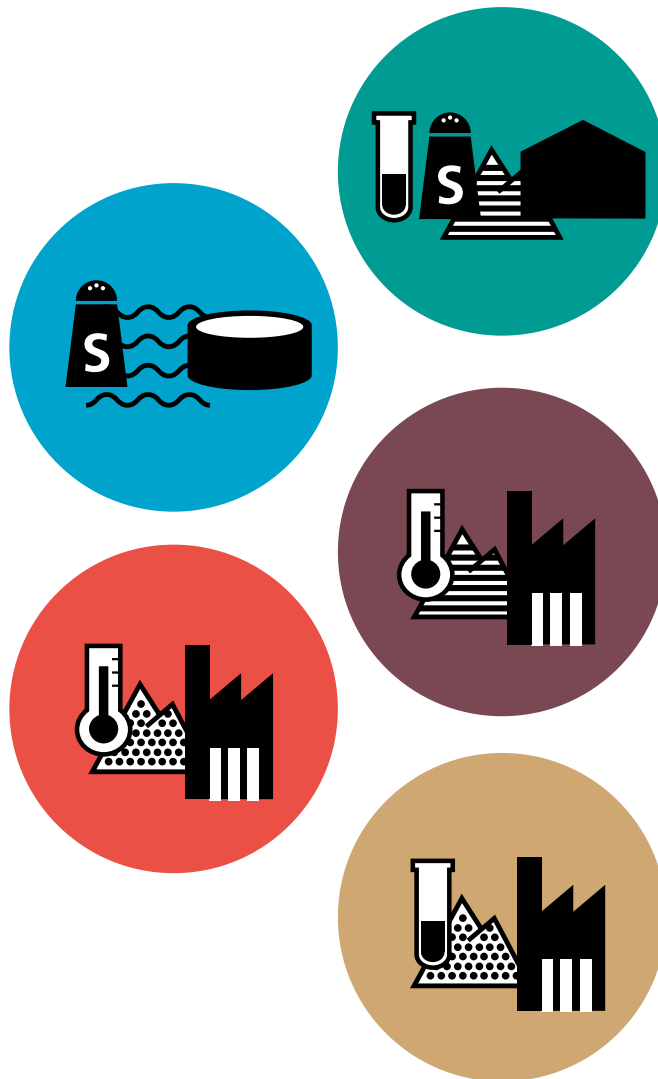


Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung

Gesamtheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit von P-Rückgewinnungstechnologien im Schweizer Kontext

JANUAR 2017



Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Abfall und Rohstoffe
Dr. Kaarina Schenk

Auftragnehmer

Ernst Basler + Partner AG
Zollikerstrasse 65
8702 Zollikon
Telefon +41 44 395 11 11
www.ebp.ch

Projektteam

Andy Spörri (Ernst Basler + Partner AG)
Isolde Erny (Ernst Basler + Partner AG)
Ludwig Hermann (Outotec AG)
Ralf Hermann (Proman Management GmbH)

Gestaltung

Ernst Basler + Partner AG
Kommunikation
www.ebp-kommunikation.ch

Diese Studie wurde im Auftrag des
BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein
der Auftragnehmer verantwortlich.

© JANUAR 2017

Inhalt

Zusammenfassung	5
Résumé	6
Summary	7
01 EINLEITUNG	
Ausgangslage	11
Zielsetzung	11
02 METHODIK	
Untersuchungsrahmen	13
Vorgehensweise	14
03 RESULTATE	
Kapitel Aufbau	21
Infografik: Untersuchtes Entsorgungssystem	22
01 Kristallisation aus Klärschlamm bzw. Schlammwasser	25
02 Säure-Aufschluss von Klärschlamm mit anschliessender Kristallisation	31
03 Thermochemischer Aufschluss von Klärschlamm	37
04 Säure-Aufschluss von Klärschlamm-Asche	43
05 Thermochemischer Aufschluss von Klärschlamm-Asche	49
Bewertungsergebnisse auf einen Blick	56
04 FAZIT	
Synthese	59
Herausforderungen und Empfehlungen	59
Weiterer Handlungsbedarf	60
Literaturverzeichnis	63

Liste der Abkürzungen

ARA	Abwasserreinigungsanlage
BAFU	Bundesamt für Umwelt
Bio-P ARA	Abwasserreinigungsanlage mit biologischer Phosphorelimination
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
DAP	Diammoniumphosphat
DCP	Dicalciumphosphat
DG Agri	Generaldirektion Landwirtschaft und ländliche Entwicklung der Europäischen Kommission
DüBV	Verordnung des Eidgenössischen Departements für Wirtschaft, Bildung und Forschung über das Inverkehrbringen von Düngern
DüV	Düngerverordnung
FIBL	Forschungsinstitut für biologischen Landbau
FMV	Futtermittel-Verordnung
KS	Klärschlamm
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
MCP	Monocalciumphosphat
MV	Monoverbrennung
REACH-Norm	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 für die Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien
SVA	Schlammverbrennungsanlage
TRL	Technologischer Reifegrad (Engl: Technological Readiness Level)
TSP	Triplesuperphosphat
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen

Zusammenfassung

Mit dem Inkrafttreten der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) wird die Rückgewinnung von Phosphor (P) aus P-reichen Abfällen, d.h. Klärschlamm (KS) und Tier- und Knochenmehl, auf Verordnungsstufe mit einer 10-jährigen Übergangsfrist verbindlich vorgeschrieben. Für die P-Rückgewinnung existieren (bzw. befinden sich im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium) diverse verfahrenstechnische Ansätze, (z. B. nass- oder thermochemisch). Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Ansatzpunktes, (Faulwasser, KS, KS-Asche) und des verfahrenstechnischen Prinzips zur P-Extraktion, aber auch hinsichtlich verschiedener Performanz- und Umsetzungsrelevanter Kriterien.

Im Sinne einer Orientierungshilfe für Umsetzungsverantwortliche zur Planung einer auf die regionalen Gegebenheiten abgestimmten Rückgewinnung besteht das Ziel des vorliegenden Projekts darin, eine Auslegeordnung zu den Vor- und Nachteilen von absehbar marktreifen Technologien unter Berücksichtigung der zentralen, umsetzungsrelevanten Kriterien zu erarbeiten.

In einem ersten Schritt werden aus den heute bekannten Technologien diejenigen ausgewählt, welche aufgrund ihres Entwicklungsstands innerhalb der 10-jährigen Übergangsfrist für eine Implementierung in der Schweiz in Frage kommen. Die in die Auswahl aufgenommenen 20 Technologien werden mit einem eigens entwickelten Beurteilungsrahmen auf einer vierstufigen Ordinalskala hinsichtlich Nachhaltigkeits-Performanz und Integrierbarkeit in den Schweizer Umsetzungskontext bewertet. Insgesamt werden sieben Bewertungsdimensionen (z.B. Umwelt, Produkt, Markt, Kompatibilität mit bestehenden Infrastrukturen) festgelegt, welche über 14 Kriterien bzw. 25 Unterkriterien differenziert werden. Die Bewertung erfolgt für fünf Technologiegruppen, welche hinsichtlich der Kriterien vergleichbare Charakteristiken aufweisen (Gruppe 1: Kristallisation aus KS bzw. Schlammwasser, Gruppe 2: Säure-Aufschluss von KS mit anschliessender Kristallisation, Gruppe 3: Thermochemischer Aufschluss von KS, Gruppe 4: Säure-Aufschluss von KS-Asche, Gruppe 5: Thermochemischer Aufschluss von KS-Asche).

Die Resultate umfassen detaillierte Beurteilungsprofile für alle Technologiegruppen inklusive Angaben von Daten und Informationen zur Begründung der Punktevergabe. Sie offenbaren bedeutende Unterschiede in den Beurteilungsprofilen und entsprechenden Vor- und Nachteilen zwischen den fünf Technologiegruppen, teilweise aber auch signifikante Unterschiede in einzelnen Kriterien zwischen einzelnen Verfahren innerhalb derselben Gruppe. So variieren die Rückgewinnungsgrade von 15 % bei den aus wässrigen Medien direkt ausfällenden Verfahren (Abwasserreinigungsanlage (ARA) mit biologischer P-Elimination (Bio-P) vorausgesetzt) bis über 90 % bei ausgewählten thermochemischen Extraktionsverfahren (z. B.

ASH DEC aus Gruppe 5; Pyreg und Susteen aus Gruppe 3). Bei den Säureaufschlussverfahren (Gruppen 2 und 4) sind die Rückgewinnungsgrade stark abhängig vom Säureeinsatz. Letztere sind zusätzlich noch in der Lage, andere P-reiche Abfälle (Tier- und Knochenmehl) zu verwerten, was den Beitrag zur Schliessung des Schweizer P-Kreislaufs weiter erhöht. Ausser bei den direkt ausfällenden Verfahren (Gruppe 1) und wenigen weiteren Ausnahmen (z. B. Pyreg und Susteen aus Gruppe 3) findet bei allen Verfahren eine effektive Abreicherung der im KS enthaltenen Schadstoffe statt.

Weiter unterscheiden sich die Verfahren wesentlich, was die Grösse und Diversität der Absatzmöglichkeiten für die rückgewonnenen P-Produkte, die Komplexität und damit die Betriebssicherheit, aber auch die Entsorgung von zusätzlich anfallenden Abfällen anbelangt. Die aus wässrigen Medien direkt ausfällenden Verfahren (Gruppe 1) schneiden in dieser Hinsicht – der tiefe Rückgewinnungsgrad, die mangelnde Schadstoffabscheidung und die Inkompatibilität mit der chemischen P-Elimination auf Schweizer ARA ausser Acht lassend – am besten ab (keine zusätzlichen Abfälle, vergleichsweise einfache Verfahrensführung, Struvit als Rohphosphat-Ersatz für die Düngerindustrie). Demgegenüber stehen die thermochemischen KS-Aufschlussverfahren (Gruppe 3), welche aufgrund der hohen Komplexität, dem vergleichsweise schwierigen Absatz der rückgewonnenen P-Produkte und den bedeutenden Mengen an zusätzlich zu entsorgenden Sonderabfällen in dieser Hinsicht (noch) problematisch sind. Die Beurteilung dieser Kriterien bei den übrigen Verfahren (Gruppen 2, 4 und 5) liegt zwischen diesen beiden Extremen, mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen.

Die Technologiegruppen sind stark unterschiedlich kompatibel mit bestehenden Infrastrukturen der Abwasserreinigung und Klärschlamm Entsorgung, sowie den regionalen Gegebenheiten. Die Verfahren von Gruppe 2 sind sehr gut integrierbar in die bestehenden System- und räumlichen Strukturen. Diese Form der Rückgewinnung tangiert die bestehenden KS-Mengen und heutigen Verwertungswege nicht und ist aufgrund der Anlagengrösse auch für eine dezentrale Umsetzung auf mittelgrossen ARA geeignet. Dies gilt grundsätzlich auch für die Verfahren aus Gruppe 1 mit der entscheidenden Ausnahme, dass diese mit der auf Schweizer ARA vorherrschenden chemischen P-Elimination nicht kompatibel sind und deshalb für eine Implementierung nicht in Frage kommen. Die Beurteilung der übrigen Verfahren (Gruppe 3, 4 und 5) liegt dazwischen. Dabei haben die auf der KS-Monoverbrennung (KS-MV) basierenden Verfahren den Vorteil, dass Schlammverbrennungsanlagen (SVA) für die P-Rückgewinnung und die Rauchgase bei einer Realisierung bei Zementwerken (ZW) bzw. Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) für die Klinkerherstellung bzw. die Energieproduktion in KVA weiter genutzt werden könnten.

Grundsätzlich zeigen die Resultate, dass für die Implementierung der P-Rückgewinnung nach VVEA, Art.15 innerhalb der 10-jährigen Übergangsfrist verschiedene Technologien für eine Implementierung zur Verfügung stehen. Aufgrund der bedeutenden Unterschiede in der Performanz aber auch in der Integrierbarkeit in bestehende Systemstrukturen ist es wesentlich, dass weitere Abklärungen im Rahmen der Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung von spezifischen regionalen Gegebenheiten und möglichst innerhalb von politisch klar abgesteckten Vorgaben an die Rückgewinnung geschehen.

Résumé

L'entrée en vigueur de l'ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED) a, avec un délai transitoire de dix ans, rendu obligatoire par voie d'ordonnance la récupération du phosphore (P) contenu dans les déchets riches en phosphore (boues d'épuration, farines animales et poudres d'os). Divers procédés techniques de récupération du phosphore (p. ex. traitement par voie chimique humide ou traitement thermo-chimique) existent déjà (ou sont à un stade avancé de développement). Ils diffèrent quant à l'élément de départ (eaux putrides, boues d'épuration, cendres de boues d'épuration) et au procédé technique d'extraction du phosphore, mais aussi du fait des différents critères de performance et de mise en œuvre.

Destiné à aider les responsables à planifier une récupération adaptée aux réalités régionales, le présent projet a pour objectif de dresser un état des lieux des avantages et des inconvénients des technologies bientôt commercialisables tout en tenant compte des critères centraux essentiels à la mise en œuvre.

Dans un premier temps, parmi les technologies aujourd'hui connues sont sélectionnées celles qui, du fait de leur niveau de développement, sont susceptibles d'être implémentées en Suisse durant le délai transitoire de dix ans. Les performances de durabilité et la capacité d'intégration dans le contexte suisse de mise en œuvre des vingt technologies sélectionnées sont évaluées sur une échelle ordinale à quatre degrés dans un cadre d'analyse établi dans ce but. Au total, sept dimensions d'évaluation (p.ex. environnement, produit, marché, compatibilité avec les infrastructures existantes), différenciées sur la base de 14 critères, resp. 25 sous-critères, sont définies. L'évaluation concerne cinq groupes de technologies présentant des caractéristiques comparables quant aux critères (groupe 1: cristallisation à partir de boues d'épuration ou d'eaux boueuses, groupe 2: digestion acide des boues d'épuration, suivie d'une cristallisation, groupe 3: digestion thermo-chimique des boues d'épuration, groupe 4: digestion acide des cendres de boues d'épuration, groupe 5: digestion thermo-chimique des cendres de boues d'épuration).

Les résultats comprennent des profils d'évaluation détaillés pour tous les groupes de technologies et les informations pour justifier l'attribution des points. Ils révèlent des différences importantes entre les cinq groupes de technologies dans les profils d'évaluation et les avantages et inconvénients, mais aussi des différences entre les procédés au sein d'un même groupe. Les degrés de récupération oscillent ainsi entre 15 % pour les processus de précipitation directement à partir de milieux aqueux (en supposant une station d'épuration des eaux usées [STEP] avec élimination biologique du phosphore [système Bio-P]) et plus de 90 % pour des procédés d'extraction thermo-chimique sélectionnés (p. ex. technologie ASH DEC du groupe 5, Pyreg et Susteen du groupe 3). Dans les procédés de digestion acide (groupes 2 et 4), les degrés de récupération dépendent fortement de l'emploi de l'acide. Ces derniers procédés permettent également de valoriser farines animales et poudres d'os, contribuant ainsi à clore le cycle du phosphore suisse. À l'exception des procédés de précipitation directe (groupe 1) et de quelques autres cas (p. ex. Pyreg et Susteen du groupe 3), tous les procédés réduisent effectivement les substances nocives contenues dans les boues d'épuration.

Qui plus est, les procédés présentent des différences fondamentales en termes de volume et de diversité des débouchés des produits phosphorés récupérés, en termes de complexité et, partant, de sécurité de l'exploitation, mais aussi concernant l'élimination des déchets supplémentaires. À cet égard (faible degré de récupération, séparation manquante des substances nocives et incompatibilité avec l'élimination chimique du phosphore dans les STEP suisses mis à part), les procédés de précipitation directe à partir de milieux aqueux (groupe 1) enregistrent les meilleurs résultats (pas de déchets supplémentaires, gestion relativement simple des procédés, struvite servant de substitut au phosphate brut pour l'industrie des fertilisants). En revanche, les procédés de digestion thermo-chimique des boues d'épuration (groupe 3) sont (encore) problématiques du fait de leur haute complexité, des débouchés relativement difficiles des produits phosphorés récupérés et des quantités importantes de déchets spéciaux en plus à éliminer. L'évaluation de ces critères pour les procédés restants (groupes 2, 4 et 5) se situe entre ces deux extrêmes, avec respectivement des avantages et des inconvénients spécifiques.

Les groupes de technologies affichent de fortes disparités en matière de compatibilité avec les infrastructures existantes d'épuration des eaux usées et d'élimination des boues d'épuration ainsi qu'avec les spécificités régionales. Les procédés du groupe 2 sont très faciles à intégrer au système et aux structures spatiales existantes. Cette forme de récupération, qui n'affecte pas les quantités de boues d'épuration existantes et les méthodes de valorisation actuelles, convient aussi, en raison des dimensions de l'installation, à une mise en œuvre décentralisée dans des STEP de capacité moyenne. Ceci vaut de manière générale également pour les procédés

du groupe 1 à cette importante exception près que ces derniers ne sont pas compatibles avec l'élimination chimique du phosphore, majoritaire dans les STEP suisses, et ne sont donc pas susceptibles d'être mis en œuvre. L'évaluation des procédés restants (groupe 3, 4 et 5) se situe dans la plage intermédiaire. Les procédés basés sur la mono-incinération des boues d'épuration présentent ici un avantage: les stations d'incinération des boues pourraient continuer à être utilisées pour la récupération de phosphore et les gaz de combustion générés pourraient, dans le cas d'une réalisation près d'une cimenterie ou les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) servir à la production de clinkers ou à la production d'énergie dans des UIOM.

Fondamentalement, les résultats montrent que l'on dispose de différentes technologies pour la mise en œuvre de la récupération de phosphore selon l'article 15 de l'OLED dans un délai transitoire de dix ans. En raison des différences importantes de performance, mais aussi de capacité d'intégration dans des systèmes existants, il est essentiel, lors du processus de décision, de procéder à des examens complémentaires en tenant compte des spécificités régionales et, si possible, dans le cadre de directives de récupération clairement définies sur le plan politique.

Summary

Since the Ordinance on the Avoidance and Disposal of Waste (VVEA) came into force, the recovery of phosphorus (P) from phosphorus-rich waste, i.e. effluent sludge (KS) and animal and bone meal has become legally binding at ordinance level, with a 10-year transitional period. Several different processing techniques are available (or are in an advanced stage of development) for P-recovery (e.g. wet chemical or thermochemical analysis). They differ with regard to their starting point (e.g. sludge water, effluent sludge, sewage sludge ash) and the processing principles used to extract the phosphorus, and therefore with regard to various criteria relevant to performance and implementation as well.

The objective of the present project, serving as an orientation guide to those responsible for planning a recovery suited to local conditions, is to compile an overview of the advantages and disadvantages of the technologies soon to come onto the market, taking into account the pivotal criteria relevant to implementation.

The first step involves selecting, from the technologies currently known, those which by reason of their stage of development can be considered for implementation in Switzerland within the 10-year transitional period. The 20 selected technologies are evaluated by means of a specially developed assessment framework on a four-level ordinal scale with regard to sustainability performance and ease of integration into the Swiss implementation

environment. Seven evaluation dimensions have been determined (e.g. environment, product, market, compatibility with existing infrastructures), which are differentiated according to 14 criteria and 25 subcriteria. The evaluation is carried out for five technology groups which present comparable traits with regard to the criteria (Group 1: Crystallisation from effluent sludge or sludge water, Group 2: Acid digestion of sludge followed by crystallisation, Group 3: Thermochemical digestion of sludge, Group 4: Acid digestion of sludge ash, Group 5: Thermochemical digestion of sludge ash).

The results comprise detailed assessment profiles for all the technology groups including details of data and information justifying the points awarded. They reveal significant differences in the assessment profiles and corresponding advantages and disadvantages between the five technology groups, but also some significant differences in individual criteria between different processes within the same group. Thus, recovery rates vary from 15 % with the processes using direct precipitation from aqueous media (assuming a wastewater treatment plant (ARA) with biological phosphorus elimination (Bio-P)) to over 90 % with selected thermochemical extraction processes (e.g. ASH DEC from Group 5; Pyreg and Susteen from Group 3). With acid digestion processes (Groups 2 and 4), recovery rates are heavily constrained by the level of acid use. These processes also have the capacity to recycle other phosphorus rich waste (animal and bone meal), which further increases their contribution to closing the Swiss phosphorus cycle. With all processes, except for the directly precipitating processes (Group 1) and a few other exceptions (e.g. Pyreg and Susteen from Group 3), pollutants are effectively eliminated from the sludge.

There is also considerable variation between processes in the scale and diversity of possible uses for the recovered phosphorus products, in their complexity and thus operational safety, as well as in the disposal of additionally accumulating waste. The processes using direct precipitation from aqueous media (Group 1) perform best in this respect (no additional waste, comparatively simple operational process, struvite as a substitute for raw phosphate in the fertiliser industry), as long as the low recovery rate, the sometimes inadequate removal of pollutants, and the incompatibility with the chemical process of phosphorus elimination used in Swiss wastewater treatment plants are not taken into consideration. By contrast, the thermochemical sludge digestion processes (Group 3) are (still) problematic in this respect because of their high degree of complexity, the relative difficulty of utilising their recovered phosphorus products and the considerable amounts of additional hazardous waste that have to be disposed of. For the other processes (Groups 2, 4 and 5), the results of the respective criteria lie between the two extremes with specific advantages and disadvantages in each case.

The technology groups greatly differ in their level of compatibility with existing infrastructure for waste treatment, effluent sludge disposal systems as well as with local conditions. Group 2 processes are suitable for integration into the existing structures of the system and the locality. This form of recovery does not affect existing quantities of effluent sludge and current recycling methods and plant size makes it appropriate for local implementation in medium-sized waste treatment plants as well. In principle, this is also true of Group 1 processes, with the crucial exception that they are not compatible with the prevailing chemical technique of phosphorus elimination of Swiss waste treatment plants. Hence, they are unsuitable for implementation. Evaluation results from the remaining processes (Groups 3, 4 and 5) lie between these extremes. The processes based on the mono-incineration of effluent sludge (KS-MV) have the advantage that sludge incineration plants (SVA) could be used for P-recovery, while flue gases could be used in the manufacture of bricks when processing takes place in cement works (ZW) or for energy production when processing takes place in municipal waste incineration plants (KVA).

The results basically show that various technologies are available for the implementation of P-recovery in accordance with VVEA, Article 15, within the 10-year transitional time period. Because of significant differences in performance as well as in the possibilities for integration into existing system structures, it is essential that further investigations explicitly relate to specific local conditions of different decision-making contexts, if possible within clearly set political guidelines for recycling.

01

EINLEITUNG

Ausgangslage

Die Verwertung der phosphorreichen Abfällen «Klärschlamm» und «Tier- und Knochenmehl» wird mit dem Inkrafttreten der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) seit anfangs 2016 neu geregelt. Darin wird die Rückgewinnung von Phosphor (P) aus P-reichen Abfällen mit einer Übergangsfrist von 10 Jahren verbindlich vorgeschrieben. Konkretisierende Vorgaben u. a. zum Stand der Technik werden in einer Vollzugshilfe geregelt, welche aktuell vom BAFU erarbeitet wird.

Für die P-Rückgewinnung existieren (bzw. befinden sich im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium) diverse verfahrenstechnische Ansätze (z. B. nass- bzw. thermochemisch, Drucksterilisation). Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Ansatzpunktes (dezentral aus ARA-Strömen versus zentral in der Abfallwirtschaft aus Klärschlamm) und des Rückgewinnungsgrads, aber auch hinsichtlich

weiterer Performanz- und Umsetzungsrelevanter Faktoren. Angesichts der Neuartigkeit und grossen Auswahl an Technologien, sowie der Vielzahl an zu berücksichtigenden Faktoren (Nachhaltigkeitsperformanz, Integrierbarkeit in bestehende Strukturen), ist es für vom Phosphor-Recycling betroffene Entscheidungsträger schwierig, ein bestimmtes Verfahren zu priorisieren.

Eine Auslegeordnung zu den Vor- und Nachteilen von P-Rückgewinnungstechnologien unter Berücksichtigung der zentralen, umsetzungsrelevanten Aspekte, erscheint in diesem Hintergrund als hilfreiche Orientierungshilfe für Umsetzungsverantwortliche, um gangbare und ökoeffiziente Wege zur Umsetzung der Rückgewinnungspflicht zu entwickeln, bzw. die für eine sinnvolle Umsetzung erforderlichen Rahmenbedingungen zu schaffen.

Zielsetzungen

Das vorliegende Projekt zur Bewertung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung verfolgt die folgende übergeordnete Zielsetzung:

Entwicklung einer Orientierungshilfe zuhanden von Entscheidungsträgern und Umsetzungsverantwortlichen für eine regional abgestimmte, wirtschaftliche und gesamtökologisch effektive Umsetzung der in der VVEA vorgesehenen Recyclingpflicht.

Dazu steht die Beantwortung folgender Fragen im Zentrum:

- Welche Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung kommen aufgrund ihres technologischen Entwicklungsstands für eine Implementierung in der Schweiz innerhalb der nächsten 10 Jahre in Frage?
- Welche Anforderungen an Rückgewinnungstechnologien sind aus Sicht der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit unter Berücksichtigung der Integrierbarkeit in den Schweizer Umsetzungskontext entscheidend?
- Welches sind die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verfahren aus Sicht der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit?
- Welche Hauptherausforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung der Phosphorrückgewinnung bestehen und wie kann diesen begegnet werden?

02

METHODIK

Untersuchungsrahmen

Für die vorliegende Studie wird folgender Untersuchungsrahmen definiert:

Raumbezug: Es wird eine schweizerische Perspektive verfolgt, d.h. es geht um die Rückgewinnung von P aus Schweizer Sekundärressourcen innerhalb der Schweiz. Einzig bei den denkbaren Absatzwegen für die rückgewonnenen Produkte wird der Blick über die Landesgrenze hinaus auch auf die europäische Düngerindustrie gerichtet.

Zeitlicher Rahmen: Die Beurteilung der Technologien zur P-Rückgewinnung orientiert sich grundsätzlich an der gegenwärtigen Situation bzw. am Entwicklungs- bzw. Informationsstand im Sommer 2016. Auf sich innerhalb der nächsten 5 Jahre abzeichnende Verbesserungen der P-Rückgewinnungstechnologien wird ergänzend hingewiesen.

Abfallströme: In Anlehnung an die VVEA, Art.15 fokussiert das Projekt auf die Rückgewinnung von P aus P-reichen Abfällen:

- Faulwasser nach Schlammmentwässerung
- Klärschlamm (nicht entwässert, entwässert, getrocknet) aus zentraler Abwasserreinigungsanlagen (ARA)
- Asche aus der thermischen Behandlung von Klärschlamm
- Tier- und Knochenmehl

Falls ein Verfahren zur P-Rückgewinnung auch weitere P-haltige Biomasse behandeln kann, wird darauf hingewiesen.

Technologien: Im Projekt werden alle P-Rückgewinnungstechnologien berücksichtigt, welche bereits jetzt marktreif sind bzw. innerhalb der nächsten 5 Jahre voraussichtlich Marktreife erlangen können und damit für eine Implementierung im Rahmen der VVEA-Übergangsfrist von 10 Jahren in Frage kommen.

Absatzsegmente für rückgewonnenes P: Das Projekt berücksichtigt alle denkbaren Absatzwege für die rückgewonnenen P-Recyclingprodukte: Verwendung als Dünger in der Landwirtschaft (konventionell, biologisch) und im Gartenbau innerhalb der Schweiz, Verwendung als Ausgangsmaterial für die Düngerherstellung in der Schweiz und EU und Verwendung als Rohstoff in der chemische Industrie in der Schweiz und EU.

Vorgehensweise

TABELLE 1: ÜBERSICHT ÜBER DIE PROJEKTMODULE UND ARBEITSSCHRITTE

MODUL	ARBEITSSCHRITTE (AS)	WAS
1. Technologie-Auswahl	1.1 Auswahlkriterien	Transparente und nachvollziehbare Auswahl der Technologien, die in den nächsten 5 Jahren Marktreife erreichen können.
	1.2 Kriteriengestützte Auswahl	
2. Beurteilungsmethodik	2.1 Beurteilungskriterien	Entwicklung eines multikriteriellen Ansatzes zur Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit der Technologien.
	2.2 Beurteilungsansatz	
3. Technologie-Beurteilung	3.1 Technologie-Gruppen	Beurteilung der ausgewählten Technologien unter Verwendung des entwickelten Kriterien-Sets.
	3.2 Beurteilungsgrundlagen	
	3.3 Multikriterielle Beurteilung	
4. Synthese und Herausforderungen	4.1 Interpretation und Synthese	Interpretation und Synthese der Ergebnisse und Übersicht über die Hauptherausforderungen zur Umsetzung der P-Rückgewinnung.
	4.2 Hauptherausforderungen	

Die Projektbearbeitung gliedert sich in vier aufeinander aufbauende Module. Die Arbeitsschritte zur Bearbeitung der eingangs aufgeführten Projektziele sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Modul 1: Technologieauswahl

Das Ziel von Modul 1 besteht darin, aus allen heute bekannten P-Rückgewinnungstechnologien diejenigen auszuwählen, welche aufgrund ihres technologischen Entwicklungsstands innerhalb der nächsten 5 Jahre Marktreife erlangen können.

Im Sinne der Transparenz und Nachverfolgbarkeit erfolgt diese Auswahl über ein Kriteriengestütztes Vorgehen. Dazu werden vier Kriterien definiert und operationalisiert, anhand welcher der in den nächsten 5 Jahren erreichbare Entwicklungsstand der Technologien eingeordnet werden kann (> AS1.1). Diese sind im Folgenden aufgeführt.

TECHNOLOGISCHER REIFEGRAD (TRL)

Mass zur Beurteilung des aktuellen Entwicklungsstands einer neuen Technologie.

- TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips (8 bis 15 Jahre)
- TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie
- TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie
- TRL 4: Versuchsaufbau im Labor
- TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung
- TRL 7: Prototyp im Einsatz
- TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
- TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

VERFAHRENSKOMPLEXITÄT

Beurteilung der Komplexität eines Verfahrens hinsichtlich der Weiterentwicklung zur Marktreife.

- Gering:** Wenige und verfahrenstechnisch verhältnismässig einfache Prozessschritte
- Mittel:** Wenige aber verfahrenstechnisch anspruchsvolle Prozessschritte
- Hoch:** Viele und verfahrenstechnisch anspruchsvolle Prozessschritte

POTENZ DES ANBIETERS

Fähigkeit eines Anbieters (Referenzprojekte/Erfahrung, Unternehmensgrösse und Kapitalisierung), eine Technologie bis zur Marktreife entwickeln zu können.

- Gering:** Unerfahrener, schwach kapitalisiertes Unternehmen ohne Referenzprojekte im Einsatzbereich
- Mittel:** Erfahrenes, kapitalstarkes Unternehmen ohne Referenzprojekte im Einsatzbereich
- Hoch:** Erfahrenes, kapitalstarkes Unternehmen mit Referenzprojekten im Einsatzbereich

ENTWICKLUNGSPOTENZIAL

Einschätzung des verfahrenstechnischen Potenzials, ein Verfahren bis zur Marktreife weiterzuentwickeln.

- Gering:** Kaum verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Weiterentwicklung vorhanden
- Mittel:** Verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Weiterentwicklung vorhanden
- Hoch:** Umfangreiche verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Weiterentwicklung vorhanden

Anhand der gezeigten Kriterien werden anschliessend die in der Studie zu berücksichtigenden Technologien ausgewählt (> AS1.2). Dazu werden die vier Kriterien für bekannte P-Rückgewinnungstechnologien durch das Projektteam beurteilt. Die Beurteilung erfolgt auf Grundlage von eigenem Wissen, verfügbarer Literatur, sowie dem Austausch mit ausgewählten Fachpersonen. Eine Technologie wird ausgewählt, wenn sie:

- einen TRL ≥ 6 aufweist (unabhängig von der Beurteilung der anderen drei Kriterien), oder
- bei einem TRL = 5 in mindestens einem der drei anderen Kriterien «hoch» abschneidet, oder
- in einer vielversprechenden Pilot-Anwendung im Schweizer Praxiskontext erprobt wird.

Die ausgewählten Verfahren sind in Tabelle 3 dargestellt.

Modul 2: Beurteilungsmethodik

Modul 2 beinhaltet die Entwicklung der Beurteilungsmethodik, um die ausgewählten Technologien in Modul 3 hinsichtlich Nachhaltigkeit und Umsetzbarkeit in der Schweiz zu beurteilen.

Dazu werden in einem ersten Schritt (> AS2.1) entscheidungsrelevante Kriterien in verschiedenen Dimensionen für eine möglichst gesamtheitliche Technologiebeurteilung erarbeitet. Zusätzlich zu «klassischen» Performanz-Kriterien, welche die Leistungsfähigkeit einer Technologie hinsichtlich verschiedener Teilaspekte widerspiegeln, wird im Hinblick auf die Realisierbarkeit die Integrierbarkeit in den Schweizer Umsetzungskontext (z.B. bestehende Abwasserreinigungs- und Entsor-

gungsstrukturen) erfasst. Die Kriterien werden über ein bis maximal drei Unterkriterien genauer charakterisiert und operationalisiert. Insgesamt werden sieben Dimensionen festgelegt, welche anhand von 14 Kriterien, bzw. 25 Unterkriterien differenziert werden (vgl. Tabelle 2). Die Erarbeitung dieses Beurteilungsgerüsts erfolgt unter kritischer Reflexion und Ergänzungen von ausgewählten Praxis-Experten.

Das Kriterien-Set wird ergänzt durch drei übergeordnete Beurteilungsaspekte, welche abfallpolitisch relevante Ziel- und Entscheidungsgrössen abdecken:

- Entsorgungssicherheit (Resilienz)
- Kompatibilität mit bestehenden Infrastrukturen (ARA-Landschaft, KS-Entsorgung in Zementwerken, SVA und KVA) und räumlichen Gegebenheiten
- Beitrag zur Kreislaufschliessung

Die drei übergeordneten Kriterien werden qualitativ beschrieben. Im Sinne einer Synthese leiten sich diese einerseits ab aus verschiedenen Beurteilungskriterien, andererseits fliessen dabei auch Informationen mit ein, welche nicht explizit über ein Kriterium abgebildet werden.

Die Kriterien, resp. Unterkriterien werden mit einer 4-stufigen Ordinalskala zur Beurteilung hinterlegt (> AS2.2) zwecks nachvollziehbarer und robuster Beurteilung. Soweit es der Wissenstand und die Art des zu beurteilenden Kriteriums, bzw. Unterkriteriums zulassen, werden quantitative Beurteilungsstufen definiert (z.B. P-Rückgewinnungsgrad). Wo dies nicht möglich ist, werden die Beurteilungsstufen qualitativ festgelegt (z.B. Kompatibilität mit ZW). Die verwendeten Skalen für alle Kriterien, bzw. Unterkriterien sind in Tabelle 2 zu finden.

Sich abzeichnende Verbesserungen der Verfahren durch technologische Weiterentwicklung werden in der Bewertung nicht direkt berücksichtigt. Allerdings wird bei den Kriterien, deren Beurteilung sich aufgrund von absehbaren Verfahrensoptimierungen zukünftig verändern könnte, auf die entsprechenden Bestrebungen hingewiesen.

Da die Beurteilungsprofile auf Ebene der Kriterien ausgewiesen werden, werden bei Kriterien, die über mehrere Unterkriterien differenziert sind, die Beurteilungen der Unterkriterien gleichgewichtet auf die Ebene des Kriteriums aggregiert. Auf weitere Aggregationsschritte (d.h. von den Kriterien auf die Dimensionen und von diesen auf ein vollaggregiertes Gesamtergebnis) wird in Anlehnung an den Projektauftrag gänzlich verzichtet.

TABELLE 2: MULTIKRITERIELLER BEURTEILUNGSANSATZ

mit berücksichtigten Dimensionen, Kriterien (K) und Unterkriterien sowie Indikatoren

DIMENSION 1: TECHNOLOGIE

	1	2	3	4
K1.1 Rückgewinnungsgrad				
Rückgewonnenes P bezogen auf P im Rohabwasser bzw. im Tier- und Knochenmehl [%]	< 25	20 – 50	51 – 75	> 75
K1.2 Rückgewinnungsgrad				
Verwertbare P-reiche Abfälle [qualitativ]	KS bzw. Schlammwasser aus Bio-P ARA	KS von allen ARA Typen	P-reiche Abfälle nach Vorbehandlung	P-reiche Abfälle ohne Vorbehandlung

DIMENSION 2: PRODUKT

	1	2	3	4
K2.1 Produktqualität				
P-Gehalt im Produkt [Gew.-% P ₂ O ₅]	< 15	15 – 30	31 – 45	> 45
Qualität hinsichtlich Verwendungszweck – Eignung des Produkts für Absatzwege [qualitativ]	Stoff mit Abfallstatus – Verwertung mit entsprechenden Genehmigungen und Schutzmassnahmen.	Produkt mit erheblichen Defiziten bei Anwendung (z. B. Staub)	Produkt mit geringfügigen Defiziten bei Anwendung (z. B. Korngröße)	Hochwertiges Produkt – gut für Verwendungszweck geeignet
Schadstoffgehalt – Schwermetalle und organische Verbindungen im Produkt [qualitativ]	Sehr hoch: keine Verbesserung zum Ausgangsstoff	Hoch: Recyclingdünger-GW klar verfehlt (ChemRRV)	Gering: Recyclingdünger-GW leicht verfehlt (ChemRRV)	Sehr gering: Recyclingdünger-GW eingehalten (ChemRRV)

DIMENSION 3: MARKT

	1	2	3	4
K3.1 Marktgrösse und -Diversität				
Marktgrösse CH – Absatzbare Produktmenge in CH [t P ₂ O ₅ /a]	< 1000	1000 – 3000	3000 – 5000	> 5000
Marktgrösse EU – Absatzbare Produktmenge in EU [t P ₂ O ₅ /a]	< 5000			> 5000
Marktdiversität – Anzahl der Abnehmer [qualitativ]	Absatz als Abfall mit entsprechenden Einschränkungen	Absatz als Produkt an Industrie	Absatz als Produkt an Handel und Industrie	Absatz als global gehandeltes Standard-Produkt

DIMENSION 4: UMWELT

	1	2	3	4
K4.1 Chemikalieneinsatz				
Menge [t/pro t P] und Umweltverträglichkeit [qualitativ]	Viel (> 5 t), Gefahrstoff	Wenig (< 5 t), Gefahrstoff	Viel (> 5 t), kein Gefahrstoff	Wenig (< 5 t), kein Gefahrstoff
K4.2 Energiebedarf				
Energieverbrauch [kWh/t P]	> 10 000	5000 – 10 000	2000 – 5000	0 – 2000
K4.3 Abfall				
Kategorie der zusätzlichen Abfälle (zu KS) [qualitativ]	Sonderabfälle	Andere kontrollpflichtige Abfälle	Grün gelistete Abfälle	Abfälle weitgehend als Produkt verwertbar
Menge – Zusätzliche Abfallmenge (zu KS) im Vergleich zum rückgewonnenem Produkt [qualitativ]	Mehr Abfälle als P-Produkt	Gleich viel Abfall wie P-Produkt	Weniger Abfälle als P-Produkt	keine Abfälle

DIMENSION 5: WIRTSCHAFTLICHKEIT

	1	2	3	4
K5.1 Investitionsbedarf				
Investitionskosten für typische Anlage [CHF/t P ₂ O ₅]	> 1500	1000 – 1500	500 – 1000	< 500
K5.2 Operative Kosten				
Betriebskosten für typische Anlage [CHF/t P ₂ O ₅]	> 5000	2000 – 5000	1000 – 2000	< 1000
K5.3 Produktertrag				
Erlöse aus Produktabsatz [CHF/t P ₂ O ₅]	< 500	500 – 1000	1000 – 1500	> 1500
K5.4 Zusatzerträge/-nutzen				
Beitrag zur Kostendeckung des Recyclings [%]	0	< 50	50 – 100	100

DIMENSION 6: KOMPATIBILITÄT INFRASTRUKTUR

K6.1 Einfluss auf heutige Entsorgungslandschaft	1	2	3	4
Kompatibilität SVA – Möglichkeit zur Nutzung für die P-Rückgewinnung [qualitativ]	nein	–	Kompatibel mit Monoverbrennung von KS	Kompatibel mit Monoverbrennung von KS
Kompatibilität ZW – Verfügbarkeit von KS als Energiequelle bzw. alternatives Rohmaterials für Klinkerproduktion [qualitativ]	Nicht verfügbar	Eingeschränkt verfügbar als Energiequelle (nur falls Realisierung vor Ort)	Eingeschränkt verfügbar als Energiequelle (nur falls Realisierung vor Ort) und Rückstände als alternatives Rohmaterial	Uneingeschränkt verfügbar für ZW
Kompatibilität KVA – Verfügbarkeit von KS als «Energiequelle» für KVA [qualitativ]	Nicht kompatibel	–	–	Kompatibel mit Co-Verbrennung
K6.2 Kompatibilität mit ARA-Betrieb	1	2	3	4
Platzbedarf [qualitativ]	Sehr gross	Gross	Gering	Ausserhalb ARA umsetzbar
Know-how für Betrieb und Unterhalt – Anforderungen an Mitarbeiter [qualitativ]	Spezialisierte Mitarbeiter erforderlich	Substantielle Zusatzausbildung erforderlich	Verhältnismässige Zusatzausbildung erforderlich	Ausserhalb ARA umsetzbar
Kompatibilität ARA-Landschaft CH – Kompatibilität mit vorhandener Infrastruktur [qualitativ]	Nur auf Bio-P ARA	Auf grösseren ARA	Kleine bis grosse ARA	Ausserhalb ARA umsetzbar

DIMENSION 7: KOMPATIBILITÄT MIT RECHTLICHEN RAHMENBEDINGUNGEN

K7.1 Zulassungsanforderungen Produkte	1	2	3	4
Dünger CH – Einhaltung der Grenzwerte für Recyclingdünger [ja/nein]	Nein	–	–	Ja
Bio-Dünger CH – Enthalten in Betriebsmittelliste Bio-Landbau [ja/nein]	Nein	–	–	Ja
REACH-Norm – Zertifizierung nach REACH-Norm [ja/nein]	Nein	–	–	Ja

Modul 3: Technologie-Beurteilung

Auf Grundlage der vorangehenden Module 1 und 2 erfolgt in Modul 3 die Beurteilung der ausgewählten Technologien, unter Verwendung der entwickelten Beurteilungsmethode.

Zuerst werden die Technologien gruppiert (> AS3.1). Das Ziel ist, hinsichtlich des Bewertungsprofils ähnliche Technologien in einer Gruppe zusammenzufassen, um die Bewertung übergeordnet für die Gruppe zu machen. Signifikante Unterschiede in einzelnen Beurteilungskriterien zwischen Technologien werden explizit ausgewiesen. Dadurch wird einerseits der Verfahrensvielfalt Rechnung getragen; andererseits können die umfassenden Ergebnisse eingängig dargestellt und vermittelt werden¹. Die Technologiegruppen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Im Beurteilungsschritt (> AS3.2) werden die Hauptergebnisse der Studie erarbeitet. Jede Technologie-Gruppe wird hinsichtlich jedes Kriteriums beurteilt. Die der Beurteilung zu Grunde liegenden Daten und Informationen werden festgehalten und dargestellt. Die Beurteilungen erfolgen durch das Projektteam auf der Grundlage von Literaturan-

gaben und Gesprächen mit Technologieentwicklern und Experten. Sie werden zusätzlich von der bereits angesprochenen Begleitgruppe auf Plausibilität geprüft.

Modul 4: Synthese und Herausforderungen

Im abschliessenden vierten Modul werden die Ergebnisse zu den einzelnen Gruppen zu einem Gesamtbild synthetisiert, indem sie zur ursprünglichen Frage nach einer nachhaltigen und praxistauglichen Umsetzung der P-Rückgewinnungspflicht (VVEA, Art.15) in Bezug gesetzt werden. Das Ziel ist dabei nicht, auf die beste Strategie zur Kreislaufschliessung zu schliessen. Vielmehr geht es darum, die Vor- und Nachteile der aus heutiger Sicht realisierbaren Ansätze im Lichte der Vielfalt des Schweizer Umsetzungskontexts aufzuzeigen. Zudem werden Empfehlungen zur Unterstützung einer effizienten und akzeptierten P-Rückgewinnung aus der Analyse abgeleitet.

¹ Die entsprechenden Gruppen entsprechen in etwa der Kategorisierung einer Studie des Deutschen Umweltbundesamts (Montag et al., 2015). In der TBF-Studie (Fux et al, 2015) wird dagegen eine andere Einteilung der Verfahren vorgenommen.

TABELLE 3: BESCHREIBUNG DER TECHNOLOGIEGRUPPEN

GRUPPE	ANSATZPUNKT	TECHNOLOGIEN
Kristallisation	Klärschlamm vor Entwässerung	Airprex, Ekobalans, NuReSys
	Schlammwasser	Crystallactor, NuReSys, Ostara Pearl, Struvia
Säure-Aufschluss und Kristallisation	Klärschlamm vor Entwässerung	Carbonic Acid Process (Budenheim)
	Entwässerter Klärschlamm	Gifhorner Verfahren, Stuttgarter Verfahren
Thermochemischer Aufschluss aus Klärschlamm	Getrockneter Klärschlamm	Kubota, Mephrec, Pyreg, Susteen
Säure-Aufschluss und Kristallisation	Asche aus Klärschlamm-Monoverbrennung	EcoPhos, LeachPhos, Reco-Phos, TetraPhos, ZAR (Weiterentwicklung von LeachPhos)
Thermochemischer Aufschluss aus Asche	Asche aus Klärschlamm-Monoverbrennung	ASH DEC, RecoPhos (P4)

03

RESULTATE

Kapitelaufbau

In diesem Kapitel werden die Resultate aus der Studie illustriert. Das Kapitel besteht aus drei Teilen: Eine Übersicht des untersuchten Entsorgungssystems, die Bewertungsergebnisse für die fünf Technologiegruppen und eine zusammenfassende Übersicht aller Bewertungsergebnisse.

INFOGRAFIK

UNTERSUCHTES ENTSORGUNGSSYSTEM

SEITE 22 BIS 23

Eine zweiseitige Infografik des untersuchten Entsorgungssystems in dem die in der Studie berücksichtigten Technologiegruppen zur P-Rückgewinnung verortet sind.

FAKTENBLÄTTER

SEITE 25 BIS 55

Die Resultate der Technologiebeurteilung der fünf Technologiegruppen sind in Form von Faktenblättern übersichtlich aufbereitet.

01 **Kristallisation aus Klärschlamm
bzw. Schlammwasser**
SEITE 25 BIS 30

02 **Säure-Aufschluss von Klärschlamm
mit anschliessender Kristallisation**
SEITE 31 BIS 36

03 **Thermochemischer Aufschluss
von Klärschlamm**
SEITE 37 BIS 42

04 **Säure-Aufschluss
von Klärschlamm-Asche**
SEITE 43 BIS 48

05 **Thermochemischer Aufschluss
von Klärschlamm-Asche**
SEITE 49 BIS 55

Die Faktenblätter sind standardisiert aufgebaut:

- Kurzbeschreibung der prinzipiellen Funktionsweise der Technologiegruppen
- Übersicht über die einzelnen Technologien in der Gruppe, inkl. Angaben zum rückgewonnenem Produkt und Umsetzungsbeispielen in der Schweiz und im Ausland
- Ordinalskalabasierte Bewertungen der Kriterien mit Begründungen
- Qualitative Beurteilung der übergeordneten Beurteilungaspekte

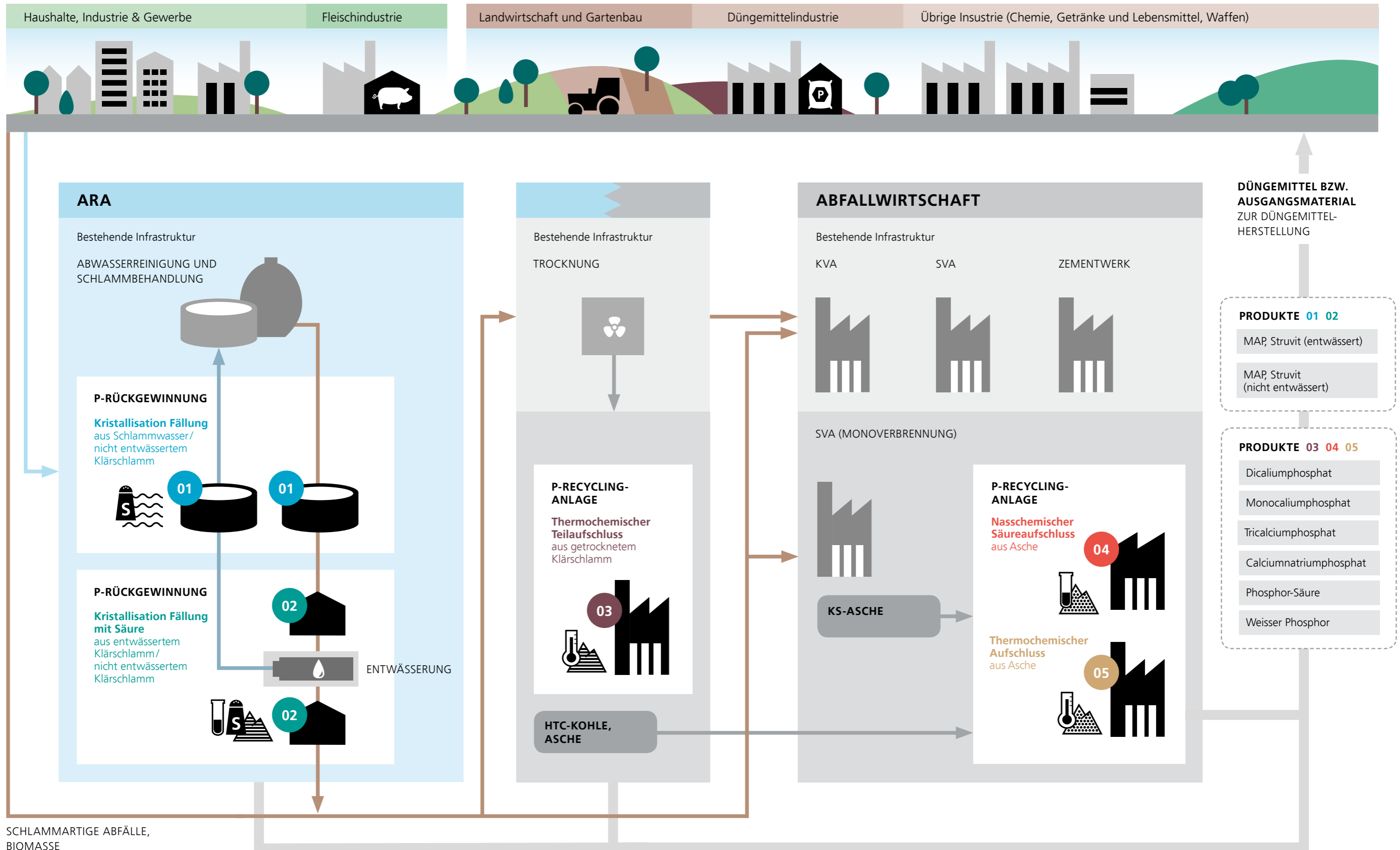
INFOGRAFIK

BEWERTUNGSERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

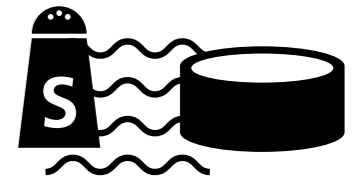
SEITE 56 BIS 57

Eine zweiseitige Darstellung, welche die Bewertungen aller Kriterien für die fünf Technologiegruppen übersichtlich zusammenfasst, um u. a. die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Gruppen besser zu ermöglichen.

Optionen zur Rückgewinnung von Phosphor



01 Kristallisation aus Klärschlamm bzw. Schlammwasser



Diese Verfahren setzen beim Klärschlamm (Faulschlamm) vor der Entwässerung bzw. beim Schlammwasser nach der Klärschlamm-entwässerung an. Die biologische Elimination von P auf der ARA ist zwingende Voraussetzung für die Funktionsweise der Verfahren. Im wässrigen Medium gelöstes P und N wird durch Zugabe von Magnesium und durch pH-Anhebung in einem Rühr- oder Wirbelschichtreaktor zu Struvit (MAP) kristallisiert und ausgelesen. Alternativ könnte durch Zugabe von Calcium auch CaP gefällt und ausgelesen werden. Nach dem P-Recycling kann der zurückbleibende Schlamm mit konventionellen Methoden weiterverwertet werden.

Übersicht über die Technologien und Praxisbeispiele

TECHNOLOGIE	BEISPIEL		
	PRODUKT	STANDORT	STATUS
Klärschlamm vor Entwässerung	Struvit $(\text{NH}_4)\text{Mg}[\text{PO}_4] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	40 bis 60 Anlagen in Europa, Nordamerika und Asien	Meist im kommerziellen Vollbetrieb auf Bio-P ARA
	Airprex Ekobalans NuReSys	Beispiel ARA der Berliner Wasserbetriebe	
Schlammwasser	Crystallactor NuReSys Ostara Pearl Struvia		

Bewertungsprofil

TECHNOLOGIE



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Rückgewinnungsgrad		
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Ostara Pearl Struvia	1	Fällung aus Klärschlamm: 8 bis 12 % Potenzial: Bis zu 20 % durch thermische oder chemische KS-Vorbehandlung (z. B. Hydrolyse) Fällung aus Schlammwasser: 10 bis 15 %. Potenzial: Bis zu 25 % durch thermische oder chemische KS-Vorbehandlung (z. B. Hydrolyse)

Inputflexibilität

Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Ostara Pearl Struvia	1	Nur Klärschlamm bzw. Schlammwasser von Bio-P ARA
---	----------	--

PRODUKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Produktqualität		
Crystallactor NuReSys (Schlammwasser) Ostara Pearl Struvia	3	Struvit mit 25 bis 28 % P_2O_5 (abhängig vom Wassergehalt) Wasserlöslichkeit < 5%, Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeit > 80% Geringfügige organische Verunreinigungen sind nicht ganz auszuschliessen Die ungleichförmige (NuReSys, Crystallactor) bzw. pulverige (Struvia) Beschaffenheit der Produkte erfordert je nach Abnehmer einen Verarbeitungsschritt (mahlen und granulieren). Ostara Pearl® Produkte sind marktfertige Granulate
Airprex Ekobalans NuReSys (KS vor Entwässerung)	3	Struvit mit 20 bis 25 % P_2O_5 (abhängig vom Wassergehalt und dem Grad der Verunreinigung) Wasserlöslichkeit < 5%, Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeit > 80% Ungleichförmige Produktbeschaffenheit erfordert je nach Abnehmer Verarbeitungsschritt (mahlen und granulieren) Recyclingdünger-Grenzwerte der ChemRRV eingehalten; infolge mangelhafter Separation von Produkt und Schlamm sind organische Verunreinigungen vorhanden

MARKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Marktgrösse und -Diversität		
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Ostara Pearl Struvia	3	Dünger (NP-Dünger mit Mg bzw Struvit): < 1000 t pro Jahr im Inland; > 5000 t pro Jahr in der EU (aktuell noch vergleichsweise geringe Akzeptanz für direkte Anwendung in Landwirtschaft) Ausgangsmaterial für Düngerindustrie: > 5000 t pro Jahr im Inland; > 5000 t pro Jahr in der EU

UMWELT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Chemikalieneinsatz		
Crystallactor NuReSys (Schlammwasser) Ostara Pearl Struvia	4	Pro t P: 3 bis 3.5 t $MgCl_2$ oder MgO $MgCl_2$ und MgO nicht als Gefahrenstoff klassifiziert Einsatz geringer Mengen an Kalkhydrat (kein Gefahrenstoff) oder NaOH (Gefahrenstoff; Ausnahmefall, da vergleichsweise teuer) zur pH-Regulierung
Airprex Ekobalans NuReSys (KS vor Entwässerung)	3	Pro t P: 12 bis 15 t $MgCl_2$ oder MgO $MgCl_2$ und MgO nicht als Gefahrenstoff klassifiziert Einsatz geringer Mengen an Kalkhydrat (kein Gefahrenstoff) oder NaOH (Gefahrenstoff; Ausnahmefall, da vergleichsweise teuer) zur pH-Regulierung
Energiebedarf		
Crystallactor NuReSys (Schlammwasser) Ostara Pearl Struvia	3	2000 bis 4000 kWh pro t P (für elektrische Antriebe und Wärme)
Airprex Ekobalans NuReSys (KS vor Entwässerung)	2	8000 bis 12 000 kWh pro t P (für elektrische Antriebe und Wärme)
Abfall		
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Ostara Pearl Struvia	4	Keine zusätzlichen Abfälle zum KS (P-entfrachteter KS); geringere Menge bei aus dem KS kristallisierenden Verfahren aufgrund verbesserter Entwässerung des KS)

WIRTSCHAFTLICHKEIT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Investitionsbedarf		
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Ostara Pearl Struvia	4	> 1500 CHF pro t P ₂ O ₅
Operative Kosten		
Ostara Pearl	4	< 1000 CHF pro t P ₂ O ₅ (v.a. für Energie und Chemikalien; Einsparungen bei Unterhaltskosten des ARA-Betriebs nicht berücksichtigt)
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Struvia	2	2000 bis 5000 CHF pro t P ₂ O ₅ (v.a. für Energie und Chemikalien; Einsparungen bei den Unterhalts- und Schlamm Entsorgungskosten nicht berücksichtigt.)
Produktertrag		
Ostara Pearl	3	Verkauf von Struvit als Dünger zu handelsüblichen Marktpreisen von P-Dünger oder durch Direktvertrieb als Markenprodukt Crystal Green®: Marktpreis P-Dünger bei 900 bis 1500 CHF pro t P ₂ O ₅ (Crystal Green® von Ostara erzielt bis zu 30 % Mehrerlös)
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Struvia	1	Verkauf von Struvit als Dünger zu 15 bis 30 % vom handelsüblichen Marktpreis von P-Dünger: Marktpreis P-Dünger bei 900 bis 1500 CHF pro t P ₂ O ₅ Verkauf als Ausgangsmaterial zur Düngerherstellung zu 30 bis 50 % vom handelsüblichen Marktpreis für Rohphosphat: Marktpreis Rohphosphat bei 350 bis 450 CHF pro t P ₂ O ₅
Zusatzerträge/-nutzen		
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Ostara Pearl Struvia	4	Vermeidung von Unterhaltskosten und Betriebsstörungen durch die Reduktion von spontanen Struvit-Ausfällungen in Rohrleitungen. Bei Kristallisation aus nicht entwässertem KS (Airprex, NuReSys, Ekobalans): bessere Entwässerung führt zu höherer Trockensubstanz und entsprechend geringerer KS-Menge mit positivem Einfluss auf KS-Entsorgungskosten (Verfahren sind aufgrund dieser positiven Einflüsse auf die Betriebsführung zu mindestens 100 % kostendeckend)

KOMPATIBILITÄT INFRASTRUKTUR



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Einfluss auf heutige Entsorgungslandschaft		
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Ostara Pearl Struvia	4	KS nach P-Extraktion auf ARA für alle drei Verwertungswege (Zementwerk, KVA, SVA) nach wie vor uneingeschränkt verfügbar
Kompatibilität mit ARA-Betrieb		
Airprex Crystallactor Ekobalans NuReSys Ostara Pearl Struvia	2	Verfahren prinzipiell für alle ARA-Größen geeignet (entsprechend auch dezentrale Einsatzmöglichkeiten; allerdings bei ARA < 50 000 EW ist Wirtschaftlichkeit problematisch); setzt jedoch biologische P-Elimination auf ARA (Bio-P) voraus Platzbedarf: < 1000 m ² für typische Anlage Knowhow: verhältnismässige Zusatzausbildung für ARA Personal erforderlich

KOMPATIBILITÄT MIT RECHTLICHEN RAHMENBEDINGUNGEN



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Zulassungsanforderungen Produkte		
Airprex Ostara Pearl	3	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger in der Regel eingehalten (möglicherweise organische Schadstoffe im Schlammanteil des Struvit-Produkts) Derzeit keine Zulassung von Struvit für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (nicht auf Betriebsmittelliste) Struvit-Produkte aus beiden Verfahren verfügen über REACH-Registrierung (in die sich andere Verfahren kostengünstig einkaufen könnten) Potenzial: EU-Zulassung für den biologischen Landbau wird derzeit für die Produkte dieser Technologie-Gruppe geprüft
Crystallactor Ekobalans NuReSys Struvia	2	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger in der Regel eingehalten (möglicherweise organische Schadstoffe im Schlammanteil des Struvit-Produkts) Derzeit keine Zulassung von Struvit für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (nicht auf Betriebsmittelliste) Struvit-Produkte aus diesen Verfahren verfügen über keine REACH-Registrierung Potenzial: EU-Zulassung für den biologischen Landbau wird derzeit für die Produkte dieser Technologiegruppe geprüft; Erlangung der REACH-Registrierung durch kostengünstigen Einkauf in bestehende Registrierung von Airprex und Ostara Pearl

Übergeordnete Beurteilungsaspekte

ENTSORGUNGSSICHERHEIT

Grundsätzlich ist die Entsorgungssicherheit als hoch einzustufen (vgl. aber auch Ausführungen zu den beiden anderen übergeordneten Kriterien):

- Verfahren eignen sich ausschliesslich für die Behandlung von Klärschlamm bzw. Schlammwasser (kein Tier- und Knochenmehl und sonstige Biomasse)
- + Keine zusätzlichen Abfälle zum Klärschlamm, welcher unverändert mit bestehender Infrastruktur entsorgt werden kann (mit gleichzeitig besserer Entwässerbarkeit des KS bei Kristallisation aus nicht entwässertem KS)
- + International vielfach bewährte und einfache Verfahrensansätze mit hoher Betriebssicherheit
- + Ausreichend grosser und diverser Absatzmarkt für das rückgewonnene Struvit (Struvite aus AirPrex und Ostara verfügen über REACH-Zertifizierung, was für Absatz im Ausland erforderlich ist)
- + Die Verfahren sind kostendeckend umsetzbar, hauptsächlich wegen positivem Einfluss auf Betriebs- bzw. Unterhaltskosten und Schlamm Entsorgungskosten

KOMPATIBILITÄT MIT BESTEHENDEN INFRASTRUKTUREN UND RÄUMLICHEN GEGEBENHEITEN

Die Kompatibilität ist insgesamt als sehr gering einzuordnen:

- Verfahren ist wenig bis nicht kompatibel mit Prozessstrukturen der Schweizer ARA-Landschaft, weil schweizweit lediglich auf 4 ARA eine biologische P-Elimination erfolgt (Funktionsweise der Verfahren setzt biologische P-Elimination jedoch voraus)
- + Die variabel kleine bis grossskalige Umsetzbarkeit der Verfahren ist kompatibel mit unterschiedlichen regionalen Gegebenheiten (dezentralste Umsetzungsvariante, die aber auch auf ARA > 50000 EW beschränkt ist)
- + Bestehende Entsorgungsinfrastrukturen (Zementwerk inkl. Trocknungsanlagen, SVA, KVA) für Entsorgung des P-abgereicherten Klärschlammes weiterhin unverändert nutzbar

BEITRAG ZUR SCHWEIZER KREISLAUFSCHLIESSUNG

Der Beitrag ist stark limitiert:

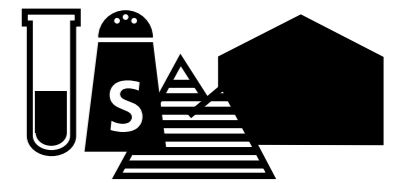
- Geringer Rückgewinnungsgrad von max. 15 % bei gleichzeitiger Beschränkung auf die Behandlung von Klärschlamm bzw. Schlammwasser
- In weniger als 1 % der Schweizer ARA umsetzbar aufgrund der Voraussetzung einer biologischen P-Elimination
- Potenzielle Ausbringung von im Produkt enthaltenen organischen Schadstoffen in die Umwelt (Ausnahme: Crystal Green® von Ostara Pearl)

Grundlagen

Dikov et al. (2014), ECHA (2010), Ewert et al. (2014), Fux et al. (2015), Gerhard (2013), Hermann (2009), Hukari et al. (2016), Kabbe (2015), Kraus & Seis (2015), Montag et al. (2015), Pinnekamp et al. (2011), Remy & Jossa (2015), Spoerri et al. (2016)

02

Säure-Aufschluss von Klärschlamm mit anschliessender Kristallisation



Diese Verfahren basieren auf einem Säure-Aufschluss von KS, um Phosphor in Lösung zu bringen. Beim Carbonic Acid Verfahren wird Kohlensäure unter Druck eingesetzt, welche im Prozess weitgehend zurückgewonnen wird; das Verfahren kommt bei Klärschlamm vor der Entwässerung zum Einsatz. Da Schwermetalle mit Kohlensäure nicht gelöst werden, landen sie auch nicht im Produkt. Bei den übrigen Verfahren wird Schwefel- oder Salzsäure eingesetzt und im Prozess weitgehend verbraucht; die Verfahren kommen bei entwässertem Klärschlamm zum Einsatz. Die Säure löst auch Schwermetalle, diese werden durch Komplexbildung und sequentielle Fällung entfernt.

Die Verfahren funktionieren auf allen ARAs unabhängig von der vorgängigen P-Ausfällung. Anschliessend wird das gelöste P und N durch Zugabe von Magnesium und durch eine pH-Anhebung (u. a. mit Natronlauge) in einem Rühr- oder Wirbelschichtreaktor zu Struvit kristallisiert oder zu CaP ausgefällt und ausgetragen. Nach dem P-Recycling kann der zurückbleibende Schlamm mit konventionellen Methoden weiterverwertet werden.

Übersicht über die Technologien und Praxisbeispiele

TECHNOLOGIE	BEISPIEL		
	PRODUKT	STANDORT	STATUS
Klärschlamm vor Entwässerung Carbonic Acid Process (Budenheim)	Calciumhydrogenphosphat (DCP) CaHPO_4	ARA Mainz Mombach (D)	Demonstrationsanlage vor Inbetriebnahme
Klärschlamm nach Entwässerung Gifhorer Verfahren Stuttgarter Verfahren	Struvit $(\text{NH}_4)\text{Mg}[\text{PO}_4] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	ARA Gifhorn (D) ARA Offenburg (D)	Gifhorn: Demonstrationsanlage zeitweise in Betrieb Offenbach: Demonstrationsanlage im ARA-Nebenstrom in Betrieb

Bewertungsprofil

TECHNOLOGIE



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Rückgewinnungsgrad		
Carbonic Acid Process Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	2	38 bis 50 % (abhängig vom Säureeinsatz und vorgängiger P-Ausfällung: Bio-P > Al-Fällung > Fe-Fällung) Potenzial: Bei Stuttgarter und Gifhorner Verfahren sind potenziell höhere Rückgewinnungsgrade möglich, allerdings mit negativen Folgen für Wirtschaftlichkeit, Schlammverwertung und Umweltbilanz Der Carbonic Acid Process erreicht in den nächsten Jahren voraussichtlich > 50 % Rückgewinnungsrate ohne nachteilige Auswirkungen auf den ARA-Betrieb.

Inputflexibilität

Carbonic Acid Process Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	2	Klärschlamm von allen ARA-Typen
--	----------	---------------------------------

PRODUKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Produktqualität		
Carbonic Acid Process	4	Dicalciumphosphat mit 30 bis 45 % P_2O_5 . Wasserlöslichkeit < 5 %, Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeit > 90%. Pulverförmige Beschaffenheit eignet sich als Ausgangsmaterial für Düngerherstellung Direkte Verwendung als landwirtschaftlicher Dünger erfordert Vorbehandlung (granulieren). Recyclingdünger-Grenzwerte der ChemRRV eingehalten; eine Belastung mit organischen Schadstoffen ist nicht ganz auszuschliessen.
Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	3	Struvit mit 25 bis 28 % P_2O_5 . Wasserlöslichkeit: < 5 %, Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeit: > 80 % Die ungleichförmige Beschaffenheit des Produkts erfordert je nach Abnehmer einen Verarbeitungsschritt (mahlen und granulieren) Recyclingdünger-Grenzwerte der ChemRRV für Schwermetalle eingehalten

MARKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Marktgröße und -Diversität		
Carbonic Acid Process Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	3	Dünger (NP-Dünger mit Mg bzw. Struvit): < 1000 t pro Jahr im Inland; > 5000 t pro Jahr in der EU (aktuell noch vergleichsweise geringe Akzeptanz für direkte Anwendung in Landwirtschaft) Ausgangsmaterial für Düngerindustrie: > 5000 t pro Jahr im Inland; > 5000 t pro Jahr in der EU

UMWELT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Chemikalieneinsatz		
Carbonic Acid Process	2	Pro t P: ca. 100 kg Kalkhydrat Kalkhydrat als Gefahrenstoff klassifiziert Für CO_2 Verbrauch liegen noch keine Daten vor, voraussichtlich zu 80 % wiederverwertet.
Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	1	Pro t P (bezogen auf 38 % Rückgewinnung): 9.1 t Schwefelsäure (75 %), 1.6 t Magnesiumoxid (92 %), 10.2 t Natronlauge (25 %), 8,4 t Zitronensäure (50 %) Mit Ausnahme von MgO alle als Gefahrenstoffe klassifiziert

Energiebedarf

Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	2	5000 bis 6500 kWh pro t P (für elektrische Antriebe und Wärme)
Carbonic Acid Process	–	Noch nicht bekannt

Abfall

Carbonic Acid Process Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	4	Keine zusätzlichen Abfälle zum KS (P-entfrachteter KS) Carbonic Acid Process: geringere Menge bei aus dem nicht entwässertem KS kristallisierenden Verfahren aufgrund verbesserter Entwässerung des KS Gifhorner Verfahren, Stuttgarter Verfahren: weist wegen saurer Hydrolyse tiefen pH-Wert auf, was Entsorgung schwieriger macht und Eignung für Verwertung in ZW möglicherweise beeinträchtigt
--	----------	---

WIRTSCHAFTLICHKEIT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Investitionsbedarf		
Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	2	> 1500 CHF pro t P ₂ O ₅
Carbonic Acid Process	3	> 1000 CHF pro t P ₂ O ₅ (Schätzung)
Operative Kosten		
Carbonic Acid Process	4	> 1000 CHF pro t P ₂ O ₅
Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	1	> 5000 CHF pro t P ₂ O ₅ (dominiert von Chemikalien)
Produktertrag		
Carbonic Acid Process Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	1	Carbonic Acid Process: Verkauf von DCP als Rohstoff für Düngerherstellung zu 30 % bis 50 % vom handelsüblichen Marktpreis von Rohphosphat: Marktpreis Rohphosphat 350 bis 450 CHF pro t P ₂ O ₅ Übrige Verfahren: Verkauf von Struvit als Dünger zu 15 bis 30 % vom handelsüblichen Marktpreis von P-Dünger: Marktpreis P-Dünger bei 900 bis 1500 CHF pro t P ₂ O ₅
Zusatzerträge/-nutzen		
Carbonic Acid Process	2	Vermeidung von Unterhaltskosten und Betriebsstörungen durch die Reduktion von spontanen Struvit-Ausfällungen in Rohrleitungen. Bei Kristallisation aus nicht entwässertem KS (Ostara Pearl, Struvia, Crystalactor, NuReSys): bessere Entwässerung führt zu höherer Trockensubstanz und entsprechend geringerer Klärschlamm-Menge mit positivem Einfluss auf KS-Entsorgungskosten
Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	1	Allenfalls sogar Zusatzkosten wegen geringerem pH-Wert des KS und problematischen Rückflüssen in die Kläranlage

KOMPATIBILITÄT INFRASTRUKTUR



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Einfluss auf heutige Entsorgungslandschaft		
Carbonic Acid Process Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	4	KS nach P-Extraktion auf ARA für alle drei Verwertungswege (Zementwerk, KVA, SVA) nach wie vor uneingeschränkt verfügbar (Stuttgarter und Gifhorner Verfahren: Verwertungsmöglichkeit von angesäuertem KS im ZW nicht abschliessend geklärt)

Kompatibilität mit ARA-Betrieb

Carbonic Acid Process Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	2	Verfahren prinzipiell für verschiedene ARA-Grössen geeignet (entsprechend auch dezentrale Einsatzmöglichkeiten; allerdings bei ARA < 50 000 EW ist Wirtschaftlichkeit problematisch) Platzbedarf: >1000 m ² (Schätzung bei Carbonic Acid Process) Knowhow: verhältnismässige Zusatzausbildung für ARA Personal erforderlich (Carbonic Acid Process); umfangreiche Zusatzausbildung bei den anderen beiden Verfahren (mehrstufiger chemischer Prozess)
--	----------	--

KOMPATIBILITÄT MIT RECHTLICHEN RAHMENBEDINGUNGEN



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Zulassungsanforderungen Produkte		
Carbonic Acid Process Gifhorner Verfahren Stuttgarter Verfahren	2	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger in der Regel eingehalten Derzeit keine Zulassung von Struvit für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (nicht auf Betriebsmittelliste) Keines der Produkte verfügt über REACH-Registrierung

Übergeordnete Beurteilungsaspekte

ENTSORGUNGSSICHERHEIT

Ist für die verschiedenen technologischen Ausprägungen unterschiedlich einzuordnen.

Carbonic Acid Process weist eine relativ hohe Entsorgungssicherheit auf:

- Verfahren eignen sich ausschliesslich für die Behandlung von KS (kein Tier- und Knochenmehl, sonstige Biomasse)
- + Keine zusätzlichen Abfälle zum KS, welcher nach P-Extraktion besser entwässerbar und daher im Vergleich zu heute günstiger entsorgbar ist
- Voraussichtlich komplexe Verfahrensführung, die zurzeit noch in Pilotanlagen weiter erprobt wird
- + Ausreichend grosser und diverser Absatzmarkt für das rückgewonnene Dicalciumphosphat in Schweiz u. EU
- + Die Verfahren sind kostendeckend umsetzbar, hauptsächlich wegen positivem Einfluss auf Betriebs- bzw. Unterhaltskosten und Schlamm Entsorgungskosten

Gifhorner Verfahren und Stuttgarter Verfahren weisen eine mässige Entsorgungssicherheit auf:

- Verfahren eignen sich ausschliesslich für die Behandlung von KS (kein Tier- und Knochenmehl, sonstige Biomasse)
- 0 Keine zusätzlichen Abfälle zum KS; dieser wird aufgrund des tiefen pHs mit bestehender Infrastruktur schwieriger verwertbar
- Voraussichtlich komplexe Verfahrensansätze, die zurzeit noch in Pilotanlagen weiter erprobt wird
- + Ausreichend grosser und diverser Absatzmarkt für das rückgewonnene Struvit in der Schweiz u. EU
- Verfahren sind bei weitem nicht kostendeckend, der überwiegende Anteil der Kosten müsste über geeignete Finanzierungsinstrumente gedeckt werden

KOMPATIBILITÄT MIT BESTEHENDEN INFRASTRUKTUREN UND RÄUMLICHEN GEGEBENHEITEN

Die Kompatibilität ist insgesamt als hoch einzuordnen:

- + Verfahren sind kompatibel mit Prozessstrukturen der Schweizer ARA-Landschaft, da Umsetzung unabhängig von der Art der P-Elimination
- + Die vergleichsweise kleine bis grossskalige Umsetzbarkeit der Verfahren ist kompatibel mit unterschiedlichen regionalen Gegebenheiten (dezentralste Umsetzungsvariante, die aber auch auf ARA > 50 000 EW beschränkt ist); aufgrund des grossen Platzbedarfs und der komplexen Verfahrensführung sind die Verfahren Schweizweit vor allem zentralisiert auf grösseren ARAs, bei SVAs oder bei ZW interessant.
- + Bestehende Entsorgungsinfrastrukturen (Zementwerk inkl. Trocknungsanlagen, SVA, KVA) für Entsorgung des P-abgereicherten KS weiterhin nutzbar; die Verwertungsmöglichkeiten von saurem KS im Zementwerk muss noch geklärt werden)

BEITRAG ZUR SCHWEIZER KREISLAUFSCHLIESSUNG

Der Beitrag ist als mässig einzuordnen:

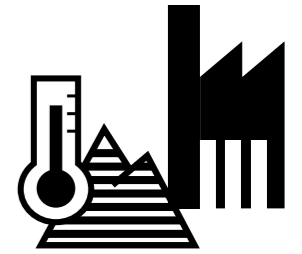
- 0 Mässiger Rückgewinnungsgrad von ca. 40 % bei gleichzeitiger Beschränkung auf die Behandlung von KS
- Verhältnismässig hoher Chemikalienverbrauch beim Gifhorner und Stuttgarter Verfahren mit negativem Einfluss auf Umweltnutzen der Kreislauflösung

Grundlagen

Dikov et al. (2014), ECHA (2010), Ewert et al. (2014), Fux et al. (2015), Gerhard (2013), Hermann (2009), Hukari et al. (2016), Kabbe (2015), Kraus & Seis (2015), Montag et al. (2015), Pinnekamp et al. (2011), Remy & Jossa (2015), Spoerri et al. (2016)

03

Thermochemischer Aufschluss von Klärschlamm



Diese Verfahren basieren auf der energetischen Verwertung von getrocknetem Klärschlamm und Tier- und Knochenmehl, mit einem (Teil-)Aufschluss des Phosphats, der sich nach dem Prozess in der Asche bzw. Schlacke (Mephrec, Kubota) befindet. Pyreg und Susteen nutzen relativ niedrige Temperaturen von 650 bis 700 °C. Kubota und Mephrec nutzen eine Schmelze von über 1250 °C; durch die hohen Temperaturen können Schwermetalle abgeschieden werden (flüchtige Metalle werden evaporiert, nichtflüchtige bilden eine Metallschmelze). Beide Verfahren erreichen nicht ganz die Energieausbeute einer modernen Schlammverbrennungsanlage, liefern aber ein phosphorhaltiges Schlacke-Produkt.

Übersicht über die Technologien und Praxisbeispiele

TECHNOLOGIE	BEISPIEL		
	PRODUKT	STANDORT	STATUS
Kubota	P-haltige Schlacke Ca-Si-Mischphosphat	Toyama, Fukuoka, Osaka (J)	6 grosstechnische Anlagen in Betrieb und 1 Anlage in Bau
Mephrec	P-haltige Schlacke Ca-Si-Mischphosphat	ARA Nürnberg (D)	Demonstrationsanlage in Inbetriebnahme
Pyreg	P-haltige Biokohle Ca-Al-Mischphosphat	ARA Linz-Unkel (D)	Demonstrationsanlage im ARA- Nebenstrom im zeitweisen Betrieb
Susteen	P-haltige Biokohle Ca-Al-Mischphosphat	ARA Altenrhein (CH)	Demonstrationsanlage geplant

Bewertungsprofil

TECHNOLOGIE



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Rückgewinnungsgrad		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	4	Pyreg: > 90 % Kubota, Mephrec: 75 bis 90 % (abhängig von P-Verlusten in den Filterstaub und die Metallfraktion)
Inputflexibilität		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	3	Getrockneter Klärschlamm (> 70 % TS) und Tier- und Knochenmehl Pyreg kann kein Tiermehl der Kat. 1 verwerten – (keine Zulassung, kein vollständiger Ausbrand)

PRODUKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Produktqualität		
Kubota Mephrec	3	Ca-Si-Mischphosphat mit 12 bis 20 % P ₂ O ₅ (abhängig vom P-Gehalt im Klärschlamm und verwendeten Zusatzstoffen) Wasserlöslichkeit < 5 %, Löslichkeit in Zitronensäure > 90 % (Angaben zur Neutral-Ammoncitrat-Löslichkeit fehlen) Eignet sich als Ausgangsmaterial für die Düngerherstellung Direkte Verwendung als landwirtschaftlicher Dünger erfordert voraussichtlich Vorbehandlung der Schlacke (granulieren) Recyclingdünger-Grenzwerte der ChemRRV eingehalten oder nur leicht überschritten (Cu, Ni); keine organischen Verunreinigungen
Pyreg Susteen	1	Biokohle mit 10 bis 15 % P ₂ O ₅ (abhängig vom P-Gehalt im Klärschlamm und Verfahrenstemperatur) Keine Angaben zur Düngerwirkung; geringe Wasserlöslichkeit, bei tiefen Verfahrenstemperaturen gute Neutral-Ammonium-citrat-Löslichkeit Hoher Schwermetallgehalt, insb. Cu, Ni und Zn; die Grenzwerte für Recyclingdünger der ChemRRV für Schwermetalle nicht eingehalten; Belastung mit organischen Schadstoffen möglich Die Beschaffenheit der Biokohle erfordert für die Verwendung als Dünger in der Landwirtschaft voraussichtlich Vorbehandlung (mahlen und granulieren) Potenzial: Biokohle als Brennstoff oder als Bodenverbesserer, sofern bereits der Rohstoff die Grenzwerte der ChemRRV einhält

MARKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Marktgrösse und -Diversität		
Kubota Mephrec	3	Dünger (Ca-Si-Mischphosphat): < 2000 t pro Jahr im Inland; > 5000 t pro Jahr in der EU (aktuell noch vergleichsweise geringe Akzeptanz für direkte Anwendung in Landwirtschaft) Ausgangsmaterial für Düngerindustrie: 0 t pro Jahr im Inland; > 5000 t pro Jahr in der EU
Pyreg Susteen	1	Derzeit keine Anwendung bekannt Dünger: Produkt entspricht hinsichtlich Schadstoffgehalt und Löslichkeit weitgehend der Asche aus Schlammverbrennung mit geringer Löslichkeit und relativ hohen Schwermetallgehalten. Ausgangsmaterial für Düngerherstellung: aufgrund tiefen P-Gehalts und hohem Schadstoffgehalt vermutlich schwierig.

UMWELT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Chemikalieneinsatz		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	4	Kubota, Mephrec: Pro t P: ca. 2000 kg Si/Ca als Schlackenbildner Nicht als Gefahrenstoff klassifiziert Pyreg, Susteen: Gemäss Hersteller keine Zusätze (jedoch teilweise widersprüchliche Herstellerangaben)
Energiebedarf		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	3	Kubota, Mephrec: ca. 3600 kWh pro t P (ohne Trocknung, geschätzter Wert) Pyreg, Susteen: Noch keine belastbaren Zahlen verfügbar (gemäss Herstellerangaben wird Wärmeüberschuss aus Klärschlammfäulung zur KS-Trocknung eingesetzt)
Abfall		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	1	Schwermetallreiche Flugasche (0,6 bis 1 t pro t P), deren Verwertung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht geklärt ist (Menge > P im Produkt, Sonderabfall) Potenzial: Aufbereitung der Flugasche durch saure Wäsche und Zn-Recycling wahrscheinlich möglich; abgereicherte Flugasche erfüllt möglicherweise Anforderungen an Inerstoff.

WIRTSCHAFTLICHKEIT

	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Investitionsbedarf		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	1	> 1500 CHF pro t P ₂ O ₅ (einschliesslich der thermischen Schlammverwertung)
Operative Kosten		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	2	2000 bis 5000 CHF t P ₂ O ₅ (Schätzung) (Die Kosten der thermischen Verwertung sind nicht zu trennen von den Kosten der P-Rückgewinnung. Die Kosten der Kubota Anlagen in Japan sind nicht übertragbar auf europäische und schweizerische Verhältnisse).
Produktertrag		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	1	Verkauf als Dünger zu 15 bis 30 % vom handelsüblichen Marktpreis von P-Dünger: Marktpreis P-Dünger bei 900 bis 1500 CHF pro t P ₂ O ₅ Verkauf als Ausgangsmaterial zur Düngerherstellung zu 30 bis 50 % vom handelsüblichen Marktpreis von Rohphosphat: Marktpreis Rohphosphat bei 350 bis 450 CHF pro t P ₂ O ₅
Zusatzerträge/-nutzen		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	2	Wegfall der bisherigen KS-Entsorgungskosten, da KS nach P-Extraktion nicht mehr zu entsorgen

KOMPATIBILITÄT INFRASTRUKTUR

	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Einfluss auf heutige Entsorgungslandschaft		
Kubota Mephrec Pyreg Susteen	1	Kubota, Pyreg, Susteen: Heizwert und mineralischer Gehalt vom KS für keinen der drei Verwertungswege verfügbar (Pyreg- und Susteen-Anlagen zu klein für Realisierung bei Zementwerk) Mephrec: Heizwert des KS für SVA und KVA nicht verfügbar, energetische Nutzung des bei Schmelzvergasung anfallenden Gichtgases in Klinkerherstellung, falls Realisierung bei Zementwerk (geringer Heizwert)

Kompatibilität mit ARA-Betrieb

Pyreg Susteen	3	Verfahren prinzipiell für verschiedene ARA-Grössen geeignet (entsprechend auch dezentral Einsatzmöglichkeiten; allerdings bei ARA < 50 000 EW ist Wirtschaftlichkeit problematisch) Platzbedarf: <1000 m ² (Angaben ohne Lagerflächen für Chemikalien und Produkte) Knowhow: verhältnismässige Zusatzausbildung für ARA Personal erforderlich
Kubota Mephrec	2	Verfahren nur für sehr grosse ARA (> 500 000 EW) geeignet (aber auch gut ausserhalb ARA umsetzbar) Platzbedarf: > 1000 m ² (Angaben ohne Lagerflächen für Chemikalien und Produkte) Knowhow: Umfangreiche Zusatzausbildung für ARA-Personal erforderlich (metallurgischer Prozess)

KOMPATIBILITÄT MIT RECHTLICHEN RAHMENBEDINGUNGEN

	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Zulassungsanforderungen Produkte		
Kubota Mephrec	2	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger von Ca-Si-Mischphosphaten eingehalten Derzeit keine Zulassung für Ca-Si-Mischphosphate für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (nicht auf Betriebsmittelliste) Produkt verfügt über keine REACH-Registrierung
Pyreg Susteen	1	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger von Biokohle nicht eingehalten Derzeit keine Zulassung für Biokohle für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (nicht auf Betriebsmittelliste; aufgrund der hohen Schadstoffgehalte wegen fehlender Abreicherung von Schwermetallen nicht zu erwarten) Produkt verfügt über keine REACH-Zertifizierung

Übergeordnete Beurteilungsaspekte

ENTSORGUNGSSICHERHEIT

Die Entsorgungssicherheit ist bei dieser Verfahrensgruppe als vergleichsweise gering einzustufen:

- + Verfahren eignen sich grundsätzlich für die Behandlung aller P-reichen Abfälle (KS, Tier- und Knochenmehl und sonstige Biomasse)
- Bedeutende Mengen an zusätzlichen Sonderabfällen, deren Entsorgung derzeit noch nicht geklärt ist
- Hohe Komplexität der Verfahren (Frage der Betriebssicherheit; nur Kubota ist in Japan in mehreren Anlagen in Einsatzumgebung umgesetzt)
- 0 Absatzmarkt für Recyclingprodukte ist unterschiedlich zwischen den Verfahren:
 - + Kubota, Mephrec: Ausreichend grosser und diverser Absatzmarkt für das rückgewonnene Ca-Si-Mischphosphat (vorausgesetzt, dass Export in EU möglich ist; momentan noch Akzeptanzprobleme in EU)
 - Pyreg, Susteen: Voraussichtlich schwieriger Markt und entsprechende Absatzprobleme aufgrund des hohen Schwermetallgehalts (vgl. mit KS-MV-Asche)

KOMPATIBILITÄT MIT BESTEHENDEN INFRASTRUKTUREN UND RÄUMLICHEN GEGEBENHEITEN

Die Kompatibilität mit transitorischen Voraussetzungen in CH sind für die Verfahren dieser Gruppe nur bedingt gegeben:

- Die Verfahren sind gut kompatibel mit Prozessstrukturen der Schweizer ARA-Landschaft, da Funktionsweise unabhängig von Art der P-Elimination
- + Kompatibilität mit Schweizer ARA-Landschaft:
 - + Pyreg, Susteen: Die vergleichsweise kleine bis grossskalige Umsetzbarkeit der Verfahren ist kompatibel mit unterschiedlichen regionalen Gegebenheiten (dezentralste Umsetzungsvariante, die aber auch auf ARA > 50 000 EW beschränkt ist)
 - Kubota, Mephrec: Grossskalige Umsetzung und entsprechende Schlammengen nur für sehr grosse ARA (> 500 000 EW) geeignet; sonst ausserhalb ARA
- Bestehende Entsorgungsinfrastrukturen (Zementwerk, SVA, KVA) mit Ausnahme der Trocknungsanlagen für energetische Verwertung des KS nicht mehr nutzbar

BEITRAG ZUR SCHWEIZER KREISLAUFSCHLIESSUNG

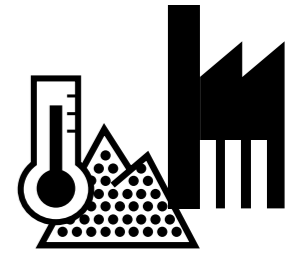
Der Beitrag ist potenziell sehr gross:

- + Hoher Rückgewinnungsgrad von bis zu 90 % und zur Behandlung aller P-reichen Abfälle geeignet: KS, Tier- und Knochenmehl, sonstige Biomasse
- Potenzielle Ausbringung von im Produkt enthaltenen Schwermetalle mit negativem Einfluss auf Umwelt-nutzen der Kreislaufösung (bei Pyreg, Susteen)

Grundlagen

Dikov et al. (2014), ECHA (2010), Fux et al. (2015), Gerhard (2013), Hermann (2009), Hosho (2016 a), Hosho (2016b), Hukari et al. (2016), Kabbe (2015), Kraus & Seis (2015), Krüger & Adam (2014), Montag et al. (2015), Pinnekamp et al. (2011), Pyreg GmbH (2016), Remy & Jossa (2015), Severin (2012), Spoerri et al. (2016), Susteen Technologies GmbH (2016)

04 Säure- Aufschluss von Klärschlamm-Asche



Die Verfahren basieren auf dem Rohstoff Asche. Sie bedürfen eines hohen P-Gehalts in der Asche; diese sollten aus der Monoverbrennung von Klärschlamm (sowie Tiermehl und Biomasse) geliefert werden. Die Verfahren unterscheiden sich bezüglich der P-Abscheidung (Säure und Fällmittel), dem Recyclingprodukt und der Schwermetallabscheidung. Reco-Phos verzichtet als einziges Verfahren auf jegliche Schwermetall-Abreicherung und liefert ein Calcium-Mischphosphat in dem P unter anderem als MCP und DCP vorliegt. Die übrigen Verfahren unterscheiden sich bezüglich des Verfahrens zur Schwermetallabscheidung (Ionentauscher oder Lösungsmittlextraktion) und liefern als Produkt Dicalciumphosphat, ein Ca-Al Mischphosphat oder Phosphorsäure.

Übersicht über die Technologien und Praxisbeispiele

TECHNOLOGIE	BEISPIEL		
	PRODUKT	STANDORT	STATUS
EcoPhos	Je nach Verfahrensführung: CaHPO_4 (Dicalciumphosphat), H_3PO_4 (Phosphorsäure)	Dunkerque (F)	Grossindustrielle Anlage (200 000 t/a) zur Produktion von Tierfutterphosphat aus Rohphosphat mit angeschlossener Verwertung von Klärschlamm-Asche als Düngemittel (40 000 t/a). Suche nach Verwertungslösung für Abfälle im Gange; vermutlich Entsorgung von Calciumchlorid im Meer
LeachPhos	Ca-Al-Mischphosphat	ARA Bern (CH)	Halbindustrieller Versuchsbetrieb auf der KVA Bern im Jahr 2014; weitere Versuchsläufe im Pilotmassstab.
Reco-Phos	Calcium-Mischphosphat; hoher Gehalt an Mono- u. Dicalciumphosphat	Zurzeit keine Anlage	Anbieter will sich unter neuem Namen neu aufstellen
TetraPhos	H_3PO_4 (Phosphorsäure)	ARA Hamburg (D)	Versuchsbetrieb im Pilotmassstab bis Ende 2016
ZAR Weiterentwicklung von LeachPhos	H_3PO_4 (Phosphorsäure)	KVA Emmenspitz (CH)	Sämtlicher KS des Kantons geht in eine moderne SVA zur Monoverbrennung. Die Aufbereitung des Recyclingprodukts zu Phosphorsäure wird in einer halbindustriellen Pilotanlage erprobt.

Bewertungsprofil

TECHNOLOGIE



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Rückgewinnungsgrad		
EcoPhos Leach-Phos TetraPhos ZAR	4	75 bis 90 % (abhängig vom Säureeinsatz; bei geringem Säureeinsatz auch tiefere Rückgewinnungsgrade möglich)
Reco-Phos	4	> 90 %
Inputflexibilität		
EcoPhos Leach-Phos Reco-Phos TetraPhos ZAR	4	P-reiche Asche aus KS-Monoverbrennung, Tier- und Knochenmehl, sonstige Biomasse

PRODUKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Produktqualität		
EcoPhos TetraPhos ZAR	4	Phosphorsäure mit > 54 % resp. > 70 % P_2O_5 (Grad der Aufkonzentrierung abhängig von Kundenanforderungen) Geeignet als Ausgangsmaterial für Düngerherstellung und Anwendungen in chemischer Industrie. Geringer Schadstoffgehalt. Die Phosphorsäure kann ohne weitere Aufbereitung zur Anwendung gelangen.
EcoPhos Leach-Phos	3	Dicalciumphosphat bzw. Ca-Al-Mischphosphat mit 31 bis 45 % P_2O_5 (abhängig vom Fällmittel: CaOH oder $Na(OH)_2$). Wasserlöslichkeit < 5 %, Neutral-Ammoncitrat-Löslichkeit > 80 % Substitut für Rohphosphat mit geringem Schadstoffgehalt, Recyclingdünger-Grenzwerte der ChemRRV voraussichtlich eingehalten. Die Beschaffenheit der Produkte erfordert für die Verwendung als Dünger in der Landwirtschaft voraussichtlich Vorbehandlung (mahlen und granulieren).
Reco-Phos	3	Calcium-Mischphosphat mit 38 % P_2O_5 Wasserlöslichkeit ca. 50 %, Neutral-Ammoncitrat-Löslichkeit > 80 % Je nach Aschequalität hoher Schadstoffgehalt, da keine Schwermetallabreicherung, Recyclingdünger-Grenzwerte der ChemRRV klar überschritten Bei Anwendung als Dünger ist ein Aufbereitungsschritt erforderlich (mahlen und granulieren).

MARKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Marktgrösse und -Diversität		
EcoPhos Leach-Phos Reco-Phos TetraPhos ZAR	3	Düngerherstellung: Phosphorsäure, resp. Mischphosphate Mono-, Dicalciumphosphat oder Mischphosphat als Ausgangsmaterial: keine Verwendung im Inland; > 5000 t P pro Jahr in der EU Chemische Industrie, Futtermittel- und Nahrungsmittelherstellung: Phosphorsäure als Rohstoff; Menge unbekannt Anwendung im Pflanzenbau, Mono-, Dicalciumphosphat oder Mischphosphat als Dünger (aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit (Ausnahme Reco-Phos) im Bio-Landbau und Gartenbau): < 2000 t P pro Jahr. im Inland; > 5000 t P pro Jahr in der EU

UMWELT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Chemikalieneinsatz		
EcoPhos Leach-Phos Reco-Phos TetraPhos ZAR	1	Pro t P: ca. 5,5 t H_3PO_4 bzw. 5,5 bis 6 t H_2SO_4 bzw. ca. 5,5 t für Leaching (je nach Technologie); ca. 3 t CaOH resp. $Na(OH)_2$ für Fällung HCl, $Ca(OH)_2$ und $Na(OH)_2$ als Gefahrenstoff klassifiziert
Energiebedarf		
EcoPhos Leach-Phos Reco-Phos TetraPhos ZAR	2	4000 bis 6000 kWh pro t P Je nach Verfahren grosser Energiebedarf zur Trocknung von Filterkuchen und Produkt (Dicalciumphosphat, Mischphosphat) bzw. zur Konzentration der Phosphorsäure; allerdings auch Energieproduktion aus der Schlammverbrennung (bei modernen Anlagen).
Abfall		
Reco-Phos	4	Keine zusätzlichen Abfälle zum KS
EcoPhos Leach-Phos TetraPhos ZAR	1	Grosse, teilweise gefährliche Abfallmengen: Gips-/Filterkuchen (Schwefelsäure, Phosphorsäure), Calciumchlorid (Salzsäure), deren Entsorgung hohen Chemikalieneinsatz oder komplexe Verfahrensführung erfordert (Menge > P im Produkt; Sonderabfall) Potenzial: Verwertung der Abfälle in der Baustoffindustrie angestrebt (erforderliche Aufbereitungsschritte in Entwicklung).

WIRTSCHAFTLICHKEIT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Investitionsbedarf		
Reco-Phos	4	< 500 CHF pro t P ₂ O ₅
EcoPhos Leach-Phos TetraPhos ZAR	2	500 bis 1000 CHF pro t P ₂ O ₅ Potenzial: < 500 CHF pro t P ₂ O ₅ bei Anlagen > 1 000 000 EW
Operative Kosten		
EcoPhos	4	< 1000 CHF pro t P ₂ O ₅ (v.a. Schwermetallabreicherung und Entsorgung der Abfälle)
Leach-Phos Reco-Phos TetraPhos ZAR	3	1000 bis 2000 CHF pro t P ₂ O ₅ (Reco-Phos: v.a. für Chemikalien; LeachPhos, TetraPhos, ZAR: v.a. Schwermetallabreicherung und Entsorgung der Abfälle) Potenzial: Reco-Phos: Verwendung von Alt-Säure für Aufschluss (möglicherweise aber höhere Schwermetallgehalten); Leach-Phos, TetraPhos, ZAR: kostengünstigere Verwertung der Abfälle in Bauindustrie
Produktertrag		
EcoPhos TetraPhos ZAR	4	Verkauf zum handelsüblichen Marktpreis von Phosphorsäure: Marktpreis Phosphorsäure bei ca. 1500 CHF pro t P ₂ O ₅ in CH (je nach Qualität); in Europa ca. 1200 CHF pro t P ₂ O ₅ Potenzial: Verkauf von Produkten kann unter Einbezug aller Nebennutzen und günstiger Abfallentsorgung/-verwertung zwischen 60 bis 120 % der Recyclingkosten decken
Leach-Phos Reco-Phos	1	Verkauf als Ausgangsmaterial für Düngerherstellung zu ca. 30 % bis 50 % des handelsüblichen Marktpreises von Rohphosphat: Marktpreis Rohphosphat bei 350 bis 450 CHF pro t P ₂ O ₅ Verkauf als Dünger zu 15 bis 30% vom handelsüblichen Marktpreis für P-Dünger: Marktpreis P-Dünger bei 900 bis 1500 CHF pro t P ₂ O ₅
Zusatzerträge/-nutzen		
EcoPhos Leach-Phos Reco-Phos TetraPhos ZAR	2	Wegfall der bisherigen KS-Entsorgungskosten, da KS nach P-Extraktion nicht mehr zu entsorgen

KOMPATIBILITÄT INFRASTRUKTUR



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Einfluss auf heutige Entsorgungslandschaft		
EcoPhos Leach-Phos Reco-Phos TetraPhos ZAR	2	Zementwerk: Nutzung der Verbrennungswärme für Klinkerherstellung, falls vorgeschaltete KS-Monoverbrennung und nass-chemische P-Extraktion auf Zementwerk realisiert; Rückstände aus P-Extraktion als alternatives Rohmaterial SVA: Extraktion aus Asche erfordert die Monoverbrennung in einer SVA (kompatibel mit bestehenden Schlamm-MV) KVA: calorischer Wert des KS für KVA nicht mehr verfügbar
Kompatibilität mit ARA-Betrieb		
Reco-Phos	3	Verfahren nur für ARA > 50 000 EW geeignet (muss nicht zwingend auf ARA sein) Platzbedarf: <1000 m ² für typische Anlage mittlerer Grösse Knowhow: Verhältnismässige Zusatzausbildung für ARA-Personal erforderlich
EcoPhos Leach-Phos TetraPhos ZAR	2	Verfahren nur für ARA > 50 000 EW geeignet (muss nicht zwingend auf ARA sein) Platzbedarf: >1000 m ² für typische Anlage mittlerer Grösse Knowhow: Umfangreiche Zusatzausbildung für ARA-Personal erforderlich

KOMPATIBILITÄT MIT RECHTLICHEN RAHMENBEDINGUNGEN



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Zulassungsanforderungen Produkte		
EcoPhos TetraPhos ZAR	4	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger für Phosphorsäure nicht relevant (erst der daraus hergestellte Dünger unterliegt den Zulassungsanforderungen für Recyclingdünger) Zulassung für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau für Phosphorsäure nicht relevant Phosphorsäure aus P-Rückgewinnung benötigt voraussichtlich separate REACH-Zertifizierung
EcoPhos Leach-Phos	3	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger für Dicalciumphosphat (bei neusten Verfahrensführungen) eingehalten Derzeit keine Zulassung von Dicalciumphosphat für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (nicht auf Betriebsmittelliste) Produkt verfügt über keine REACH-Zertifizierung
Reco-Phos	1	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger von Calcium-Mischphosphat nicht eingehalten Derzeit keine Zulassung von Calcium-Mischphosphat für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (nicht auf Betriebsmittelliste) Produkt verfügt über keine REACH-Zertifizierung

Übergeordnete Beurteilungsaspekte

ENTSORGUNGSSICHERHEIT

Die Entsorgungssicherheit dieser Verfahren ist relativ hoch einzustufen:

- + Verfahren eignen sich grundsätzlich für die Behandlung aller P-reichen Abfälle (KS, Tier- und Knochenmehl und sonstige Biomasse)
- Bedeutende Mengen an zusätzlichen Sonderabfällen (Ausnahme: Reco-Phos), deren Entsorgung derzeit noch nicht geklärt ist; optimierte Entsorgung über die Bauindustrie ist bei verschiedenen Verfahren Gegenstand laufender Weiterentwicklungen
- 0 Hohe Komplexität der Verfahren (Frage der Betriebssicherheit; Ausnahme: Reco-Phos); allerdings bereits gut erprobt und verlässlich
- + Ausreichend grosser und diverser Absatzmarkt für die rückgewonnenen Produkte; v.a. Phosphorsäure ist zu guten Marktpreisen «quasi unerschöpflich» absetzbar in EU

KOMPATIBILITÄT MIT BESTEHENDEN INFRASTRUKTUREN UND RÄUMLICHEN GEGEBENHEITEN

Die Umsetzung dieser Verfahren ist relativ gut kompatibel:

- + Die Verfahren sind gut kompatibel mit Prozessstrukturen der Schweizer ARA-Landschaft, da Funktionsweise unabhängig von Art der P-Elimination
- + Grossskalige Umsetzung und entsprechend hohe KS-Mengen lassen keine dezentrale P-Rückgewinnung zu (überregionale P-Rückgewinnung); auf für CH-Verhältnisse sehr grossen ARA aber auch ausserhalb ARA umsetzbar
- + Geringer Einfluss auf ARA-Betrieb (KS geht weiter zur KS-MV oder neu zu einer KS-MV)
- + Aufgrund erforderlichen KS-MV sind die Verfahren mit bestehenden KS-MV (SVA) hoch kompatibel; auch andere Schlämme behandelnde SVA müssten auf MV umstellen oder aber auf KS als Input verzichten
- Heizwert des KS für Zementwerke und KVA nicht mehr verfügbar (ausser Realisierung der KS-MV mit P-Extraktion aus Asche vor Ort und energetische Nutzung der Verbrennungswärme)

BEITRAG ZUR KREISLAUFSCHLIESSUNG

Der Beitrag ist je nach Verfahrensführung bedeutend bis sehr hoch:

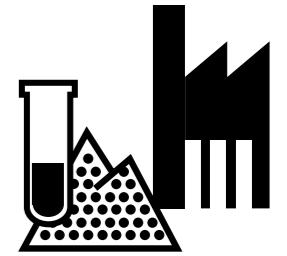
- + Mittlerer bis sehr hoher Rückgewinnungsgrad zwischen 50 und > 90 % (je nach Verfahrensführung bzw. Säureeinsatz) und zur Behandlung aller P-reichen Abfälle geeignet: KS, Tier- und Knochenmehl, sonstige Biomasse
- Risiko der Ausbringung von Schadstoffen wegen fehlender Abreicherung von Schwermetallen (betrifft nur Reco-Phos)

Grundlagen

Adam et al. (2015), Adam et al. (2010), Dikov et al. (2014), ECHA (2010), Fux et al. (2015), Gerhard (2013), Hermann (2009), Herzel et al. (2015), Hukari et al. (2016), Kabbe (2015), Kraus & Seis (2015), Krüger & Adam (2014), Lehmkuhl & Lebek (2015), Montag et al. (2015), Pinnekamp et al. (2011), Remy & Jossa (2015), Severin (2012), Sonveaux (2016), Takhim (2014), Spoerri et al. (2016)

05

Thermochemischer Aufschluss von Klärschlamm-Asche



Die Verfahren basieren auf der thermochemischen Verwertung von phosphorreicher Asche aus der Mono-Verbrennung (oder -Vergasung) von Klärschlamm, Tiermehl oder anderer Biomasse. ASH-DEC nutzt Temperaturen von rund 950 °C und ein Alkalisalz zum Aufschluss des Phosphors und zur Abreicherung flüchtiger Schwermetalle (As, Cd, Hg und Zn). RecoPhos P₄ bringt dagegen Phosphor und flüchtige Schwermetalle in die Gasphase; zurück bleibt eine Schlacke, die sich als Zement-Zuschlagsstoff eignet. Die Schwermetalle werden aus dem Gas abgetrennt und elementarer Phosphor gewonnen, dass zu Phosphorsäure hydrolisiert werden kann.

Übersicht über die Technologien und Praxisbeispiele

TECHNOLOGIE	BEISPIEL		
	PRODUKT	STANDORT	STATUS
ASH DEC	Calciumhydrogenphosphat (DCP) CaHPO ₄	Leoben (A)	2-jähriger Pilotbetrieb und wiederkehrender, halbindustrieller Versuchsbetrieb
RecoPhos (P4)	Weisser Phosphor P ₄ , oder hochreine Phosphorsäure H ₃ PO ₄	Pilotanlage Leoben (A)	Mehrmonatiger Pilotbetrieb im Kleinmassstab, industrielle Pilotanlage in Planung

Bewertungsprofil

TECHNOLOGIE



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Rückgewinnungsgrad		
ASH DEC RecoPhos (P4)	4	ASH DEC: > 90 % RecoPhos P4: 75 bis 90 % (abhängig von P-Verlusten in die Schlacke)

Inputflexibilität

ASH DEC RecoPhos (P4)	4	P-reiche Asche aus KS-Monoverbrennung, Tier- und Knochenmehl, sonstige Biomasse
----------------------------------	----------	---

PRODUKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Produktqualität		
RecoPhos (P4)	4	Zwei Produkte sind möglich, beide mit sehr geringem Schadstoffgehalt: – Hochreine Phosphorsäure mit > 70 % P ₂ O ₅ – Weisser Phosphor P4 (100% P ₂ O ₅)
ASH DEC	3	Calciumnatriumphosphat mit 16 bis 20 % P ₂ O ₅ , (abhängig vom P-Gehalt der Asche. Wasserlöslichkeit < 5 %, Neutral-Ammoncitrat-Löslichkeit > 80 %, (Produkt entspricht Rhenaniaphosphat und anderen Thermophosphaten) Recyclingdünger-Grenzwerte der ChemRRV nicht eingehalten (Cu, Ni, Zn). Herstellung von streufähigem Granulat gehört zum Lieferumfang der Anlage Potenzial: Zusätzliche Abscheidung von Ni, Cu und Zn möglich, um ChemRRV Grenzwerte für Recyclingdünger einzuhalten (Produkt erprobt als Zuschlagsstoff für Ammonsalpeter von Lonza zur Herstellung von NP-Dünger)

MARKT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Marktgröße und -Diversität		
RecoPhos (P4)	3	Düngerherstellung, Phosphorsäure als Rohstoff: kein Abnehmer im Inland, > 5000 t pro Jahr in der EU Industrie (Futtermittelherstellung, chemische Industrie, Nahrungsmittelindustrie), Phosphorsäure als Rohstoff: < 3000 t pro Jahr im Inland, > 5000 t pro Jahr in der EU. P ₄ als Rohstoff: > 5000 t pro Jahr in der EU
ASH DEC	2	Als Dünger: Calciumnatriumphosphat: < 1000 t pro Jahr im Inland, > 5000 t pro Jahr in EU (tiefer P-Gehalt und geringe Wasserlöslichkeit dämpfen Interesse) Düngerherstellung, Calciumnatriumphosphat als Rohstoff: > 5000 t pro Jahr im Inland und in der EU (tiefer P-Gehalt und geringe Wasserlöslichkeit dämpfen Interesse)

UMWELT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Chemikalieneinsatz		
ASH DEC RecoPhos (P4)	4	RecoPhos: Pro t P: 1,5 bis 3 t Kohlenstoffträger als Reduktionsmittel (z. B. trockener Klärschlamm) und Schlackenbildner (Si-Verbindung) ASH DEC: Pro t P: 3,3 t Na ₂ SO ₄ und 1,3 t getrockneter Klärschlamm als Reduktionsmittel oder 3,5/t MgCl ₂ Keine Verbindung als Gefahrenstoff klassifiziert
Energiebedarf		
ASH DEC	3	Ca. 4300 kWh pro t P (bei in die Schlammverbrennung integrierter Anlage)
RecoPhos (P4)	1	12 000 bis 15 000 kWh pro t P
Abfall		
ASH DEC	2	0.25 t Filterstaub/t P als inertes Schwermetallkonzentrat (Menge < P im Produkt; Sonderabfall)
RecoPhos (P4)	1	7,5 t Schlacke pro t P, die sich als Zuschlagsstoff für Zementindustrie eignen (Menge > P im Produkt; Sonderabfall) Potenzial: Vielversprechende Möglichkeiten zur Verwertung in Bauindustrie

WIRTSCHAFTLICHKEIT



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Investitionsbedarf		
ASH DEC RecoPhos (P4)	3	< 1000 CHF pro t P ₂ O ₅ Potenzial: < 500 CHF pro t P ₂ O ₅ bei Anlagen > 1 000 000 EW
Operative Kosten		
ASH DEC	4	< 1000 CHF pro t P ₂ O ₅ (v. a. Chemikalien und Anlagenbetrieb bzw. -unterhalt)
RecoPhos (P4)	3	1000 bis 2000 CHF pro t P ₂ O ₅ Potenzial: Verwertung der Schlacke als Zuschlagsstoff für Zementindustrie würde Entsorgungskosten senken
Produktertrag		
RecoPhos (P4)	4	Verkauf zum handelsüblichen Marktpreis von Phosphorsäure: Marktpreis Phosphorsäure bei ca. 1500 CHF pro t P ₂ O ₅ in CH (je nach Qualität); in Europa ca. 1200 CHF pro t P ₂ O ₅ Verkauf zum handelsüblichen Marktpreis von P4: 2500 CHF pro t P ₂ O ₅ Potenzial: Kostendeckender Betrieb von zentralen P4 Anlagen zu erwarten.
ASH DEC	1	Verkauf als Ausgangsmaterial für Düngerherstellung zu ca. 30 % bis 50 % des handelsüblichen Marktpreises von Rohphosphat: Marktpreis Rohphosphat bei 350 bis 450 CHF pro t P ₂ O ₅ Verkauf als Dünger zu 15 bis 30 % des handelsüblichen Preises von P-Dünger: Marktpreis P-Dünger bei 900 bis 1500 CHF pro t P ₂ O ₅
Zusatzerträge/-nutzen		
ASH DEC RecoPhos (P4)	2	Wegfall der bisherigen KS-Entsorgungskosten, da KS nach P-Extraktion nicht mehr zu entsorgen

KOMPATIBILITÄT INFRASTRUKTUR



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Einfluss auf heutige Entsorgungslandschaft		
ASH DEC RecoPhos (P4)	2	Zementwerk: Nutzung der Verbrennungswärme für Klinkerherstellung, falls vorgeschaltete KS-Monoverbrennung und thermochemische P-Extraktion beim Zementwerk SVA: Extraktion aus Asche erfordert die Monoverbrennung in einer SVA (kompatibel mit bestehenden KS-MV) KVA: kalorischer Wert des KS für KVA nicht mehr verfügbar
Kompatibilität mit ARA-Betrieb		
ASH DEC	3	Verfahren wird normalerweise ausserhalb ARA im Verbund mit KS-Monoverbrennung umgesetzt (oder auf sehr grossen ARA) Platzbedarf: >1000 m ² (Angaben ohne Lagerflächen für Chemikalien und Produkte) Knowhow: Verhältnismässige Zusatzausbildung des ARA-Personals erforderlich (falls auf ARA umgesetzt)
RecoPhos (P4)	2	Verfahren wird normalerweise ausserhalb ARA in einem Chemiapark umgesetzt Platzbedarf: > 1000 m ³ (Angaben ohne Lagerflächen für Chemikalien und Produkte) Knowhow: Umfangreiche Zusatzausbildung des ARA-Personals erforderlich (metallurgischer Prozess)

KOMPATIBILITÄT MIT RECHTLICHEN RAHMENBEDINGUNGEN



	BEURTEILUNG	BEGRÜNDUNG
Zulassungsanforderungen Produkte		
RecoPhos (P4)	3	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger für Phosphorsäure und weissen P nicht relevant (erst der daraus hergestellte Dünger unterliegt den Zulassungsanforderungen für Recyclingdünger) Zulassung für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau für Phosphorsäure nicht relevant Phosphorsäure aus P-Rückgewinnung benötigt voraussichtlich separate REACH-Zertifizierung
ASH DEC	1	Grenzwerte der ChemRRV für Recyclingdünger für Calciumnatriumphosphat nicht eingehalten Derzeit keine Zulassung von Calciumnatriumphosphat für Anwendung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (nicht auf Betriebsmittelliste) Produkt verfügt über keine REACH-Zertifizierung Potenzial: Zulassung als Hilfsstoff im biologischen Landbau (entsprechendes Dossier in der Europäischen Kommission eingereicht)

Übergeordnete Beurteilungsaspekte

ENTSORGUNGSSICHERHEIT

Die Entsorgungssicherheit der beiden Verfahren dieser Gruppe ist unterschiedlich zu beurteilen:

RecoPhos P4 weist eine relativ hohe Entsorgungssicherheit auf:

- + Verfahren eignet sich grundsätzlich für die Behandlung aller P-reichen Abfälle (KS, Tier- und Knochenmehl und sonstige Biomasse)
- Sehr grosse Abfallmenge in Form einer unproblematischen Schlacke, deren Verwertung als Zuschlagsstoff in der Zementindustrie voraussichtlich möglich ist
- Komplexe Technologie bzw. Verfahrensführung
- + Produkt ist auf dem Markt sehr gefragt und zu hohen Preisen absetzbar; die absetzbare Menge übersteigt das hohe Rückgewinnungspotenzial gerade in der EU bei Weitem
- + Gute Wirtschaftlichkeit (speziell wenn Abfallentsorgung über Zementindustrie möglich)

ASH DEC weist eine mässige Entsorgungssicherheit auf:

- + Verfahren eignet sich grundsätzlich für die Behandlung aller P-reichen Abfälle (KS, Tier- und Knochenmehl und sonstige Biomasse)
- 0 Geringe Mengen an Sonderabfall (Filterstaub als inertes Schwermetallkonzentrat)
- 0 Mittelkomplexe und erprobte Technologie
- 0 Produkt grundsätzlich als Düngemittel oder Rohphosphat-Ersatz für die europäische Düngerindustrie in Frage kommend mit entsprechend hohem Absatzpotenzial; jedoch Absatz- bzw. Preisproblem, da aufgrund Zusammensetzung nur beschränkt nachgefragt
- 0 An der Grenze zur Wirtschaftlichkeit (stark abhängig von Produkterträgen und damit vom Aufbau eines Vertriebswegs)

KOMPATIBILITÄT MIT BESTEHENDEN INFRASTRUKTUREN UND RÄUMLICHEN GEGEBENHEITEN

Die Umsetzung dieser Verfahren ist relativ gut kompatibel:

- + Die Verfahren sind gut kompatibel mit Prozessstrukturen der Schweizer ARA-Landschaft, da Funktionsweise unabhängig von Art der P-Elimination
- + Grossskalige Umsetzung und entsprechend hohe KS-Mengen lassen keine dezentrale P-Rückgewinnung zu (überregionale P-Rückgewinnung); auf für CH-Verhältnisse sehr grossen ARA aber auch ausserhalb ARA umsetzbar
- + Geringer Einfluss auf ARA-Betrieb (KS geht weiter zur KS-MV oder neu zu einer KS-MV)
- + Aufgrund erforderlichen KS-MV sind die Verfahren mit bestehenden KS-MV (SVA) hoch kompatibel; auch andere Schlämme behandelnde SVA müssten auf MV umstellen oder aber auf KS als Input verzichten
- Heizwert des KS für Zementwerke und KVA nicht mehr verfügbar (ausser Realisierung der KS-MV mit P-Extraktion aus Asche vor Ort und energetische Nutzung der Verbrennungswärme)

BEITRAG ZUR SCHWEIZER KREISLAUFSCHLIESSUNG

Der Beitrag dieser beiden Verfahren (speziell: ASH DEC) ist sehr hoch:

- + Sehr hoher Rückgewinnungsgrad von bis 90 % (RecoPhos P4) bzw > 90 % (ASH DEC) und zur Behandlung aller P-reichen Abfälle geeignet: KS, Tier- und Knochenmehl, sonstige Biomasse
- + Keines bis mässiges Risiko der Ausbringung von Schadstoffen:
 - + RecoPhos P4: Kein Risiko der Ausbringung von Schadstoffen
 - 0 ASH DEC: mässiges Risiko der Ausbringung von Schadstoffen (d. h. Schwermetalle, da nur Entfrachtung bestimmter Schwermetalle: As, Cd, Hg, Pb)

Grundlagen

Adam et al. (2015), Adam et al. (2009), Dikov et al. (2014), ECHA (2010), Fux et al. (2015), Gerhard (2013), Hermann (2009), Hermann & Reuter (2013), Herzel et al. (2015), Hukari et al. (2016), Kabbe (2015), Kraus & Seis (2015), Krüger & Adam (2014), Montag et al., (2015), Pinnekamp et al. (2011), Remy & Jossa (2015), Spoerri et al. (2016), Werner (1981)

Bewertungsergebnisse auf einen Blick

	01 Kristallisation aus Klärschlamm bzw. Schlammwasser							02 Säure-Aufschluss von Klärschlamm				03 Thermochemischer Aufschluss von Klärschlamm				04 Säure-Aufschluss von Klärschlamm-Asche				05 Thermochem. Auf- schluss v. KS-Asche	
	Klärschlammvor Entwässerung			Schlammwasser				Carbonic Acid Process	Gifhorner Verfahren	Stuttgarter Verfahren	Kubota	Mephrec	Pyreg	Susteen	EcoPhos	LeachPhos	Reco-Phos	TetraPhos	ZAR	ASH DEC	RecoPhos (P4)
	Airprex	Ekobalans	NuReSys (Schlamm)	Crys- tallactor	NuReSys (H ₂ O)	Ostara Pearl	Struvia														
TECHNOLOGIE																					
RÜCKGEWINNUNGSGRAD	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
INPUTFLEXIBILITÄT	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	
PRODUKT																					
PRODUKTQUALITÄT	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	1	1	4/3	3	3	4	4	3	4
MARKT																					
MARKTGRÖSSE UND -DIVERSITÄT	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3	3	3	3	3	2	3
UMWELT																					
CHEMIKALIEN- EINSATZ	3	3	3	4	4	4	4	2	1	1	4	4	4	4	1	1	1	1	1	4	4
ENERGIEBEDARF	2	2	2	3	3	3	3	–	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	1
ABFÄLLE	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	1	1	2	1
WIRTSCHAFTLICHKEIT																					
INVESTITIONSBEDARF	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	1	1	1	1	2	2	4	2	2	3	3
OPERATIVE KOSTEN	2	2	2	2	2	4	2	4	1	1	2	2	2	2	4	3	3	3	3	4	3
PRODUKTERTRAG	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	4	4	1	4
ZUSATZERTRÄGE/ -NUTZEN	4	4	4	4	4	4	4	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
KOMPATIBILITÄT INFRASTRUKTUR																					
EINFLUSS HEUTIGE ENT- SORGUNGLANDSCHAFT	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
KOMPATIBILITÄT MIT ARA-BETRIEB	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3	2	2	3	2
RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN																					
ZULASSUNGSANFORDE- RUNGEN PRODUKTE	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	1	1	4/3	3	1	4	4	1	3

04 FAZIT

Synthese

Wie eingangs erwähnt, besteht das Ziel des Projekts in der Entwicklung einer Orientierungshilfe zuhanden von Entscheidungsträgern und Umsetzungsverantwortlichen für eine regional abgestimmte, wirtschaftliche und gesamtökologisch effektive Umsetzung von Artikel 15 der VVEA. Dazu werden diejenigen Technologien, die aufgrund ihrer heutigen bzw. absehbaren Marktreife für eine Umsetzung innerhalb der Übergangsfrist der VVEA in Frage kommen, mit Hilfe eines eigens entwickelten Kriterien-Sets umfassend hinsichtlich Nachhaltigkeit und Integrierbarkeit in die bestehenden regionalen Gegebenheiten und Infrastruktursysteme beurteilt.

Insgesamt werden 20 Technologien als genügend marktreif für eine mögliche Implementierung innerhalb der nächsten 10 Jahre befunden (bezogen auf den Entwicklungsstand in Q3/2015). Diese Auswahl deckt alle unterschiedlichen Verfahrenstypen ab, welche die P-Extraktion aus verschiedenen Medien (d.h. Schlammwasser, (nicht) entwässerter, getrockneter KS, MV-Asche) auf unterschiedliche Weise (nasschemisch, thermochemisch) vornehmen. Die Unterschiedlichkeit spiegelt sich auch in den Bewertungsergebnissen wieder. Die fünf Technologiegruppen weisen stark unterschiedliche Bewertungsprofile mit entsprechenden Vor- und Nachteilen auf:

Beitrag zur Kreislaufschliessung

Die Rückgewinnungsgrade variieren von 15 % (vorausgesetzt: Bio-P ARA) bei den aus wässrigen Medien direkt ausfallenden Verfahren bis über 90 % bei ausgewählten thermochemischen Extraktionsverfahren (z.B. ASH DEC aus Gruppe 5; Pyreg und Susteen aus Gruppe 3). Bei den Säureaufschlussverfahren (Gruppen 2 und 4) sind die Rückgewinnungsgrade stark abhängig vom Säureeinsatz. Letztere sind zusätzlich noch in der Lage, andere P-reiche Abfälle (Tier- und Knochenmehl) zu verwerten, was den Beitrag zur Schliessung des Schweizer P-Kreislaufs weiter erhöht. Ausser bei den direkt ausfallenden Verfahren (Gruppe 1) und wenigen weiteren Ausnahmen (z.B. Pyreg und Susteen aus Gruppe 3) reichern alle Verfahren die im KS enthaltenen Schadstoffe aus dem Produkt ab.

Entsorgungssicherheit

Die Beurteilungen der Kriterien, welche zur Entsorgungssicherheit beitragen, sind ebenfalls stark unterschiedlich zwischen den berücksichtigten Verfahren. So unterscheiden sich diese wesentlich, was die Grösse und Diversität der Absatzmöglichkeiten für die rückgewonnenen P-Produkte, die Komplexität und damit die Betriebssicherheit, aber auch die Entsorgung von zusätzlich anfallenden Abfällen anbelangt. Die aus wässrigen Medien direkt ausfallenden Verfahren (Gruppe 1) schneiden in dieser Hinsicht – der tiefe Rückgewinnungsgrad und die Inkompatibilität mit der chemischen P-Elimination auf ARA ausser Acht lassend – am besten ab (keine zusätzlichen Abfälle, vergleichsweise einfache Verfahrensführung, Struvit als Rohphosphat-Ersatz für die Düngerindustrie). Demgegenüber stehen die thermoche-

mischen Klärschlamm-Aufschlussverfahren (Gruppe 3), welche aufgrund der hohen Komplexität, dem vergleichsweise schwierigen Absatz der rückgewonnenen P-Produkte und den bedeutenden Mengen an zusätzlich zu entsorgenden Sonderabfällen in dieser Hinsicht (noch) problematisch sind. Die Entsorgungssicherheit bei den übrigen Verfahren (Gruppen 2, 4 und 5) liegt zwischen diesen beiden Extremen, mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen.

Kompatibilität mit heutigen Infrastrukturen und räumlichen Gegebenheiten

Die fünf Verfahrensgruppen sind stark unterschiedlich kompatibel mit bestehenden Infrastrukturen der Abwasserreinigung und heutigen Klärschlamm Entsorgung sowie den regionalen Gegebenheiten in der Schweiz. Die Verfahren von Gruppe 2 sind in hohem Masse integrierbar in die bestehenden System- und räumlichen Strukturen. Diese Form der Rückgewinnung tangiert die bestehenden KS-Mengen und entsprechenden Verwertungswege (KVA, SVA, Zementwerk) nicht und ist aufgrund der Anlagengrösse auch für eine dezentrale Umsetzung auf mittelgrossen ARA geeignet. Dies gilt grundsätzlich auch für die Verfahren aus Gruppe 1 mit der entscheidenden Ausnahme, dass diese Verfahren mit der in der Schweiz verbreiteten Prozessführung auf ARA (chemische P-Elimination) nicht kompatibel sind und damit für eine Implementierung nicht in Frage kommen. Die übrigen Verfahren (Gruppen 3, 4 und 5) liegen zwischen diesen beiden Extremen, wobei die auf der KS-MV basierenden Verfahren den Vorteil vorweisen, dass bestehende SVA für die P-Rückgewinnung weiter genutzt werden können und bei einer Realisierung vor Ort die heissen Rauchgase für die Klinkerherstellung bzw. die Energieproduktion in KVA genutzt werden könnten.

Auf Empfehlungen hinsichtlich der Priorisierung von Verfahren wird an dieser Stelle bewusst verzichtet. Vielmehr dient die Studie als strukturierte Auslegeordnung zu technologischen Optionen zur P-Rückgewinnung und als Grundlage für vertiefte regionalisierte Variantenentwicklungen – und Bewertungen.

Herausforderungen und Empfehlungen

Zur Unterstützung einer wirtschaftlich und ökologisch sinnvollen Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung werden abschliessend die aus Sicht der Autorenschaft zentralen Herausforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung der Rückgewinnungspflicht zusammengestellt und entsprechende Handlungsempfehlungen vorgeschlagen. Diese Herausforderungen betreffen sowohl spezifische Aspekte zur Reduktion bzw. Lösung von technologischen Problemen (d.h. Nachteilen) wie auch die übergeordnete Politikebene, welche den regulatorischen Rahmen für die Umsetzung der Rückgewinnungspflicht abstecken. Da die Ersteren bereits umfassend in der Beurteilung der Verfahren behandelt wurden (z.B. Verwertung von zusätzlichen Abfällen,

Marktgängigkeit bzw. Akzeptanz von Mischphosphaten, ungenügende Abreicherung von Schwermetallen), fokussieren wir an dieser Stelle auf die wichtigsten regulatorischen Rahmenbedingungen, welche für die zielgerichtete Weiterentwicklung der Verfahren zentral sind. Für zusätzliche Ausführungen zu Herausforderungen und entsprechenden Empfehlungen sei hier auf ein bereits durchgeführtes Projekt des BLW verwiesen (vgl. Spoerri et al., 2016).

Keine Umsetzungsbestimmung in der VVEA

Die gegenwärtige Regelung der Rückgewinnungspflicht (vgl. VVEA, Art.15) enthält keine konkreten Anforderungen an die Umsetzung der P-Rückgewinnung; sowohl was quantitative Vorgaben zur rückgewonnenen Menge wie auch (grenzüberschreitende) Lösungen beim Produktabsatz anbelangt. Dies wird seitens der Technologieentwickler und von Umsetzungsverantwortlichen (Kantone, Abfallzweckverbände, ARA-Betreiber) als grosses Hindernis für die Entwicklung von praxistauglichen Lösungen empfunden.

BAFU:

Stand der Technik (z. B. Rückgewinnungsgrad, Schadstoffgehalt, Pflanzenverfügbarkeit) im Modul zu Art.15 der VVEA-Vollzugshilfe definieren, damit Planungs- und Investitionssicherheit für technologische Weiterentwicklungen und grosstechnische Pilotprojekte gewährleistet ist: welche Verfahren kommen überhaupt in Frage und sollen weiter optimiert bzw. grosstechnisch erprobt werden bzw. auf welche sollte a priori nicht gesetzt werden.

Keine Anforderungen an Zulassung von mineralischen Recyclingdüngern

Die in der ChemRRV geregelten Anforderungen an die Zulassung von organischen Recyclingdüngern sind einerseits für die mineralischen Dünger aus der P-Rückgewinnung (primär wegen höheren P-Gehalten) nicht anwendbar bzw. einhaltbar. Andererseits enthält sie «vergleichsweise sehr grosszügige» Schwermetallgrenzwerte für Primärphosphate (P-Mineraldünger), was die Recyclingdünger nur schwer konkurrenzfähig macht. Das BLW ist im Rahmen des Projekts «Mineralische Recyclingdünger (Min-Rec)» momentan daran, die Zulassungsanforderungen für mineralische Recyclingdünger neu zu regeln. Die momentan herrschende Unklarheit bezüglich der Vorgaben für die Zulassung dieser Dünger steht dem Entscheid für oder gegen eine Rückgewinnungstechnologie und sowie der gezielten Produktoptimierung im Rahmen der technologischen Weiterentwicklungen aus Sicht der Umsetzungsverantwortlichen im Weg.

BLW:

Gesetzliche Anforderungen an die Zulassung von mineralischen Recyclingdüngern aus der P-Rückgewinnung so schnell wie möglich definieren, damit die Planung der Umsetzung von VVEA, Art.15 konkret auf diese Anforderungen ausgerichtet werden kann.

Angleichen der Zulassungsanforderungen von primär gewonnenen Mineraldüngern (Grenzwerte für Cadmium,

Chrom, Vanadium in ChemRRV, Anhang 2.6) und mineralischen Recyclingdüngern (Einführung der Düngerkategorie über DüV), um einerseits Recyclingprodukte im Vergleich zu Primärprodukte konkurrenzfähiger zu machen. Andererseits wird dadurch ein Beitrag geleistet, um den Eintrag von teilweise hoch problematischen Schwermetallen (z. B. Uran) in landwirtschaftliche Böden und in die Umwelt zu reduzieren.

Weiterer Handlungsbedarf

Die Studie beinhaltet eine umfassende Auslegeordnung zu Vor- und Nachteilen von 20 Technologien zur P-Rückgewinnung hinsichtlich verschiedener entscheidungsrelevanter Aspekte. Aufbauend auf dieser Studie sehen wir die folgenden Schwerpunkte für weiteren Handlungsbedarf, um die P-Rückgewinnung in der Schweiz weiter voranzutreiben:

Laufende Aktualisierung an neusten Stand der Technologieentwicklung

Die vorliegende Studie bildet eine Auslegeordnung über die zum Zeitpunkt der Bewertung verfügbaren Verfahren mit einem technologischen Reifegrad, der einerseits die Beurteilung des Verfahrens und andererseits die Erwartung zulässt, dass die Verfahren in den nächsten Jahren zum P-Recycling einsetzbar sein werden. Die Studie wird durch das BAFU regelmässig an den neusten Stand der Technologieentwicklung angepasst. Dies beinhaltet:

- Die Aktualisierung der Beurteilungsprofile bei bedeutenden Weiterentwicklungen der Technologien.
- Die Aufnahme von zusätzlichen Technologien, welche aufgrund von Entwicklungssprüngen für eine Implementierung in der Schweiz neu in Frage kommen (z. B. EuPhoRe) bzw. die Ausscheidung von Technologien, welche die Anforderungen an die technologische Reife nicht mehr erfüllen bzw. aufgrund neuer Erkenntnisse für eine Implementierung in der Schweiz nicht mehr in Frage kommen.

Konkretisierung der Betrachtung in regionalen Praxiskontexten

Die Studie legt die Vor- und Nachteile der verschiedenen Rückgewinnungsansätzen dar und zeigt, dass die Eignung der Verfahren von konkreten, regional vorherrschenden Gegebenheiten abhängt. Dies zeigt sich auch darin, dass in unterschiedlichen Regionen verschiedene Lösungen für die Rückgewinnung im Vordergrund stehen bzw. in grossangelegten Praxistests vorangetrieben werden (ZH/Gruppe 4; BE/Gruppe 2; ERZO/Gruppe 3), womit belastbare Daten gesammelt werden. In diesem Hintergrund werden aussagekräftige Technologievergleiche hinsichtlich Umweltnutzen und Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung von konkreten regionalen Gegebenheiten möglich. Zur Schärfung der bestehenden, vergleichsweise generischen Entscheidungsgrundlagen bzw. zur Aufarbeitung wichtiger Erkenntnisse aus

laufenden Praxistests für Umsetzungsverantwortliche erachten wir es als naheliegend, die weit fortgeschrittenen Umsetzungsbeispiele einer vergleichenden, Lebenszyklusbasierten Analyse des Umweltnutzens (Ökobilanz) und der Wirtschaftlichkeit zu unterziehen. Mit der Ökobilanz (z. B. UBP nach Methode der ökologischen Knappheit 2013) wird die Frage nach dem ökologischen Nettonutzen von unterschiedlichen Rückgewinnungsansätzen beantwortet. Das heisst in welchem Verhältnis stehen die Umweltbelastungen der P-Rückgewinnung (z. B. Säureeinsatz, Verteilung von Schadstoffen über das Recyclingprodukt in der Umwelt) im Vergleich zum Nutzen der Rückgewinnung (d. h. die durch die Rückgewinnung substituierten Umweltbelastungen aus der Herstellung der entsprechenden Primärprodukte). Die ergänzende Betrachtung der Wirtschaftlichkeit lässt dann aufbauend Schlüsse zum ökologischen Grenznutzen zu, indem sie zeigt, mit welchem finanziellen Aufwand welcher Nettonutzen für die Umwelt erzielt wird (Ökoeffizienz-Analyse). Idealerweise würden die entwickelten Bewertungsmodelle aufbauend verallgemeinert und parametrisiert werden, um die Ökoeffizienz dieser Rückgewinnungsansätze für verschiedene, in der Schweiz vorherrschende Umsetzungsgegebenheiten (d. h. Umsetzungskontext) beurteilen zu können (vgl. nächster Punkt zur wirtschaftlichen Betrachtung).

Volkswirtschaftliche Betrachtung

Die Ausführungen haben gezeigt, dass die verfügbaren Ansätze zur P-Rückgewinnung mit unterschiedlichen Kosten aber auch unterschiedlichen Nutzen für die Umwelt einhergehen. Entsprechend wird in der weiteren Umsetzung die Frage aufkommen, «wieviel der Schweiz die Ökologie wert ist». Auf Grundlage von betriebswirtschaftlichen Analysen der Ansätze zur P-Rückgewinnung (vgl. vorheriger Punkt zur Ökoeffizienz-Analyse) sollen aufbauende volkswirtschaftliche Betrachtungen aufzeigen, wie gesellschaftliche Gesamtkosten und der erzielte Nutzen für die Umwelt zusammenhängen. Nur so kann diese Abwägung zwischen verschiedenen gesellschaftlichen Teilzielen (d. h. Kostenaufwand vs. Umweltnutzen) evidenzbasiert diskutiert und vorgenommen werden.

Unterstützung der Umsetzung

Zur Unterstützung der Umsetzung der VVEA-Rückgewinnungspflicht innerhalb des festgelegten zeitlichen Fahrplans (ab 2026) sollen die verschiedenen Möglichkeiten zur gezielten staatlichen Förderung bzw. von begleitenden Massnahmen geprüft werden. Diese Unterstützung kann prinzipiell an unterschiedlichen Stellen ansetzen:

- Technologische Entwicklung: Instrumente zur Technologieförderung (z. B. Umwelttechnologieförderung, KTI-Projekte), um technologische Weiterentwicklungen und Nachweis der Praxistauglichkeit in realistischer Einsatzumgebung finanziell zu unterstützen.

- Produktabsatz: Instrumente zur Förderung der Wettbewerbsfähigkeit von Recyclingprodukten bei unzureichenden Absatzmöglichkeiten im Markt (z. B. Informationen zur Produktqualität, Lenkungsabgabe oder Steuer auf importierte Mineraldünger, «kostendeckende Absatzvergütung»).
- Finanzierung von Mehrkosten: Instrumente zur Finanzierung von allfälligen Mehrkosten der P-Rückgewinnung im Vergleich zur heutigen Entsorgungspraxis (z. B. Abwassergebühr als eine Form einer Kausalabgabe, Subventionierung über Steuergelder).

Wissensaustausch

Damit die P-Rückgewinnung erfolgreich eingeführt und betrieben werden kann, müssen verschiedene Puzzle-Teile zusammenpassen. Entsprechend ist ein zielgerichteter regelmässiger Wissens- und Erfahrungsaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren, Wissens- und Entscheidungsträger (Technologieentwickler, Dünger- und Futtermittelindustrie, BLW, BAFU, Kantone, ARA, Berater, Forschung) anzustreben, damit die einzelnen Bestrebungen, Bedürfnisse und Anforderungen entlang der Wertschöpfungskette und diese umrahmenden politischen Rahmenbedingungen optimal aufeinander abgestimmt werden können. Dazu eignet sich der Aufbau einer Wissensplattform (z. B. Themen-Webseite beim BAFU), um den Stand des Wissens im In- und Ausland übersichtlich bereitzustellen. Ergänzend sehen wir einen umfassenden Stakeholder-Dialog in Form eines strukturierten transdisziplinären Prozesses mit verschiedenen partizipativen Elementen zum Wissensaustausch und für lösungsorientierte, auf die Schnittstellen ausgelegte Diskussionen (z. B. Marktanforderungen als Zielgrösse für die Technologieentwicklung bzw. Wahl).

Kommunikation

Zur Unterstützung des vorgängig erwähnten Wissenstransfers unter den Stakeholdern empfehlen wir eine professionelle kommunikative Begleitung. Dies reicht beispielsweise vom Aufbau einer P-Webseite, Newsletter-Lösungen, und der Entwicklung von Infografiken, Broschüren, etc. bis zur Organisation und Moderation von Workshops.

Machbarkeit für inländische Absatzwege

Studien und der Austausch mit Marktakteuren legen nahe, dass eine Kreislaufschiessung innerhalb der Schweiz zwar möglich ist, aber auch eine koordinierte Vorgehensweise erfordert. Die Potenziale dieser inländischen Absatzwege bzw. deren Produkthanforderungen hinsichtlich Typ, Qualität und Preis sind genauer zu spezifizieren und an den technologischen Möglichkeiten zu spiegeln. Damit sollen klare Anhaltspunkte geschaffen werden, um die technologische Umsetzung auf die Schweizer Marktbedürfnisse auszurichten.

Literaturverzeichnis

Adam, C., Hermann, L., Herzel, H., Mallon, J., Schaaf, M., Eicher, N., et al. (2015). Comparative review of ash processes. Berlin: BAM Federal Institute for Materials Research and Testing (P-REX Deliverable).

Adam, C., Peplinski, B., Michaelis, M., Kley, G., & Simon, F. – G. (2009). Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. Waste Management 29, 1122 – 1128.

Dikov, G., Hermann, L., Hukari, S., Muskolus, A., Nätörp, A., Pokorna, M., et al. (2014). Pre-Normative matrix. Review of fertilization schemes. Review of current legal framework for phosphorus recovery. Basel: FHNW (P-REX Deliverable).

ECHA. (2010). Guidance on waste and recovered substances. Helsinki: European Chemicals Agency

Ewert, W., Hermanussen, O., Kabbe, C., Mèlè, C., Niewersch, C., Paillard, H., et al. (2014). Comparison of sludge related processes. Basel: FHNW.

Fux, C., Theiler, M., & Irzan, T. (2015). Studie Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. Bern: Organisation Kommunale Infrastruktur.

Gerhard, A. (2013). Biomonitoring in der kommunalen Abwasserreinigung. Zürich: Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, AQUA & GAS No 7/8.

Hermann, L. (2009). Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung – Eine Bestandaufnahme. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.

Hermann, L., & Reuter, M. (2013). Environmental Footprint of Thermo-Chemical Phosphate-Recycling. Journal of Earth Science and Engineering 3 (2013), 744 – 749.

Herzel, H., Krüger, O., Hermann, L., & Adam, C. (2015). Sewage sludge ash – A promising secondary phosphorus source for fertilizer production. Science of the Total Environment (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.059).

Hosho, F. (08. 08 2016). Solution for Wastewater & Waste Management, (L. Hermann, Interviewer).

Hosho, F. (10. 05 2016). Solution for Wastewater & Waste Management. URL: <http://www.phosphorusplatform.eu/images/Conference/ESPC2-materials/Kubota%20poster%20ESPC2.pdf>

Hukari, S., Hermann, L., & Nätörp, A. (2016). From wastewater to fertilisers – Technical overview and critical

review of European legislation governing phosphorus recycling. Science of the Total Environment 542, 1127 – 1135.

Kabbe, C. (2015). Project Final Report. Berlin: Kompetenzzentrum Wasser Berlin GmbH.

Kraus, F., & Seis, W. (2015). Quantitative risk assessment of potential hazards for humans and the environment: quantification of potential hazards resulting from agricultural use of the manufactured fertilizers. Berlin: KWB (P-REX Deliverable).

Krüger, O., & Adam, C. (2014). Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Lehmkuhl, J., & Lebek, M. (2015). Patentnr. WO 2015/067328 A1. PCT.

Pinnekamp, J., Everding, W., Gethke, K., Montag, D., Weinfurter, K., Sartorius, C., et al. (2011). Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland. Aachen: Verbund RWTH Aachen University, Institute of Environmental Engineering, Fraunhofer Institute for Molecular Biology and Applied Ecology, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Justus-Liebig-University Giessen.

Pyreg GmbH. (10. 05 2016). URL: <http://www.pyreg.de/anlage.html>.

Remy, C., & Jossa, P. (2015). Life Cycle Assessment of selected processes for P recovery. Berlin: KWB (P-REX).

Severin, M. (2012). Phosphatlöslichkeiten und Phosphatdüngewirkung von Stoffen aus der Klärschlammbehandlung – Betrachtung unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren. Braunschweig: Julius Kühn Institut.

Sonveaux, M. (2016). Ecophos Process. Phosphates 2016 International Conference and Exhibition. Paris: CRU Group.

Susteen Technologies GmbH. (10. 05 2016). URL: <https://susteentechnologiesgmbh-public.sharepoint.com/info>.

Takhim, M. (2014). Patentnr. EP1517856. Europe.

Werner, W. (1981). Der Rhenania Dünger – Monographie über Herstellung, Eigenschaften und Wirkung der Rhenania-Dünger. Hannover: Verlag M. & H. Schaper.

