

# 10. Kostenabschätzung von ausgewählten Phosphorrückgewinnungsverfahren

Wibke Everding, Johannes Pinnekamp, Aachen

## 1 Einleitung

Im Rahmen des BMBF/BMU Projekts PhoBe „Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland“ (FKZ 02WA0805) wurde vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen auf Basis der „LAWA-Leitlinien zur dynamischen Kostenvergleichsrechnung eine Kostenabschätzung der in der Förderinitiative entwickelten Verfahren vorgenommen. Die Ergebnisse der Arbeit werden in zusammengefasster Form dargestellt. Die nachfolgend aufgeführten Phosphorrückgewinnungsverfahren der Technikprojekte aus der BMBF/BMU Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ wurden betrachtet:

1. Rückgewinnung aus Klärschlamm durch ein Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration (PHOXNAN)
2. Rückgewinnung aus der wässrigen Phase (P-RoC)
3. Rückgewinnung aus Klärschlamm (FIX-Phos)
4. Rückgewinnung aus Klärschlammasche (SESAL-Phos, PASCH)

Des Weiteren wurde in die Betrachtung die folgende Option einbezogen:

5. Direkter Aufschluss von Klärschlammaschen
6. Deponierung und anschließender Rückbau der Klärschlammasche für je 30 Jahre

In diesem Beitrag wird jedoch nur auf die vier erstgenannten Verfahren genauer eingegangen. Weitere Informationen können dem PhoBe-Abschlussbericht entnommen werden.

## 2 Finanzmathematische Vorgaben

Da die Verfahren zur Phosphorrückgewinnung teilweise im labor- und halbertechnischen Maßstab untersucht wurden, musste bei der Ermittlung der Kosten für die großtechnische Umsetzung von einer Kostenabschätzung ausgegangen werden. Die Investitionskosten wurden in Nettosummen, auf Basis von Literaturangaben, Preisfragen und Berufserfahrungen ermittelt. Für die Ermittlung der Chemikalienkosten wurden aktuelle Richtpreisangebote bei Chemikalienherstellern und -händlern eingeholt. Die ermittelten Werte wurden anschließend aufgrund von Risiko- und Unsicherheitsmomenten einer Empfindlichkeitsprüfung – der Sensitivitätsanalyse – unterzogen. Die Empfindlichkeitsprüfung berücksichtigt eine Veränderung des Zins-

satzes, der allgemeinen Preissteigerungsrate sowie eine Analyse des Einflusses der einzelnen Betriebskosten auf den produktspezifischen Preis.

Zur Ermittlung der Investitionskosten der jeweiligen Rückgewinnungsverfahren, die auf kommunalen Kläranlagen errichtet werden können, wird als Basisberechnung eine Kläranlagengröße von 100.000 EW angenommen. Zur Abschätzung der Rückgewinnungskosten für größere Kläranlagen werden für die Verfahren FIX-Phos und P-RoC ebenfalls Kläranlagengrößen von 250.000 EW, 500.000 EW und 1.000.000 EW berücksichtigt. Den Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm-Asche wird eine Anlage mit einem Aschedurchsatz von 30.000 Mg TS/a zugrunde gelegt. Der Schlamm(wasser)-, Prozesswasser- und Ascheanfall sowie die dazugehörigen Phosphorkonzentrationen der Stoffströme sind aus Kennwerten einschlägiger Literatur entnommen. Nebenkosten wie Ingenieurhonorare, Prüf- und Nebengebühren werden ebenso wie Grundstückerwerbs- und Transportkosten nicht mitberücksichtigt. Bei der Ermittlung der Investitionskosten wird davon ausgegangen, dass ausreichend Platz für die Errichtung der Phosphorrückgewinnungsanlage auf der Kläranlage zur Verfügung steht und nur anlagenspezifische Bauten errichtet werden müssen.

Die Bilanzgrenze zur Erstellung der Kostenabschätzung wird eng um die Phosphorrückgewinnung gezogen, d.h. es werden beispielsweise bei der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm-Asche weder die Kosten der Klärschlammbehandlung noch die der Klärschlammverbrennung berücksichtigt. Dieser Ansatz wird gewählt, da mittelfristig davon ausgegangen werden kann, dass eine Phosphorrückgewinnungsanlage an die bestehende Infrastruktur zur Schlammbehandlung oder Klärschlammverbrennung anschließt bzw. darin eingebunden wird.

Als Wirtschaftlichkeitskriterium werden Jahreskosten [€/a] als Summe von Kapital- und Betriebskosten zugrunde gelegt.

Die „LAWA-Leitlinien“ empfehlen einen langfristigen Zinssatz von real 3% p.a. als Standardwert, der auch hier für die Kostenabschätzung der einzelnen Verfahren angewendet wird. Im Rahmen der Empfindlichkeitsprüfung wird der Realzinssatz zwischen 1 und 5% variiert. Die Abschreibungsräume wurden für die Bautechnik auf 30 Jahre, für die Maschinenteknik auf 15 Jahre und die Elektrotechnik auf 10 Jahre festgelegt und der Betrachtungszeitraum beträgt 30 Jahre. Die Anlagenauslastung der Rückgewinnungsanlagen wurde aufgrund des Pilotcharakters mit 8.000 Betriebstunden pro Jahr angenommen, so dass für die Berechnung des Durchsatzes eine Auslastung von 91% zugrunde liegt. Die Personalarbeitsstunden wurden auf 1.550 h/a festgelegt. Aus diesen Annahmen resultiert ein Personalbedarf von 5 Arbeitsstellen mit einer Person pro Schicht und Jahr. Die Personalkosten werden mit 50.000 €/a angenommen und entsprechen durchschnittlichen Gehältern für Ingenieure und Kläranlagenfachpersonal.

Die Preissteigerungsraten für die Reinvestitions- und sonstigen Kosten wie Personal, Wartung und Betriebsmittel wurden anhand von Preisindizes des Statistischen Bundesamtes ermittelt. Einen ansteigenden Trend der letzten Jahrzehnte weisen die Betriebsmittel Ammoniak, Brandkalk, Natronlauge und Strom auf. Einen negativen

Trend weisen dagegen Schwefelsäure, Sauerstoff und Salzsäure auf. Nach mündlichen Informationen der Chemikalienhersteller ist eine Prognose über die Preisentwicklung für die nächsten Jahre zum jetzigen Zeitpunkt nur schwer möglich. Auf dieser Grundlage wird für die Preissteigerung der Betriebsmittel ein Prozentsatz von 2% und für die Reinvestitionen ein Prozentsatz von 1% angenommen.

Der erhöhte Ansatz von 4% Instandhaltungs- und Wartungskosten für die Maschinenteknik ist mit dem Einsatz von stark sauren, alkalischen und abrasiven Stoffströmen in den Rückgewinnungsanlagen zu begründen. Sollten keine Preisangebote für die Elektrotechnik der einzelnen Aggregate vorliegen, wird mit einer Pauschale von 25% der Investitionskosten für die Elektrotechnik gerechnet.

Vereinfachend wird angenommen, dass für die phosphorreichen Inputströme (Asche, Prozesswasser, Klärschlamm) der Rückgewinnungsanlagen und die phosphorabgereicherten Outputströme keine Entgelte von den Betreibern der P-Rückgewinnungsanlagen gezahlt werden müssen. Bei der Berechnung der jahres- und produktspezifischen Kosten werden keine Verkaufserlöse für das rückgewonnene Sekundärphosphat eingerechnet. Die Mengenangaben für Betriebsmittel, Reststoffe und Energie wurden von den Sachbearbeitern des entsprechenden Projektes bzw. Verfahrens eingeholt.

Bei der Sensitivitätsanalyse der produktspezifischen Kosten, werden Personalkosten, da diese üblicherweise nicht wie Chemikalien von wirtschaftlichen Kriterien wie Bedarf und Nachfrage oder steigenden Rohstoffpreisen abhängig sind, bei der Betrachtung des Einflusses von starken Preisschwankungen der Betriebskosten generell ausgeschlossen. Des Weiteren werden bei den Sensitivitätsanalysen immer die Kosten ohne Preissteigerung zugrunde gelegt.

Für die Ermittlung der Phosphorkonzentrationen in den Inputstoffströmen der Rückgewinnungsanlagen wurde mit einer einwohnerspezifischen Phosphorfracht im Kläranlagenzufluss von 1,9 g P/(E-d) und 0,2 g P/(E-d) im Kläranlagenablauf gerechnet (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Durchschnittliche Phosphorgehalte verschiedener Stoffströme**

Stoffstrom	[mg P/l]	[g P/(E-d)]	[g TS/(E-d)]	[% P TS]	[l/(E-d)]
P-Zulauf Kläranlage	9	1,9			211
Überschussschlamm, entwässert <sup>1)</sup>		1,6	45	3,6	1,5
Faulschlamm		1,9	55	3,5	
Faulschlamm, entwässert		1,7	55	3,1	
Klärschlammasche		1,7	28	6,1	
Schlammwasser/Nebenstrom <sup>2)</sup>	31	0,2			6,5
<sup>1)</sup> entwässert auf 30 g/l, <sup>2)</sup> insgesamt entwässert auf 300 g/l					

Die berechneten Investitions-, Kapital-, Betriebsmittel- und Jahreskosten sowie der Projektkostenbarwert sind auf 100 € gerundet, die einwohner- und produktspezifischen Kosten auf 50 Euro-Cent. Die Beurteilung der kostenmäßig abge-

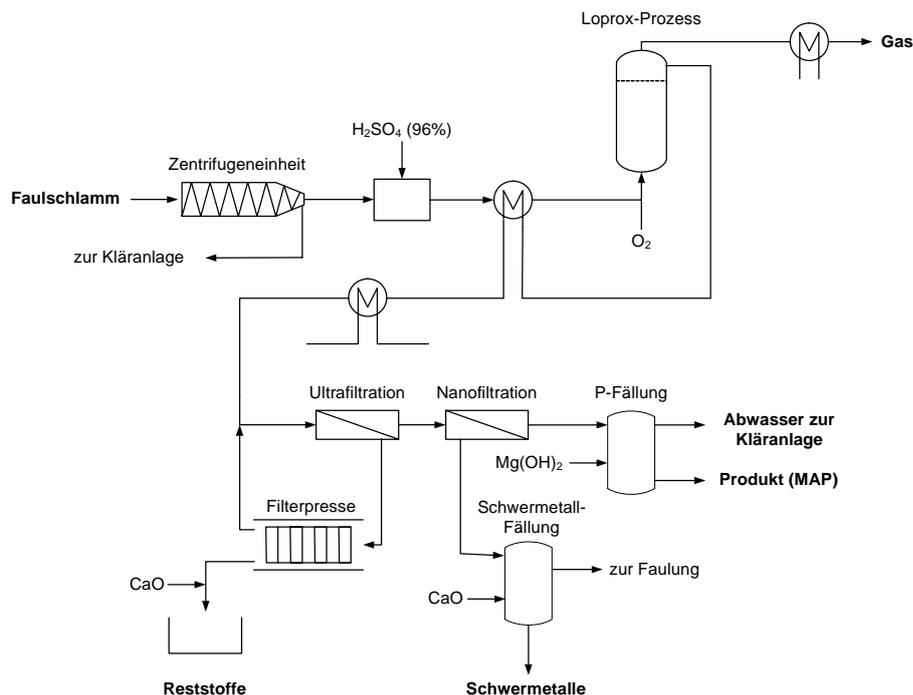
schätzten Verfahren bleibt zunächst unberücksichtigt von den Ergebnissen der Düngewirkung (z.B. Anteil des verfügbaren Phosphors) und dem Verkauf/der Vermarktung der Sekundärphosphate.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Kostenabschätzungen nur als grobe Richtwerte zum Verfahrensvergleich dienen und keine genaue Auskunft liefern, wie teuer ein Verfahren letztendlich sein wird. Dafür sind die jeweiligen Randbedingungen wie bspw. Erwerb von Grundstücken und tatsächliche Phosphorkonzentration im Abwasser zu beachten. Weitere Angaben sind aus dem Abschlussbericht PhoBe Kap. 4.1 „Kostenabschätzung der in der Förderinitiative Entwickelten Verfahren“ zu entnehmen.

### 3 Kostenabschätzung

#### 3.1 PHOXNAN Verfahren

Im Projekt PHOXNAN „Optimierte Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen durch ein Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration“ (FKZ 02WA0796, 02WA0797 und 02WA0798) wurde u.a. das in Abbildung 1 dargestellte PHOXNAN-Verfahren entwickelt.



**Abb. 1: Fließbild des PHOXNAN-Verfahrens (nach BTS, 2009)**

Die genaue Verfahrensbeschreibung ist dem Beitrag von Blöcher et al. „Optimierte Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen durch ein Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration“ in diesem Tagungsband zu entnehmen. Die für die Kostenabschätzung notwendigen Auslegungsparameter wurden zum Teil von der Firma Bayer Technology Services (BTS) angegeben und den im

Vorfeld erstellten Vorgaben entnommen. Für die Kostenabschätzung wird eine Kapazität der Rückgewinnungsanlage von 100.000 EW berücksichtigt.

Der einwohnerspezifische Faulschlammanfall liegt nach einer Berechnung von Loll und Glasenapp (2003) bei 55 g TS/(E·d) und weist einen durchschnittlichen  $P_{\text{ges}}$ -Anteil von 31 g/kg TS auf (Jardin, 2003). Der Wirkungsgrad der Phosphorrückgewinnung des PHOXNAN-Verfahrens wird von BTS mit 51% angegeben. Resultierend aus diesen Annahmen beträgt die jährlich rückgewonnene Phosphormenge bei der Modellberechnung 31.739 kg und die einwohnerspezifische Phosphormenge 0,32 kg/(E·a).

Aufgrund der nötigen chemischen Werkstoffbeständigkeit wird von der Fa. BTS als Material für die Anlagenkomponenten (Behälter- und Rohrleitungsmaterial) Titan gewählt. Basierend darauf, wird für einen Teil der Maschinentechnik ein Abschreibungszeitraum von 30 Jahren angenommen. Die Preise für die Hauptaggregate wurden von der Fa. BTS übernommen. Nach den Angaben von BTS besitzt deren Kostenschätzung, aus der die Preisangaben der Investitionskosten übernommen wurden, eine Genauigkeit von +/- 30% (BTS, 2009). Die Summe der Investitionskosten beläuft sich beim PHOXNAN-Verfahren auf ca. 2,43 Mio. €. Auf Basis der Investitionskosten werden die Kapitalkosten zu ca. 211.900 €/a berechnet. Die von Bayer Technology Services ermittelten Investitionskosten (Blöcher et al., 2011) von ca. 3 Mio. € beinhalten zusätzliche Kosten für bspw. Bauleitplanung und Unvorhergesehenes.

Für die Berechnung der Personalkosten, wird davon ausgegangen, dass der Prozess direkt in einen Kläranlagenbetrieb eingebunden ist. Die Rückgewinnungsanlage wird tagsüber wie herkömmliche Kläranlagen im Achtstundenbetrieb betreut. Es wird davon ausgegangen, dass 1,5 Mitarbeiter für die Kontrolle und Wartung ausreichen, so dass durch Urlaub und Krankheit insgesamt Personalkosten für 2,6 Mitarbeiter entstehen. Die Summe der Betriebskosten beläuft sich auf ca. 557.200 €/a.

Durch Summierung der Kapital- und Betriebskosten werden die Jahreskosten ermittelt. Unter Berücksichtigung der rückgewinnbaren Phosphorfracht bzw. den angeschlossenen Einwohnerwerten belaufen sich die einwohnerspezifischen Kosten auf 8,0 €/(E·a) bzw. die produktspezifischen Kosten auf 25,0 €/kg P. Der Anteil der Kapitalkosten an den Jahreskosten liegt abhängig von der Berücksichtigung der Preissteigerung zwischen 23 und 27% und der Betriebskostenanteil zwischen 73 und 77% (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Vergleich der einzelnen Kostenarten mit und ohne Preissteigerung (PHOXNAN)**

		Ohne Preissteigerung		Mit Preissteigerung	
Investitionskosten	€	2.430.600		2.430.600	
Kapitalkosten	€/a	211.900	27%	225.800	23%
Betriebskosten	€/a	584.000	73%	771.200	77%
<b>Summe Jahreskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>795.900</b>	<b>100%</b>	<b>997.000</b>	<b>100%</b>
<b>Projektkostenbarwert</b>	<b>€</b>	<b>15.600.500</b>		<b>19.541.700</b>	
<b>einwohnerspezifische Kosten</b>	<b>€/(E-a)</b>	<b>8,0</b>		<b>10,0</b>	
<b>produktspezifische Kosten</b>	<b>€/kg P</b>	<b>25,0</b>		<b>31,5</b>	

Unter Einbeziehung einer jährlichen Preissteigerungsrate von 1% für die Reinvestitionen und 2% für die Betriebskosten ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Kosten. Die Jahreskosten erhöhen sich aufgrund der Preissteigerung um 201.100 €/a auf ca. 997.000 €/a, die produktspezifischen Kosten belaufen sich auf 31,5 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten auf 10,0 €/(E-a).

Der PHOXNAN-Prozess ist laut BTS im Vergleich zu den meisten Phosphorrückgewinnungsverfahren kein klassisches Add-On Verfahren, sondern es bezieht die Klärschlammbehandlung mit ein. Da bei diesem Verfahren der Klärschlamm vom Kläranlagenbetreiber nicht entsorgt werden muss, sondern im PHOXNAN-Prozess in einen Teilstrom mit einem Aschegehalt von > 95%, einer Fraktion mit gefällten Schwermetallen und dem MAP-Produkt umgewandelt wird, können die jährlichen Klärschlammbehandlungskosten als „Einsparungen“ gegengerechnet werden. Abhängig vom Entsorgungsweg (Landwirtschaft, Landschaftsbau, Mit- und Monoverbrennung) lagen die Klärschlammbehandlungskosten in den letzten Jahren je Tonne Klärschlamm zwischen ca. 145 und 275 €/Mg TS (Pinnekamp und Beier, 2006). Durch die Einsparungen bei den Entsorgungskosten liegen die produktspezifischen Kosten zwischen 8 und 16,5 €/kg P ohne Preissteigerung, unter Berücksichtigung der Preissteigerung zwischen 9 und 20 €/kg P. Für die weiteren Berechnungen wird von gemittelten Einsparungen in Höhe von 220 €/Mg TS Klärschlamm ausgegangen.

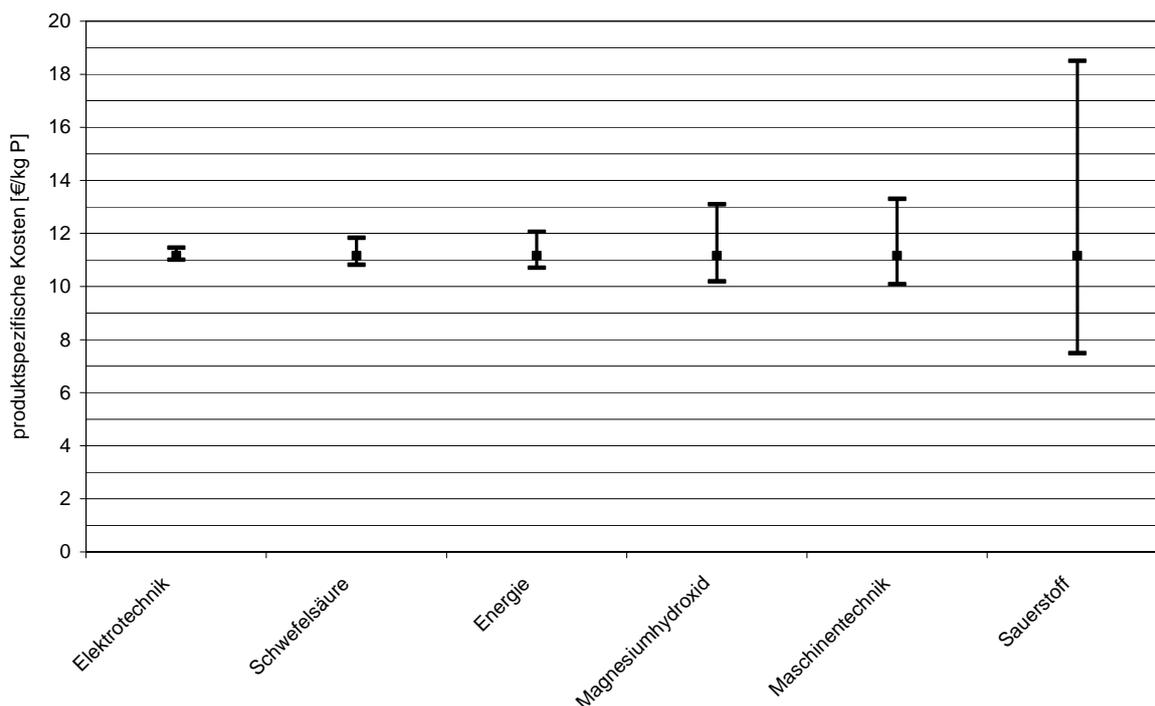
Die Summe der Einsparung ohne Preissteigerung liegt bei 441.700 €/a und mit Preissteigerung bei 583.200 €/a. In Tabelle 3 sind die auf dieser Basis ermittelten jahres-, einwohner- und produktspezifischen Kosten aufgelistet.

**Tabelle 3: Kostenzusammenstellung inkl. Einsparungen (PHOXNAN)**

		ohne Preissteigerung	mit Preissteigerung
Summe Jahreskosten	€/a	330.500	402.200
einwohnerspezifische Kosten	€/(E-a)	3,5	4,0
produktspezifische Kosten	€/kg P	11,5	14,0

Durch die eingesparten Klärschlamm Entsorgungskosten belaufen sich die produktspezifischen Kosten ohne Preissteigerung auf 11,5 €/kg P) und mit Preissteigerung auf 14,0 €/kg P).

Da die Jahreskosten maßgeblich (zu 73%) von den Betriebskosten beeinflusst werden, wird für diese Kostenart eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dazu werden die Produktpreise (ausgehend von den produktspezifischen Kosten ohne Preissteigerung aber inklusive Einsparungen) halbiert bzw. verdoppelt und die produktspezifischen Kosten für jede Variante berechnet.



**Abb. 2: Sensitivitätsanalyse der produktspezifischen Kosten, inkl. Einsparungen (PHOXNAN)**

Die produktspezifischen Kosten hängen am stärksten vom Sauerstoffpreis ab. Durch die Verdopplung des Sauerstoffpreises können die Produktionskosten für ein kg Phosphor von ca. 11,5 auf etwa 18,5 €/kg P (ca. +60%) steigen. Unter der Annahme einer Senkung des Sauerstoffpreises um 50% resultieren ca. 7,5 €/kg P.

Durch eine Senkung- bzw. Anhebung des Zinssatzes von 3% auf 1% bzw. 5% liegen die Veränderungen der produktspezifischen Kosten unter 1 €/kg P. Durch die Variation der Preissteigerungsrate für die Reinvestitionen von 2% und für die Betriebskosten von 4% ergeben sich Veränderungen von 40% für die produktspezifischen Kosten, wodurch die Kosten von ca. 11,5 €/kg P auf ca. 15,5 €/kg P steigen.

Die Erstellung einer Kostenabschätzung für die Kläranlagenanschlussgrößen von 250.000 E, 500.000 E und 1.000.000 E kann aufgrund fehlender Angaben bei der BTS-Maschinentechnik nicht durchgeführt werden. Beim Bau des PHOXNAN-Verfahrens auf einer Kläranlage mit höherer Anschlussgröße würden sich die spezi-

fischen Kosten für die Maschinenteknik und das Personal voraussichtlich verringern und somit die produktspezifischen Kosten sinken. Dies konnte jedoch im Rahmen des Projektes nicht quantifiziert werden.

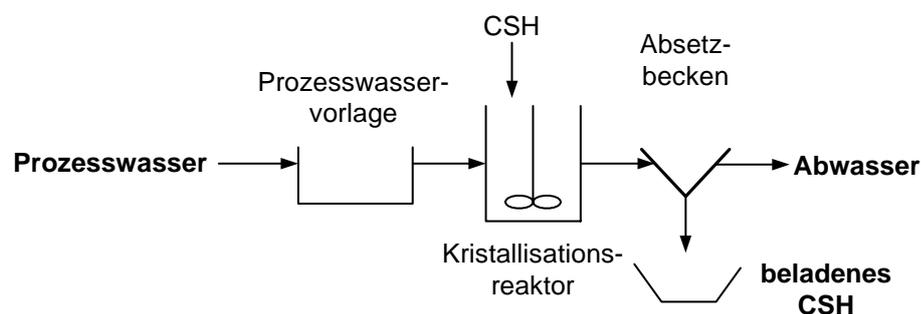
Nicht berücksichtigt in der Kostenabschätzung sind mögliche Einsparungen durch die Nutzung der im LOPROX-Prozess entstandenen Wärme und eine daraus resultierende Energiegewinnung. Die anfallende Wärme kann bspw. über Wärmetauscher für die Beheizung der Faulbehälter verwendet werden. Den Einsparungen müssten jedoch Investitionskosten für den Bau von Leitungen und Wärmetauscherstationen gegenüber gestellt werden.

Weiter wird von der Bayer Technology Services GmbH angegeben, dass durch den Einsatz des LOPROX-Prozesses die kostenintensive Entwässerung der Klärschlämme auf der Kläranlage entfallen kann, da lediglich eine Feststoffkonzentration von ca. 3% für den Prozess benötigt wird. Werden die durchschnittlichen spezifischen Entwässerungskosten nach PINNEKAMP und BEIER (2006) von ca. 150 €/Mg TS für die Einsparungen zugrunde gelegt, können die produktspezifischen Kosten deutlich auf ca. 1,5 €/kg P gesenkt werden. Diese Variation der Kosten verdeutlicht, wie stark die Aussagekraft der Kostenabschätzung von den Randbedingungen und reellen Gegebenheiten abhängig ist.

### 3.2 P-RoC Verfahren

Im Projekt ProPhos „Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“ (FKZ 02WA0782, 02WA0783 und 02WA0784) wurden insgesamt drei Verfahren für die jeweils eine separate Kostenabschätzung durchgeführt wurde, wissenschaftlich untersucht.

Das Verfahrensfliessbild des im Projekt ProPhos vom Kompetenzzentrum für Materialfeuchte, KIT Campus Süd entwickelten P-RoC-Verfahrens ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abb. 3: Fließbild des P-RoC-Verfahrens (nach Schuhmann, 2010)**

Das P-RoC-Verfahren ist sowohl für den Einsatz auf kommunalen als auch industriellen Kläranlagen zur Phosphorrückgewinnung aus Prozesswässern sowie zur Behandlung landwirtschaftlicher Abwässer geeignet. In einem Kristallisationsreaktor, der als Rührreaktor ausgelegt ist, werden dem Prozesswasser CSH (Calciumsilicathydrat) Impfkristalle beigefügt. Das mit Phosphor beladene CSH wird

nach einer Verweildauer im Reaktionsreaktor, in Abhängigkeit der Qualität des Abwassers, zwischen ca. 0,5 – 2 Stunden in einem Absetzbecken vom Abwasser getrennt. Weitere Informationen zu dem Verfahren kann dem Beitrag von Petzet et al. „BMBF-Verbundprojekt ProPhos: Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“ in diesem Tagungsband entnommen werden.

Durch die geringe spezifische Phosphorfracht von 0,2 g P/(E-d) (31 mg P/l) können mit dem P-RoC-Verfahren 6.570 kg P/a bzw. 0,07 kg P/(E-a) rückgewonnen werden. In einer zweiten Variante wird davon ausgegangen, dass das Rückgewinnungsverfahren in einem industriellen Betrieb implementiert wird, in dem der Abwasserstrom eine Phosphorkonzentration von 120 mg P/l (bspw. in der kartoffelverarbeitenden Industrie) aufweist. Die übrigen Annahmen wie bspw. die Abwassermenge wird aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit zur kommunalen Variante konstant gehalten. Resultierend daraus ergibt sich eine rückgewinnbare Phosphormenge von 25.432 kg P/a.

Es wird davon ausgegangen, dass die kommunale und industrielle Variante dieselbe Anlagentechnik und die gleiche Menge an Betriebsmitteln (CSH) benötigen.

Die Summe der Investitionskosten beläuft sich beim P-RoC-Verfahren auf ca. 388.200 €, und die daraus resultierenden Kapitalkosten betragen ca. 33.100 €/a (Tabelle 4).

Als Betriebsmittel werden beim P-RoC-Verfahren lediglich Calciumsilicathydrat und elektrische Energie eingesetzt. Die Personalkosten wurden so berechnet, dass für die Überwachung und Instandhaltung ein Mitarbeiterbedarf mit einer 10% Personalstelle angesetzt wird. Die jährlichen Betriebskosten aus den Betriebsmitteln und den Instandhaltungskosten belaufen sich auf ca. 47.700 €/a.

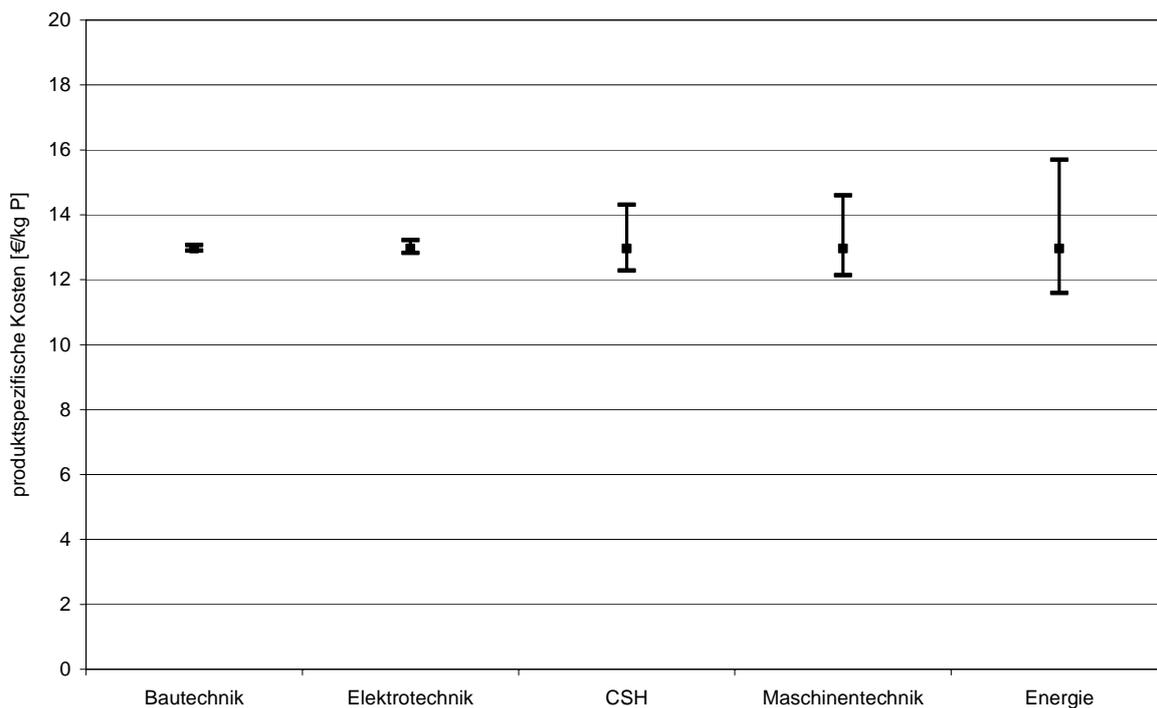
Durch Summierung der Kapital- und Betriebskosten ergeben sich Jahreskosten ohne Preissteigerung von ca. 80.900 €/a und mit Preissteigerung von ca. 98.300 €/a. Die einwohnerspezifischen Kosten betragen sowohl ohne als auch mit Preissteigerung für die kommunale Variante 1,0 €/(E-a) und die produktspezifischen Kosten 12,5 €/kg P bzw. 15,0 €/kg P (Tabelle 4).

**Tabelle 4: Vergleich der einzelnen Kostenarten mit und ohne Preissteigerung (P-RoC, kommunal)**

		Ohne Preissteigerung		Mit Preissteigerung	
Investitionskosten	€	388.200		388.200	
Kapitalkosten	€/a	33.200	41%	35.300	36%
Betriebskosten	€/a	47.700	59%	63.000	64%
<b>Summe Jahreskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>80.900</b>	<b>100%</b>	<b>98.300</b>	<b>100%</b>
<b>Projektkostenbarwert</b>	<b>€</b>	<b>1.585.000</b>		<b>1.926.000</b>	
<b>einwohnerspezifische Kosten</b>	<b>€/(E-a)</b>	<b>1,0</b>		<b>1,0</b>	
<b>produktspezifische Kosten</b>	<b>€/kg P</b>	<b>12,5</b>		<b>15,0</b>	

Bei der industriellen Variante können aufgrund der Anhebung der Phosphorkonzentration um das Vierfache auch die produktspezifischen Kosten um das Vierfache reduziert werden. In diesem Fall würden die Kosten bei 3,5 €/kg P bzw. mit Preissteigerung bei 4,0 €/kg P liegen.

Wie in Tabelle 4 angegeben, haben die Betriebskosten einen Anteil von 59% an den Jahreskosten, was sich in der Sensitivitätsanalyse der produktspezifischen Kosten widerspiegelt. Eine Verdopplung des Energiepreises lässt die produktspezifischen Kosten von ca. 12,5 €/kg P um nur 2,7 €/kg P (ca. +21%) auf 15,7 €/kg P steigen bzw. um ca. 1,3 €/kg P auf 11,6 €/kg P (-7,2%) sinken (Abbildung 4).



**Abb. 4: Sensitivitätsanalyse der produktspezifischen Kosten (P-RoC, kommunal)**

Die Variation des Zinssatzes von 3% auf 1% bzw. 5% hat trotz des hohen prozentualen Anteils der Kapitalkosten von 41% an den Jahreskosten nur einen sehr geringen Einfluss (<1 €/kg P) auf die produkt- und einwohnerspezifischen Kosten

Der mögliche Anstieg der Betriebsmittelpreise wird durch die Variation der Preissteigerung simuliert. Durch eine Verdopplung der Preissteigerungsraten würden die einzelnen Kostenarten um ca. 52% zunehmen, wodurch die produktspezifischen Kosten für das P-RoC-Verfahren von ca. 12,5 €/kg P auf ca. 19,0 €/kg P steigen.

Für das P-RoC-Verfahren wurde sowohl eine Variantenberechnung für andere Kläranlagengrößen für die kommunale als auch industrielle Variante durchgeführt. Wie in Abbildung 5 dargestellt, können die produktspezifischen Kosten durch den Bau einer größeren P-Rückgewinnungsanlage auf einer kommunalen Kläranlagengröße mit bspw. 1.000.000 angeschlossenen Einwohnerwerten ohne Preissteigerung

auf unter 4,0 €/kg P (ca. -67%) reduziert werden. Bei der industriellen Variante können die produktspezifischen Kosten von ca. 3,0 €/kg P auf ca. 1,0 €/kg P gesenkt werden (Abbildung 5).

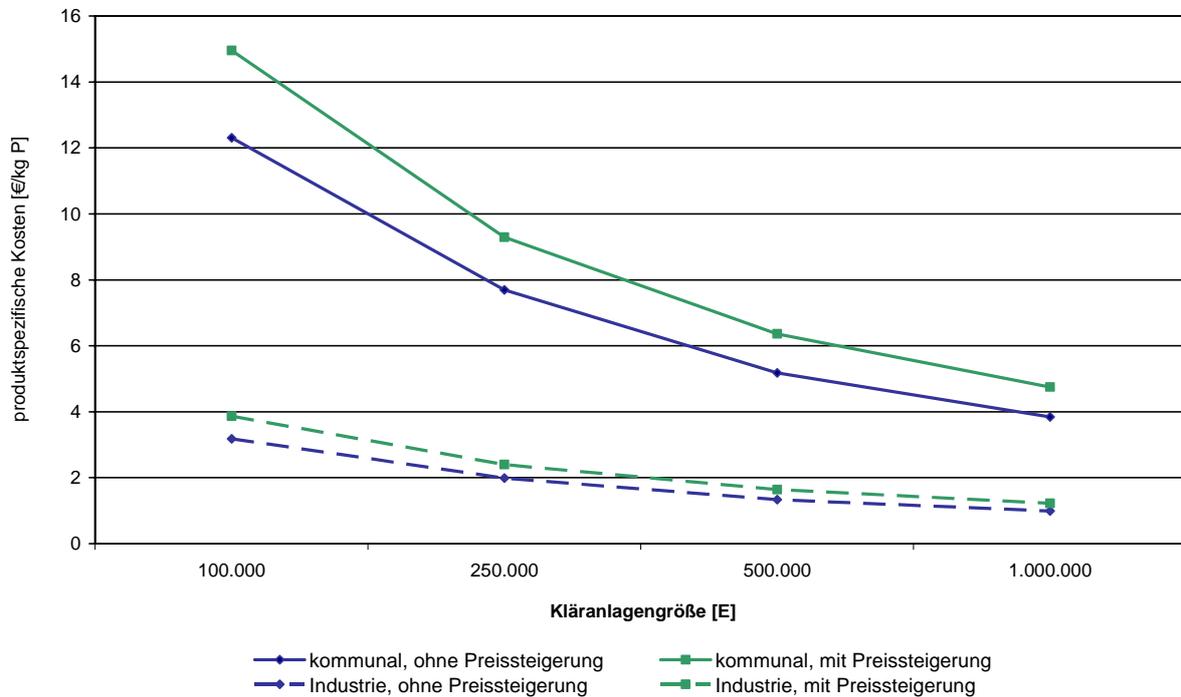


Abb. 5: Kostendegression mit und ohne Preissteigerung (P-RoC)

### 3.3 Das Fix-Phos Verfahren

Das FIX-Phos-Verfahren wurde ebenfalls im Projekt ProPhos „Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“ vom Institut IWAR der Technischen Universität Darmstadt entwickelt. Das Verfahrensfliessbild ist in Abbildung 6 dargestellt.

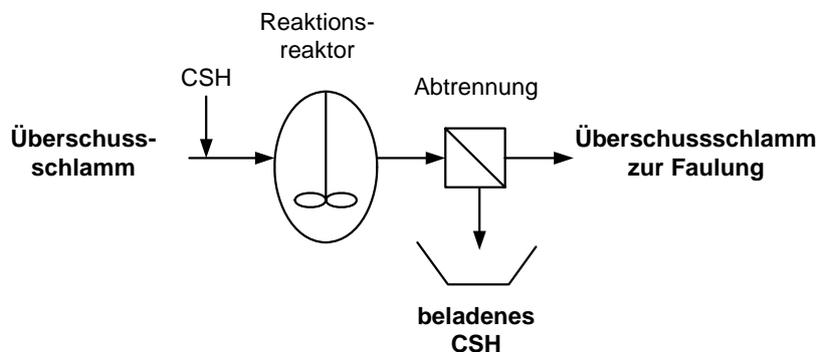


Abb. 6: Fließbild des FIX-Phos-Verfahrens (Variante 2) (nach Petzet und Cornel, 2009a)

Der Überschussschlamm aus einer Kläranlage mit biologischer Phosphorelimination wird in einem geschlossenen Reaktionsreaktor mit Calciumsilicathydrat (CSH) mit einer Aufenthaltszeit von 10 Tagen anaerob behandelt. Das Polyphosphat und organisch gebundene Phosphat werden in die wässrige Phase überführt und auf der Oberfläche und im Inneren des CSH kristallisiert. Das beladene CSH wird anschließend über ein Sieb abgetrennt. Weitere Informationen zu dem Verfahren können dem Beitrag von Petzet et al. „BMBF-Verbundprojekt ProPhos: Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“ in diesem Tagungsband entnommen werden.

Bei diesem Verfahren werden zwei unterschiedliche Varianten betrachtet:

- Getrennte Faulung von Überschussschlamm (ÜSS) und Primärschlamm (PS). Da auf größeren Kläranlagen meist mehrere Faulbehälter und Voreindicker zur Verfügung stehen, kann eine getrennte Faulung vorgenommen werden. Das CSH wird dem ÜSS zugegeben und gemeinsam anaerob behandelt. Es muss lediglich in Siebe und zusätzliche Leitungen investiert werden.
- Gemeinsame Faulung von ÜSS und PS für kleine Kläranlagen mit nur einem Faulbehälter. Nach der Voreindickung wird der Überschussschlamm in einem Reaktionsreaktor für 10 Tage mit dem CSH anaerob behandelt, das CSH mittels Sieb abgetrennt und der ÜSS anschließend dem vorhandenen Faulbehälter mit dem Primärschlamm zugeführt. Es ist der Bau eines Reaktors für 10 d  $HRT_{ÜSS}$ , eines Siebes und von Leitungen notwendig.

Grundsätzlich wäre die Zugabe des CSH ebenfalls bei einer gemeinsamen Faulung des Klärschlammes möglich, jedoch steigt der Aufwand für die Abtrennung des CSH nach der Faulung durch die Störstoffe im Primärschlamm erheblich. Weiter könnte eine getrennte Faulung von Primär- und Überschussschlamm beim Neubau von Faulbehältern berücksichtigt werden.

Für die Mengenermittlung des rückgewonnenen Phosphors wird von einem Überschussschlammfall von 45 g TS/(E·a), einer Phosphorkonzentration von 3,6%  $P_{TS}$  und einem Wirkungsgrad der Phosphorrückgewinnungsanlage von 37% (Petzet und Cornel, 2009a) ausgegangen. Demnach können 21.878 kg P/a bzw. 0,22 kg P/(E·a) Phosphor für eine 100.000 EW Kläranlage durch das FIX-Phos-Verfahren rückgewonnen werden.

Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass bei der gemeinsamen und getrennten Faulung von ÜSS und PS das Rückgewinnungspotential identisch ist.

In Tabelle 5 sind die einzelnen Kostenarten der Variante 1 dargestellt. Veränderungen bei Variante 2 bei den Betriebskosten existieren lediglich bei den Kosten für Wartung, da diese prozentual von den Investitionskosten abhängig sind sowie den Energiekosten der Maschinentechnik. Die Betriebskosten der Variante 1 belaufen sich auf ca. 37.500 €/a und die der Variante 2 auf ca. 59.500 €/a.

**Tabelle 5: Vergleich der einzelnen Kostenarten mit und ohne Preissteigerung, Variante 1 (FIX-Phos)**

		ohne Preissteigerung		mit Preissteigerung	
Investitionskosten	€	70.600		70.600	
Kapitalkosten	€/a	4.800	11%	5.000	9%
Betriebskosten	€/a	37.500	89%	49.500	91%
<b>Summe Jahreskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>42.300</b>	<b>100%</b>	<b>54.500</b>	<b>100%</b>
<b>Projektkostenbarwert</b>	<b>€</b>	<b>829.400</b>		<b>1.068.700</b>	
<b>einwohnerspezifische Kosten</b>	<b>€/E·a</b>	<b>0,5</b>		<b>0,5</b>	
<b>produktspezifische Kosten</b>	<b>€/kg P</b>	<b>2,0</b>		<b>2,5</b>	

Die Jahreskosten liegen bei Variante 1 (Tabelle 5) und 2 (Tabelle 6) ohne Preissteigerung bei ca. 42.300 €/a und 49.900 €/a und mit Preissteigerung bei ca. 54.500 €/a und ca. 171.700 €/a. Die produktspezifischen Kosten betragen im günstigsten Fall 2,0 €/kg P für Variante 1 ohne Preissteigerung und im teuersten Fall 8,0 €/kg P für Variante 2 mit Preissteigerung.

Bedingt durch die hohen Investitionskosten, aber gleichbleibenden Kosten für das Calciumsilicathydrat und nur geringfügig höheren Stromkosten bei Variante 2 verändert sich die prozentuale Verteilung der Kapital- und Betriebskosten an den Jahreskosten. Während bei Variante 1 die Betriebskosten mit ca. 90% den Hauptanteil der Jahreskosten ausmachen, nimmt der Anteil bei Variante 2 auf ca. 40% ab (Tabelle 6).

**Tabelle 6: Vergleich der einzelnen Kostenarten mit und ohne Preissteigerung, Variante 2 (FIX-Phos)**

		ohne Preissteigerung		mit Preissteigerung	
Investitionskosten	€	1.409.400		1.409.400	
Kapitalkosten	€/a	91.500	61%	94.600	55%
Betriebskosten	€/a	58.400	39%	77.100	45%
<b>Summe Jahreskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>149.900</b>	<b>100%</b>	<b>171.700</b>	<b>100%</b>
<b>Projektkostenbarwert</b>	<b>€</b>	<b>2.938.600</b>		<b>3.364.800</b>	
<b>einwohnerspezifische Kosten</b>	<b>€/E·a</b>	<b>1,5</b>		<b>1,5</b>	
<b>produktspezifische Kosten</b>	<b>€/kg P</b>	<b>7,0</b>		<b>8,0</b>	

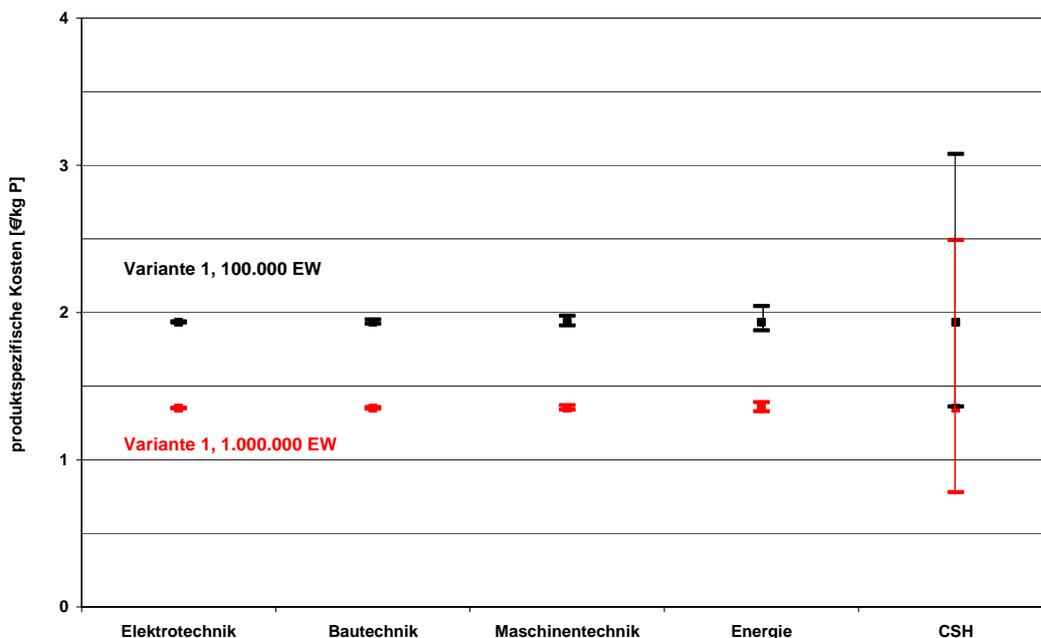
Zur Ermittlung der Kostenveränderung für unterschiedliche Kläranlagengrößen für die zwei Varianten des FIX-Phos-Verfahrens wurde in erster Linie auf die Werke von Günthert und Reicherter (2001) „Investitionskosten in der Abwasserentsorgung“ und von Sander (2003) „Ökonomie der Abwasserbeseitigung“ für die Kostenermittlung zurückgegriffen. Die in der Literatur angegebenen Investitionskosten, beispielsweise von 1997, wurden mit dem entsprechenden Preisindex auf die heutigen (2009) Kosten umgerechnet. In Tabelle 7 ist die Kostenveränderung der produktspezifischen Kosten der beiden Varianten mit und ohne Preissteigerung für die Kläranlagengrößen von 100.000, 250.000, 500.000 und 1.000.000 EW angegeben.

Die Veränderung der produktspezifischen Kosten bei den verschiedenen Kläranlagengrößen beider Varianten liegt lediglich im Bereich kleiner 1 €/kg P. Mit zunehmender Kläranlagengröße liegen die produktspezifischen Kosten bei Variante 1 ohne Preissteigerung zwischen 2,0 und 1,5 €/kg P bzw. mit Preissteigerung bei 2,5 und 2,0 €/kg P. Diese geringe Abstufung ist darauf zurückzuführen, dass die Jahreskosten zu 89% von den Kosten des CSH abhängig sind und die Menge CSH wiederum vom Kläraschlammvolumen abhängt, das in gleichem Verhältnis wie die Kläranlagengröße zunimmt. Dementsprechend haben die Investitionen, die mit zunehmender Kläranlagengröße im Verhältnis geringer werden nur einen sehr geringen Einfluss auf die Jahreskosten.

**Tabelle 7: Kostenveränderung der produktspezifischen Kosten bei unterschiedlichen Kläranlagengrößen mit und ohne Preissteigerung (FIX-Phos)**

Variante		Kläranlagengröße [EW]			
		100.000	250.000	500.000	1.000.000
		produktspezifische Kosten [€/kg P]			
1	ohne Preissteigerung	2,0	1,5	1,5	1,5
2		7,0	5,5		
1	mit Preissteigerung	2,5	2,0	2,0	2,0
2		8,0	6,5		

Exemplarisch wird für Variante 1 die Sensitivitätsanalyse ohne Preissteigerung für die Kläranlagengröße 100.000 EW und 1.000.000 EW durchgeführt (Abbildung 7).



**Abb. 7: Sensitivitätsanalyse, Variante 1 für 100.000 und 1.000.000 EW (FIX-Phos)**

Der Einfluss des CSH auf die produktspezifischen Kosten wird durch die Sensitivitätsanalyse deutlich dargestellt. Durch eine Verdopplung bzw. Halbierung des CSH-Preises können die Kosten für ein kg recycelten Phosphor auf gerundet 3,0 €/kg P steigen bzw. auf 1,5 €/kg P bei Variante 1 mit 100.000 EW sinken.

Die Sensitivitätsanalyse des Zinssatzes und der Preissteigerung für Variante 1 mit der Standardkläranlagengröße von 100.000 E hat auf die produktspezifischen Kosten einen sehr geringen Einfluss im Cent-Bereich, was ebenfalls mit den geringen Investitionskosten im Vergleich zu den Betriebsmitteln zusammenhängt. Die Variation der Preissteigerung (Reinvestitionskosten 2%, Betriebsmittel 4%) zeigt, dass durch den Anstieg der Preise für die Betriebsmittel und Reinvestitionen die produktspezifischen Kosten von ca. 2,0 auf ca. 3,5 €/kg P steigen.

Durch die Behandlung des Überschussschlammes oder des Klärschlammes mit Calciumsilicathydrat sind folgende Vorteile bzw. Einsparungen anzunehmen, die monetär nicht in der Kostenabschätzung berücksichtigt werden, jedoch erheblich zu der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beitragen können (Petzet, 2010a):

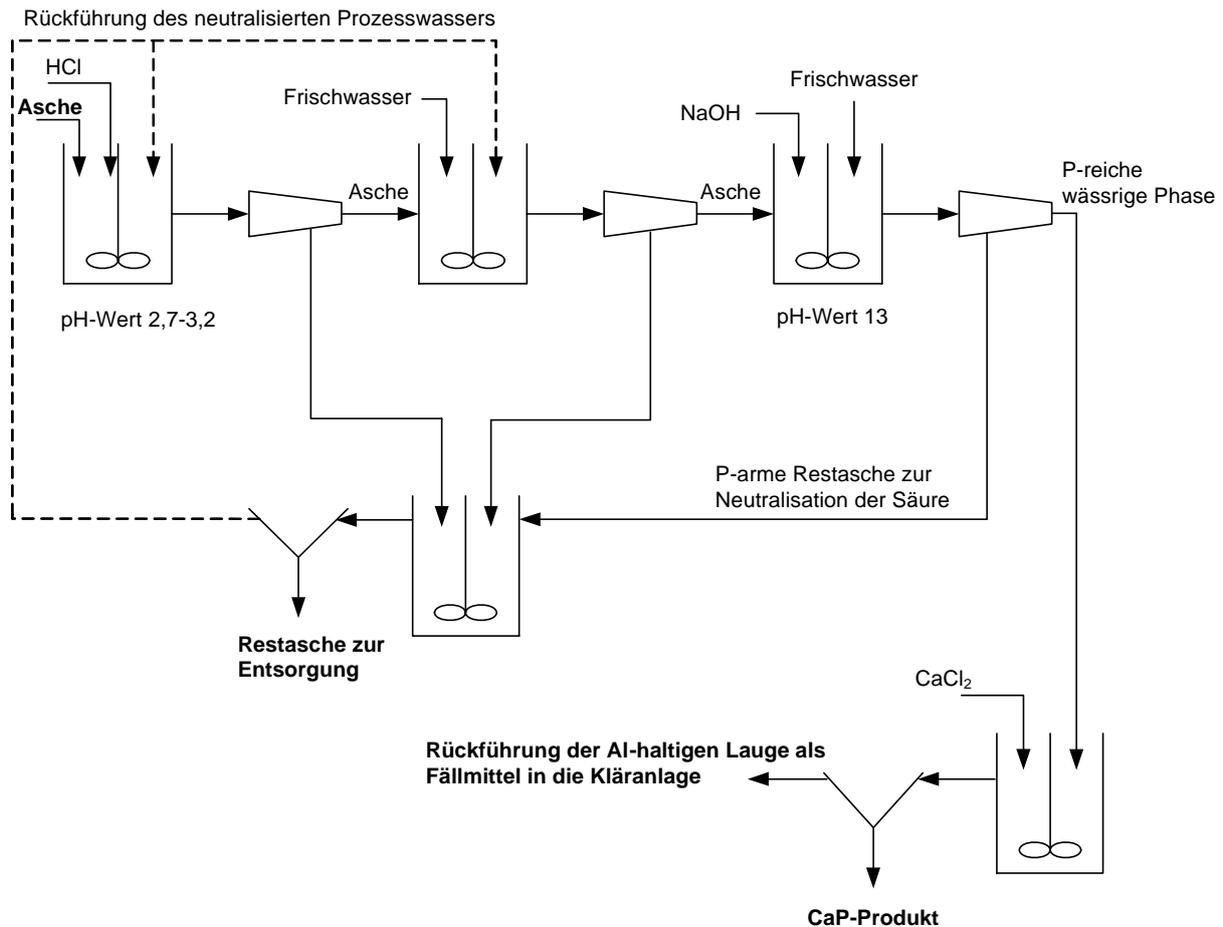
- Verbesserung der Entwässerbarkeit durch niedrigere Phosphorkonzentrationen im Schlammwasser
- Reduzierung der Kosten die im Zusammenhang mit der MAP Problematik auf Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination auftreten können
  - Verzicht auf den Einsatz von Anti-scaling Mitteln um MAP-Ablagerungen zu verhindern
  - Verringerung des Wartungs- und Reparaturaufwands (Austausch und Reparatur von Rohrleitungen und Pumpen)
  - Reduktion des Fällmittelbedarf, falls diese eingesetzt werden

### **3.4 SESAL-Phos Verfahren**

Das SESAL-Phos-Verfahren „Rückgewinnung von Phosphor und Aluminium aus Klärschlammaschen mittels kombinierter saurer und basischer Elution“ wurde vom Institut IWAR der Technischen Universität in Darmstadt im Projekt ProPhos entwickelt. Das Verfahrensfliessbild ist in Abbildung 8 dargestellt.

Die ausführliche Beschreibung des Verfahrens kann dem Beitrag von Petzet et al. „BMBF-Verbundprojekt ProPhos: Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“ in diesem Tagungsband entnommen werden.

Als wichtige Rahmenbedingung des Verfahrens ist anzumerken, dass nur Klärschlammäsche zur Phosphorrückgewinnung verwendet werden, die aus Rückständen bei der Monoverbrennung von Klärschlamm entsteht, die auf Kläranlagen mit Aluminiumfällung zur Phosphorelimination anfallen.



**Abb. 8: Fließbild des SESAL-Phos-Verfahrens (nach Petzet und Cornel, 2009b)**

Die Berechnung basiert bei der Phosphorrückgewinnung aus Asche auf einer Anlagengröße mit einem Aschedurchsatz von 30.000 Mg TS/a. Unter der Annahme, dass die Asche eine Phosphorkonzentration von 6,1% P besitzt und der Wirkungsgrad der Rückgewinnungsanlage bei 63% (Petzet und Cornel, 2009b) liegt, ergibt sich in der Modellberechnung eine rückgewinnbare Phosphormenge von ca. 1.153 Mg P/a bzw. 0,39 kg P/(E-a).

Die Investitionskosten belaufen sich insgesamt auf ca. 8,66 Mio. € und die Kapitalkosten auf ca. 600.500 €/a (Tabelle 8). Die Betriebskosten liegen jährlich bei ca. 10,19 Mio. €/a und werden zu ca. 41% von den Betriebsmitteln für die Natronlauge und zu ca. 22% vom Calciumchlorid bestimmt. Die jährlichen Wartungskosten für die Anlagentechnik tragen lediglich zu ca. 2% an den gesamten Betriebskosten bei. Es ist zu prüfen, ob das anfallende Abwasser ohne vorherige Reinigung und Abtrennung der Schwermetalle in das öffentliche Kanalnetz eingeleitet werden kann. Zu beachten ist, dass sich die Entsorgungskosten des anfallenden Abwassers gegebenenfalls erhöhen können.

**Tabelle 8: Vergleich der einzelnen Kostenarten mit und ohne Preissteigerung (SESAL-Phos)**

		ohne Preissteigerung		mit Preissteigerung	
Investitionskosten	€	8.663.000		8.663.000	
Kapitalkosten	€/a	600.500	6%	625.700	4%
Betriebskosten	€/a	10.185.700	94%	13.450.000	96%
<b>Summe Jahreskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>10.786.200</b>	<b>100%</b>	<b>14.075.700</b>	<b>100%</b>
<b>Projektkostenbarwert</b>	<b>€</b>	<b>211.415.600</b>		<b>275.890.000</b>	
<b>einwohnerspezifische Kosten</b>	<b>€/E-a)</b>	<b>3,5</b>		<b>5,0</b>	
<b>produktspezifische Kosten</b>	<b>€/kg P</b>	<b>9,5</b>		<b>12,0</b>	

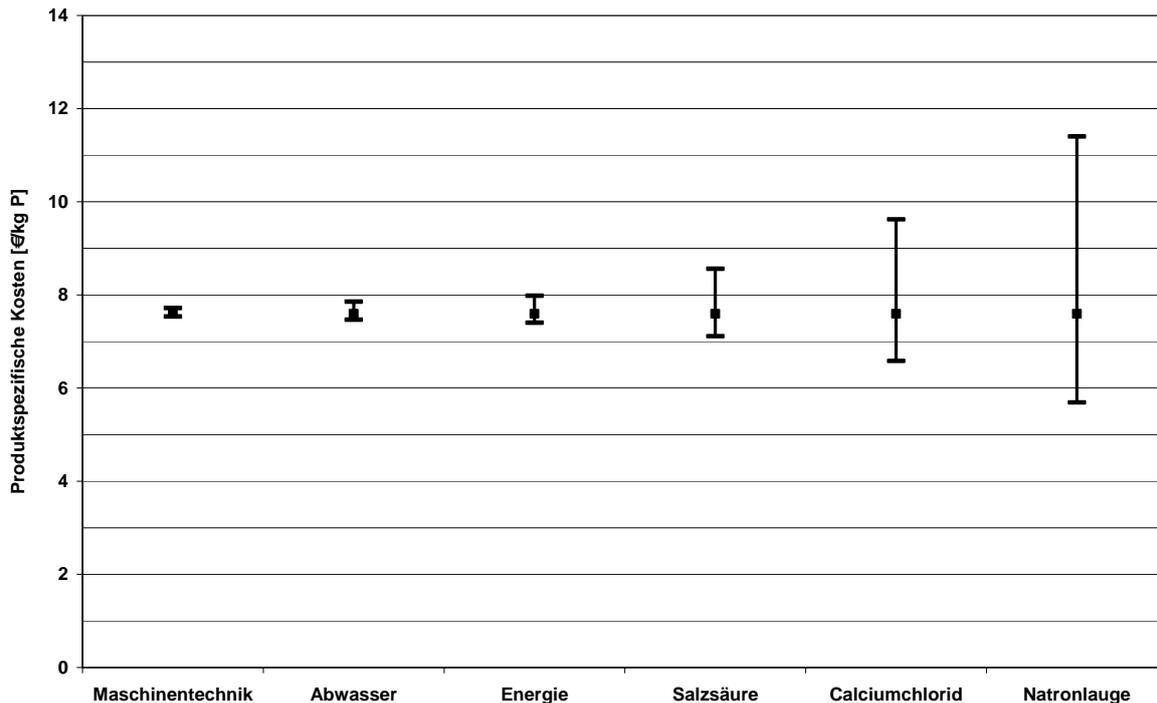
Die aus den Kapital- und Betriebskosten ermittelten Jahreskosten liegen beim SESAL-Phos-Verfahren bei ca. 10,79 Mio. €/a. Unter Berücksichtigung einer rückgewonnenen Phosphormenge von 1.153 Mg P/a entspricht dies produktspezifischen Kosten von 9,5 €/kg P und einwohnerspezifischen Kosten von ca. 3,5 €/E-a). Durch den Ansatz einer Preissteigerung von 1% für die Reinvestitionen und 2% für die Betriebskosten ergeben sich Jahreskosten von ca. 14,08 Mio. €/a, produktspezifische Kosten von 12,0 €/kg P und einwohnerspezifische Kosten von ca. 5,0 €/E-a).

Unter der idealisierten Annahme, dass die beim SESAL-Phos-Verfahren anfallende Aluminiumlösung zu gleichwertigen Kosten wie herkömmliche Fällungsmittel an Kläranlagen verkauft werden können, ergeben sich jährliche Einsparungen von ca. 2,03 Mio. €/a bzw. mit Preissteigerung von ca. 2,68 Mio. €/a. Durch die Einsparungen können die produktspezifischen Kosten um 2,0 €/kg P auf 7,5 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten ohne Preissteigerung um 0,5 €/E-a) auf 3,0 €/E-a) gesenkt werden. Bei Berücksichtigung der Preissteigerung liegen die produktspezifischen Kosten bei 10,0 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten bei 4,0 €/E-a).

Ob die Aluminiumlösung zu dem Preis wie herkömmliche Fällmittel abgenommen wird oder einen niedrigeren Markwert besitzt, muss durch eine Einzelfallprüfung geklärt werden.

Den stärksten Einfluss auf die produktspezifischen Kosten haben Natronlauge, Calciumchlorid und Salzsäure. Bei einer Verdopplung des Natronlaugepreises würden die Kosten auf über 11,5 €/kg P steigen bzw. bei einer Halbierung des Preises auf unter 6,0 €/kg P sinken (Abbildung 9).

Die Variation des Zinssatzes von 3% auf 1% bzw. 5% hat bei den einwohner- und produktspezifischen Kosten lediglich einen Einfluss im Cent-Bereich, was durch den sehr geringen prozentualen Anteil der Kapitalkosten an den Jahreskosten zu erklären ist.



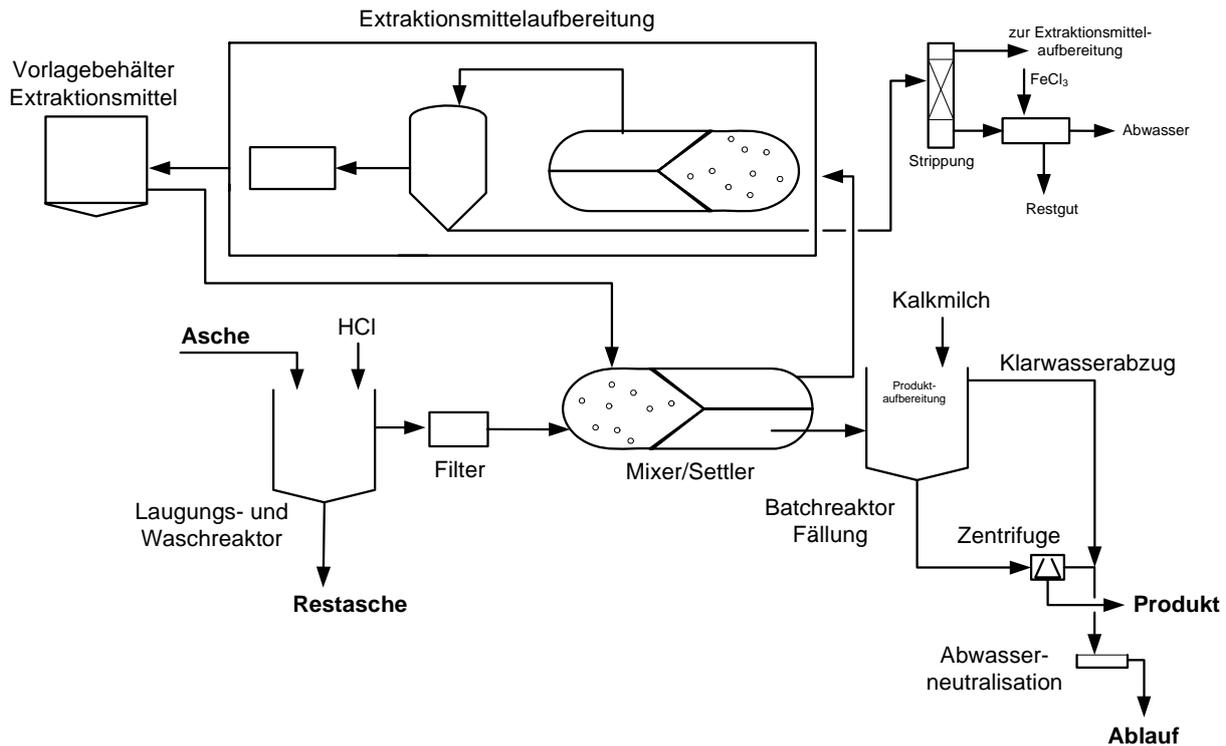
**Abb. 9: Sensitivitätsanalyse der produktspezifischen Kosten (SESAL-Phos)**

Eine Veränderung der jährlichen Preissteigerung hat einen starken Einfluss auf die produktspezifischen Kosten. Die Kosten erhöhen sich bei einer Preissteigerung für die Reinvestitionen von 2% und für die Betriebsmittel von 4% um insgesamt 74%, was die produktspezifischen Kosten von 7,6 €/kg P auf 13,2 €/kg P ansteigen lässt.

Bei einem Up- oder Downscaling der Anlagenkapazität für eine Kostenabschätzung würden die Betriebsmittelkosten konstant bleiben. Variablen wären die Personalkosten und Wartungskosten für die Anlagentechnik. Es ist jedoch aufgrund des geringen Einflusses der Kapitalkosten auf die Jahreskosten nicht davon auszugehen, dass die produktspezifischen Kosten sich durch eine Veränderung der Anlagenkapazität maßgeblich ändern werden.

### 3.5 PASCH Verfahren

Im Projekt PASCH „Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm“ (FKZ 02WA0793, 02WA0794 und 02WA0795) wurde ein Verfahren im Labor- und Technikumsmaßstab entwickelt, in dem aus Klärschlammasche von Monoverbrennungsanlagen Phosphor durch einen nass-chemischen Aufschluss rückgewonnen werden kann. Das PASCH-Verfahren basiert auf drei Hauptschritten: Chemischer Aufschluss der Aschen (Laugung), Reinigung der Aufschlusslösung sowie der Produktfällung. Das Verfahrensschema ist in Abbildung 10 dargestellt, die genaue Verfahrensbeschreibung kann im Beitrag von Montag et al. „Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche mittels des nasschemischen PASCH-Verfahrens“ nachgelesen werden.



**Abb. 10: Fließbild des PASCH-Verfahrens (nach Montag et al., 2010)**

Wie beim SESAL-Phos-Verfahren wird auch hier mit einer Anlagengröße von 30.000 Mg/a Klärschlammascheninput gerechnet. Bei einem Wirkungsgrad der Phosphorrückgewinnungsanlage von 90% liegt die rückgewinnbare Phosphormenge in der Modelberechnung bei 1.647 Mg P/a bzw. 0,56 kg P/(E-a).

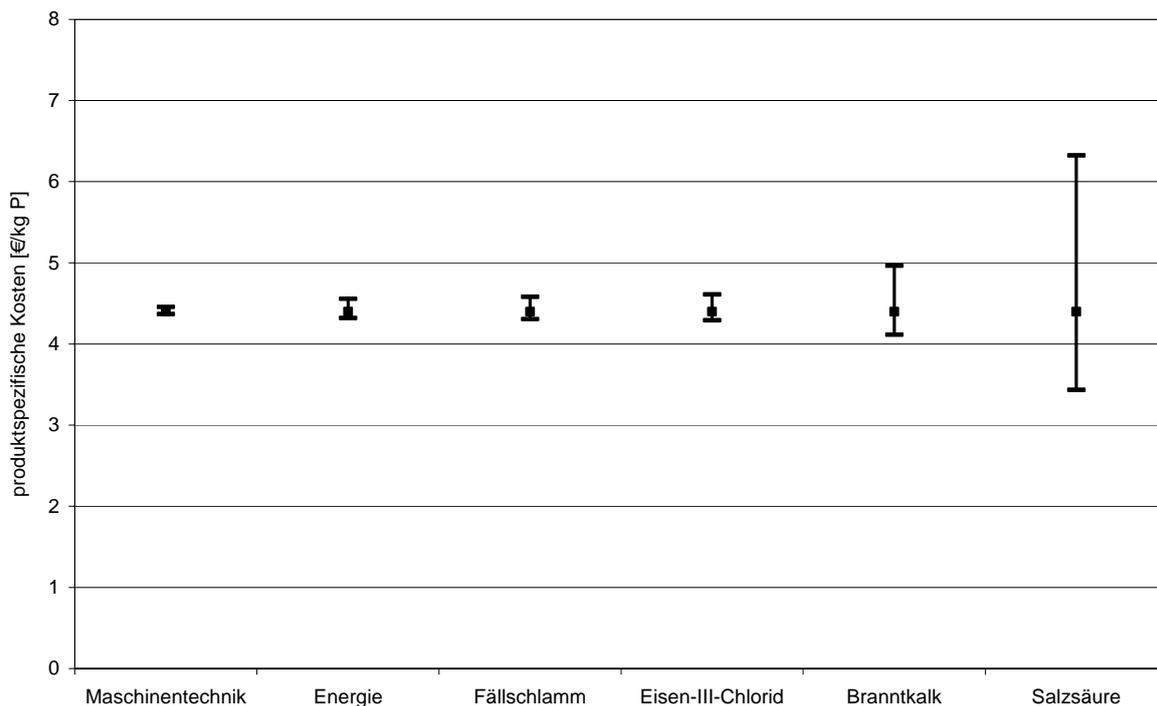
Die Angaben zu den benötigten Anlagenteilen, Hinweise zur Auslegung und Ausgestaltung sowie die Preise der Bau-, Maschinen- und Elektrotechnik stammen von der ATEMIS Ingenieurgesellschaft. Die Investitionskosten belaufen sich auf 4,76 Mio. € und die Kapitalkosten auf jährlich ca. 356.900 €/a.

Der mit Schwermetallen versetzte Fällschlamm wird für 500 €/Mg TS in einer entsprechenden Behandlungsanlage entsorgt. Der Personalbedarf von 16 Arbeitern (inkl. Urlaubs- und Krankheitszeit) entspricht einer Betreuung der Phosphorrückgewinnungsanlage mit 3 Personen je Schicht, so dass Anlieferung, Rückgewinnung und Ablieferung von Produkt und Reststoffen stets überwacht werden. Die Summe der Betriebskosten beläuft sich auf jährlich ca. 6,89 Mio. € (siehe Tabelle 9).

**Tabelle 9: Vergleich der einzelnen Kostenarten mit und ohne Preissteigerung (PASCH)**

		Ohne Preissteigerung		Mit Preissteigerung	
Investitionskosten	€	4.755.000		4.755.000	
Kapitalkosten	€/a	356.900	5%	375.100	4%
Betriebskosten	€/a	6.885.300	95%	9.091.800	96%
<b>Summe Jahreskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>7.242.200</b>	<b>100%</b>	<b>9.466.900</b>	<b>100%</b>
<b>Projektkostenbarwert</b>	<b>€</b>	<b>141.950.600</b>		<b>185.555.200</b>	
<b>einwohnerspezifische Kosten</b>	<b>€/E-a</b>	<b>2,50</b>		<b>3,00</b>	
<b>produktspezifische Kosten</b>	<b>€/kg P</b>	<b>4,50</b>		<b>5,50</b>	

Die Jahreskosten liegen beim PASCH-Verfahren bei ca. 7,24 Mio. €/a. Dies entspricht bei der rückgewonnenen Phosphormenge von 1.647 Mg P/a produktspezifischen Kosten von gerundet 4,5 €/kg P bzw. einwohnerspezifischen Kosten von ca. 2,5 €/E-a). Unter Berücksichtigung der Preissteigerungsraten von 1% für die Reinvestitionen und 2% für die Betriebsmittel belaufen sich die produktspezifischen Kosten auf 5,5 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten auf 3,0 €/E-a).



**Abb. 11: Sensitivitätsanalyse der produktspezifischen Kosten (PASCH)**

Den stärksten Einfluss auf die produktspezifischen Kosten hat der Salzsäurepreis. Durch eine Verdopplung bzw. Halbierung des Salzsäurepreises können die Kosten für ein kg Phosphor von 4,5 €/kg P auf 6,0 €/kg P steigen bzw. auf 3,5 €/kg P sinken (Abbildung 11).

Die Sensitivitätsanalyse des Zinssatzes sowie der Preissteigerungsrate spiegelt den hohen prozentualen Anteil der Betriebskosten (95%) im Vergleich zu den Kapitalkosten an den Jahreskosten wider. Während die Anhebung des Zinssatzes bei den produktspezifischen Kosten von 3% auf 5% einen Unterschied im Euro-Cent-Bereich ausmacht, reagieren die produktspezifischen Kosten bei einer Anhebung der Preissteigerungsrate deutlich empfindlicher.

Bedingt durch den starken Einfluss der Betriebskosten an den einzelnen Kostenarten steigen die produktspezifischen Kosten bei einem Zinssatz der Reinvestitionen von 2% und der Betriebskosten von 4% um 75% von 4,4 €/kg P auf 7,7 €/kg P. Somit hat die jährliche Preissteigerung nennenswerte Auswirkungen auf die Kosten des PASCH-Verfahrens.

Bei einer Kostenabschätzung für eine Rückgewinnungsanlage mit einer höheren bzw. niedrigeren Anlagenkapazität als 30.000 Mg TS/a, würden die spezifischen Betriebsmittel- und Entsorgungskosten der Reststoffe konstant bleiben. Einzige Variablen wären die Personalkosten, die jedoch keinen nennenswerten Einfluss (11%) auf die Jahreskosten haben, und die Instandhaltungskosten, die von den Investitionskosten für Bau-, Maschinen- und der Elektrotechnik abhängig sind und ebenfalls nur einen geringen Einfluss aufweisen. Resultierend daraus ist nicht davon auszugehen, dass sich die produktspezifischen Kosten bei einer Erhöhung bzw. Senkung (im sinnvollen Bereich) der Anlagenkapazität grundlegend verändern.

#### **4 Vergleich und Zusammenfassung der untersuchten Verfahren**

Es ist noch einmal grundsätzlich darauf hinzuweisen, dass die berechneten Kosten der einzelnen Verfahren nur Schätzungen auf Basis der wissenschaftlichen Untersuchungen darstellen. Die Kosten können sich beispielsweise durch den Erwerb eines Grundstücks, durch andere Phosphorkonzentrationen im Abwasser, Schlamm oder Klärschlamm sowie eventuell durch bereits vorhandene oder leerstehende Reaktionsbecken oder ungenutzte Aggregate deutlich verändern.

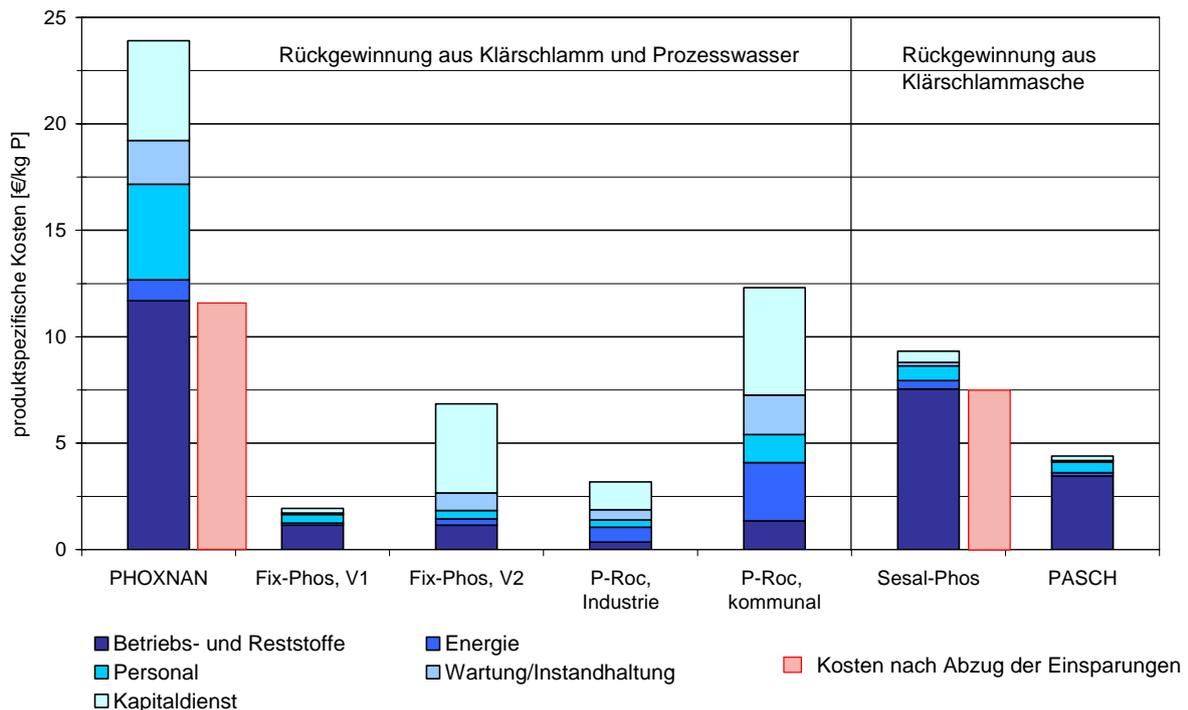
Die LAWA-Leitlinien sehen neben der Kostenberechnung und Sensitivitätsanalyse die Gegenüberstellung der unterschiedlichen berechneten Varianten vor. Die Voraussetzung zum Vergleich der einzelnen Varianten untereinander ist durch den gleichen Betriebsbeginn und die gleiche Nutzungsdauer formal erfüllt, wodurch die Projektkostenbarwerte und Jahreskosten untereinander verglichen werden können. In Tabelle 10 sind die einzelnen Kostenarten der in der Förderinitiative entwickelten Verfahren vergleichend dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche für ca. 3 Mio. angeschlossene Einwohner dimensioniert und berechnet wurde. Bei den Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm wurden Basisanschlussgröße von 100.000 E und erweitert bis zu 1 Mio. E berücksichtigt.

**Tabelle 10: Vergleich der in der Förderinitiative entwickelten Verfahren**

		PHOXNAN	P-RoC, kommunal	FIX-Phos, V1	SESAL-Phos	PASCH
Anschlussgröße	E	100.000	100.000	100.000	ca. 3 Mio.	ca. 3 Mio.
Investitionskosten	€	2.430.600	388.200	70.600	8.663.000	4.755.000
Kapitalkosten	€/a	218.500	33.200	4.800	600.500	356.900
Betriebskosten	€/a	590.000	47.700	39.900	10.146.400	6.885.300
<b>Summe Jahreskosten</b>	<b>€/a</b>	<b>366.800 *</b>	<b>80.900</b>	<b>44.700</b>	<b>8.716.700 *</b>	<b>7.242.200</b>
<b>Projektkostenbarwert</b>	<b>€</b>	<b>7.189.900 *</b>	<b>1.585.000</b>	<b>875.900</b>	<b>170.852.000 *</b>	<b>141.950.600</b>
<b>einwohnerspezifische Kosten</b>	<b>€(E-a)</b>	<b>3,5 *</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>3,0 *</b>	<b>2,5</b>
<b>produktspezifische Kosten</b>	<b>€/kg P</b>	<b>11,5 *</b>	<b>12,5</b>	<b>2,0</b>	<b>7,5 *</b>	<b>4,5</b>

\* Einsparungen inbegriffen

Da sich die Investitionskosten der Verfahren in den absoluten Beträgen sehr stark unterscheiden, die Betriebsmittelkosten im Verhältnis zu den Kapitalkosten je Verfahren ähnlich sind, ist eine graphische Darstellung der Projektkostenbarwerte über 30 Jahre nicht zielführend.



**Abb. 12: Gegenüberstellung der in der Förderinitiative entwickelten Verfahren**

In Abbildung 12 sind die einzelnen Verfahren gegliedert nach Anteilen an Betriebs- und Reststoffen, Energie, Personal, Wartung/Instandhaltung sowie an Kapitaldienst an den produktspezifischen Kosten in €/kg P dargestellt. Die roten Balken neben den Verfahren PHOXNAN und SESAL-Phos stellen die produktspezifischen Kosten

inklusive der Einsparungen dar. Die Varianten des FIX-Phos-Verfahrens sind in Kapitel 3.3 und die des P-RoC-Verfahrens in Kapitel 3.2 beschrieben.

Auffällig sind die sehr hohen Betriebsmittelkosten bei den Verfahren PHOXNAN und SESAL-Phos, die mit dem Einsatz von Sauerstoff bzw. Natronlauge und Calciumchlorid zu erklären sind. Die Energiekosten sind mit Ausnahme des P-RoC-Verfahrens sehr gering. Die hohen Personalkosten beim PHOXNAN-Verfahren beruhen auf der komplexen Prozessführung des Verfahrens, so dass im Vergleich zu den Verfahren P-RoC und FIX-Phos mehr Personalbedarf besteht. Im absoluten Vergleich benötigen die Verfahren PASCH und SESAL-Phos, bedingt durch die große Anlagengröße, mehr Personal. Jedoch kann dies im Vergleich zu der hohen rückgewinnbaren Phosphormenge relativiert werden.

In Tabelle 11 sind die Verfahren der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm (FIX-Phos, PHOXNAN) und in Tabelle 12 die der Rückgewinnung aus Klärschlammasche (PASCH, SESAL-Phos) vergleichend dargestellt. Da bis auf das P-RoC-Verfahren kein weiteres in der Förderinitiative entwickelte Verfahren die Rückgewinnung aus Abwasser vorsieht, ist ein Vergleich des P-RoC-Verfahrens nicht möglich.

**Tabelle 11: Vergleich der Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm (FIX-Phos, PHOXNAN)**

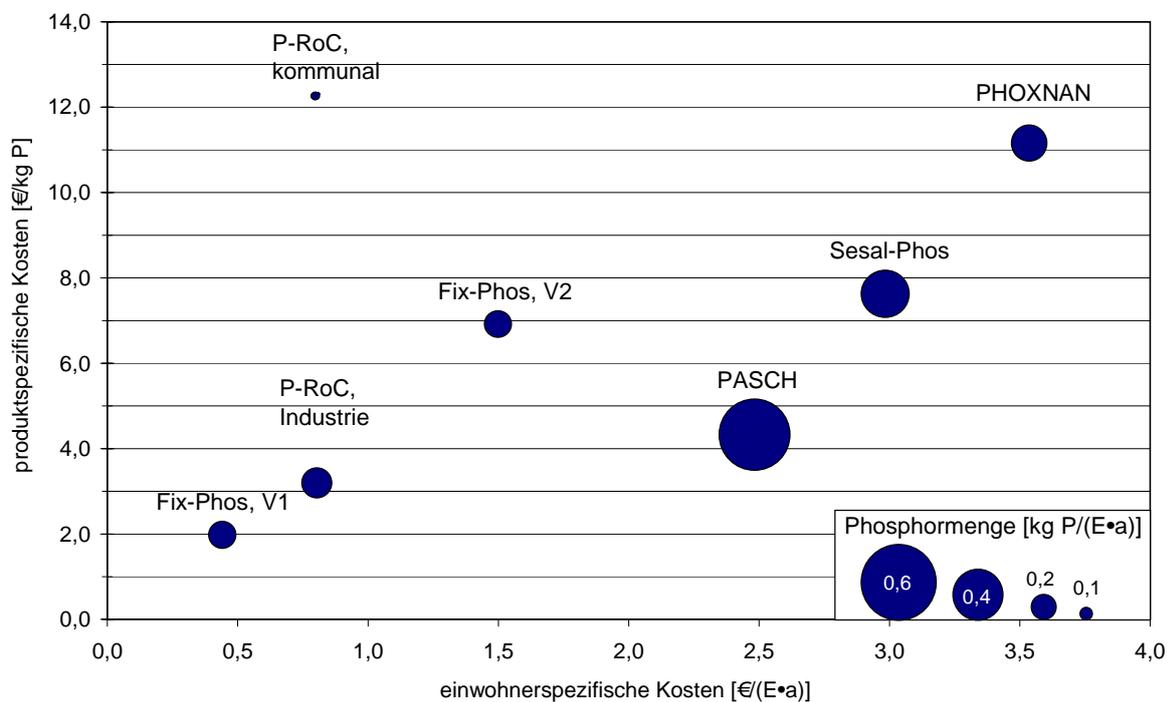
Verfahren	Kosten [€/kg P]	Investitionskosten [€]	spez. Investitionskosten [€/E]	Verfahrenstechnischer Aufwand	Verfahrenstechnische Einschränkung	Betriebsmittelbedarf	P-Rückgewinnungspotential
Fix-Phos V1 / V2	2,0 / 7,0	70.600 / 1.409.400	0,5 / 14,0	einfach, in jede Kläranlage mit Faulbehälter integrierbar	keine (ÜSS aus Bio-P)	sehr gering	niedrig, 37%
PHOXNAN	11,5	1.518.100	15,0	aufwändig	keine (zwei Verfahren entwickelt, für KS mit hohen und niedrigen Eisengehalten)	hoch	gut, 51%

Das FIX-Phos-Verfahren (Variante 1 und 2) ist bereits heute, trotz des geringen Rückgewinnungspotentials von 37%, eine günstige Variante Phosphor aus Klärschlämmen rückzugewinnen. Die Prozessführung ist im Vergleich zum PHOXNAN-Verfahren einfach. Ferner wird lediglich Calciumsilicathydrat als Betriebsmittel benötigt und letztlich sind auch die in Kapitel 3.3 beschriebenen nicht monetär angerechneten, positiven Effekte auf die Schlammbehandlung zu berücksichtigen.

**Tabelle 12: Vergleich der Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammmasche (PASCH, SESAL-Phos)**

Verfahren	Kosten [€/kg P]	Investitionskosten [€]	spez. Investitionskosten [€/E]	Verfahrenstechnischer Aufwand	Verfahrenstechnische Einschränkung	Betriebsmittelbedarf	P-Rückgewinnungspotential
PASCH	4,5	4.755.000	1,5	aufwändig	keine	Anzahl Chemikalien hoch Menge niedrig	sehr hoch, 90%
Sesal-Phos	7,5	8.663.000	3,0	aufwändig	es können nur Aluminiumaschen verarbeitet werden	Anzahl Chemikalien niedrig Menge hoch	gut, 63%

Das PASCH-Verfahren ist kostengünstiger im Vergleich zum SESAL-Phos-Verfahren, zumal bei letzterem Verfahren die Einsparungen unter optimalen Bedingungen berechnet wurden und eventuell niedriger ausfallen können und somit die produktspezifischen Kosten wieder steigen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass im SESAL-Phos-Verfahren nur Klärschlammmasche von Klärschlämmen, die auf Kläranlagen mit Aluminiumfällung zur Phosphorelimination anfallen, eingesetzt werden können. Im Regelfall werden auf derzeit 65% der Kläranlagen Eisensalze verwendet und nur auf 23% der Anlagen wird mit Aluminiumsalzen gefällt (DWA, 2005).



**Abb. 13: Darstellung der Verfahren nach produkt- und einwohnerspezifischen Kosten sowie der rückgewonnenen Phosphormenge je Einwohner und Jahr**

In Abbildung 13 sind die in der Förderinitiative entwickelten Verfahren gegenübergestellt. Dabei ist das Verhältnis von produkt- zu einwohnerspezifischen Kosten und die Menge des rückgewinnbaren Phosphors je Einwohner und Jahr, als Kreis dargestellt.

## Literatur

- Blöcher C., Niewersch C., Schröder H. Fr., Gebhardt W., Melin Th. (2011): Optimierte Phosphor-Rückgewinnung durch ein Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nonofiltration 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
- BTS (2009): Vertrauliche Informationen Firma Bayer Technology Services Herr Blöcher, 2009
- 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
- Günther F.W. und Reicherter E. (2001): Investitionskosten der Abwasserentsorgung. Oldenbourg Industrieverlag, ISBN: 3-486-26507-5
- Jardin, N. (2003): Phosphorbilanz bei der Abwasser- und Klärschlammbehandlung. In: Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall. Tagungsband Symposium vom 6.-7.2.2003 in Berlin.
- Loll, U.; Glasenapp, J. (2003): Aktuelle Schlammengen bei der Planung von Schlammbehandlungsanlagen und Entsorgungskapazitäten. Tagungsband der 3. DWA-Klärschlammtag, 05.-07.05.2003, Würzburg
- Montag, D., Everding, W., Pinnekamp, J. (2010): Stand und Perspektiven der Rückgewinnung von Phosphat aus Abwasser und Klärschlamm. 43. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 17.-19.3.2010 in Essen. ISBN 978-3-398996-26-3
- Montag, D., Pinnekamp, J., Dittrich, C., Rath, W., Schmidt, M., Pfennig, A., Seyfried, A., Grömping, M., van Norden, H., Doetsch, P. (2011): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammmasche mittels des nasschemischen PASCH-Verfahrens. 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
- Petzet S. und Cornel P. (2009a): Verfahrensbeschreibung FIX-Phos, intern.
- Petzet S. und Cornel P. (2009b): Verfahrensbeschreibung SESAL-Phos, intern.
- Petzet, S. (2010a): Information von Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Petzet am 20.08.2010
- Petzet, S., Cornel, P., Beier, M., Rosenwinkel, K.-H., Pikula, R., Sperlich, V., Ehbrecht, A., Patzig, D., Schönauer, S., Schuhmann, R.: (2011): BMBF-Verbundprojekt ProPhos: Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung. 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
- Pinnekamp J. und Beier S. (2006): Kostenstruktur verschiedener Entsorgungsverfahren. In: Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Band 3. Klärschlamm-entsorgung: Eine Bestandsaufnahme. Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp, Dr. rer. nat. Harald Friedrich. Aachen, ISBN: 3-939377-02-3
- Sander T.: Ökonomie der Abwasserbeseitigung, wirtschaftlicher Betrieb von kommunalen Kläranlagen. Springer, ISBN: 3-540-00675-3
- Schuhmann, R. (2010): Phosphor-Rückgewinnung aus Ab- und Prozesswässern. Informationsblatt

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](mailto:everding@isa.rwth-aachen.de)