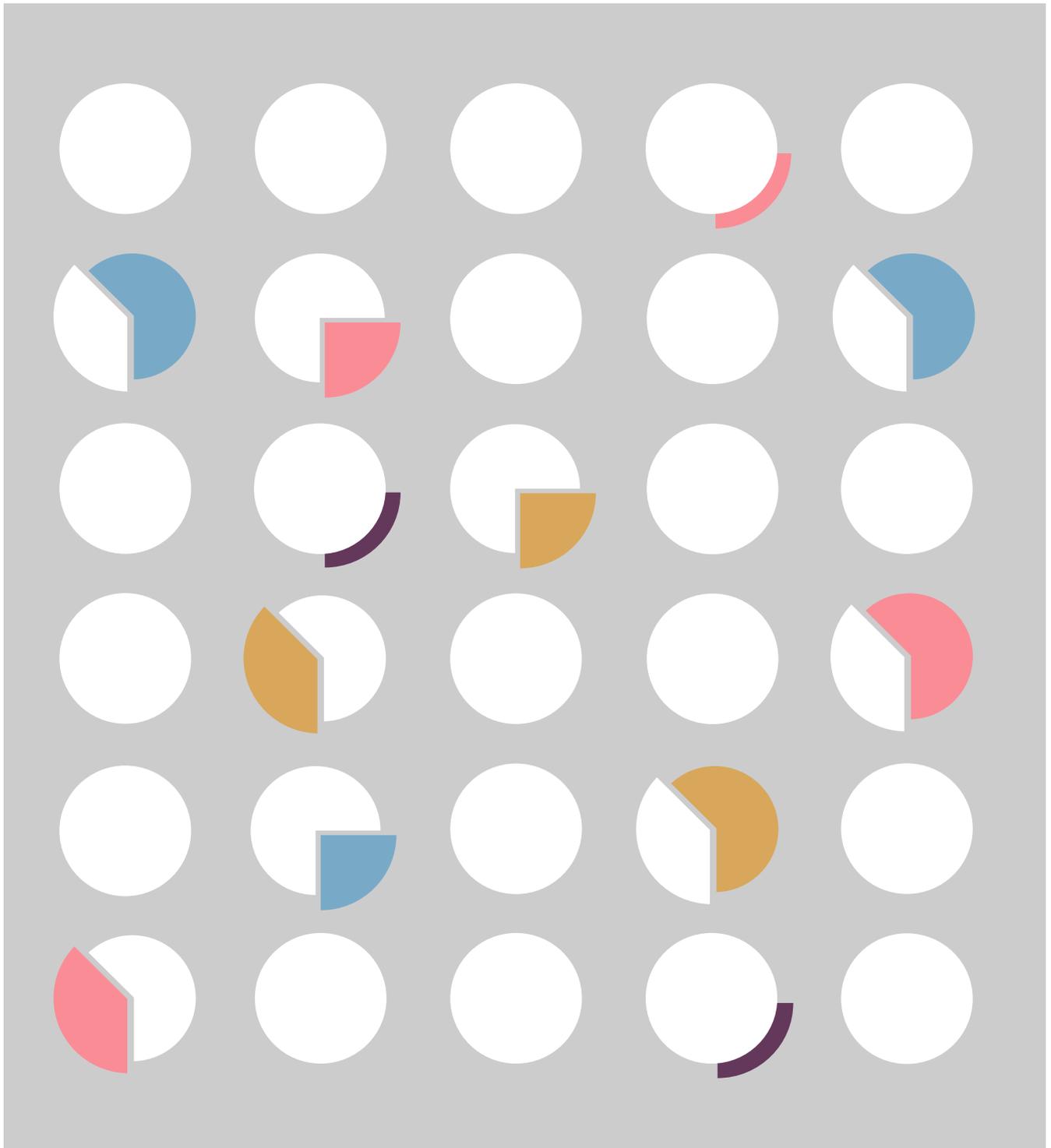


Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung

Bewertung von Technologien für die Schweiz bezogen
auf den Entwicklungsstand April 2019 (mit punktuellen Ergänzungen aus dem Jahr 2021)



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Vorgehensweise	6
3	Resultate	11
	ExtraPhos	12
	EuPhoRe	16
	Pyrophos	20
	ZAB	24
	CleanMAP	28
	EcoPhos	32
	Phos4life	36
	REALphos	40
	TetraPhos	44
	Alle Bewertungen im Überblick	48

Impressum

Auftraggeberin

Bundesamt für Umwelt BAFU
 Abteilung Abfall und Rohstoffe
 Sibylla Hardmeier

Auftragnehmerin

EBP Schweiz AG
 Mühlebachstrasse 11
 8032 Zürich
 Schweiz
 Telefon +41 44 395 11 11
 info@ebp.ch
 www.ebp.ch

Projektteam

Andy Spörri (EBP Schweiz AG)
 Isabel O'Connor (EBP Schweiz AG)
 Ludwig Hermann (Proman Management GmbH)
 Ralf Hermann (Proman Management GmbH)

Gestaltung

EBP Schweiz AG
 ebp-kommunikation.ch

Diese Studie wurde im Auftrag des
 BAFU verfasst. Für den Inhalt sind allein
 die Auftragnehmer verantwortlich.

1 Einleitung

Seit dem Inkrafttreten der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) anfangs 2016 ist die Rückgewinnung von Phosphor (P) aus den phosphorreichen Abfällen «Klärschlamm» (KS) und «Tier- und Knochenmehl» mit einer Übergangsfrist von 10 Jahren ab 2026 verbindlich vorgeschrieben.

Für die P-Rückgewinnung wurden in den vergangenen Jahren diverse Technologien entwickelt und im Rahmen von Pilotprojekten und Technikumsversuchen getestet und optimiert. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich des Ansatzpunktes (dezentral aus Strömen der Abwasserreinigungsanlagen (ARA) versus zentral in der Abfallwirtschaft aus Klärschlamm) und basieren auf unterschiedlichen Prinzipien. Aufgrund der Vielzahl an Verfahren und ihren unterschiedlichen Charakteristiken haben EBP und Proman in den Jahren 2015 und 2016 eine Auswahl von für die Schweiz in Frage kommenden Technologien vorgenommen und diese hinsichtlich umsetzungsrelevanter Kriterien beurteilt¹. Die Studie basiert auf dem technologischen Entwicklungsstand von Mitte 2015 und soll eine Orientierung über Vor- und Nachteile der Technologien geben.

In der Zwischenzeit hat sich das Spektrum für die Schweiz denkbarer und in Pilotprojekten weiter geprüfter Technologien eingengt. Zusätzlich sind neue Technologien auf den Markt gelangt (z.B. EuPhoRe, CleanMAP) und Entwicklungsfortschritte bei den bereits berücksichtigten Verfahren von statten gegangen. Entsprechend besteht die Zielsetzung der Studie darin, die damals durchgeführte Auswahl von für die Schweiz in Frage kommenden Technologien sowie deren Bewertung an den heutigen Wissens- und Entwicklungsstand anzupassen.

Dazu verfolgt die Studie folgende Teilziele:

- Aktualisierte Zusammenstellung derjenigen Technologien, die aus heutiger Sicht für eine Umsetzung in der Schweiz vielversprechend sind
- Gezielte Anpassung der Bewertungsmethodik
- Bewertung der ausgewählten Technologien anhand der angepassten Bewertungsmethodik
- Zusammenfassende Darstellung der Bewertungsergebnisse in eingängigen Technologiefaktenblättern

¹ Spoerri, A., Erny, I., Hermann, L., & Hermann, R. (2017). Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung: Gesamtheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit von P-Rückgewinnungstechnologien im Schweizer Kontext. Zollikon und Auerthal: EBP Schweiz AG und Proman Management GmbH.

2 Vorgehensweise

Die Bearbeitung der Studie basiert auf drei Arbeitsschritten, welche im Anschluss noch detaillierter ausgeführt werden:

- Auswahl der Technologien
- Entwicklung der Bewertungsmethode
- Bewertung der ausgewählten Technologien

Technologieauswahl

In einem ersten Schritt wurden auf Basis des heutigen Wissenstandes die Technologien bestimmt, welche für eine Umsetzung unter Berücksichtigung der Anforderungen an die P-Rückgewinnung in der Schweiz in Frage kommen und somit Eingang in die Bewertung finden. Damit eine Technologie in die Auswahl aufgenommen wurde, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

- **Entwicklungsstand**
Die Technologie weist einen technologischen Reifegrad (technology readiness level, TRL) von mindestens 6 auf (d.h. Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung)², und
- **Performanz**
Die Technologie erfüllt die grundsätzlichen ökologischen Anforderungen für eine Umsetzung im Schweizer Kontext (z.B. Rückgewinnungsgrad, Produktqualität), oder
- **Pilotprojekt Schweiz**
Die Technologie wird in einem regionalen Pilotprojekt in der Schweiz geprüft und weiterentwickelt.

Im Vergleich zur Vorgängerstudie umfasst die Auswahl nur noch neun Technologien (vorher 20). Erstens wurden die direkt aus der wässrigen Phase (nicht entwässertes Klärschlamm, Schlammwasser) kristallisierenden Verfahren aufgrund ihres stark limitierten Rückgewinnungsgrads und dem Bedarf einer biologischen P-Elimination auf der ARA ausgeschlossen. Bei den Kristallisationsverfahren im Anschluss an einen Säureaufschluss blieb einzig das ExtraPhos-Verfahren in der Auswahl, weil alle anderen nur mit unverhältnismässigem Säureeinsatz zu einigermaßen akzeptablen Rückgewinnungsgraden führen, was neben den Kosten auch aus ökologischer Sicht wenig zielführend ist. Ebenfalls wurden die thermochemischen, von der Asche der Monoverbrennung (MV) ausgehenden Verfahren nicht mehr berücksichtigt. Aus Standortgründen und mangels Pilotprojekt wurde RecoPhos P4 nicht mehr berücksichtigt. Bei den nasschemischen Extraktionsverfahren werden dieselben, aber in der Zwischenzeit weiterentwickelten Technologien berücksichtigt und zusätzlich die beiden Verfahren CleanMAP und REALphos aufgenommen. Die in die Auswahl aufgenommenen Technologien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

² Damit wird sichergestellt, dass eine Umsetzung der Technologie im Schweizer Kontext ab 2026 aufgrund ihres Entwicklungsstands realistisch ist.

Übersicht über die ausgewählten Technologien

Typ	Technologie	Anbieter	Projekt CH
Säure-Aufschluss und Kristallisation			
	ExtraPhos (Budenheim, Carbonic Acid Process) ³	Chemische Fabrik Budenheim KG	ARA Bern
Thermochemischer Aufschluss von Klärschlamm			
	EuPhoRe ⁴	EuPhoRe GmbH	erzo (KVA Oftringen), Uvrier
	Pyrophos ⁵	CTU AG	AVA Altenrhein
Nasschemischer Aufschluss von Asche			
	ZAB	ZAB	Bazenheid
Nasschemische Extraktion aus Asche			
	CleanMAP	Easy mining	kein CH-Projekt
	EcoPhos	Ecophos Group	kein CH-Projekt
	Phos4Life	Técnicas Reunidas	Zuchwil
	REALphos	REAL	Luzern
	TetraPhos	Remondis AG	kein CH-Projekt

Tabelle 1

- ³ Die Erprobung des ExtraPhos-Verfahrens auf der ARA Bern erfolgte ausschliesslich im Labormassstab und das damals geplante Pilotprojekt wurde mittlerweile sistiert. Der Hauptgrund liegt darin, dass für den ausreichenden Aufschluss des Klärschlammes aus einer ARA ohne Bio-P anstelle von Kohlensäure aus der Erdgasaufbereitung grosse Mengen an starker Säure erforderlich gewesen wären, was die Sinnhaftigkeit dieses Verfahrens aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht kompromittiert.
- ⁴ Obwohl sich das EuPhoRe-Verfahren (ausgeführt als Vorschaltanlage zur KVA) im Pilotprojekt bei der erzo als funktionstüchtig herausstellte, erwies es sich in Anbetracht der strengen Anforderungen an die mineralischen Recyclingdünger für eine Umsetzung im Schweizer Kontext als technisch sehr anspruchsvoll (ausreichende Abreicherung von Schwermetallen beim Betrieb als Vorschaltanlage zur bestehenden KVA). Aktuell wird im Rahmen einer Projektpartnerschaft mit Holcim die Monoverbrennung und anschliessende P-Extraktion aus der Asche über das REALphos-Verfahren am Holcim-Standort Untersiggenthal oder erzo Standort Oftringen verfolgt.
- ⁵ Die Umsetzung von Pyrophos beim AVA Altenrhein wurde bis auf Weiteres zurückgestellt. Dies liegt darin begründet, dass in der Zwischenzeit mit der in Bazenheid geplanten Monoverbrennung (zusammen mit Tiermehl) mit anschliessendem nasschemischem Aufschluss der Asche (vgl. ZAB-Verfahren) eine effiziente, regionale Lösung zur Verwertung des getrockneten Klärschlammes gefunden wurde.

Bewertungsmethode

Beurteilungskriterien

Die Bewertung der Technologien basiert wiederum auf einem multikriteriellen Bewertungsansatz, welcher diverse Kriterien in verschiedenen Dimensionen berücksichtigt⁶. Dafür wurde der bereits bestehende Ansatz aus der erwähnten Vorgängerstudie (vgl. Fussnote 1) angepasst bzw. in seinem Umfang auf die aufgrund der heutigen Datenlage aussagekräftig beurteilbaren Dimensionen und Kriterien reduziert.

Die Dimensionen Markt, Wirtschaftlichkeit und Kompatibilität mit rechtlichen Rahmenbedingungen wurden in der vorliegenden Studie nicht mehr bewertet. Eine aussagekräftige Beurteilung der Grösse und Diversität von Absatzmärkten für die Recyclingprodukte ist aktuell nicht möglich. Gleiches gilt für die Wirtschaftlichkeitskriterien (Investitionskosten, Betriebskosten, Beitrag zur Kostendeckung), für welche mit Ausnahme des Produkterlöses die aktuell verfügbare Datenlage keine belastbaren Aussagen erlaubt. Der Produkterlös ist neu in der Dimension Produkt subsummiert. Die Kompatibilität der Recyclingprodukte mit den mittlerweile veröffentlichten Grenzwerten für mineralische Recyclingdünger (MinRec⁷) wird neu unter dem Kriterium Schadstoffgehalt (Dimension Produkt) bewertet.

Insgesamt wurden für die Beurteilung 13 Kriterien herangezogen. Neun davon wurden über eine 4-stufige Ordinalskala für die Bewertung operationalisiert (Level 1: schlecht bis Level 4: sehr gut). Auf absehbare zukünftige Entwicklungen, die Einfluss auf die Bewertung der Kriterien haben können, wird an entsprechender Stelle jeweils hingewiesen. Drei dieser Kriterien (Rückgewinnungsgrad, Chemikalieneinsatz und Energiebilanz) wurden für die Bewertung über jeweils zwei Indikatoren operationalisiert. Die Bewertung dieser drei Kriterien entspricht jeweils dem Mittelwert aus der Bewertung der beiden Indikatoren. Vier Kriterien (z.B. Komplexität des Verfahrens) wurden nicht bewertet, sondern ausschliesslich beschreibend beurteilt. Eine Übersicht über die definierten Kriterien und Indikatoren sowie die verwendete Bewertungsskala ist in Tabelle 2 gegeben.

⁶ Die Aggregation der Bewertungen der einzelnen Kriterien zu einer Gesamtbewertung ist nicht vorgesehen. Entsprechend erlaubt die vorliegende Studie keinen aussagekräftigen Vergleich der Technologien hinsichtlich ihrer Gesamtperformanz.

⁷ Verordnung zur Reduktion von Risiken im Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV), Stand 9. Juli, 2019). Anhang 2.6(Art. 3), Kap. 2.2.4.

Übersicht Bewertungsansatz

Kriterien	Indikatoren	Levels			
		●○○○	●●○○	●●●○	●●●●
Kreislaufschliessung					
Inputflexibilität	Verwertbare P-reiche Abfälle	KS bzw. Schlammwasser aus ARA mit biologischer P-Elimination	Nur Faulschlamm (Trockensubstanz (TS) 0 – 5%)	Getrockneter Klärschlamm und andere P-reiche Abfälle	Entwässerter bis getrockneter Klärschlamm und andere P-reiche Abfälle
Rückgewinnungsgrad	Rückgewonnenes P bezogen auf P-Input [%]	< 50 %	50 – 70 %	71 – 90 %	> 90 %
	Konformität Vollzugsanforderungen	nicht konform (< 50 %)	n/a	n/a	konform (≥ 50 %)
Umwelt					
Chemikalieneinsatz	Gefahrstoff [j/n] Basierend auf Menge [t/t KS TS]	Grosse Mengen Gefahrenstoffe > 1 t/t KS TS	Relevante Mengen Gefahrenstoffe > 0.25t/t KS TS	Wenige Gefahrenstoffe < 0.25t/t KS TS	Keine Gefahrenstoffe
	Umweltbelastung Herstellung [UBP ¹³ /t KS TS]	> 0.6 Mio. UBP	> 0.4 Mio. UBP	> 0.2 Mio. UBP	< 0.2 Mio. UBP
Energie	Energieverbrauch* [kWh/t KS TS]	> 500 kWh	< 500 kWh	< 250 kWh	< 100 kWh
	Nutzung des kalorischen Inhalts des KS [%]	< 30 %	< 60 %	< 85 %	> 85 %
Abfälle	Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit	Viel und nicht verwertbar	Viel und mit grossem Aufwand verwertbar	Viel und mit kleinem Aufwand verwertbar	Wenig < 0.1 t/t KS TS
Produkt					
P-Gehalt	[Gew.-% P]	< 10 % P	> 10 % P	> 15 % P	> 25 % P
Pflanzenverfügbarkeit	Löslichkeit in Wasser, Neutral-Ammoniumcitrat oder Zitronensäure	< 50 % löslich in Neutral-Ammoniumcitrat	> 50 % löslich in Neutral-Ammoniumcitrat	> 75 % löslich in Neutral-Ammoniumcitrat	> 90 % wasserlöslich oder Phosphorsäure
Schadstoffgehalt	Schwermetalle und organische Verbindungen im Produkt	Einer/mehrere Grenzwerte deutlich überschritten	Einer/mehrere Grenzwerte knapp überschritten	Alle Grenzwerte eingehalten	Alle Grenzwerte deutlich unterschritten (mind. Faktor > 2)
Produkterlös	Erlöse aus Produktabsatz [CHF/t Produkt]	< 50 CHF	50 – 200 CHF	200 – 400 CHF	> 500 CHF

Tabelle 2

Datenerhebung und Bewertung

Für die Bewertung der Kriterien wurden die entsprechenden Daten und Informationen zu den Technologien zusammengetragen. Dazu wurde ein Erfassungsformular erstellt und mit Angaben aus existierenden Studien⁸ vorausgefüllt. Die Erfassungsformulare wurden dann den Technologieanbietern bzw. den für die Pilotprojekte in der Schweiz zuständigen Verantwortlichen zugestellt, um bestehende Angaben zu plausibilisieren bzw. veraltete oder fehlende Angaben unter Berücksichtigung des aktuellen Entwicklungsstands zu ergänzen.

Die retournierten Erfassungsformulare bzw. die darin enthaltenen Angaben wurden anschliessend durch das Projektteam einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Unstimmigkeiten und nicht ausreichend nachvollziehbare Angaben wurden in einem aufbauenden Austausch mit Anbietern und Projektverantwortlichen sowie durch Übernahme plausiblerer Aussagen aus Publikationen geklärt. Auf dieser Grundlage wurden die Technologien anhand der definierten Kriterien bewertet (Levels 1-4) und die der Bewertung zugrundeliegenden Daten und Angaben zur Nachvollziehbarkeit der Bewertung übersichtlich zusammengestellt. Im Falle von fehlenden Angaben wurden die entsprechenden Kriterien nicht bewertet.

8

Spoerri, A., Erny, I., Hermann, L., & Hermann, R. (2017). Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung: Gesamtheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit von P-Rückgewinnungstechnologien im Schweizer Kontext. Zollikon und Auerthal: EBP Schweiz AG und Proman Management GmbH.

Morf, L. (2018). Verfahrenstechnische Machbarkeitsanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad. Zürich: Baudirektion Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft.

Mehr, J., & Hellweg, S. (2018). Studie zum ökologischen Vergleich der Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche mittel Phos4Life-Verfahren mit der Primärproduktion von P-Säure aus Rohphosphat. Zürich: ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwissenschaften.

Kabbe, C. (2018). Global Compendium on Phosphorus Recovery. Stirling: GWRC.

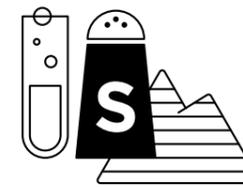
Everding, W. & Montag, D. (2017). Modulbeschreibungen Phosphorrückgewinnung - TetraPhos®.

Kraus, F., Zamzow, M., Conzelmann, L., Remy, C., Kleyböcker, A., Seis, W., Miehe, U., Hermann, L., Hermann, R. & Kabbe, Ch. (2019). Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Umweltbundesamt, Texte 13/2019, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Verfahrenspräsentationen aus Yverdon, 9.11.2018, insbesondere EuPhoRe.

3 Resultate

Die Bewertungsergebnisse sind für jede Technologie in Form von standardisierten Faktenblättern übersichtlich festgehalten. Die Faktenblätter beinhalten eine Beschreibung der jeweiligen Technologie, eine Übersicht über Umsetzungsbeispiele und die Beurteilung der 13 Kriterien.



Säure-Aufschluss und
Kristallisation

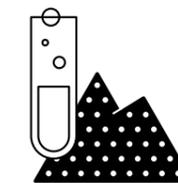
ExtraPhos S. 12–S. 15



Thermochemischer Aufschluss
von Klärschlamm

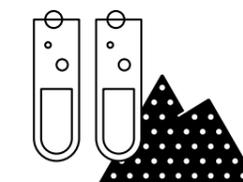
EuPhoRe S. 16–S. 19

Pyrophos S. 20–S. 23



Nasschemischer Aufschluss
von Asche

ZAB S. 24–S. 27



Nasschemische Extraktion
aus Asche

CleanMAP S. 28–S. 31

EcoPhos S. 32–S. 35

Phos4life S. 36–S. 39

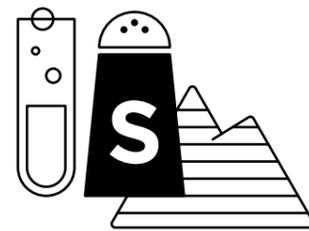
REALphos S. 40–S. 43

TetraPhos S. 44–S. 47

ExtraPhos

Säureaufschluss und Kristallisation von KS

Geplantes Pilotprojekt auf ARA Bern sistiert
> siehe Fussnote 3, Seite 7, Technologieauswahl



22 % P_2O_5 , 10 % P

Calciumphosphat (v.a. Dicalciumphosphat)

Das ExtraPhos®-Verfahren der Chemischen Fabrik Budenheim KG setzt für die Phosphorrückgewinnung beim nassen Klärschlamm an und wird entsprechend direkt in der Schlammlinie auf der ARA umgesetzt. Es handelt sich grundsätzlich um ein zwei-stufiges Säureaufschluss- und Fällungsverfahren, wobei der Phosphor zuerst in Lösung gebracht und anschliessend ausgefällt wird.

Dazu wird der flüssige Klärschlamm bei einem Druck von ungefähr 10 bar mit CO_2 versetzt. Dabei entsteht Kohlensäure, wodurch ein Teil der gebundenen Phosphate aufgrund der pH-Absenkung mobilisiert wird. In der anschliessenden Fest-/Flüssig-Trennung werden die Klärschlammteilchen von der flüssigen Phase getrennt. Das CO_2 geht nach der Entspannung in die Gasphase über und wird der Flüssigkeit entzogen. Es kann aufgefangen, verdichtet und dem Prozess erneut zugeführt werden. Das Schlammwasser wird anschliessend der Phosphatfällung zugeführt und Calciumphosphat ausgefällt. Um den Vorgang der Fällung zu beschleunigen, wird eine geringe Menge Kalkmilch zugesetzt – ein Großteil des benötigten Calciums ist bereits im Schlammwasser enthalten. Durch die Kontrolle des pH-Wertes bei der Phosphatfällung, wird sichergestellt, dass kein Tricalciumphosphat, sondern das erheblich besser lösliche und pflanzenverfügbare Dicalciumphosphat ausfällt. Nach Abtrennung, optionaler Trocknung und Granulierung können die Calciumphosphate als Düngemittel eingesetzt werden.

Praxisbeispiel

Mainz-Mombach, Deutschland

Pilotanlage auf der ARA Mainz-Mombach (2 m³/h Faulschlamm)

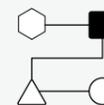
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität



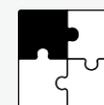
Komplexität für Einsatzumgebung Kläranlage nicht zu vernachlässigen

Zusatzerträge/-nutzen



Geringere Schlammengen dank verbesserter Entwässerbarkeit
Phosphor-Rückgewinnung mit anschliessender Klärschlamm-Trocknung und Abgabe ans Zementwerk kompatibel (falls Mindestrückgewinnungsgrad erreicht)

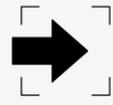
Abhängigkeiten Infrastruktur



Kohlendioxid aus Erdgasaufbereitung für Säure-Druckaufschluss verwendbar

Bewertung

Inputflexibilität

**Verwertbare P-reiche Abfälle**

Nur Faulschlamm (< 5 % TS, nicht entwässerter Klärschlamm)

Auch Behandlung von Gülle und Gärresten möglich (allerdings nicht zusammen mit KS)

P-Rückgewinnungsgrad

**Rückgewonnenes P bezogen auf Input**

35 %

Potenzial: geschätzt auf 50 %
(mit negativen Auswirkungen auf z.B. Chemikalienbedarf, evtl. KS-Vorbehandlung erforderlich)

Konformität Vollzugsanforderungen

Mindestanforderung für klärschlamm-basierte Verfahren (50 %) klar nicht erfüllt



Chemikalieneinsatz

Bewertung nur für spezifische Anlage möglich

**Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]**

Gefahrenstoffe: Kalkmilch (keine Mengenangabe)
Weitere Chemikalien: Kohlendioxid (keine Mengenangabe)

Hinweis: prozessinterne Wiederverwendung des CO₂ möglich

Umweltbelastung Produktion [UBP'13/t KS TS]

Keine Bewertung möglich aufgrund fehlender Mengenangaben

Bewertung nur für spezifische Anlage möglich

Bewertung nur für spezifische Anlage möglich

Energie

Bewertung nur für spezifische Anlage möglich

**Energieverbrauch [kWh/t KS TS]**

Ausschliesslich Strombedarf v.a. für Rohrreaktor / Kompressor (keine Mengenangabe)

Energienutzung [%]

Effiziente energetische Verwertung des P-abgereicherten Dickschlammes im Zementwerk (Energienutzungsgrad von ca. 75 %)

Bewertung nur für spezifische Anlage möglich



Technologie

Abfälle

**Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit**

Keine Abfälle aus der P-Rückgewinnung
(875 t P-abgereicherter Dickschlamm zur energetischen und stofflichen (Mineralik) Verwertung im Zementwerk)

P-Gehalt

**Phosphor im Produkt [Gew.-% P]**

9.5 % P
21.7 % P₂O₅

Pflanzenverfügbarkeit

**Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]**

Löslichkeit in Neutral-Ammoniumcitrat von 60 %,
0.5 % in Wasser, kein Wert für Zitronensäure

Schadstoffgehalt

**Schwermetalle und organische Verbindungen**

Alle MinRec-Grenzwerte deutlich eingehalten
(keine Angabe zum Cr-Gehalt)

Hinweis: Transfer von organischen Schadstoffen (Keime, Antibiotikarest, etc.) ins Produkt nicht ausgeschlossen

Produkterlös

**Marktpreis [CHF / t Produkt]**

50 - 100 CHF (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2019)

Produkt

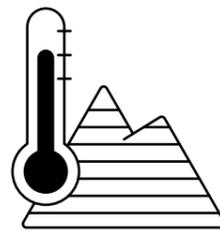
Umwelt

EuPhoRe

Thermochemischer Aufschluss von KS

Beurteilung bezieht sich auf Umsetzungsvariante
als Vorschaltanlage zur KVA

Im Anschluss an Pilotprojekt am erzo Standort Oftringen sistiert
> siehe Fussnote 4, Seite 7, Technologieauswahl



12 – 20 % P_2O_5 , 5 – 9 % P

Phosphathaltige Asche (Calciumphosphate)

Das von der EuPhoRe GmbH entwickelte Verfahren ist ein mehrstufiges thermochemisches Behandlungsverfahren für entwässerten Klärschlamm in einem Drehrohrreaktor. Das Verfahren zielt darauf ab, Trocknung, thermische Behandlung mit Verbesserung der Phosphatlöslichkeit und Schwermetallabscheidung in einem Reaktor durchzuführen.

Bei der Aufgabe des entwässerten Klärschlammes wird gleichzeitig das Additiv zugeführt, bevorzugt Magnesiumchlorid ($MgCl_2$). Das Salz dissoziiert unmittelbar nach der Dosierung, womit einerseits der Schwermetallaustrag vorbereitet und andererseits die P-Löslichkeit im Ascheprodukt verbessert wird. Im ersten Teil des Reaktors wird der entwässerte Schlamm getrocknet. Im mittleren Teil erfolgt der Übergang in die Reduktionsphase der Pyrolyse. Hier findet die chemische Reduktion von Metallen und Ausschleusung als Chloride in die Gasphase statt. Die an- und abschließende Kohlenstoffverbrennung bei Temperaturen über 900 °C garantiert die Zerstörung der organischen Schadstoffe. Das Verfahren kann zur Nutzung von Synergien als Vorschaltanlage zu einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) implementiert (Trocknung über KVA-Rauchgase, Nachverbrennung und Rauchgasreinigung in KVA) oder als eigenständige Insellösung umgesetzt werden.

Praxisbeispiele

Dinslaken, Deutschland

Pilotanlage bei EGLV Dinslaken (100 kg/h entwässertes Schlamm),
Teilbetrieb im Rahmen des Interreg NW-Europe Projekts Phos4You, 2019

Oftringen, Schweiz

Kurzzeitige Pilotversuche, 2018/2019

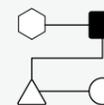
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter,
dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität



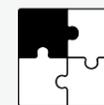
Interdependenz von zwei grundsätzlich
unabhängigen Anlagen erhöht die Komplexität

Zusatzerträge/-nutzen



Umsetzung als Vorschaltanlage zu einer Kehrichtverbrennungs-
anlage (KVA) ermöglicht niedrige Investitionsausgaben
(capital expenditures, CAPEX)

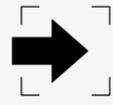
Abhängigkeiten Infrastruktur



Vorschaltanlage zu KVA zur Nutzung der heissen Rauchgase
für Trocknung und zur Einspeisung der Abgase in KVA
Einfluss der VSA auf KVA-Betrieb (z.B. vermehrte Korrosion infolge
 $MgCl_2$ -Zudosierung) noch nicht ausreichend geklärt

Bewertung

Inputflexibilität

**Verwertbare P-reiche Abfälle**

Entwässertes bis getrocknetes Klärschlamm (aber typischerweise 15 – 40 % TS) und andere P-reiche und schwermetallarme Substrate (z.B. Tier- und Knochenmehl)

P-Rückgewinnungsgrad

**Rückgewonnenes P bezogen auf Input**

> 95 %
(möglicher P-Verlust über Asche-/Staubabzug in KVA noch unbekannt)

Konformität Vollzugsanforderungen

Mindestanforderung für thermische Verfahren (50 %) erfüllt



Chemikalieneinsatz

**Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]**

Gefahrenstoffe: keine
Weitere Chemikalien: 0.06 – 0.07 t (Magnesiumchlorid, Natriumhydrogencarbonat), unbekannte Menge Chemikalien für Rauchgasreinigung in KVA

Umweltbelastung Produktion [UBP'13/t KS TS]

Rund 0.1 Mio. UBP 2013



Energie

**Energieverbrauch [kWh/t KS TS]**

57 kWh Strom (Drehrohr und Nebenaggregate)

Energienutzung [%]

Hoch effiziente energetische Verwertung des Klärschlammes im Drehrohr (Energienutzungsgrad ca. 90 %)



Abfälle

**Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit**

< 0.03 t nicht verwertbare Abfälle:
Filterstaub aus der Rauchgasreinigung

Technologie

Umwelt

P-Gehalt

**Phosphor im Produkt [Gew.-% P]**

5.2 – 8.8 % P
12 – 20 % P₂O₅

Pflanzenverfügbarkeit

**Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]**

Löslichkeit in Neutral-Ammoniumcitrat im Bereich von 30 – 50 %, 0 % in Wasser, 40 – 80 % in Zitronensäure

Schadstoffgehalt

**Schwermetalle und organische Verbindungen**

MinRec-Grenzwerte bei Chrom, Kupfer, Nickel und Zink aktuell deutlich überschritten (bezogen auf 3 %-Zudosierung von MgCl₂)

Potenzial: Verbesserung durch P-reiches und schwermetallarmes Co-Substrat (Verdünnung; Technikumsversuch geplant)

Produkterlös

**Marktpreis [CHF/t Produkt]**

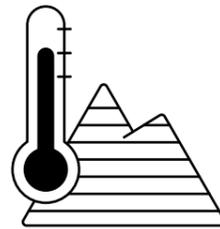
5 – 20 CHF (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2019)

Produkt

Pyrophos

Thermochemischer Aufschluss von KS

Umsetzung beim AVA Altenrhein mittlerweile zurückgestellt
> siehe Fussnote 5, Seite 7, Technologieauswahl



15 % P_2O_5 , 7 % P

Phosphathaltige Asche (Calciumphosphate)

Das von der CTU AG mit dem AVA Altenrhein entwickelte Pyrophos-Verfahren ist ein mehrstufiges thermo-chemisches Aufschlussverfahren für Klärschlamm über eine Wirbelschichtpyrolyse mit anschliessender Nachverbrennung. Die erforderliche Trocknung des Klärschlammes erfolgt in einer separaten Anlage.

Das Verfahren nutzt die bestehende Klärschlamm-trocknung und ergänzt sie mit einer anschliessenden Pyrolyse. Die Pyrolyse erfolgt hier in einem Wirbelschichtreaktor als Hauptaggregat und verwendet Kaliumsalze als Additiv, um die Pflanzenverfügbarkeit der Phosphate zu verbessern und die Schwermetalle abzureichern. Die Salze werden mit dem getrockneten Schlamm in den Pyrolyse-reaktor aufgegeben. Im Prozess werden die unter reduzierenden Bedingungen flüchtigen Schwermetalle teilweise über die Gasphase ausgetrieben und in der Abgasreinigungsanlage zurückgehalten. Der thermische Verwertungsprozess bewirkt gleichzeitig die Umwandlung der Phosphatphasen in Kaliumphosphate mit einer hohen Löslichkeit in Neutral-Ammoniumcitrat von über 80%. Das Phosphat ist im Pyrolyserückstand – einer phosphathaltigen Asche – angereichert, der zu einem Phosphat- oder Mehrnährstoffdünger aufbereitet werden kann.

Praxisbeispiel

Altenrhein, Schweiz

Versuchsanlage am Standort der ARA Altenrhein

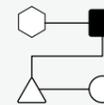
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität

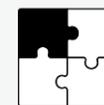


Klärschlamm-pyrolyse hinsichtlich Abgasreinigung komplex

Zusatzerträge/-nutzen



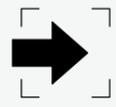
Abhängigkeiten Infrastruktur



Vorgängige Trocknung des Klärschlammes erforderlich

Bewertung

Inputflexibilität

**Verwertbare P-reiche Abfälle**

Getrockneter Klärschlamm (90-100% TS)
und andere P-reiche und schwermetallarme Substrate
(z.B. Tier- und Knochenmehl)

P-Rückgewinnungsgrad



Rückgewonnenes P bezogen auf Input
> 95 %

Konformität Vollzugsanforderungen
Mindestanforderung für thermische Verfahren
(50 %) erfüllt



Chemikalieneinsatz

**Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]**

Gefahrenstoffe: 0.14 t (Kaliumhydroxid,
Ammoniumhydroxid)

Weitere Chemikalien: 0.04 t
(Natriumhydrogencarbonat, Aktivkohle)

Umweltbelastung Produktion [UBP¹³/t KS TS]
Knapp 0.5 Mio. UBP 2013



Energie



Energieverbrauch [kWh/t KS TS]
ca. 100 kWh Strom

Energienutzung [%]

Hoch effiziente energetische Verwertung des Klärschlammes im Drehrohr (Energienutzungsgrad ca. 90 %)



Abfälle

**Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit**

0.06 t nicht verwertbare Abfälle:
Filterasche aus der Rauchgasreinigung

Technologie

P-Gehalt

**Phosphor im Produkt [Gew.-% P]**

6.5 % P

15 % P₂O₅

Potenzial: Erhöhung durch Mitbehandlung P-reicher und schwermetallarmer Co-Substrate

Pflanzenverfügbarkeit

**Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]**

Löslichkeit in Neutral-Ammoniumcitrat von ca. 90 %,
ca. 5 % in Wasser, kein Wert für Zitronensäure

Umwelt

Schadstoffgehalt

**Schwermetalle und organische Verbindungen**

MinRec-Grenzwerte bei Arsen, Chrom, Nickel
und Kupfer deutlich überschritten, keine Werte
zu organischen Schadstoffen (PAK, PCB, PCDD/PCDF)
vorhanden (Grenzwerte vermutlich eingehalten)

Potenzial: Verbesserung durch Mitbehandlung P-reicher
und schwermetallarmer Co-Substrate (Verdünnung)

Produkterlös

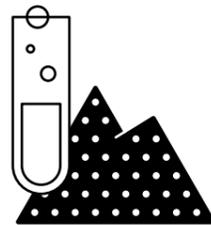
**Marktpreis [CHF/t Produkt]**

50-100 CHF (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2019)

Produkt

ZAB

Nasschemischer Aufschluss aus Asche



46 % P_2O_5 , 20 % P

Tripelsuperphosphat TSP

Das von ZAB in der Schweiz auf Grundlage des Reco-Phos-Verfahrens (neu: Phos4Green) entwickelte Verfahren ist ein nasschemisches Verfahren, welches den Phosphor aus der Asche der Monoverbrennung von entwässertem Klärschlamm und Tiermehl extrahiert. Die Umsetzung erfolgt unabhängig vom Betrieb der Abwasserreinigungsanlagen.

Das Verfahren besteht im Wesentlichen aus einem nasschemischen Aufschluss der Mischasche mit Phosphorsäure, um ein Phosphordüngemittel analog TSP mit 46 % P_2O_5 zu erzeugen. Bei Bedarf findet eine gezielte Abreicherung von flüchtigen Metallen durch Zugabe von Chloriden im Mineralisierungsprozess statt (auch abhängig von der Qualität der P-Säure). Dazu wird die Pflanzenverfügbarkeit des in der KSA enthaltenen Phosphats durch Reaktion mit Phosphorsäure signifikant erhöht. Ausgenutzt wird dabei die Instabilität der primären P Mineralphasen in Gegenwart hoher Phosphatkonzentration bei niedrigem pH-Wert. Als Reaktionsprodukte bilden sich lösliches Ca- und Mg-Dihydrogenphosphat als Hauptnährstoffkomponenten. Der Prozess entspricht prinzipiell der industriellen Herstellung von Tripelsuperphosphat, wobei die P-reiche Asche hierbei das Phosphaterz substituiert. Je nach Auslegung des Verfahrens bzw. der eingesetzten Säuren können auch Mehrnährstoffdünger hergestellt werden.

Praxisbeispiel

Bazenheid, Schweiz

Kontinuierlicher Pilotbetrieb u. a. bei CFT Tangermünde, 2011/2012

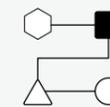
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität

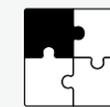


Geringe Komplexität, jedoch hohe Anforderungen an Substratmix

Zusatzerträge/-nutzen



Abhängigkeiten Infrastruktur



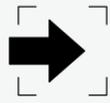
Mischverbrennung von Klärschlamm und Schlachtabfällen erforderlich, falls in der MV keine Abreicherung von Schwermetallen erfolgt

Mögliche Nutzung von Säuren aus der Rauchgasreinigung (jedoch mit Einfluss auf andere Verfahrensparameter, z.B. Schadstoffgehalt)

Hohe Abhängigkeit vom Substratmix, nur bei lokaler Verfügbarkeit von Schlachtabfällen

Bewertung

Inputflexibilität



Verwertbare P-reiche Abfälle

Asche aus Monoverbrennung von entwässertem bis getrocknetem Klärschlamm (15 - 100 % TS) mit Beimischung von Tiermehlasche (mind. 20 %), auch andere P-reiche und schwermetallarme Substrate (z.B. Gärschlamm)

Hinweis: wegen Tiermehl keine Schwermetall-abreicherung vorgesehen (P-An- und Schwermetall-Abreicherung)

P-Rückgewinnungsgrad



Rückgewonnenes P bezogen auf Input
> 95 %

Konformität Vollzugsanforderungen
Mindestanforderung für thermische Verfahren (50 %) erfüllt



Chemikalieneinsatz

keine Bewertung möglich



Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]
Gefahrenstoffe: P-Säure (keine Mengenangabe)

Hinweis: Verfahrens-Setup noch nicht geklärt, Angaben bezogen auf TSP mit P-Säure, andere Säuren für Produktion von Mehrnährstoffdüngern

Umweltbelastung Produktion [UBP*13/t KS TS]
Keine Bewertung möglich aufgrund fehlender Mengenangaben

keine Bewertung möglich

keine Bewertung möglich

Energie



Energieverbrauch [kWh/t KS TS]
643 kWh Wärme, 214 kWh Strom, insgesamt 857 kWh

Energienutzung [%]
Effiziente energetische Verwertung mit Gesamtnutzungsgrad von ca. 80 % (BAT-Technologie)



Technologie

Abfälle



Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit

Rund 0.02 t nicht verwertbare Abfälle:
Bettasche (Rückstand aus Mineralisierung, v.a. Sand)

P-Gehalt



Phosphor im Produkt [Gew.-% P]

Tripelsuperphosphat: 20.1% P, 46% P₂O₅

Pflanzenverfügbarkeit



Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]

Löslichkeit in Wasser von über 90 %

Umwelt

Schadstoffgehalt

keine Bewertung möglich



Schwermetalle und organische Verbindungen

Noch keine Angaben zu Schadstoffgehalten verfügbar

Hinweis: Schadstoffgehalte ohne Schwermetall-Abreicherung in der MV nur dank der Beimischung von P-reichen, schwermetallarmen Co-Substraten möglich

Produkterlös



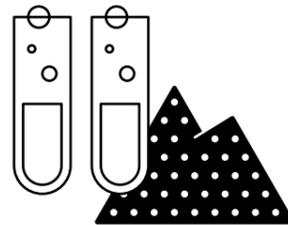
Marktpreis [CHF/t Produkt]

ca. 400 CHF (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2019)

Produkt

CleanMAP

Nasschemische Extraktion aus Asche



60 % P_2O_5 , 26 % P

Monoammoniumphosphat MAP ($NH_4H_2PO_4$)

Alternative (anderes Setup): Kalziumphosphat als Futtermittelzusatz
(ca. 40 % P_2O_5), Superphosphat, Phosphorsäure H_3PO_4 75 %

Das von Easymining in Schweden entwickelte CleanMAP-Verfahren ist ein nasschemisches Verfahren, welches den Phosphor aus der Asche der Monoverbrennung von entwässertem Klärschlamm und eventuell zusätzlichen P-reichen Co-Substraten extrahiert. Die Umsetzung erfolgt unabhängig vom Betrieb der Abwasserreinigungsanlagen.

Nach Lösung der Asche in Salzsäure (HCl) erfolgt der erste Separationsschritt, bei dem die ungelösten Reststoffe abgetrennt werden. Rückgewinnbare Elemente in der Lösung wie Phosphor, Eisen und Aluminium werden in weiteren Prozessschritten zu Zwischenprodukten verarbeitet (Eisen-/Aluminiumsalze als Fällmittel). Das im ersten Schritt als Fällungsprodukt gewonnene Calciumphosphat kann in der Düngerindustrie oder in eigenen Anlagen zu voll wasserlöslichen Monoammoniumphosphat (MAP), das sowohl als Granulat wie auch in gelöster Form (Blattdüngung) eingesetzt werden kann, bzw. auch zu Diammoniumphosphat (DAP) aufbereitet werden.

Praxisbeispiele

Helsingborg, Schweden

Pilotbetrieb am Standort der Kemira Versuchsanlage (ehemals Kemira Grow How), 2017/2018

Uppsala, Schweden

CleanMAP Pilotbetrieb (ab 2019) und Versuchsbetrieb (2014 - 2019) am Firmenstandort von EasyMining

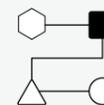
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität



Hohe Komplexität beherrschbar in der geplanten Einsatzumgebung

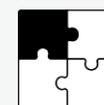
Zusatzerträge/-nutzen



Rückführung von Eisen- und Aluminiumsalzen in die Kläranlage

Nutzung des silikatischen Rückstands als (Zement-)zuschlagsstoff

Abhängigkeiten Infrastruktur



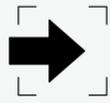
Monoverbrennung von Klärschlamm erforderlich

Mögliche Nutzung von Säuren aus der Rauchgasreinigung (jedoch mit Einfluss auf andere Verfahrensparameter, z.B. Schadstoffgehalt)

Düngerprodukt (MAP) mit höchster Variabilität im Einsatz

Bewertung

Inputflexibilität

**Verwertbare P-reiche Abfälle**

Asche aus Monoverbrennung von entwässertem bis getrocknetem Klärschlamm (15 - 100 % TS) und andere P-reiche und schwermetallarme Substrate (z.B. Tier- und Knochenmehlasche)

P-Rückgewinnungsgrad



Rückgewonnenes P bezogen auf Input
ca. 95 %

Konformität Vollzugsanforderungen
Mindestanforderung für thermische Verfahren (50 %) erfüllt



Chemikalieneinsatz



Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]

Gefahrenstoffe: rund 0.64 t (Salzsäure 19 % oder Schwefelsäure > 50 %, Kalk, Natriumhydroxid, Ammoniak)

Umweltbelastung Produktion [UBP*13/t KS TS]
Knapp 0.1 Mio. UBP 2013



Energie



Energieverbrauch [kWh/t KS TS]

25 kWh Wärme, 30 kWh, Strom, insgesamt 55 kWh

Energienutzung [%]

Effiziente energetische Verwertung mit Gesamtnutzungsgrad von ca. 80 % (BAT-Technologie)



Abfälle



Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit

Knapp 0.4 t mit geringem Aufwand verwertbare Abfälle: Sand, Eisenhydroxid, Aluminiumhydroxid, Schwermetallkonzentrat, Gips oder Kalziumchlorid

Technologie

Umwelt

P-Gehalt



Phosphor im Produkt [Gew.-% P]

> 26 % P
> 60 % P₂O₅

Pflanzenverfügbarkeit



Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]

Löslichkeit von 100 % in allen drei Medien (Wasser, Neutral-Ammoniumcitrat, Zitronensäure)

Schadstoffgehalt



Schwermetalle und organische Verbindungen

Alle MinRec-Grenzwerte sehr deutlich eingehalten

Produkterlös



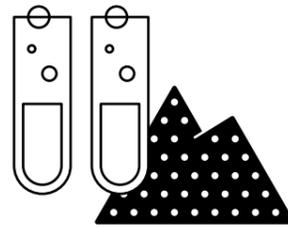
Marktpreis [CHF/t Produkt]

ca. 700 CHF (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2019)

Produkt

EcoPhos

Nasschemische Extraktion aus Asche



54 % H_3PO_4 , 17 % P

Phosphorsäure

Beim von EcoPhos in Belgien entwickelten EcoPhos-Verfahren handelt es sich um ein nasschemisches Verfahren, welches den Phosphor aus der Asche der Monoverbrennung von entwässertem Klärschlamm und eventuell zusätzlichen P-reichen Co-Substraten extrahiert. Die Umsetzung erfolgt unabhängig vom Betrieb der Abwasserreinigungsanlagen.

Im hier betrachteten EcoPhos-Verfahren (Phosphorsäure als Produkt) wird Klärschlamm-Asche in technischer Phosphorsäure gelöst. Die dabei entstehende, verdünnte Phosphorsäure wird von unlöslichen Rückständen (etwa 50 % der eingesetzten Asche) mit einem Filter abgetrennt. Calcium, Magnesium, Eisen, Aluminium und andere Metallrückstände werden über eine Reihe selektiver Ionenaustauscher aus der verdünnten Phosphorsäure entfernt. Die Kationenaustauscher werden mit Salzsäure regeneriert. Die gewonnene technische Phosphorsäure wird teilweise prozessintern verwertet, während der andere Teil zur Merchant Grade P-Säure aufkonzentriert (54 %) wird. Die Chlorid-Lösungen der Ionenaustauscher sollen aufkonzentriert und als Fe-/Al-Chlorid-Lösungen in der Kläranlage als Fällmittel eingesetzt werden. Die anderen Metallrückstände (MeCIX-Lösungen) werden aufbereitet und entsorgt. Die im Verdampfer gewonnene Salzsäure wird im Prozess im Kreis gefahren, um den Säureverbrauch bei der Regeneration der Kationenaustauscher gering zu halten.

Praxisbeispiel

Varna, Bulgarien

Pilotbetrieb am Standort der EcoPhos Versuchsanlage, 2018

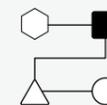
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität



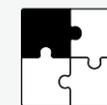
Hohe Komplexität beherrschbar in der geplanten Einsatzumgebung

Zusatzerträge/-nutzen



Anpassung des Verfahrens an lokale Gegebenheiten möglich durch veränderten Chemiekalieneinsatz und entsprechend besserer Verwertbarkeit der Abfälle

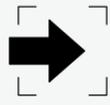
Abhängigkeiten Infrastruktur



Monoverbrennung von Klärschlamm erforderlich
Mögliche Nutzung von Säuren aus der Rauchgasreinigung (jedoch mit Einfluss auf andere Verfahrensparameter, z.B. Schadstoffgehalt)
Säurenutzung zur Düngerproduktion im Inland oder als global handelbares Produkt

Bewertung

Inputflexibilität

**Verwertbare P-reiche Abfälle**

Asche aus Monoverbrennung von entwässertem bis getrocknetem Klärschlamm (15-100% TS) und andere P-reiche und schwermetallarme Substrate (z.B. Tier- und Knochenmehlasche)

P-Rückgewinnungsgrad

**Rückgewonnenes P bezogen auf Input**

ca. 85 %

Konformität Vollzugsanforderungen

Mindestanforderung für thermische Verfahren (50 %) erfüllt



Chemikalieneinsatz

**Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]**

Gefahrenstoffe: rund 0.5 t (Salzsäure 33 %, P-Säure 54 %, Kalk, Sulfide, Harze)

Umweltbelastung Produktion [UBP'13/t KS TS]

Rund 0.6 Mio. UBP 2013



Energie

**Energieverbrauch [kWh/t KS TS]**

272 kWh Wärme, 24 kWh Strom, insgesamt 296 kWh

Energienutzung [%]

Effiziente energetische Verwertung mit Gesamtnutzungsgrad von ca. 80 % (BAT-Technologie)



Abfälle

**Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit**

Rund 1 t mit grossem Aufwand verwertbare Abfälle: Kalziumchlorid 35 %, Eisen/Aluminium-Silikat-Filterrückstände, Schwermetallkonzentrat

Technologie

Umwelt

P-Gehalt

**Phosphor im Produkt [Gew.-% P]**

17.1 % P
39 % P₂O₅
54 % H₃PO₄

Pflanzenverfügbarkeit

**Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]**

P-Säure für Herstellung von handelsüblichen Mineraldüngern verwendbar (P in Lösung)

Schadstoffgehalt

**Schwermetalle und organische Verbindungen**

Alle MinRec-Grenzwerte sehr deutlich eingehalten

Produkterlös

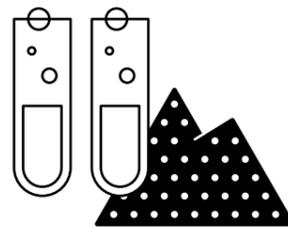
**Marktpreis [CHF/t Produkt]**

ca. 400 CHF (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2019)

Produkt

Phos4Life

Nasschemische Extraktion aus Asche



75 % H_3PO_4 , 24 % P

Phosphorsäure

Beim von der Tecnicas Reunidas entwickelten Phos4Life-Verfahren handelt es sich um ein nasschemisches Verfahren, welches den Phosphor aus der Asche der Monoverbrennung von entwässertem Klärschlamm und eventuell zusätzlichen P-reichen Co-Substraten extrahiert. Die Umsetzung erfolgt unabhängig vom Betrieb der Abwasserreinigungsanlagen.

Aus Klärschlammasche wird P durch eine stark schwefelsaure Laugung extrahiert. Neben P gehen dabei auch die meisten Schwermetalle in Lösung. Der verbleibende metallarme, mineralische Anteil wird abgetrennt und einer stofflichen Verwertung zugeführt. In einer ersten Lösungsmittel-extraktionsstufe wird mittels Flüssig/Flüssig Extraktion Eisen als Eisenchloridlösung separiert und aufbereitet. Diese Lösung kann in Kläranlagen wieder als Fällmittel eingesetzt werden. In einer zweiten Lösungsmittel-extraktionsstufe wird die P-Säure von den Schwermetallen befreit, durch Verdampfung aufkonzentriert und in technisch reine 75%ige P-Säure überführt. Diese entspricht einem handelsüblichen Produkt und kann sowohl in der Düngerindustrie zum Aufschluss von Rohphosphat bzw. P-haltigen Aschen wie auch für weitere industrielle Anwendungen eingesetzt werden. Die gelösten Schwermetalle werden anschliessend ausgefällt und teilweise einer stofflichen Verwertung zugeführt.

Praxisbeispiel

Madrid, Spanien

Pilotversuche zur Verfahrensentwicklung mit dem Ziel der Auslegung einer Industrieanlage, 2018

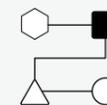
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität



Hohe Komplexität beherrschbar in der geplanten Einsatzumgebung

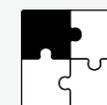
Zusatzerträge/-nutzen



Rückführung von Eisen- und Aluminiumsalzen in die Kläranlage

Nutzung des silikatischen Rückstands als (Zement-)zuschlagsstoff

Abhängigkeiten Infrastruktur



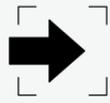
Monoverbrennung von Klärschlamm erforderlich

Mögliche Nutzung von Säuren aus der Rauchgasreinigung (jedoch mit Einfluss auf andere Verfahrensparameter, z.B. Schadstoffgehalt)

Säurenutzung zur Düngerproduktion im Inland oder als global handelbares Produkt

Bewertung

Inputflexibilität

**Verwertbare P-reiche Abfälle**

Asche aus Monoverbrennung von entwässertem bis getrocknetem Klärschlamm (15 - 100 % TS) und andere P-reiche und schwermetallarme Substrate (z.B. Tier- und Knochenmehlasche)

P-Rückgewinnungsgrad

**Rückgewonnenes P bezogen auf Input**

> 95 %

Konformität Vollzugsanforderungen

Mindestanforderung für thermische Verfahren (50 %) erfüllt



Chemikalieneinsatz

**Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]**

Gefahrenstoffe: rund 0.9 t (Schwefelsäure 96 %, Salzsäure 33 %, Kalk), Weitere Chemikalien: rund 3.5 t (v.a. Wasser, wenig Kalkstein)

Umweltbelastung Produktion [UBP*13/t KS TS]

Rund 0.7 Mio. UBP 2013



Energie

**Energieverbrauch [kWh/t KS TS]**

313 kWh Wärme, 168 kWh Strom, insgesamt 481 kWh

Energienutzung [%]

Effiziente energetische Verwertung mit Gesamtnutzungsgrad von ca. 80 % (BAT-Technologie)



Abfälle

**Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit**

Rund 1.8 t mit geringem Aufwand verwertbare Abfälle: Laugungsrückstand (55 % TS), Weisser Gips (70 % TS), Schwermetallkonzentrat (70 % TS), Eisenchloridlösung 40 %, Salzsäure 17 %

0.025 t nicht verwertbare Abfälle: Filterasche aus der Rauchgasreinigung

Technologie

Umwelt

P-Gehalt

**Phosphor im Produkt [Gew.-% P]**

23.7 % P
54 % P₂O₅
75 % H₃PO₄

Pflanzenverfügbarkeit

**Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]**

P-Säure für Herstellung von handelsüblichen Mineraldüngern verwendbar (P in Lösung)

Schadstoffgehalt

**Schwermetalle und organische Verbindungen**

Alle MinRec-Grenzwerte sehr deutlich eingehalten

Produkterlös

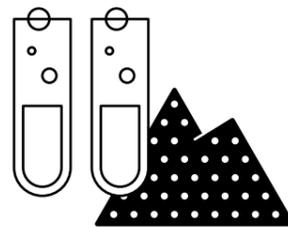
**Marktpreis [CHF/t Produkt]**

600 - 700 CHF (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2019)

Produkt

REALphos

Nasschemische Extraktion aus Asche



70 % H_3PO_4

Phosphorsäure

Beim von der REAL auf Basis von Leachphos entwickelten REALphos-Verfahren handelt es sich um ein nasschemisches Verfahren, welches den Phosphor aus der Asche der Monoverbrennung von entwässertem Klärschlamm extrahiert. Die Umsetzung erfolgt unabhängig vom Betrieb der Abwasserreinigungsanlagen.

Klärschlammasche wird mit Schwefelsäure gelaugt, wobei Phosphorsäure entsteht, welche abfiltriert wird. In der Phosphorsäure lösen sich auch einige Schwermetalle. Die verbleibende Asche wird teilweise rezirkuliert zur Erhöhung der Ausbeute. Die Asche wird anschliessend mit Salzsäure behandelt, um sie von den verbleibenden Schwermetallen zu reinigen und die Qualitätsanforderungen für die Zementindustrie zu erfüllen (Versuche bei der Zementindustrie laufen). Die Phosphorsäure wird gereinigt und aufkonzentriert. Mittels sulfidischer Fällung werden Schwermetalle ausgefällt und unter Zugabe von Kieselgur in einem Kerzenfilter zurückgehalten. Der Schwermetallschlamm aus der Asche-Reinigung und der Filterkuchen des Kerzenfilters gehen in die betriebseigene chemische Abwasserbehandlungsanlage. Dort entsteht Hydroxidschlamm, der an einen Sonderabfallverwerter abgegeben wird. Die gereinigte Phosphorsäure wird durch Verdampfung unter Vakuum aufkonzentriert zu 70%iger Phosphorsäure und soll in der Schweiz zum Aufschluss von P-haltigen Aschen zur Erzeugung von Dünger eingesetzt werden.

Praxisbeispiele

Luzern, Schweiz

Pilotanlage auf dem Gelände der ARA REAL, 2020

Oftringen, Schweiz

Machbarkeitsstudie der erzo in Projektpartnerschaft mit Holcim Schweiz AG, 2022

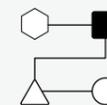
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität



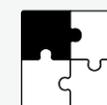
Hohe Komplexität beherrschbar in der geplanten Einsatzumgebung

Zusatzerträge/-nutzen



Nutzung des silikatischen Rückstands als (Zement-)zuschlagstoff

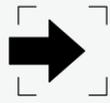
Abhängigkeiten Infrastruktur



Monoverbrennung von Klärschlamm erforderlich
 Phosphorsäure absetzbar bei der ZAB (LOI liegt vor)
 Nutzung von Prozesswärme und Dampf aus Monoverbrennung für Eindampfung der P-Säure
 Nutzung von Brauchwasser der ARA statt Frischwasser
 Mögliche Nutzung von Säuren aus der Rauchgasreinigung (falls KVA vor Ort; jedoch mit Einfluss auf andere Verfahrensparameter, z.B. Schadstoffgehalt)

Bewertung

Inputflexibilität

**Verwertbare P-reiche Abfälle**

Asche aus Monoverbrennung von entwässertem bis getrocknetem Klärschlamm (15 - 100 % TS) und andere P-reiche und schwermetallarme Substrate (z.B. Tier- und Knochenmehlasche)

Technologie

P-Rückgewinnungsgrad



Rückgewonnenes P bezogen auf Input
> 80 %

Konformität Vollzugsanforderungen
Mindestanforderung für thermische Verfahren (50 %) erfüllt



Chemikalieneinsatz



Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]
Gefahrenstoffe: rund 0.5 t (Schwefelsäure 96 %, Salzsäure 30 %, Natriumhydroxid 32 %, TMT 15 und Kieselgur).
Weitere Chemikalien: rund 0.7 t (Wasser)

Hinweis: Sulfidische Fällung mit TMT 15 noch nicht geklärt

Umweltbelastung Produktion [UBP'13/t KS TS]
0.61 Mio. UBP 2013



Umwelt

Energie



Energieverbrauch [kWh/t KS TS]
465 kWh, davon 76 kWh elektrisch

Hinweis: Abwärmenutzung aus SVA

Energienutzung [%]
Effiziente energetische Verwertung mit Gesamtnutzungsgrad von ca. 80 % (BAT-Technologie)



Abfälle

**Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit**

0.4 t mit geringem Aufwand verwertbare Abfälle: Asche (trocken), Schwermetallkonzentrat (TS 30 %)

0.025 t nicht verwertbare Abfälle: Filterasche aus der Rauchgasreinigung

P-Gehalt

**Phosphor im Produkt [Gew.-% P]**

22.1% P
70% H₃PO₄
51% P₂O₅

Produkt

Pflanzenverfügbarkeit

**Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]**

P-Säure für Herstellung von handelsüblichen Mineraldüngern verwendbar (P in Lösung)

Schadstoffgehalt

**Schwermetalle und organische Verbindungen**

Alle MinRec-Grenzwerte eingehalten

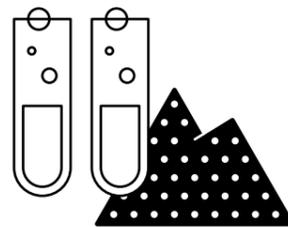
Produkterlös

**Marktpreis [CHF/t Produkt]**

< 400 CHF/t (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2020)

TetraPhos

Nasschemische Extraktion aus Asche



75 % H_3PO_4 , 24 % P

Phosphorsäure

Beim von Remondis in Deutschland entwickelten TetraPhos-Verfahren handelt es sich um ein nasschemisches Verfahren, welches den Phosphor aus der Asche der Monoverbrennung von entwässertem Klärschlamm und eventuell zusätzlichen P-reichen Co-Substraten extrahiert. Die Umsetzung erfolgt unabhängig vom Betrieb der Abwasserreinigungsanlagen.

In einem ersten Schritt wird Klärschlammasche (bzw. insbesondere die darin enthaltenen Matrixelemente Ca, P, Fe, Al) in im Kreis gefahrener Phosphorsäure (ca. 25%) aufgelöst. Durch die Zugabe von einem sulfidischen Additiv werden die meisten Schwermetalle in der Aschematrix gehalten und anschließend über eine Filtration abfiltriert. Die feuchten Rückstände entsprechen massenmäßig in etwa der eingesetzten Aschemenge. Anschließend wird Schwefelsäure der calciumhaltigen Phosphorsäure zugegeben und Gips ausgefällt, der über eine Filtration abgetrennt wird. Die eisen- und aluminiumhaltige Säure wird anschließend über Kationenaustauscher gereinigt. Die dabei gewonnene, dünne Phosphorsäure wird einerseits prozessintern eingesetzt, d.h. zum Aufschluss der Asche verwendet und andererseits aufkonzentriert und als technische P-Säure gewonnen. Die Regeneration der Kationenaustauscher erfolgt mit Salzsäure. Die Regenerat-Salzsäure mit Fe-/Al-CIX-Verunreinigungen wird über eine Nanofiltration gereinigt und prozessintern verwertet. Das Konzentrat der Nanofiltration ist eine dünne Fe-/Al-CIX-Lösung, welche als Fällmittel in der Kläranlage wiederverwendet werden kann.

Praxisbeispiele

Hamburg, Deutschland

Pilotbetrieb (50 kg/h entwässertem Schlamm) am Standort der VERA Klärschlammverbrennung, 2018

Werdohl, Deutschland

Pilotanlage bei WFA Elverlingsen GmbH (50 kg/h entwässertem Schlamm), Teilbetrieb im Rahmen des Interreg NW-Europe-Projekts Phos4You, 2019

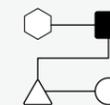
Beurteilung

Entwicklungsstand



Demonstration der Technologie in simulierter, dem späteren Einsatz entsprechender Umgebung

Komplexität



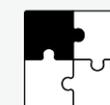
Hohe Komplexität beherrschbar in der geplanten Einsatzumgebung

Zusatzerträge/-nutzen



Anpassung des Verfahrens an lokale Gegebenheiten möglich durch veränderten Chemikalieneinsatz und entsprechend besserer Verwertbarkeit der Abfälle

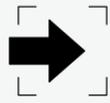
Abhängigkeiten Infrastruktur



Monoverbrennung von Klärschlamm erforderlich
Mögliche Nutzung von Säuren aus der Rauchgasreinigung (jedoch mit Einfluss auf andere Verfahrensparameter, z.B. Schadstoffgehalt)
Säurenutzung zur Düngerproduktion im Inland oder als global handelbares Produkt

Bewertung

Inputflexibilität

**Verwertbare P-reiche Abfälle**

Asche aus Monoverbrennung von entwässertem bis getrocknetem Klärschlamm (15 - 100 % TS) und andere P-reiche und schwermetallarme Substrate (z.B. Tier- und Knochenmehl)

P-Rückgewinnungsgrad

**Rückgewonnenes P bezogen auf Input**

ca. 85 %

Konformität Vollzugsanforderungen

Mindestanforderung für thermische Verfahren (50 %) erfüllt



Chemikalieneinsatz

**Gefahrstoff [j/n], Menge [t/t KS TS]**

Gefahrenstoffe: rund 0.25 t (Salzsäure 33 %, Schwefelsäure 96 %, Sulfide, Harze)

Umweltbelastung Produktion [UBP'13/t KS TS]

Rund 0.2 Mio. UBP 2013



Energie

**Energieverbrauch [kWh/t KS TS]**

384 kWh Wärme, 92 kWh Strom, insgesamt 476 kWh

Energienutzung [%]

Effiziente energetische Verwertung mit Gesamtnutzungsgrad von ca. 80 % (BAT-Technologie)



Abfälle

**Menge [t/t KS TS] und Verwertbarkeit**

Ca. 0.1 t mit geringem Aufwand verwertbare Abfälle: Gips

Rund 1 t mit grossem Aufwand verwertbare Abfälle: Laugungsrückstand

Technologie

Umwelt

P-Gehalt

**Phosphor im Produkt [Gew.-% P]**

23.7 % P

75 % H_3PO_4

54 % P_2O_5

Pflanzenverfügbarkeit

**Löslichkeit in ausgewählten Medien [%]**

P-Säure für Herstellung von handelsüblichen Mineraldüngern verwendbar (P in Lösung)

Schadstoffgehalt

**Schwermetalle und organische Verbindungen**

Alle MinRec-Grenzwerte sehr deutlich eingehalten

Produkterlös

**Marktpreis [CHF/t Produkt]**

400 CHF (Schätzung auf Basis des Entwicklungsstands April 2019)

Produkt

Alle Bewertungen im Überblick

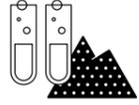
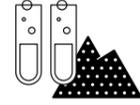
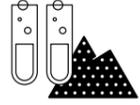
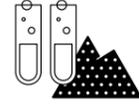
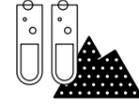
Kriterien	Technologien				Technologien				
	Säure-Aufschluss und Kristallisation	Thermochemischer Aufschluss von Klärschlamm	Nasschemischer Aufschluss von Asche		Nasschemische Extraktion aus Asche				
	 ExtraPhos	 EuPhoRe	 Pyrophos	 ZAB	 CleanMAP	 EcoPhos	 Phos4life	 REALphos	 TetraPhos
Kreislaufschliessung									
Inputflexibilität	●●○○	●●●●	●●●○	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Rückgewinnungsgrad	●○○○	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Rückgewonnenes P	●○○○	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●○	●●●○	●●●○	●●●○
Konformität Vollzug	●○○○	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Umwelt									
Chemikalieneinsatz	-----	●●●●	●●●○	-----	●●●○	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○
Gefahrstoff	-----	●●●●	●●●○	-----	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○
Umweltbelastung Produktion	-----	●●●●	●●○○	-----	●●○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○
Energie	-----	●●●●	●●●●	●●○○	●●●○	●●●○	●●●○	●●●○	●●●○
Energieverbrauch	-----	●●●●	●●●●	●○○○	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○
Energienutzung	●●●○	●●●●	●●●●	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○
Abfälle	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●○	●●○○	●●○○	●●○○	●●○○
Produkt									
P-Gehalt	●○○○	●○○○	●○○○	●●●○	●●●●	●●●○	●●●○	●●●○	●●●○
Pflanzenverfügbarkeit	●●○○	●○○○	●●●○	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Schadstoffgehalt	●●●●	●○○○	●○○○	-----	●●●●	●●●●	●●●●	●●●○	●●●●
Produkterlös	●●○○	●○○○	●●○○	●●○○	●●●●	●●●○	●●●○	●●●○	●●●●

Tabelle 3