beruht auf der Inbetriebnahme der Anlagen in Altenstadt und Dinkelsbühl mit einer Gesamtkapazität von ca. 30.000 Mg/a. Ende 2010 wurde die Klärschlammvergasungsanlage in Mannheim mit einer Kapazität von 5.000 Mg/a in Betrieb genommen. Die Gesamtkapazität der Monoverbrennungsanlagen beträgt 2011 ca. 510.000 Mg TS/a. (Lehrmann, 2010a)

Nach Lehrmann (2010b) sind die Monoverbrennungsanlagen ausgelastet und die Abweichungen zwischen Kapazität und tatsächlich verbrannter Menge auf Reparaturen und Betriebsstörung zurück zu führen. Die tatsächlich freien Kapazitäten werden auf maximal 5% geschätzt.

3.2 Darstellung von Szenarien

In dem entwickelten Phosphorrückgewinnungskonzept werden insgesamt sechs Szenarien (Monoklärschlammverbrennung) mit fünf Unterkategorien (Klärschlammbehandlung) betrachtet.

- Szenario 1: Klärschlammmonoverbrennungsaschen aus Anlagen mit einem Durchsatz von ≥ 40.000 Mg/a werden einer P-Rückgewinnung angedient.
- Szenario 2: Klärschlammmonoverbrennungsaschen aus Anlagen mit einem Durchsatz von > 20.000 Mg/a werden einer P-Rückgewinnung zugeführt.
- Szenario 3: Alle Aschen aus der Monoklärschlammverbrennung werden einer P-Rückgewinnung zugeführt (Stand heute).
- Szenario 4: Alle Aschen aus der Monoklärschlammverbrennung sowie die Hälfte der Aschen der bisher landwirtschaftlich verwerteten Klärschlamme werden einer P-Rückgewinnung zugeführt.
- Szenario 5: Alle heute thermisch entsorgten Klärschlämme werden monoverbrannt und einer P-Rückgewinnung angedient.
- Szenario 6: Alle Klärschlämme werden in Monoverbrennungsanlagen verbrannt und in eine P-Rückgewinnung gegeben.

Die fünf Unterkategorien a bis e geben die Kläranlagengrößen an, auf denen eine Phosphorrückgewinnung zusätzlich aus dem Klärschlamm erfolgen kann, sowie das angewendete Rückgewinnungsverfahren.

- a: nur P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche
- b: auf Kläranlagen > 1 Mio. E, als P-Rückgewinnungsverfahren wird das FIX-Phos-Verfahren angewendet
- c: auf Kläranlagen > 1 Mio. E, als P-Rückgewinnungsverfahren wird das FIX-Phos- und PHOXNAN-Verfahren angewendet

- d: auf Kläranlagen der Größenklasse 5 (> 100.000 E), als P-Rückgewinnungsverfahren wird das FIX-Phos-Verfahren angewendet
- e: auf Kläranlagen der Größenklasse 5 (> 100.000 E), als P-Rückgewinnungsverfahren wird das FIX-Phos- und PHOXNAN-Verfahren angewendet

Die vier in Deutschland betriebenen Monoklärschlammverbrennungsanlagen mit einem Durchsatz von ≥ 40.000 Mg TS/a haben einen prozentualen Anteil der Verbrennungsleistung an der Gesamtmenge von ca. 36% und verbrennen ca. 10,5% des anfallenden Klärschlammes (Szenario 1). Die elf Anlagen mit einem Durchsatz von > 20.000 Mg TS/a verbrennen ca. 82,6% des Klärschlammes, der in die Monoverbrennung gegeben wird, was einer Klärschlammmenge von 19,9% entspricht (Szenario 2). In Szenario 3 wird die gesamte Asche aus den Monoverbrennungsanlagen einer Phosphorrückgewinnung zugeführt. Dabei wird allerdings nicht davon ausgegangen, dass jede Monoverbrennungsanlage über eine eigene P-Rückgewinnungsanlage verfügt, sondern dass die Aschen aus den kleineren Verbrennungsanlagen einer P-Rückgewinnungsanlagen der größeren Verbrennungsanlagen zugeführt werden.

Studien gehen davon aus, dass ca. 40 bis 80% des heute landwirtschaftlich verwerteten Klärschlammes in Zukunft nicht mehr die Grenzwerte einer novellierten Klärschlammverordnung einhalten können, wenn die derzeit diskutierten Grenzwerte geltendes Recht werden. Ausgehend davon werden in Szenario 4 50% der heute noch landwirtschaftlich verwerteten Schlämme ebenfalls monoverbrannt und anschließend einer P-Rückgewinnung zugeführt. Insgesamt können so 37% der in Deutschland anfallenden kommunalen Klärschlämme einer P-Rückgewinnung aus Asche zugeführt werden. In Szenario 5 werden alle heute bereits thermisch entsorgten Klärschlämme einer Monoverbrennung zugeführt und in Szenario 6 alle Klärschlämme monoverbrannt. Für Szenario 4 bis 6 wäre der Neubau von Monoklärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland notwendig.

Die Unterkategorien a bis e variieren bei der Kläranlagengrößenklasse bzw. angeschlossenen Einwohnerzahlen auf der eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm durchgeführt werden soll sowie nach dem eingesetzten Rückgewinnungsverfahren. In Kategorie a findet die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche statt, der Klärschlamm wird zunächst nicht mit einbezogen.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und im Sinne einer einfachen Technik, wird für dieses Konzept das FIX-Phos-Verfahren als Referenzverfahren für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm gewählt. Da das FIX-Phos-Verfahren jedoch nur für Klärschlämme angewendet werden kann, die auf Kläranlagen mit einer biologischen oder überwiegend biologischen Phosphorelimination anfallen, wird als weiteres Verfahren das PHOXNAN-Verfahren angeführt, da ansonsten zu wenig Phosphor aus dem Klärschlamm genutzt werden kann. Da lediglich die Kläranlagen Waßmannsdorf und Bottrop bei der Ausbaugröße > 1 Mio. E eine biologische oder vorwiegend biologische Phosphorelimination durchführen, wird für Kategorie b für die Phosphorrückgewinnung mit dem FIX-Phos-Verfahren mit den angeschlossenen Einwohnerwerten der beiden Kläranlagen gerechnet. Da sowohl Bottrop als auch Berlin Standorte einer Monoverbrennungsanlage sind, ist die Wahrscheinlichkeit

gegeben, dass die rückgewinnbaren Phosphormengen sowohl in Kategorie a als auch b verrechnet werden. Da die Phosphormengen jedoch in Bezug auf die gesamten Mengen relativ gering sind, wird die Überschneidung nicht weiter berücksichtigt. In Kategorie c wird zusätzlich auf den weiteren Kläranlagen mit chemischer Phosphorelimination und einer Ausbaugröße von > 1 Mio. E das PHOXNAN-Verfahren angewendet.

In Kategorie d und e werden die Kläranlagen der Größenklasse GK 5 (>100.000 EW) betrachtet, von denen gemäß Statistischem Bundesamt (Destatis, 2009b) 252 Kläranlagen in Deutschland existieren, was einem prozentualen Anteil an den gesamten Kläranlagen von 2,5% entspricht. Diese 2,5% der Anlagen reinigen jedoch ca. 51,5% des Abwassers. Basierend darauf wird davon ausgegangen, dass auch 51,5% des in Deutschland anfallenden Klärschlammes auf den 252 Kläranlagen anfällt, jedoch abgemindert durch den in einer Befragung von Keicher und Krampe (2007) ermittelten prozentualen Ansatz, dass 95% der Kläranlagen GK 5 mit einer Faulung ausgestattet sind. Des Weiteren werden dem auf den Kläranlagen zur Verfügung stehenden Klärschlamm die Mengen abgezogen, die monoverbrannt und landwirtschaftlich verwertet werden. Da ebenso wie in Kategorie b nur Kläranlagen in Betracht kommen, auf denen die Phosphorelimination überwiegend biologisch durchgeführt wird, muss die Menge Klärschlamm um den prozentualen Ansatz der Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination verringert werden. Nach einer Studie der DWA (2005) wird das Abwasser von 6% der angeschlossenen Einwohner ausschließlich mit biologischer Phosphorelimination behandelt und 31% vorwiegend biologisch. Es wird angenommen, dass insgesamt 37% der Klärschlämme der GK 5 für das FIX-Phos-Verfahren verwendet werden können. In Kategorie e wird die zur Verfügung stehende Phosphormenge aus Kategorie d um die restlichen 63% Kläranlagen, auf denen keine Rückgewinnung mit dem FIX-Phos-Verfahren möglich ist, um das PHOXNAN-Verfahren erweitert.

In Tabelle 2 sind die theoretisch rückgewinnbaren Phosphormengen für die Szenarien dargestellt. Die Spanne der rückgewinnbaren Phosphormenge liegt zwischen ca. 5.300 Mg P/a für Szenario 1, wenn nur aus den vier großen KMV Aschen zur Phosphorrückgewinnung eingesetzt werden, und ca. 50.300 Mg P/a, wenn alle anfallenden Klärschlämme monoverbrannt werden und einer Phosphorrückgewinnung zugeführt werden.

Tabelle 2: Szenarien und Potenziale zur Phosphorrückgewinnung in Deutschland

	Szenario	1	2	3	4	5	6
		Klärschlammaschen aus Monoverbrennung zur P-Rückgewinnung					
	Asche	Anlagengröße > 40.000 Mg TR/a ¹	Anlagengröße > 20.000 Mg TR/a ²	aus allen Monoverbrennungsanlagen ³	wie Szenario 3 + Monoverbrennung von 50% der landwirtschaftlich verwerteten Schlämme ⁴	alle thermisch entsorgten Klärschlämme werden monoverbrannt ⁵	Alle Klärschlämme werden monoverbrannt
Klärschlamm	Mg P/a						
a	Nur P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche	5.317	9.996	12.093	19.290	26.421	50.325
b	KA > 1 Mio. E ⁶ (Fix-Phos)	5.709	10.389	12.486	19.683	26.814	
c	KA > 1 Mio. E (Fix-Phos, PHOXNAN)	8.565	13.245	15.342	22.538	27.692	
d	KA > 100.000 E (> GK 5) ⁷ (Fix-Phos)	9.607	14.286	16.384	23.580	28.100	
e	KA > 100.000 E (> GK 5) (Fix-Phos, PHOXNAN)	17.234	21.914	24.011	31.207	31.084	

1: 44% der Aschen (10,5% des Klärschlamm) zur P-Rückgewinnung

2: 82,6% der Aschen (19,9% des Klärschlamm) zur P-Rückgewinnung

3: 100% der Aschen (24% des Klärschlamm) zur P-Rückgewinnung

4: 38% des Klärschlamm zur P-Rückgewinnung

5: 51,5% des Klärschlamm zur P-Rückgewinnung

6: 0,1% der Anlagen behandeln 13,5% des Abwassers/Klärschlamm

7: 2,5% der Anlagen behandeln 52% des Abwassers/Klärschlamm

Als Referenzverfahren für die P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche wird für das Rückgewinnungskonzept das PASCH-Verfahren gewählt, da es im Vergleich zum SESAL-Phos-Verfahren nach der Kostenabschätzung von Everding und Pinnekamp (2011) wirtschaftlicher ist. Des Weiteren ergab eine DWA Erhebung „Stand der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in Deutschland – Ergebnisse der DWA Klärschlammhebung 2003“, dass der Phosphor in ca. 67% des anfallenden Abwassers mit eisenhaltigen, 18,2% mit eisen- und aluminiumhaltigen und 13,5% mit rein aluminiumhaltigen Fällmitteln eliminiert werden. Da das SESAL-Phos-Verfahren nur für Klärschlammaschen angewendet werden kann, die von Klärschlämmen stammen die auf Kläranlagen mit aluminiumhaltigen Fällmitteln gefällt werden, kann das SESAL-Phos-Verfahren im Vergleich zum PASCH-Verfahren nur für einen geringen Anteil (13,5%) der Klärschlämme (Aschen) angewendet werden.

Für die Berechnung, welche Phosphormengen tatsächlich rückgewonnen werden können, müssen die Wirkungsgrade der einzelnen Rückgewinnungsverfahren berücksichtigt werden. Das PASCH-Verfahren hat einen P-Rückgewinnungswirkungsgrad von ca. 90%, das FIX-Phos-Verfahren von 37% und das PHOXNAN-Verfahren einen Wirkungsgrad von 51%.

In Tabelle 3 sind die rückgewinnbaren Phosphormengen inklusive der Wirkungsgrade für den Stoffstrom Klärschlamm und Klärschlammaschen zusammengestellt. Die Phosphormenge liegt für die Rückgewinnung aus Klärschlammasche (Unterkategorie a) abhängig vom Szenario zwischen ca. 4.800 Mg P/a (1a) und ca. 45.300 Mg P/a (6a). Durch die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm können auf Kläranlagen mit über 1 Mio. angeschlossenen Einwohnerwerten durch die Anwendung des FIX-Phos-Verfahrens weitere 145 Mg P/a und durch den Einsatz des PHOXNAN-Verfahrens weitere 1.602 Mg P/a rückgewonnen werden. Das Phosphorrückgewinnungspotenzial liegt auf Kläranlagen der Größenklasse 5 durch die

Anwendung des FIX-Phos-Verfahrens bei 1.587 Mg P/a und mit dem PHOXNAN-Verfahren bei weiteren 3.890 Mg P/a.

Tabelle 3: Rückgewinnbare Phosphormengen in Deutschland inkl. Wirkungsgrade der verschiedenen Techniken

	Szenario	1	2	3	4	5	6
		Klärschlammaschen aus Monoverbrennung zur P-Rückgewinnung					
	Asche	Anlagengröße > 40.000 Mg TR/a ¹	Anlagengröße > 20.000 Mg TR/a ²	aus allen Monoverbrennungsanlagen ³	wie Szenario 3 + Monoverbrennung von 50% der landwirtschaftlich verwerteten Schlämme ⁴	alle thermisch entsorgten Klärschlämme werden monoverbrannt ⁵	Alle Klärschlämme werden monoverbrannt
		Klärschlamm					
		Mg P/a					
a	Nur P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche	4.785	8.996	10.884	17.361	23.779	45.293
b	KA > 1 Mio. E ⁶ (Fix-Phos)	4.930	9.142	11.029	17.506	23.924	
c	KA > 1 Mio. E (Fix-Phos, PHOXNAN)	6.387	10.598	12.486	18.963	24.372	
d	KA > 100.000 E (> GK 5) ⁷ (Fix-Phos)	6.372	10.584	12.471	18.948	24.400	
e	KA > 100.000 E (> GK 5) (Fix-Phos, PHOXNAN)	10.262	14.474	16.361	22.838	25.922	

1: 44% der Aschen (10,5% des Klärschlamm) zur P-Rückgewinnung

2: 82,6% der Aschen (19,9% des Klärschlamm) zur P-Rückgewinnung

3: 100% der Aschen (24% des Klärschlamm) zur P-Rückgewinnung

4: 38% des Klärschlamm zur P-Rückgewinnung

5: 51,5% des Klärschlamm zur P-Rückgewinnung

6: 0,1% der Anlagen behandeln 13,5% des Abwassers/Klärschlamm

7: 2,5% der Anlagen behandeln 52% des Abwassers/Klärschlamm

Würden die bereits heute anfallenden Klärschlammaschen (Szenario 1a - 3a) zum Teil oder komplett einer Phosphorrückgewinnung angedient, könnten ca. 4.800 bis 10.900 Mg P/a rückgewonnen werden.

3.3 Konzept 1

Da die Phosphorrückgewinnung in Deutschland noch nicht als Stand der Technik definiert wurde, existiert bisher noch kein geregelter Ansatz und Anreiz, die Phosphorrückgewinnung bspw. auf kommunalen Kläranlagen oder in Klärschlamm-entsorgungskonzepten einzubinden. Die Bundesländer weisen noch keine einheitliche Vorgehensweise in Bezug auf die Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung auf, wodurch in Konzept 1 zunächst davon ausgegangen wird, dass die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche in dem Bundesland durchgeführt wird, wo die Klärschlammasche anfällt. Des Weiteren werden alle bereits heute produzierten Aschen aus den existierenden Monoverbrennungsanlagen in Konzept 1 berücksichtigt.

Auf dieser Grundlage könnten und müssten an den Standorten der Monoverbrennungsanlagen in Berlin, Bitterfeld-Wolfen, Elverlingsen, Frankfurt am Main, Hamburg, Lünen, München, Stuttgart und Wuppertal Phosphorrückgewinnungsanlagen bspw. nach dem PASCH-Verfahren erbaut werden. Die Aschen der nicht genannten Verbrennungsanlagen würden den Rückgewinnungsanlagen im entsprechenden Bundesland angedient. In Tabelle 4 sind die Standorte der Monoverbrennungsanlagen, an die eine Phosphorrückgewinnungsanlage angeschlossen werden kann, aufgelistet. Des Weiteren ist angegeben, aus welchen Verbrennungsanlagen im jeweiligen Bundesland die Aschen angedient werden. Sowie die jeweilige Klär-

schlammmenge mit entsprechendem Phosphorpotenzial. Aus ökonomischer Sicht rentieren sich große zentrale Anlagen meist schneller als kleinere dezentrale Anlagen. Aus diesem Grund werden die Phosphorrückgewinnungsanlagen in Konzept 1 in Verbindung mit Monoverbrennungsanlagen mit einem hohen Durchsatz vorgesehen. Die in Tabelle 4 aufgeführten Klärschlamm- und Phosphormengen beziehen sich auf eine Auslastung der Anlagen von 100%.

Tabelle 4: Standorte von Monoklärschlammverbrennungs- mit integrierten Phosphorrückgewinnungsanlagen des Konzepts 1

Anlage	Asche aus ...	Menge Klärschlamm*	Menge Phosphor**
		[Mg TR/a]	[Mg P/a]
Berlin	Berlin	36.000	882
Bitterfeld-Wolfen	Bitterfeld-Wolfen	15.200	372
Elverlingsen	Elverlingsen	50.000	1.225
Frankfurt	Frankfurt	39.000	956
Hamburg	Hamburg	42.000	1.029
Lünen	Lünen	85.000	2.083
München	München, Altstadt, Gendorf, Dinkelsbühl, Neu-Ulm	72.000	1.764
Stuttgart	Stuttgart, Karlsruhe, Balingen, Mannheim	66.200	1.622
Wuppertal	Wuppertal, Düren, Bottrop, Bonn	88.200	2.161
Summe		493.600	12.093

* bei 100% Auslastung der Anlagen

** bei 24,5 g P/kg im Klärschlamm

Die kleinste Phosphorrückgewinnungsanlage wäre Bitterfeld-Wolfen mit einer jährlich zur Verfügung stehenden Phosphormenge von ca. 370 Mg P/a und die größte wäre Wuppertal mit 2.300 Mg P/a.

Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Konzepte untereinander wird die Kennzahl „zu fahrende Kilometer je produzierte Phosphormenge“ [km/Mg P] eingeführt. Diese Kennzahl gibt an, wie viele Kilometer für den Transport von der Monoverbrennungs- zur Phosphorrückgewinnungsanlage für das gesamte Konzept notwendig sind. Einberechnet werden nicht die Fahrten und Kilometer um den Klärschlamm von den Kläranlagen zu den Monoverbrennungsanlagen zu transportieren, da diese bereits heute anfallen. Des Weiteren werden die Fahrten für den Transport der ausgelaugten Aschen nicht berücksichtigt, da die Aschen nach der Verbrennung bereits heute an entsprechende Abnehmer verbracht werden. Üblicherweise wird die Asche als Versatz im Bergbau oder im Straßenbau verwendet. Der Vertrieb des gewonnenen Sekundärphosphats in Form von Düngemitteln kann von jeder Phosphorrückgewinnungsanlage selber durchgeführt werden, wodurch ebenfalls keine zusätzlichen Fahrten berücksichtigt werden.

Weiter wird innerhalb der Konzepte ein „best case“ und „worst case“ Szenario betrachtet und berechnet. Beim best case (b.c.) Szenario wird davon ausgegangen,

dass der LKW nach dem Transport der Asche von der Monoverbrennungs- zur Rückgewinnungsanlage durch eine logistische Planung weiter eingesetzt werden kann (Anrechnung einer einfachen Fahrstrecke), beim worst case (w.c.) Szenario hingegen fehlt eine weiterführende Tour und der LKW fährt ohne Ladung zur Verbrennungsanlage zurück (Anrechnung von Hin- und Rückfahrt). Die Entfernungen der Monoverbrennungsanlagen beziehen sich auf grobe Berechnungen von Stadt zu Stadt, dabei wurde nicht berücksichtigt, dass die Anlagen meist etwas außerhalb einer Stadt errichtet wurden. Für die Berechnung der Anzahl der Fahrten und Kilometer wird als Grundlage die Trockenmasse der Aschen verwendet.

Entsprechend der in Tabelle 4 dargestellten Anordnung der Verbrennungsanlagen und Andienung der Aschen aus den übrigen Monoverbrennungs- zu den Phosphorrückgewinnungsanlagen, wären 3.310 LKW-Fahrten mit einer Ladung von 20 Mg/Fahrt notwendig. Die 3.310 Fahrten ergeben insgesamt jährlich für den best case ca. 348.250 zu fahrende Kilometer und im worst case ca. 696.500 km. Bei einer rückgewinnbaren Phosphormenge von 12.093 Mg P/a entspricht dies einer spezifischen Transportstrecke von 28,8 km/Mg P (b.c.) bzw. 57,6 km/Mg P (w.c.).

3.4 Konzept 2

Im zweiten Konzept werden die Grenzen der Bundesländer nicht berücksichtigt, so dass die Andienung und das Einzugsgebiet einer Phosphorrückgewinnungsanlage entsprechend den Entfernungen angepasst werden kann. Die Klärschlammasche aus Bitterfeld-Wolfen wird zur Verbrennungs- bzw. Rückgewinnungsanlage nach Berlin gefahren, die Aschen aus Dinkelsbühl und Neu-Ulm werden Stuttgart andient und die Aschen von Mannheim werden nach Frankfurt transportiert. Die Aufteilung in NRW bleibt nach Konzept 1 bestehen. In Abbildung 2 sind die Verbrennungs- und Phosphorrückgewinnungsanlagen mit entsprechendem Einzugsgebiet dargestellt. Durch diese neue Anordnung sinken die spezifischen Kilometer bei gleichbleibender rückgewinnbarer Phosphormenge je Tonne Phosphor von 28,8 auf 27,0 km/Mg P bzw. im worst case von 57,6 auf 54,0 km/Mg P. Die leichte Abnahme der Kilometer ist in erster Linie durch die Andienung der Aschen von Neu-Ulm und Dinkelsbühl nach Stuttgart anstelle nach München zu erklären sowie durch den Transport der Aschen von Mannheim nach Frankfurt. Es sind zwar insgesamt mehr Fahrten notwendig, jedoch können 21.775 km eingespart werden.

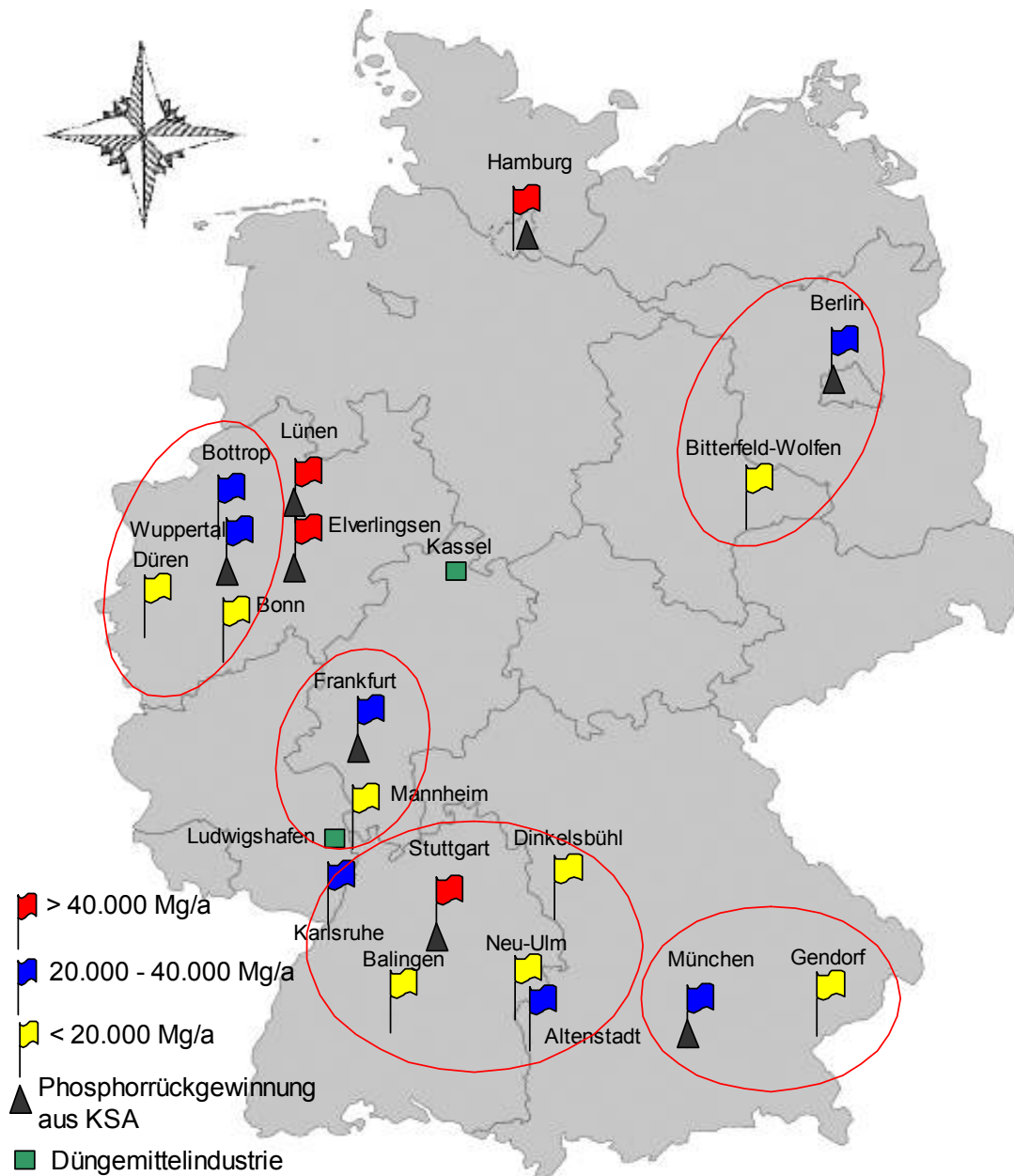


Abb. 3: Verbrennungs- und Phosphorrückgewinnungsanlagen mit entsprechendem Einzugsgebiet für das Konzept 2

3.5 Konzept 3

Die Mehrzahl der Monoverbrennungsanlagen mit geringem Durchsatz (< 20.000 Mg/a, gelb) liegen weit entfernt von den möglichen Rückgewinnungsanlagen. Vor diesem Hintergrund werden im dritten Konzept die kleineren und entfernteren Verbrennungsanlagen für das strategische Verwertungskonzept nicht berücksichtigt. Dies betrifft die Anlagen Balingen, Bitterfeld-Wolfen, Bonn, Dinkelsbühl, Düren, Gendorf, Mannheim und Neu-Ulm. Die rückgewinnbare Phosphormenge reduziert sich von 12.093 Mg P/a um 13,3% auf 10.486 Mg P/a (siehe Tabelle 5). Die Anzahl der Fahrten konnte auf 2.050 und die zu fahrenden Kilometer auf 193.875 km

reduziert werden. Die transportspezifischen Kilometer liegen im best case bei 18,5 km/Mg P und für den worst case bei 37 km/Mg P. Trotz reduzierter rückgewinnbarer Phosphormenge können die spezifischen Kilometer deutlich gesenkt werden.

Tabelle 5: Standorte von Monoklärschlammverbrennungs- mit integrierten Phosphorrückgewinnungsanlagen für das Konzept 3

Anlage	Asche aus ...	Menge Klärschlamm*	Menge Phosphor**
		[Mg TR/a]	[Mg P/a]
Berlin	Berlin	36.000	882
Elverlingsen	Elverlingsen, Wuppertal	82.000	2.009
Frankfurt	Frankfurt, Mannheim	39.000	956
Hamburg	Hamburg	42.000	1.029
Lünen	Lünen, Bottrop	122.000	2.989
München	München, Altstadt	47.000	1.152
Stuttgart	Stuttgart, Karlsruhe	60.000	1.470
Summe		428.000	10.486

* bei 100% Auslastung der Anlagen

** bei 24,5 g P/kg im Klärschlamm

Die geographische Anordnung der heute existierenden Klärschlammmonoverbrennungsanlagen zeigt, dass der Westen und Süden Deutschlands im Vergleich zu Nordwest- und Ostdeutschland eine größere Dichte an Verbrennungsanlagen aufweist. Als Standorte für weitere Verbrennungsanlagen würden sich Regionen mit Kläranlagen mit einer hohen Anschlussgröße (> 100.000 EW) anbieten. Ohne eine genauere Prüfung des Standortes und der Gegebenheiten vor Ort, alleine auf Grundlage der angeschlossenen Einwohnerwerte bieten sich in Nordwest- und Ostdeutschland die Regionen/Kläranlagen in Bremen, Hannover, Dresden und Leipzig an.

Die Erstellung eines Konzepts für den Stoffstrom Klärschlamm (Szenario 1 bis 5) analog zur Klärschlammasche ist aufgrund der Vielzahl an Kläranlagen in Deutschland für die Größenklasse 5 mit 252 Anlagen nicht möglich (Destatis, 2009b). Des Weiteren liegen keine zentral verwalteten Daten vor, wie der Klärschlamm der einzelnen Kläranlagen entsorgt wird, wodurch die genaue Anzahl der Kläranlagen, auf denen eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm durchgeführt werden kann, nur schwer zu ermitteln ist. Von den 252 Kläranlagen müssen die Anzahl an Kläranlagen abgezogen werden, die ihre Schlämme in die landwirtschaftliche Verwertung und an Monoverbrennungsanlagen abgeben. Die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm kann auf den Kläranlagen dezentral selbst verwaltet werden. Abhängig von den angeschlossenen Einwohnerwerten und der geographischen Lage der Kläranlage (Stadt oder Land) kann die Kläranlage die Vermarktung und den Verkauf des gewonnenen Sekundärphosphats selbst übernehmen oder einem Düngemittelproduzenten zum weiteren Verkauf überlassen.

3.6 Kostenabschätzung der Szenarien

Bedingt durch den starken Preisanstieg des Phosphors im Jahr 2008 sank der Phosphor-Inlandsabsatz im Wirtschaftsjahr (WSJ) 2007/2008 von 138.200 auf ca. 76.000 Mg P/a im Wirtschaftsjahr 2008/2009 ab. Durch den sinkenden Phosphorpreis stieg der Inlandsabsatz im WSJ 2009/2010 auf ca. 102.000 Mg P/a an. Der Inlandsabsatz an phosphorhaltigen Düngemitteln lag in Deutschland über die letzten vier Jahre gemittelt bei ca. 110.400 Mg P/a. (Destatis, 2010). In Tabelle 6 sind die Phosphorrückgewinnungsanlagen mit den angedienten Aschen und dem Phosphorpotenzial aufgelistet. Des Weiteren ist der Phosphor-Inlandsabsatz des jeweiligen Bundeslandes, in dem die Phosphorrückgewinnungsanlagen errichtet werden, dargestellt. Aus der rückgewinnbaren Phosphormenge und dem P-Inlandsabsatz des Bundeslandes ist die Deckung des Phosphorbedarfs mit den rückgewonnenen Sekundärphosphaten angegeben. In der Rückgewinnungsanlage in Hamburg können ca. 1.030 Mg P/a rückgewonnen werden, da jedoch aufgrund mangelnder Anbaufläche Hamburg einen sehr geringen Düngemittelbedarf aufweist, wird das gewonnene Sekundärphosphat Schleswig-Holstein gutgeschrieben. Durch den „Import“ des Sekundärphosphats von ca. 1.030 Mg P/a können ca. 6% des Düngemittelbedarfs von Schleswig-Holstein gedeckt werden. Das größte Einsparpotenzial weist Nordrhein-Westfalen mit insgesamt 61% Deckungsgrad auf. Die Bundesländer, in denen eine Phosphorrückgewinnung durchgeführt werden kann und Sekundärphosphate durch die Rückgewinnung aus der anfallenden Klärschlammasche durchgeführt werden, haben einen Phosphorbedarf von ca. 85.940 Mg P/a. Durch die Rückgewinnung von 12.070 Mg P/a kann ca. 14% des Bedarfs durch die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche aus Monoverbrennungsanlagen, die heute bereits existieren, gedeckt werden (ohne Berücksichtigung der Wirkungsgrade der P-Rückgewinnungsverfahren) (Tabelle 6).

Tabelle 6: Deckung des Phosphorinlandsabsatzes nach Bundesländern

Anlage	Asche aus ...	Menge Klärschlamm*	Menge Phosphor*	P-Absatz je Bundesland**	Bundesland	Deckung
		[Mg TR/a]	[Mg P/a]	[Mg P/a]		[%]
Hamburg	Hamburg	42.000	1.029	17.706	Schleswig-Holstein	6%
Berlin	Berlin, Bitterfeld-Wolfen	51.200	1.254	11.107	Sachsen-Anhalt, Brandenburg	11%
Lünen	Lünen	85.000	2.083	8.899	Nordrhein-Westfalen	61%
Elverlingsen	Elverlingsen	50.000	1.225			
Wuppertal	Wuppertal, Düren, Bottrop, Bonn	88.200	2.161			
Frankfurt	Frankfurt	39.000	956	19.346	Niedersachsen	5%
München	München, Gendorf, Dinkelsbühl, Neu-Ulm, Altstadt	72.000	1.764	18.493	Bayern	10%
Stuttgart	Stuttgart, Karlsruhe, Balingen, Mannheim	66.200	1.622	10.387	Baden-Württemberg	16%
Summe		493.600	12.093	85.938		14%

* bei 100% Auslastung der Anlagen

** gemittelt über die letzten vier Jahre

Auf ganz Deutschland umgerechnet können bei einem P-Inlandsabsatz von ca. 110.400 Mg P/a die in Tabelle 7 aufgelisteten prozentualen Deckungsgrade, abhängig vom Szenario und durch die Einberechnung der Wirkungsgrade der Phos-

phorrückgewinnungsverfahren gedeckt werden. Würden alle Klärschlämme in Deutschland in Monoverbrennungsanlagen verbrannt, könnten ca. 41% des P-Inlandsabsatzes durch die rückgewonnenen Sekundärphosphate gedeckt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einer vollständigen Verbrennung der Klärschlämme die landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme den Landwirten als Phosphorquelle nicht mehr zur Verfügung stehen und voraussichtlich der Phosphor-Inlandsabsatz für Mineraldünger ansteigen würde.

Tabelle 7: Deckung des Phosphorinlandsabsatzes mit den Sekundärphosphaten für Deutschland

	Szenario	1	2	3	4	5	6
		Klärschlammaschen aus Monoverbrennung zur P-Rückgewinnung					
	Asche Klärschlamm	Anlagengröße > 40.000 Mg TR/a	Anlagengröße > 20.000 Mg TR/a	aus allen Monoverbrennungs- anlagen	wie Szenario 3 + Monoverbrennung von 50% der landwirtschaftlich verwerteten Schlämme	alle thermisch entsorgten Klärschlämme werden monoverbrannt	Alle Klärschlämme werden monoverbrannt
Deckung des Phosphorinlandsabsatzes [%]							
a	Nur P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche	4,3	8,1	9,9	15,7	21,5	41,0
b	KA > 1 Mio. E (Fix-Phos)	4,5	8,3	10,0	15,9	21,7	
c	KA > 1 Mio. E (Fix-Phos, PHOXNAN)	5,8	9,6	11,3	17,2	22,1	
d	KA > 100.000 E (> GK 5) (Fix-Phos)	5,8	9,6	11,3	17,2	22,1	
e	KA > 100.000 E (> GK 5) (Fix-Phos, PHOXNAN)	9,3	13,1	14,8	20,7	23,5	

Um einen groben Eindruck zu bekommen, welche Kosten durch die flächendeckende Phosphorrückgewinnung für die einzelnen Szenarien entstehen könnten, wurde eine grobe Kostenabschätzung durchgeführt. Für die Berechnung wurden die spezifischen Investitionskosten [€/Mg Asche] der Verfahren PASCH, FIX-Phos und PHOXNAN aus der Kostenabschätzung von Everding und Pinnekamp (2011) entnommen. Auch hier wird vereinfachend angenommen, dass sich die spezifischen Investitionskosten mit Variation des Durchsatzes nicht verändern. Für die Szenarien 4 bis 6 wäre der Bau von Monoverbrennungsanlagen notwendig, die monetär nicht dargestellt werden. Die Investitionskosten liegen abhängig vom Szenario zwischen 13,8 Mio. € (1a) und 353,1 Mio. € (4e). Für eine Rückgewinnung des Phosphors in den heute schon in Monoverbrennungsanlagen anfallenden Aschen wären Investitionskosten von ca. 31,4 Mio. € (3a) notwendig.

Die Jahreskosten für die Phosphorrückgewinnung belaufen sich auf 21,0 Mio. €/a (1a) bis 199,2 Mio. €/a (6a) ohne die zusätzlichen Kosten durch den Betrieb der Monoverbrennungsanlagen. In diese Berechnung sind noch keine Preissteigerungen für Reinvestitions- und Betriebskosten enthalten, so dass die Angaben die momentane Preissituation widerspiegeln. Damit sich aus wirtschaftlicher Sicht der Bau und Betrieb von Phosphorrückgewinnungsanlagen lohnt, müssen die Erlöse aus dem Verkauf des Sekundärphosphats die Kosten für den Betrieb der Anlage übersteigen. Die Kosten variieren abhängig vom Szenario und damit auch vom eingesetzten Phosphorrückgewinnungsverfahren zwischen ca. 4.430 €/Mg P (1b) und ca. 6.600 €/Mg P (2e) für die Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammasche. Anfang des Jahres 2011 lag der Preis für eine Tonne Phosphor bei

ca. 1.500 €/Mg P, womit deutlich aufgezeigt werden kann, dass sich die Phosphorrückgewinnung zum jetzigen Zeitpunkt aus wirtschaftlicher Sicht noch nicht lohnt.

4 Zusammenfassende Diskussion

In Deutschland werden bereits heute jährlich ca. 493.000 Mg Klärschlämme in Monoverbrennungsanlagen verbrannt und die Aschen anschließend im Bergbau als Versatzmaterial oder zur Substitution von Rohstoffen im Straßenbau eingesetzt. Durch eine Phosphorrückgewinnung aus den anfallenden Aschen könnten ca. 10.900 Mg P/a als Sekundärphosphate produziert werden und somit ca. 10% des phosphorhaltigen Mineraldüngerabsatzes in Deutschland substituieren. Der Einsatz von P-Rückgewinnungsverfahren aus dem Stoffstrom Klärschlamm auf den kommunalen Kläranlagen könnte einen weiteren Beitrag zur Schonung der Phosphorreserven liefern.

Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung ist seit Jahren rückläufig. Gründe für die Abkehr sind die im Klärschlamm enthaltenen organischen und anorganischen Schadstoffe, die die landwirtschaftliche Verwertung durch die geforderten Grenzwerte einschränken. Wird die thermische Klärschlammbehandlung in Zukunft als präferierter Entsorgungsweg angesehen, sollte vor dem Hintergrund der Phosphorrückgewinnung in den Ausbau von Monoverbrennungsanlagen investiert werden. Würden alle in Deutschland auf kommunalen Kläranlagen anfallenden Klärschlämme in Monoverbrennungsanlagen verbrannt und die Aschen anschließend einer Phosphorrückgewinnung zugeführt, könnten ca. 45.300 Mg P/a rückgewonnen werden und somit ca. 41% des heutigen durchschnittlichen Düngemittelabsatzes substituieren. Bei einer vollständigen Verbrennung der Klärschlämme würden die bis dato landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme den Landwirten als Phosphorquelle nicht mehr zur Verfügung stehen wodurch der Phosphor-Inlandsabsatz für Mineraldünger voraussichtlich wieder ansteigen wird. Grundsätzlich sind große zentrale Rückgewinnungsanlagen günstiger im Bau und Betrieb, jedoch können sich abhängig vom Einzugsgebiet auch kleine dezentrale Anlagen aus wirtschaftlicher Sicht lohnen.

Eine vollständige Umstellung auf die Klärschlammmonoverbrennung wird in naher Zukunft noch nicht realisierbar sein. Um jedoch den Phosphor im Klärschlamm bereits heute nutzen zu können, könnten auf größeren Kläranlagen (> 100.000 EW) Phosphorrückgewinnungsanlagen zur Rückgewinnung aus dem Klärschlamm errichtet werden.

Nach der Phosphorrückgewinnung kann der Klärschlamm wie heute in die landschaftsbauliche Verwertung oder in die Mitverbrennung geführt werden. Die Klärschammaschen könnten ebenfalls im Bergbau oder Straßenbau eingesetzt werden. Durch die Phosphorrückgewinnung würden heute bestehenden Verwertungswege weder verschlossen, noch würden Marktverhältnisse verschoben.

Literatur

- Destatis (2009a): Thermische Entsorgung des Klärschlammes hat zugenommen. Pressemitteilung Nr. 504 vom 22.12.2009. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- Destatis (2009b): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserableitung 2007. Fachserie 19. Reihe 2.1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- Destatis (2010): Produzierendes Gewerbe, Düngemittelversorgung Wirtschaftsjahr 2009/2010. Fachserie 4 Reihe 8.2. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- DWA (2005): Stand der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Klärschlammhebung 2003. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Hrsg.), Oktober 2005, ISBN 3-937758-29-1
- DWA (2010): 22. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen 2009. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- Everding W. und Pinnekamp J.: Kostenabschätzung von ausgewählten Phosphorrückgewinnungsverfahren. In: Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor, Schlusspräsentation der Förderinitiative am 14.09.2011 in Berlin. Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser Band 228. Hrsg.: Prof. J. Pinnekamp, Aachen. ISBN 978-3-938996-34-8 (2011)
- Gethke, K. (2011): Verfahren zur Gewinnung von Sekundärphosphaten aus flüssigen Stoffströmen und deren Einfluss auf die deutsche Phosphorbilanz. Dissertation in Vorbereitung, Aachen 2011
- Jasper, M., Lehrmann, F., Steier, K. (2009): Stand und Perspektiven der thermischen Klärschlamm-entsorgung. Korrespondenz Abwasser, Abfall Nr. 10 2009 (56), S. 1014- 1026. ISSN: 1866-0029
- Keicher, K., Krampe, J. (2007): Vorsorgesicherheit und Störfallszenarien. In Innovative Energiekonzepte für Kläranlagen. 82. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium am 11. Okt. 2007. Stuttgarter Bericht zur Siedlungswasserwirtschaft Band 191. ISBN: 978-3-8356-3141-0, Stuttgart
- Lehrmann, F. (2010a): Stand und Perspektiven der thermischen Klärschlamm-entsorgung. VDI-Fachtagung Klärschlammbehandlung, 27.-28.10.2010, Offenbach. ISBN: 978-3-9813793-2-7
- Lehrmann, F. (2010b): Nach Informationen von Herrn Lehrmann
- Ristow, R., Lebek, M., Simon, G., Köpkens, E., Krüger, M., Meierling, L. (2009): Phosphorrückgewinnung aus industriellen Abwässern – Das REPHOS-Verfahren. GWF-Wasser/Abwasser, September 2009 S. 696 – 699.
- Spitznagel M. (2010): Bund-/Länderstrategie zur nachhaltigen Phosphor-Nutzung – Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und weiteren Stoffen. 44. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft 23.3. – 25.3.2011 in Aachen. GWA Band 223, Aachen

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WA0805 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Anschrift der Verfasserin:

Dipl.-Ing. Wibke Everding
Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen
E-Mail: everding@isa.rwth-aachen.de