

# Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung

Abschlussbericht im Auftrag des  
Bayerischen Landesamtes für Umwelt  
(LfU)

## **Mitteilungen / Institut für Wasserwesen – Nr. 130**

Universität der Bundeswehr München  
Institut für Wasserwesen  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
D-85577 Neubiberg  
[www.unibw.de/wasserwesen](http://www.unibw.de/wasserwesen)

### **Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung *Abschlussbericht* *im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU)***

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum  
Christian Hubert, M.Sc.  
Bettina Steiniger, M.Sc.  
*Universität der Bundeswehr München – Institut für Wasserwesen  
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik*

Dr.-Ing. Eberhard Steinle  
Dr.-Ing. Konstantinos Athanasiadis  
*Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH*

*Projektleitung durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU)*  
Karla Mix-Spagl  
Stefan Bleisteiner

Die Inhalte und Meinungen in dieser Veröffentlichung entsprechen nicht unbedingt der grundlegenden Meinung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt.

Copyright 2020



Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen 4.0 International zugänglich.

Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

**ISSN 2700-7332**

**ISBN 978-3-943207-45-3**

## Inhaltsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Abbildungsverzeichnis .....  | III |
| Tabellenverzeichnis .....  | V   |
| 1 Einleitung und Zielsetzung .....                                       | 1   |
| 2 Aktuelle Situation der Klärschlammverwertung in Bayern .....           | 3   |
| 3 Von der Phosphorelimination zur Phosphorrückgewinnung .....            | 7   |
| 3.1 Verfahrenstechniken zur Phosphorelimination .....                    | 7   |
| 3.1.1 Biologische Phosphorelimination (Zellaufbau) .....                 | 7   |
| 3.1.2 Erhöhte biologische Phosphorelimination (Bio-P) .....              | 7   |
| 3.1.3 Chemisch-physikalische Phosphorelimination .....                   | 8   |
| 3.2 Phosphorbilanz kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen .....           | 8   |
| 3.3 Bio-P aus Sicht der Praxis .....                                     | 10  |
| 3.4 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm .....                          | 13  |
| 3.5 Voraussetzungen für eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ..... | 15  |
| 4 Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm .....         | 23  |
| 4.1 Gesamtverfahrensübersicht zur Phosphorrückgewinnung .....            | 23  |
| 4.2 Verfahren zur Fällung/Kristallisation/Adsorption von Phosphor .....  | 24  |
| 4.2.1 Fällung/Kristallisation im Faulschlamm .....                       | 24  |
| 4.2.2 Fällung/Kristallisation aus Prozesswasser .....                    | 25  |
| 4.2.3 Beispiele für eine großtechnische Umsetzung .....                  | 27  |
| 4.2.4 Zwischenfazit .....  | 28  |
| 4.3 Erhöhte Rücklösung mittels physikalischer Verfahren .....            | 29  |
| 4.3.1 Verfahrenstechnisches Grundprinzip .....                           | 29  |
| 4.3.2 Beispiele für eine großtechnische Umsetzung .....                  | 30  |
| 4.3.3 Zwischenfazit .....  | 31  |
| 4.4 Erhöhte Rücklösung mittels biologischer Verfahren .....              | 31  |
| 4.4.1 Verfahrenstechnisches Grundprinzip .....                           | 31  |
| 4.4.2 Zwischenfazit .....  | 33  |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.5   | Erhöhte Rücklösung mittels chemischer Verfahren.....                   | 33 |
| 4.5.1 | Verfahrenstechnisches Grundprinzip .....                               | 33 |
| 4.5.2 | Beispiele für eine großtechnische Umsetzung .....                      | 35 |
| 4.5.3 | Zwischenfazit.....   | 36 |
| 4.6   | Hydrothermale Carbonisierung (HTC).....                                | 36 |
| 4.6.1 | Verfahrenstechnisches Grundprinzip .....                               | 36 |
| 4.6.2 | Zwischenfazit.....   | 37 |
| 4.7   | Weitere Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwasser/Klärschlamm.....    | 37 |
| 5     | Bewertung der Rezyklate nach DüMV .....                                | 39 |
| 5.1   | Bewertung nach DüMV .....  | 39 |
| 5.2   | Bewertung im europäischen Kontext .....                                | 41 |
| 6     | Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis.....                   | 45 |
| 6.1   | Herausforderungen der Klärschlammverordnung .....                      | 45 |
| 6.2   | Möglichkeiten und Grenzen einer P-Rückgewinnung aus Klärschlamm.....   | 45 |
| 6.3   | Hinweise zum Vorgehen zur Verfahrenswahl für Kläranlagenbetreiber..... | 49 |
| 6.4   | Ausblick .....   | 51 |
| 7     | Literaturverzeichnis .....   | 53 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Verteilung der Klärschlammverwertung in Bayern und Deutschland (Daten: Destatis (2018b)) .....  | 3  |
| Abbildung 2: Phosphorkonzentration im Klärschlamm nach Ausbaugröße in Bayern in den Jahren 2014 bis 2017 (Daten: LfU (2019)).....  | 5  |
| Abbildung 3: Vereinfachtes Fließschema zur gezielten Bio-P (Schaum et al. 2020).....   | 8  |
| Abbildung 4: Phosphorbilanz für eine konventionelle Abwasserbehandlungsanlage mit biologischer Phosphorelimination und/oder Fällung (PS: Primärschlamm, ÜSS: Überschussschlamm), vgl. Cornel (2002)..... | 9  |
| Abbildung 5: Zusammenhang $PO_4$ -P im Schlammwasser und TR(A) (Kopp 2017) .....   | 10 |
| Abbildung 6: Verfahrenstechnik Zentralkläranlage Jena (Abwasser) (Stubenrauch und Steinle 2017) .....  | 11 |
| Abbildung 7: MAP-Ausfällungen ZKA Jena (Stubenrauch und Steinle 2017) .....  | 12 |
| Abbildung 8: Optimierung Fällung ZKA Jena (Stubenrauch und Steinle 2017).....  | 13 |
| Abbildung 9: Phosphorkonzentrationen im Faulschlamm in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad der Verfahren zur P-Rückgewinnung bei einer Ausgangskonzentration von 30 bzw. 40 g P/kg TM .....                    | 14 |
| Abbildung 10: Anteilige Fraktionen der P-Konzentrationen für unterschiedliche P-Eliminationsstrategien nach DWA A 131 (2016).....  | 19 |
| Abbildung 11: Anteilige Fraktionen der P-Frachten für unterschiedliche P-Eliminationsstrategien nach DWA A 131 (2016) .....  | 19 |
| Abbildung 12: Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, verändert nach Schaum und Cornel (2013) .....   | 23 |
| Abbildung 13: Vereinfachtes Schema einer Fällung/Kristallisation im Faulschlamm (OPTION A) bzw. im Prozesswasser (OPTION B).....   | 26 |
| Abbildung 14: Vereinfachtes Schema einer physikalischen Rücklösung von Phosphor ..   | 29 |
| Abbildung 15: Vereinfachtes Schema einer biologischen Rücklösung von Phosphor, OPTION A: CalPrex; OPTION B: WASSTRIP .....   | 32 |
| Abbildung 16: Vereinfachtes Schema einer chemischen Rücklösung von Phosphor mittels Säure .....  | 34 |
| Abbildung 17: Vereinfachtes Schema der HTC mit anschließender P-Rücklösung .....   | 36 |
| Abbildung 18: Verfahrensmöglichkeiten zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm  | 48 |
| Abbildung 19: Hinweise zum Vorgehen zur Verfahrenswahl für Kläranlagenbetreiber ....   | 50 |



## Tabellenverzeichnis

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1:  | Übersicht über den Klärschlammanfall in Bayern aufgeteilt nach Regierungsbezirken und Struktur (Daten: LfU (2018a)) .....   | 4  |
| Tabelle 2:  | Vergleich von Stoffströmen zur P-Rückgewinnung, vgl. Schaum und Cornel (2013) .....   | 15 |
| Tabelle 3:  | Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Faulschlamm, teilweise realisiert ohne Separation von MAP .....  | 25 |
| Tabelle 4:  | Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Prozesswasser .....  | 27 |
| Tabelle 5:  | Verfahren zur biologischen Rücklösung von Phosphor .....  | 33 |
| Tabelle 6:  | Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Faulschlamm .....  | 35 |
| Tabelle 7:  | Phosphorgehalte und -löslichkeiten der jeweiligen Rezyklate (LfU 2015) .  | 40 |
| Tabelle 8:  | Gegenüberstellung der Grenzwerte nach DÜMV Anlage 2 Tabelle 1.4 mit den vorliegenden Analysen der Rezyklate in mg/kg TM, *Cadmium: 50 mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> für Düngemittel ab 5 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (FM), sonst 1,5 mg/kg TM (LfU 2015; Daly 2017; Saerens 2019) .....   | 41 |
| Tabelle 9:  | Untere Grenzwerte nach dem aktuellen Stand der EG-Verordnung in % (LfU 2015; EU 2019) .....   | 42 |
| Tabelle 10: | Grenzwerte nach dem aktuellen Stand der EG-Verordnung in mg/kg TM (LfU 2015; Daly 2017; EU 2019; Saerens 2019) .....  | 43 |
| Tabelle 11: | Zu untersuchende Mikroorganismen einschließlich der Grenzwerte gemäß EU-Verordnung; n = Anzahl der zu untersuchenden Proben, c = Anzahl der Proben, in denen die Keimzahl zwischen m und M liegt, m = Schwellenwert der als zufriedenstellend erachteten Keimzahl, M = Höchstwert für die Keimzahl (EU, 2019). .....  | 43 |
| Tabelle 12: | Vereinfachte Zusammenfassung der Beurteilung der Verfahrensart zur Einhaltung der AbfklärV sowie Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen; rot: Nach dem aktuellen Stand der Umsetzungen/Forschung konnte bislang keine Unterschreitung von 20 g P/kg TM nachgewiesen werden; gelb: Forschungsarbeiten zeigen, dass ggf. eine Unterschreitung von 20 g P/kg TM möglich sein kann; grün: Unterschreitung von 20 g P/kg TM ist möglich. .... | 46 |





## 1 Einleitung und Zielsetzung

Mit Inkrafttreten der novellierten Klärschlammverordnung in 2017 wurden einerseits die Grenzwerte für eine bodenbezogene Klärschlammverwertung verschärft und andererseits eine Rückgewinnungspflicht von Phosphor aus Klärschlämmen eingeführt.

Die wichtigsten Kenngrößen sind hierbei die Unterschreitung eines Schwellenwertes für im Klärschlamm verbleibenden Phosphor von 20 g P/kg TM oder ein Wirkungsgrad der Phosphorrückgewinnung von mindestens 50 %. Die Umsetzungspflicht betrifft dabei Kläranlagen > 100.000 EW mit einer Übergangsfrist von 12 Jahren (ab dem 01.01.2029) bzw. > 50.000 EW mit einer Übergangsfrist von 15 Jahren (ab dem 01.01.2032) (AbfKlärV 2017). Die geänderte Gesetzgebung durch die Klärschlammverordnung stellt Kommunen vor die Herausforderung, wie zukünftig mit der Ressource Klärschlamm in Hinblick auf die geforderte Phosphorrückgewinnung umgegangen wird.

Bereits zum 31.12.2023 müssen alle Kläranlagenbetreiber, die kommunales Abwasser behandeln und den Klärschlamm bodenbezogenen verwerten, der zuständigen Behörde einen Bericht über deren geplante Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung vorlegen (Schneichel 2019). Grundsätzlich kommen die Rückgewinnung aus dem Klärschlamm mit anschließender Entsorgung des Restschlammes in einer Mitverbrennungsanlage oder die Verbrennung/thermische Verwertung des Klärschlammes mit anschließender Phosphorrückgewinnung in Frage.

Im Rahmen des Vorhabens „Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung“ sollen die aktuellen Erkenntnisse zusammengestellt werden, ob und mit welchen Verfahren eine geeignete Phosphorrückgewinnung auch auf Kläranlagen durchgeführt werden kann. Die Möglichkeiten zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen sind nicht Bestandteil des Vorhabens.

Ziel ist es, eine ganzheitliche Handlungsempfehlung für Kläranlagenbetreiber zum Umgang mit einer Phosphorrückgewinnung aus Abwasser/Klärschlamm zu entwickeln.

*Begriffsdefinition Trockenmasse und Trockenrückstand:*

*Gemäß DWA M 383 (2019) wird die Trockenmasse ( $m_{TM}$ ) (kg TM) definiert als „nach Trocknung der Originalprobe verbleibende Masse, die in der Originalprobe gelöste, nicht flüchtige Stoffe enthält.“ Analytisch wird die Trockenmasse im Bereich der Klärschlammbehandlung gemäß AbfKlärV (2017) über den Trockenrückstand (TR) nach DIN EN 15934 (2012) erfasst (und nicht über die Trockensubstanz nach Filtration).*



## 2 Aktuelle Situation der Klärschlammverwertung in Bayern

In Bayern fallen auf 2.486 Kläranlagen rund 261.823 Mg TM/a Klärschlamm an (Stand 2018) (LfU 2018b). Dabei stammen rd. 60 % der Klärschlämme aus Anlagen > 50.000 EW. In Abbildung 1 ist die Struktur der Klärschlammverwertung in Bayern und ganz Deutschland gegenübergestellt. Im Vergleich zu Deutschland weist Bayern ähnliche Strukturen auf, so dass in beiden Fällen rund zwei Drittel der Klärschlämme thermisch verwertet werden. Ein weiteres Drittel wird landwirtschaftlich oder landschaftsbaulich verwertet. In Bayern werden 56 % (Stand 2018) der innerhalb der Grenzen des Bundeslands anfallenden Klärschlamm-mengen verwertet (LfU 2018a), während der Rest in benachbarte Bundesländer verbracht wird.

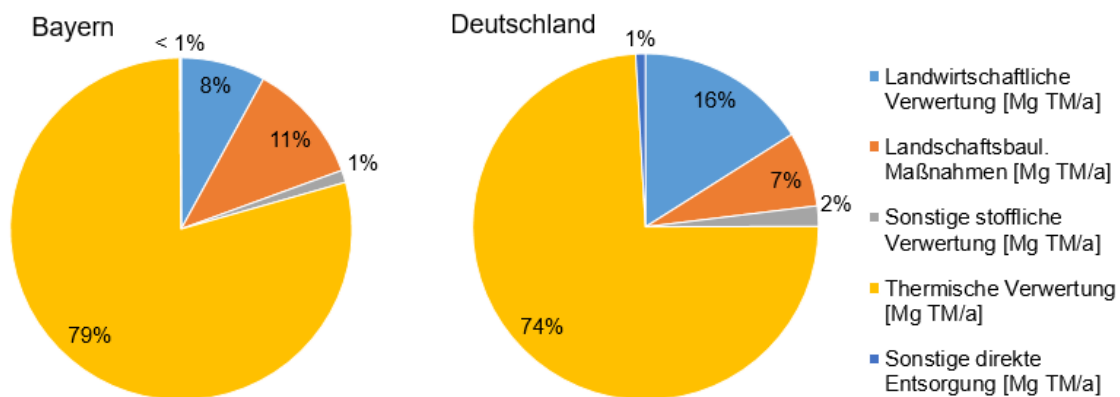


Abbildung 1: Verteilung der Klärschlammverwertung in Bayern und Deutschland (Daten: Destatis (2018b))

Mit dem Inkrafttreten der neuen Klärschlammverordnung in 2017 sind Kläranlagen mit einer Ausbaugröße > 50.000 EW, insgesamt 79 Anlagen in Bayern, ab 2029 bzw. 2032 zur Rückgewinnung von Phosphor verpflichtet. DABay (2018) hat für 72 bayerische Kläranlagen > 50.000 EW die Klärschlamm Entsorgung erfasst. Danach wurde der Klärschlamm von 82 % dieser Anlagen in einer thermischen Behandlung, 12 % im Landschaftsbau bzw. Rekultivierung sowie 6 % in der Landwirtschaft verwertet (DABay 2018). Zukünftig wird die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen deutlich eingeschränkt werden, was zu einer weiteren Steigerung der thermischen Verwertung führen wird.

Der Klärschlammfall in Bayern hängt stark von der Struktur und Dichte der Besiedlung ab. In Tabelle 1 ist der Klärschlammfall und die spezifische Klärschlammmenge nach Regierungsbezirken und Struktur in Bayern aufgeteilt; rd. 62 % des Klärschlammes fällt dabei in ländlichen Regionen an, wohingegen allein in Oberbayern fast ein Drittel des Klärschlammes entsorgt werden muss.

Tabelle 1: Übersicht über den Klärschlammanfall in Bayern aufgeteilt nach Regierungsbezirken und Struktur (Daten: LfU (2018a))

| Regierungsbezirk     | Klärschlammanfall<br>[Mg TM/a] | spez. Klärschlammmenge<br>[kg TM/(EW·a)] |
|----------------------|--------------------------------|--|
| Oberbayern           | 84.373                         | 18,1                                     |
| Niederbayern         | 22.363                         | 18,1                                     |
| Oberpfalz            | 22.012                         | 19,9                                     |
| Oberfranken          | 25.350                         | 23,8                                     |
| Mittelfranken        | 29.627                         | 16,8                                     |
| Unterfranken         | 27.271                         | 20,7                                     |
| Schwaben             | 50.827                         | 27,0                                     |
| <b>Bayern gesamt</b> | <b>261.823</b>                 | <b>20,1</b>                              |
| ländlich             | 79.582                         | 19,6                                     |
| ländlich dicht       | 82.921                         | 17,4                                     |
| städtisch            | 39.755                         | 24,1                                     |
| großstädtisch        | 59.565                         | 23,3                                     |

Mit Blick auf die Entwicklungen hin zur Verbrennung des Klärschlamms ist davon auszugehen, dass bei den aktuell bestehenden sowie geplanten Monoklärschlammverbrennungsanlagen die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche angestrebt wird und damit eine Alternative zu der Phosphorrückgewinnung auf den Kläranlagen darstellt.

Nach Harant (2018) ist davon auszugehen, dass Monoklärschlammverbrennungskapazitäten von ca. 64.400 Mg TM/a für das Bezugsjahr 2016 in Bayern zur Verfügung standen.

Abbildung 2 zeigt die Phosphorkonzentration im Klärschlamm von Kläranlagen, die landwirtschaftlich verwerten, nach Kläranlagenausbaugröße in Bayern. Es ist eine Zunahme der Konzentration in Abhängigkeit der Ausbaugröße zu erkennen. Liegen die Konzentrationen bei Anlagen der Größenklasse 10.000 bis 50.000 EW im Mittel bei 27 g P/kg TM, beträgt diese für Kläranlagen mit > 100.000 EW 37,5 g P/kg TM. Hinsichtlich der Streuung ist eine Abnahme mit steigender Ausbaugröße feststellbar.

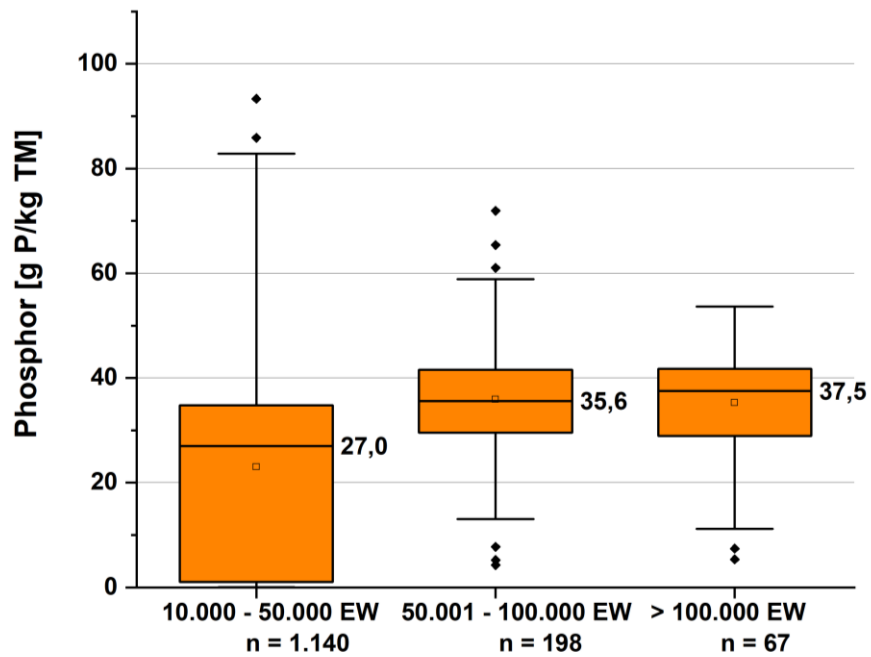


Abbildung 2: Phosphorkonzentration im Klärschlamm nach Ausbaugröße in Bayern in den Jahren 2014 bis 2017 (Daten: LfU (2019))



### **3 Von der Phosphorelimination zur Phosphorrückgewinnung**

#### **3.1 Verfahrenstechniken zur Phosphorelimination**

##### **3.1.1 Biologische Phosphorelimination (Zellaufbau)**

Die Phosphorelimination erfolgt beim Bakterienwachstum bei biologischen Prozessen in unterschiedlichem Ausmaß. Bei der biologischen Abwasserbehandlung auf Kläranlagen findet der Abbau von organischen Substanzen statt, wobei Ammonium und Phosphate für das Biomassewachstum in das Zellinnere aufgenommen werden. Die Einlagerung von Phosphor der Bakterien in der biologischen Abwasserbehandlung liegt im Mittel bei rd. 2 mg P/L bezogen auf 200 mg/L abgebautem biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) (b.is 2017).

Auf Kläranlagen werden durch die Abscheidung des Primärschlammes und der biologischen Phosphorelimination rd. 20 bis 30 % des Phosphors, bezogen auf die Zulaufkonzentration, eliminiert. Dementsprechend wird die biologische Phosphorelimination im Wesentlichen durch die Entfernung von Feststoffen im Überschussschlamm der biologischen Abwasserbehandlung reguliert. Die Eliminationsleistung der alleinigen, biologischen Phosphorelimination ist jedoch zu gering, um die Anforderungen der Phosphorkonzentrationen im Kläranlagenablauf einzuhalten, vgl. auch Kapitel 3.2.

##### **3.1.2 Erhöhte biologische Phosphorelimination (Bio-P)**

Für eine erhöhte, biologische Phosphorelimination werden spezifische, heterotrophe Mikroorganismen eingesetzt, die vermehrt Phosphor aufnehmen, um den Metabolismus unter nachteiligen Milieubedingungen aufrechtzuerhalten. Diese Mikroorganismen besitzen dadurch einen Selektionsvorteil gegenüber anderen Bakterien, welcher auf folgendem Zusammenhang beruht (Tchobanoglous 2014):

- Unter anaeroben Bedingungen nehmen Bakterien Zwischenprodukte des Abbaus (beispielsweise kurzkettige Fettsäuren) auf und lagern diese in den Zellen ein. Gleichzeitig findet der Verbrauch von Polyphosphaten und die Freisetzung von Orthophosphaten aus der Zelle statt. Die Polyphosphate agieren dabei als Speicher von biochemisch verfügbarer Energie, welche während dem Prozess freigesetzt wird.
- Unter aeroben/anoxischen Bedingungen nehmen die Bakterien erneut das freigesetzte Orthophosphat auf und füllen damit den Energiespeicher durch die Bildung von Polyphosphaten erneut auf. Die bereits zuvor eingelagerten, organischen Zwischenprodukte werden zum Biomassewachstum eingesetzt. Die spezifischen Bakterien erhalten dadurch einen Wachstumsvorteil gegenüber anderen Bakterien.

Die Realisierung von Bio-P in der Verfahrenstechnik erfordert eine Kombination aus anaeroben, anoxischen und aeroben Bedingungen. Bio-P wird dann durch die separate Ableitung des Überschussschlammes aus der biologischen Behandlungsstufe erzielt. In Abbildung 3 ist beispielhaft die Prozesskombination, entwickelt von der Universität Kapstadt (University of Cape Town (UCT)), aufgezeigt. Zahlreiche Verfahrenskombinationen für die Realisierung von Bio-P sind u.a. in Tchobanoglous (2014) und Bratby (2018) zu finden.

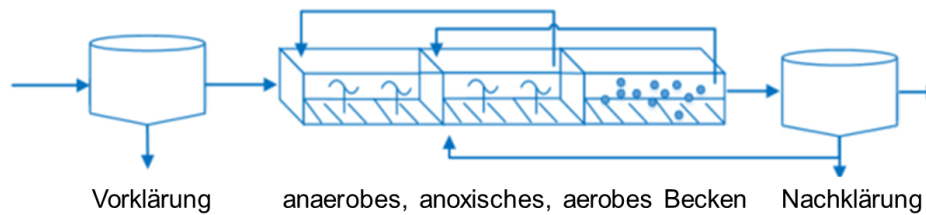
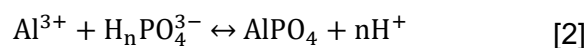


Abbildung 3: Vereinfachtes Fließschema zur gezielten Bio-P (Schaum et al. 2020)

### 3.1.3 Chemisch-physikalische Phosphorelimination

Das Prinzip der chemisch-physikalischen Phosphorelimination basiert auf der gravimetrischen Abtrennung von Feststoffen aufgrund schlechter Löslichkeit von Substanzen in bestimmten Lösungsmitteln mittels Zugabe von Fällmittel. In Abhängigkeit der Partikelgröße und -dichte wird dadurch das Löslichkeitsprodukt des Mediums überschritten, sodass der Feststoff sedimentiert. Zur optimierten Sedimentation der gebildeten Fällungsprodukte können zusätzlich Flockungsmittel eingesetzt werden. Die langkettigen Polymerketten der Flockungsmittel führen zu einer Zusammenlagerung zu großen Partikeln, wodurch eine verbesserte Sedimentation der Feststoffe möglich ist. Der Grad der Phosphorelimination hängt von der vorliegenden Form der Phosphorverbindung ab, so werden Orthophosphate mittels chemischer Fällung gut separiert, wohingegen Phosphonate mittels Fällung nicht entfernt werden können, vgl. Krause (2018).

Als Fällmittel werden mehrwertige Metalle und Erdalkalimetallionen, typischerweise Fe (II), Fe (III), Al (III) und Ca (II) verwendet. Die vereinfachte Reaktionsgleichung für Eisen [1] und Aluminium [2] sind, vgl. Tchobanoglous (2014):



Aus den Gleichungen ergeben sich stöchiometrische Verhältnisse von Metall zu Phosphor von 1:1. In der Realität weicht das Verhältnis aufgrund der Komplexität des Mediums von diesem Idealwert ab. So finden gleichzeitig konkurrierende Reaktionen wie Fällungsreaktionen von Hydroxiden und Karbonaten, Komplexbildungen von organischen Substanzen, Mitfällung von Phosphaten, Adsorptionsreaktionen, Diffusion sowie Koagulations- und Flockungsprozesse statt (Stumm und Morgan 1996; Szabó et al. 2008). Wenngleich die Gleichungen [1] und [2] nicht die realen Bedingungen beschreiben, können diese für eine erste Abschätzung des Fällmittelverbrauchs verwendet werden.

## 3.2 Phosphorbilanz kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen

Die im Zulauf von Kläranlagen enthaltene Phosphorfracht setzt sich im Wesentlichen aus menschlichen Ausscheidungen sowie einem deutlich geringeren Teil aus Wasch- und Reinigungsmittel zusammen, vgl. Krause (2018), Schaum (2007).



Ausgehend von einem mittleren Phosphorgehalt im Rohabwasser von 1,8 g P/(E·d) (ATV-DVWK 2000) ergibt sich bei einer einwohnerspezifischen Zulaufmenge von 200 l/(E·d) eine Zulaufkonzentration von 9 mg/l.

Durch die Vorklärung werden im Mittel ca. 11 % der Zulauffracht von Phosphor mit dem Primärschlamm abgezogen (ATV-DVWK 2000). Bei der biologischen Abwasserreinigung werden, selbst ohne eine gezielte Elimination von Phosphor, ca. 28 % der P-Zulauffracht in die Biomasse inkorporiert und mit dem Überschussschlamm abgezogen.

Auf Basis der zulässigen Ablaufwerte von 1 bzw. 2 mg/l müssen demzufolge noch ca. 50 % der P-Zulauffracht gezielt entfernt werden, entweder durch biologische oder chemisch-physikalische Verfahren oder deren Kombination. Mit der aktuell diskutierten Verschärfung der Ablaufwerte erhöht sich entsprechend die zu eliminierende Phosphorfracht.

Die DWA Klärschlammumfrage, vgl. Durth *et al.* (2005) sowie DWA (2005), hat gezeigt, dass die Phosphorelimination in Deutschland überwiegend, d.h. zu ca. 61 % aller Einwohnerwerte, chemisch-physikalisch erfolgt, wobei hauptsächlich, d.h. zu ca. 67 % aller Einwohnerwerte, Eisensalze als Fällmittel Verwendung finden. Eine rein biologische Phosphorelimination ist in nur ca. 6 % aller Einwohnerwerte installiert, vgl. DWA (2005).

Zusammenfassend bedeutet dies, dass ca. 90 % der P-Zulauffracht im Klärschlamm eingelagert werden. Abbildung 4 enthält eine schematische Phosphorbilanz einer konventionellen Abwasserbehandlungsanlage.

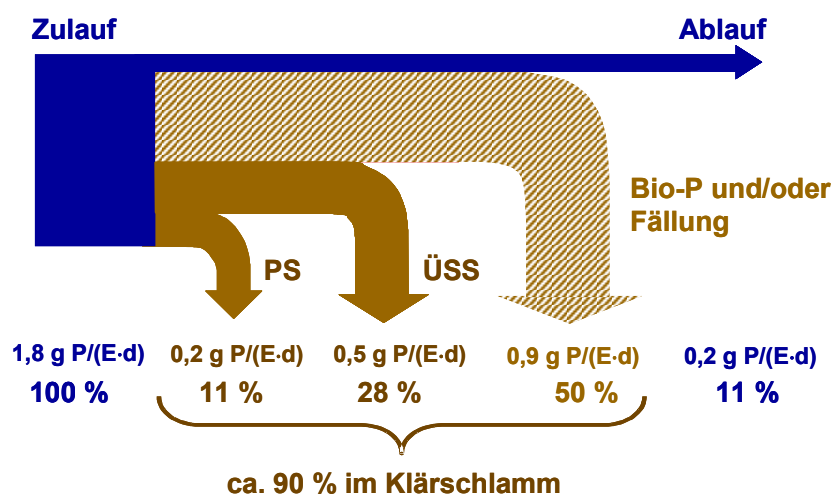


Abbildung 4: Phosphorbilanz für eine konventionelle Abwasserbehandlungsanlage mit biologischer Phosphorelimination und/oder Fällung (PS: Primärschlamm, ÜSS: Überschussschlamm), vgl. Cornel (2002)

### 3.3 Bio-P aus Sicht der Praxis

Im praktischen Kläranlagenbetrieb können durch die vermehrte, biologische Phosphorelimination Störungen im Betriebsablauf auftreten. An dieser Stelle erfolgt dazu eine Gegenüberstellung der biologischen und chemischen Phosphorelimination aus Sicht der Praxis.

Es ist zu beobachten, dass bei Anlagen mit einer biologischen Phosphorelimination die Entwässerung des Klärschlammes negativ beeinflusst wird. Die Art und Weise der Phosphorelimination hat einen Einfluss auf die Wasserbindung in Klärschlämmen. Von den Mikroorganismen werden extrazelluläre polymere Substanzen gebildet, welche stark wasserbindend wirken. Das dadurch in sogenannten Hydrogelen im Klärschlamm gebundene Wasser ist nur durch eine mechanische Entwässerung nicht ohne weiteres abtrennbar. Die Struktur der Hydrogele ist unter anderem von der Phosphatkonzentration im Schlamm bzw. im Schlammwasser abhängig (Kopp 2010).

Das bei der biologischen Phosphorelimination unter aeroben Bedingungen in der Bakterienzelle gespeicherte Polyphosphat wird unter anaeroben Bedingungen im Faulbehälter rückgelöst. In Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen TR-Austrag und Phosphatkonzentration im Schlammwasser graphisch dargestellt. Demnach verschlechtert sich die Entwässerbarkeit von Klärschlamm aufgrund einer erhöhten Phosphatkonzentration im Schlammwasser, welche wiederum auf die biologische Phosphorelimination zurückzuführen ist. Infolge dessen erhöht sich der Polymerbedarf für die Schlammentwässerung.

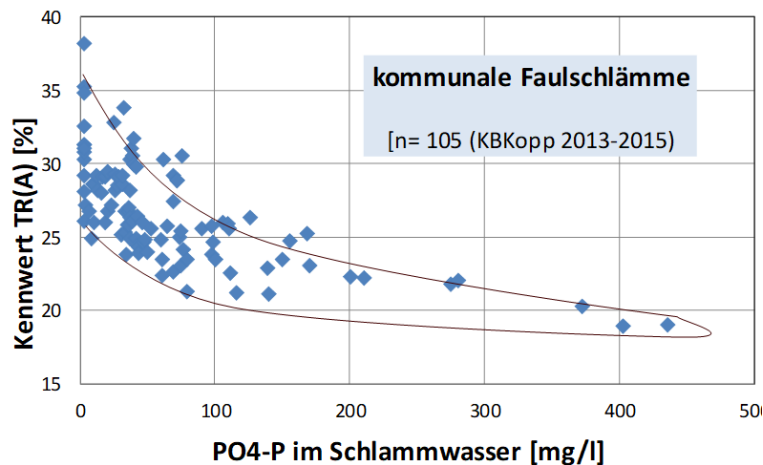


Abbildung 5: Zusammenhang  $PO_4\text{-P}$  im Schlammwasser und  $TR(A)$  (Kopp 2017)

Durch eine chemische Fällung des Phosphats mit Hilfe von Eisen- bzw. Aluminiumsalzen wird der Phosphor im Schlamm gebunden und kann während der Schlammbehandlung nicht rückgelöst werden. Dadurch verringert sich die Phosphatkonzentration im Schlammwasser und die Entwässerbarkeit des Schlammes wird verbessert.

Der erhöhte Polymerbedarf für die Schlammentwässerung im Falle einer biologischen Phosphorelimination relativiert auch die Kosten für den Fällmittelbedarf bei einer alternativen chemischen Phosphorelimination. Für die Elimination des Phosphors mittels vermehrter biologischer Aufnahme wird im Vergleich zur chemischen Phosphor-Fällung zunächst von geringeren Betriebskosten ausgegangen, da keine Kosten für Fällmittel anfallen.

Dadurch, dass sich bei der biologischen Phosphorelimination jedoch der Polymerbedarf für die Schlammentwässerung erhöht, kann dies vernachlässigt werden.

Am Beispiel der Zentralkläranlage (ZKA) Jena wird ein weiteres Problem aufgeführt, welches auf die biologische Phosphorelimination zurückzuführen ist. In der nachfolgenden Abbildung 6 ist das Verfahrensfließbild der Abwasserbehandlung dargestellt. Etwa 20 % des Kläranlagenzulaufs sowie 50 % des Rücklaufschlammes werden in das Anaerob-Becken eingeleitet. Dadurch werden 50 % des Rücklaufschlammes einer Phosphorrücklösung unterzogen. Die Phosphorelimination erfolgt zum einen durch die vermehrte biologische Phosphorelimination, zum anderen durch die Zugabe von Eisenchlorid-Lösung (40 %) in den Ablauf der Belebung.

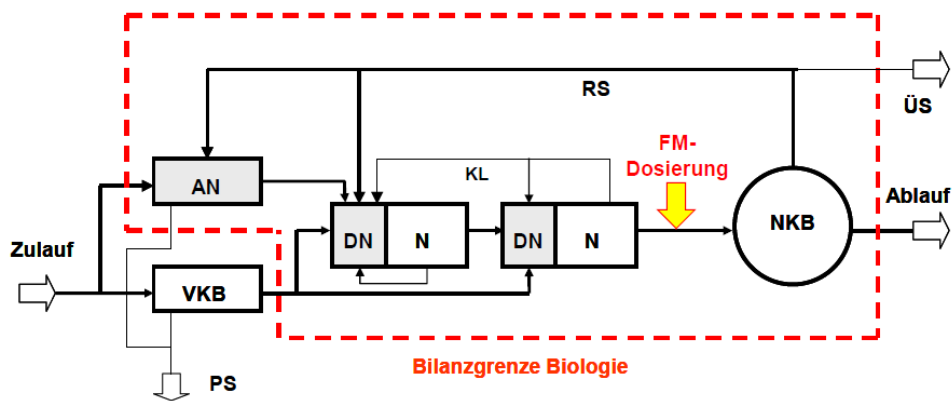


Abbildung 6: Verfahrenstechnik Zentralkläranlage Jena (Abwasser) (Stubenrauch und Steinle 2017)

Mit dieser Verfahrenstechnik konnten sehr niedrige Phosphorkonzentrationen von unter 0,5 mg/l bei einem Phosphor-Eliminationsgrad von mehr als 98 % erreicht werden. Eine zentrale Rolle spielt dabei auch die sehr gut funktionierende Nachklärung, in der eine effiziente Abtrennung partikulärer Stoffe erfolgt.

Jedoch wurde der reguläre Betrieb der Kläranlage durch die Ausfällung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) an den in Abbildung 7 markierten Stellen erheblich beeinträchtigt.

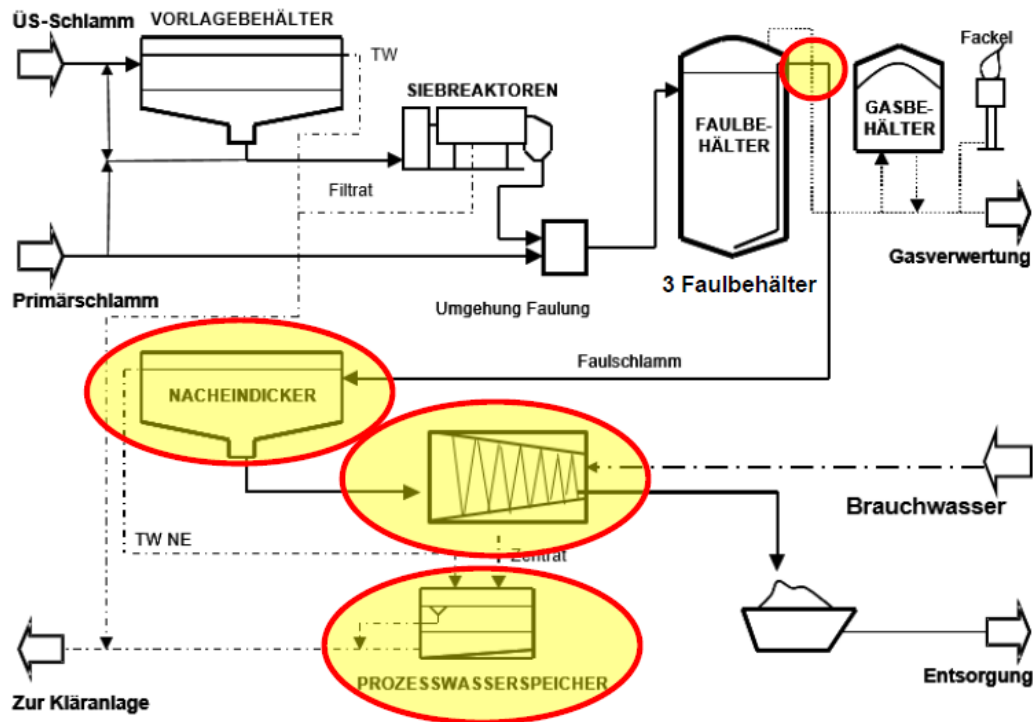


Abbildung 7: MAP-Ausfällungen ZKA Jena (Stubenrauch und Steinle 2017)

So kam es in den Falleitungen des Faulbehälters, dem Nacheindicker, dem Prozesswasserspeicher und der Zentrifuge (Schlammmentwässerung) zu starken Ablagerungen von MAP. Neben einem erhöhten Personalaufwand wurden durch die Ablagerungen Schäden an der Zentrifuge verursacht.

Im Rahmen einer Studie wurde nachgewiesen, dass dies unter anderem auf die Rücklösung des in der biologischen Phosphorelimination aufgenommenen Phosphats zurückgeführt werden kann.

Um die Betriebsbeeinträchtigungen zu beheben und weiterhin sehr niedrige Phosphor-Ablaufwerte gewährleisten zu können, wurde deshalb über mehrere Wochen Eisen (III)-Chlorid in den Ablauf des Anaerob-Beckens dosiert (vgl. Abbildung 8). Dadurch wird der im Anaerob-Becken rückgelöste Phosphor als Eisenphosphat im Schlamm gebunden und kann während der Schlammbehandlung nicht rückgelöst werden. Die Phosphormenge im Ablauf der Kläranlage so wie im entsorgten Schlamm bleibt dadurch unverändert.

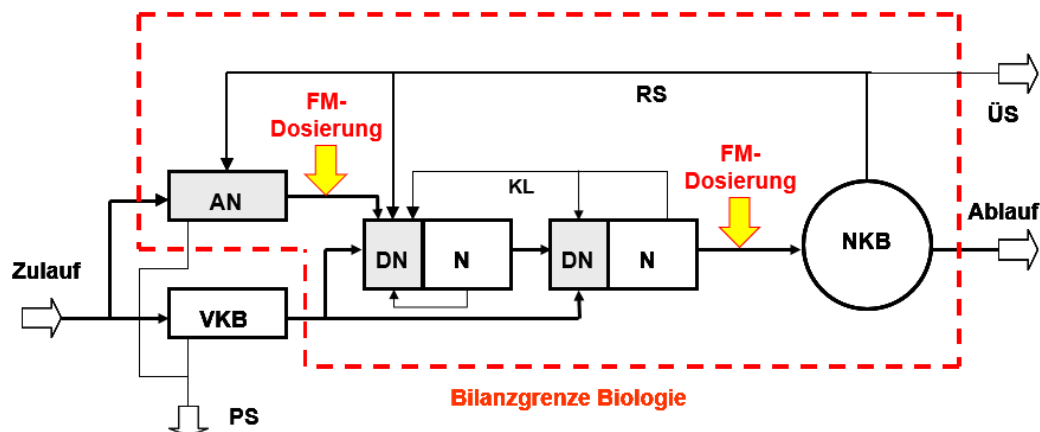


Abbildung 8: Optimierung Fällung ZKA Jena (Stubenrauch und Steinle 2017)

Durch diese zusätzliche P-Fällung im Hauptstrom konnte die  $\text{PO}_4\text{-P}$  Konzentration im Faulschlamm und Zentrat von 120 mg/l auf 40 mg/l nachhaltig reduziert werden (Stubenrauch und Steinle 2017). Dies führte dazu, dass seit dem Einsatz der zusätzlichen chemischen Phosphorfällung im Ablauf der Anaerob-Becken keine weiteren Probleme mit MAP-Ausfällungen beobachtet wurden.

Im Allgemeinen ist bei kommunalen Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination eine zusätzliche chemische Fällung des Phosphors zu empfehlen, da nur so verlässlich niedrige Ablaufkonzentrationen für Phosphor ( $< 1 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{l}$ ) gewährleistet werden können, bzw. Probleme mit MAP-Fällung wie am Beispiel der ZKA Jena beschrieben, vermieden werden können. Für die Einhaltung sehr niedriger Ablaufwerte ( $< 0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{l}$ ) hat außerdem eine effiziente Abtrennung der partikulären Stoffe in der Nachklärung einen bedeutenden Einfluss. Dementsprechend sind für die Konstruktion der Nachklärung die Empfehlungen gemäß DWA-A 131 zu beachten. Des Weiteren kann durch betriebliche Maßnahmen die Absetzbarkeit des Belebtschlammes optimiert werden. (Helmreich *et al.* 2017)

Gegen den vermehrten Einsatz von Fällmitteln zur chemischen Phosphorelimination sprechen die möglicherweise negativen Auswirkungen durch den Einsatz von  $\text{Al}^{3+}$ - bzw.  $\text{Fe}^{3+}$ -Salzen auf die Konzentration von Schwermetallen und Salzen im Kläranlageablauf.

### 3.4 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Aus der Zusammenführung der Phosphorbilanz einer kommunalen Kläranlage mit den einwohnerspezifischen Frachten des Klärschlammmanfalls, bspw. für Faulschlamm von ca. 55 g TM/(E·d), ergeben sich Phosphorkonzentrationen im Klärschlamm von ca. 20 bis 50 g P/kg TM (im Mittel rd. 30 g P/kg TM) (Jardin 2002). Die theoretische Betrachtung zeigt, dass von einer spezifischen Phosphorkonzentration im Klärschlamm von rd. 30 g P/kg TM ausgegangen werden kann und somit der Schwellenwert gemäß AbfKlärV (2017) von 20 g P/kg TM überschritten wird.

Die AbfKlärV (2017) gibt vor ein Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor anzuwenden, welche die Reduzierung des Phosphorgehalts des behandelten Klärschlammes um mindestens 50 % oder auf weniger als 20 g P/kg TM gewährleistet. Es ist davon

auszugehen, dass die Reduzierung um 50 % keine praktische Relevanz hat, da in den meisten Fällen eine Unterschreitung der 20 g P/kg TM mit geringeren Wirkungsgraden der Rückgewinnungsverfahren erzielt wird.

Ausgehend von 30 bzw. 40 g P/kg TM im Klärschlamm sind beispielsweise für die Einhaltung der Vorgaben der AbfKlärV (2017) Wirkungsgrade mindestens von rd. 30 bzw. 50 % einzuhalten, vgl. Abbildung 9.

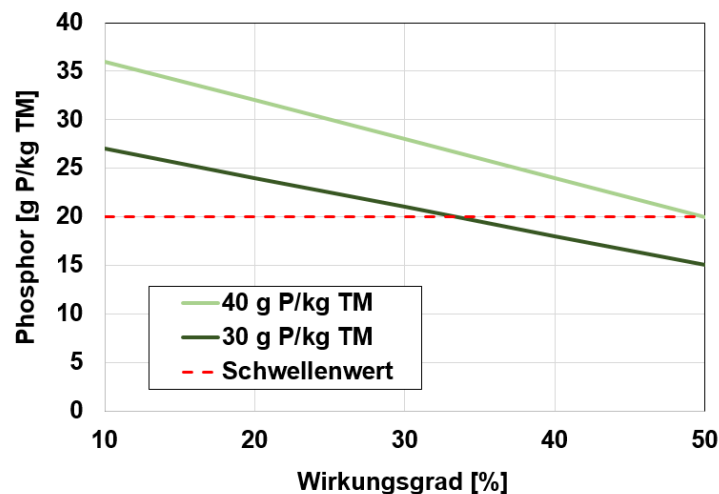


Abbildung 9: Phosphorkonzentrationen im Faulschlamm in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad der Verfahren zur P-Rückgewinnung bei einer Ausgangskonzentration von 30 bzw. 40 g P/kg TM

Durch die Zugabe von Co-Substraten in die Faulung, bspw. Bioabfälle, kann sich die Phosphorkonzentration im Faulschlamm theoretisch sowohl erhöhen als auch erniedrigen. Da die AbfKlärV (2017) den zu entsorgenden Klärschlamm fokussiert (Abfallrecht), gibt es hierzu entsprechend keine Regelungen. Auch im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für die Co-Vergärung (Wasserrecht) dürften in der Regel keine entsprechenden Auflagen gefordert werden.

Des Weiteren wäre es denkbar eine vollständig getrennte Behandlung von Primär- und Überschussschlamm zu errichten. Durch die geringeren Phosphorkonzentrationen im Primärschlamm ist davon auszugehen, dass der Faulschlamm aus der Primärschlammfäulung den Schwellenwert von 20 g P/kg TM unterschreitet und somit separat entsorgt werden könnte. Es würde sich dabei um eine Einzelfallentscheidung handeln, die entsprechend durch die Genehmigungsbehörden entschieden werden.

Unter der Annahme, dass alle bayerischen Kläranlagen > 50.000 EW eine Phosphorrückgewinnung betreiben, würde sich ein Gesamtpotential von rd. 4.600 Mg P/a ergeben (Annahme: Klärschlammmanfall in Bayern: 257.400 Mg TM/a; Klärschlammmanfall der Kläranlagen > 50.000 EW rd. 60 %; Phosphorkonzentration im Klärschlamm 30 g P/kg TM). Bei einem min. Wirkungsgrad von 80 % bei einer Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammmasche würde sich eine potentiell nutzbare Phosphorfracht von rd. 3.700 Mg P/a ergeben. Aufgrund steigender Anforderungen an die P-Elimination ist in den nächsten Jahren mit einer weiteren Zunahme der potentiell nutzbaren Phosphorfracht zu rechnen.

Sofern alle betroffenen Kläranlagen lediglich eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm betreiben (Einhaltung des Schwellenwertes von 20 g P/kg TM), würde sich die potentielle Phosphorfracht auf lediglich rd. 1.500 Mg P/a reduzieren (Annahme: Phosphorrückgewinnung von 10 g P/kg TM). Zum Vergleich: Im Wirtschaftsjahr 2017/2018 wurden in Bayern mineralische Düngemittel mit einem Phosphorgehalt von rd. 17.450 Mg P abgesetzt, vgl. Destatis (2018a).

Grundsätzlich gibt es die drei Stoffströme Prozesswasser der Schlammentwässerung, Faulschlamm sowie Asche nach thermischer Klärschlammbehandlung, in denen sich die Rückgewinnung von Phosphor anbietet. In Tabelle 2 sind die wesentlichen Parameter für die drei Stoffströme aufgezeigt.

*Tabelle 2: Vergleich von Stoffströmen zur P-Rückgewinnung, vgl. Schaum und Cornel (2013)*

| Aspekte                      | Prozesswasser  | Faulschlamm            | Asche                   |
|------------------------------|----------------|------------------------|-------------------------|
| Volumen-/<br>Massenstrom     | 1 – 10 l/(E·d) | 0,2 – 0,8 l/(E·d)      | rd. 0,03 kg/(E·d)       |
| Feststoffkonzentration (TR)  | < 1 %          | rd. 3 %                | 100 %                   |
| Glührückstand (GR)           | -              | 40 – 50 %              | 100 %                   |
| Phosphor (P <sub>ges</sub> ) | 20 – 100 mg/l  | 2 – 5 %<br>bez. auf TR | 5 – 10 %<br>bez. auf TR |
| Rückgewinnungspotential*     | rd. 10 – 20 %  | rd. 90 %               | rd. 90 %                |

\* Bezogen auf die Zulauffracht zur Abwasserbehandlungsanlage; theoretisches Rückgewinnungspotential, durch den Wirkungsgrad der Verfahren kann das tatsächliche Potential deutlich darunter liegen

Das allgemeine Rückgewinnungspotential von 10 bis 20 % für Prozesswasser hängt von der Phosphorrücklösung während der Faulung ab, wobei auf Kläranlagen mit erhöhter biologischer Phosphorelimination höhere Phosphorkonzentrationen erzielt werden.

Im Gegensatz dazu liegt das Rückgewinnungspotential aus dem Faulschlamm und aus der Asche bei max. 90 %. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des eingesetzten Verfahrens zur Phosphorrückgewinnung entspricht das Rückgewinnungspotential nicht der tatsächlichen Rückgewinnung.

### 3.5 Voraussetzungen für eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Wichtige Voraussetzung für eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ist die Freisetzung von Orthophosphat des während der Abwasserbehandlung im Klärschlamm gebundenen Phosphats.

Die Betriebsweise sowie verfahrenstechnische Einstellungen einzelner Prozesse auf der Kläranlage können dabei das Rücklösungsvermögen von Phosphor beeinflussen, insbesondere:

- Art der Phosphorelimination
- Schlammalter
- Faulung
- Klärschlammwässerung

Neben den verfahrenstechnischen Randbedingungen spielen gleichfalls standortspezifische Randbedingungen eine Rolle. So sind die auftretenden Phosphorspezies und die Abwasserzusammensetzung für die Effizienz der Rückgewinnung von Bedeutung. Diese sind im Wesentlichen von der Geologie und der ansässigen Industrie abhängig. Insbesondere Ca, Mg, Huminsäuren und Zeolithe haben Einfluss auf die Bindungsmechanismen (Jardin 1995).

### **Art der Phosphorelimination**

Die Phosphorelimination erfolgt biologisch, durch die Aufnahme von Phosphat durch die Mikroorganismen und ggf. chemisch-physikalisch durch Fällung. Bei der biologischen Abwasserbehandlung werden somit, selbst ohne eine gezielte Elimination von Phosphor, ca. 30 % der P-Zuladung in die Biomasse inkorporiert und mit dem Überschussschlamm abgezogen.

Beim Verfahren der vermehrten/erhöhten biologischen Phosphorelimination kommt es zu einer erhöhten biologischen Phosphoraufnahme durch die Mikroorganismen (im Allgemeinen als Bio-P bezeichnet). Verfahrenstechnisch erfordert die Bio-P sowohl anaerobe als auch aerobe Bedingungen. Durch den Wechsel von anaerob und aeroben Zonen werden Polyphosphat akkumulierende Bakterien (PAO) zur vermehrten P-Aufnahme angeregt.

Während der chemisch-physikalischen Elimination, hier kommen vor allem Eisen- und Aluminiumsalze zum Einsatz, kann das Phosphat auf unterschiedlichen Wegen gebunden werden. Unter anderem bildet sich Eisen-/Aluminiumhydroxid, an deren Oberflächen Phosphate adsorbieren können. Weiterhin können die Phosphate auch in die Oxid- und Hydroxidstruktur eingelagert werden. Ein weiterer Reaktionspfad ist die Einbindung in Mischkristallen. In Abhängigkeiten der Stärke der chemischen Bindung, hier spielen insbesondere auch die Ausbildung von innersphärischen Komplexen eine wesentliche Rolle, können die Verbindungen nicht oder nur mit hohem Einsatz von Extraktionsmitteln in Lösung gebracht werden (Tchobanoglous *et al.* 2014).

Die DWA A 131 (2016) unterscheidet im Rahmen der Bemessung von einstufigen Belebungsverfahren die folgenden Phosphorfraktionen:



- Phosphor aus biologischer Phosphorelimination:  $X_{P,BioP} = 0,005 \text{ bis } 0,007 C_{CSB,ZB}$   
( $C_{CSB,ZB} = \text{CSB Zulaufkonzentration zur Belebung}$ )
- Phosphor zum Zellaufbau der heterotrophen Biomasse:  $X_{P,BM} = 0,005 C_{CSB,ZB}$
- Phosphor aus Fällung:  $X_{P,Fäll}$ ;  
resultiert aus der Phosphorbilanz als zu fällender Phosphor

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge wurden für eine konventionelle, exemplarische Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 50.000 EW (mit Vorklärung) folgende Szenarien für die Überschussschlammproduktion untersucht:

- Szenario 1: keine gezielte P-Elimination
- Szenario 2: Simultanfällung
- Szenario 3: Biologische Phosphorelimination (ohne Fällung)
- Szenario 4: Biologische Phosphorelimination mit Simultanfällung
- Szenario 5: analog Szenario 4, einschl. 10 % höhere CSB-Konzentration im Zulauf zur Belebung

Weitere Annahmen:

- Verfahren:  
Vorklärung (Aufenthaltszeit 0,5 h) mit anschl. vorgeschalteter Denitrifikation;  
Berechnung gemäß DWA A 131 (2016)
- Abwassertemperatur: 15°C;  
Einwohnerspezifische Frachten gemäß ATV-DVWK (2000)
- Konstantes Schlammalter bei allen Szenarien von  $t_{TS} = 13,25 \text{ d}$
- Ablaufkonzentration Phosphor  $C_{P,AN} = 1 \text{ mg/L}$

Abbildung 10 und 11 stellen die Ergebnisse der Berechnung graphisch dar.

Abbildung 10 zeigt die Phosphorkonzentrationen in den jeweiligen Schlammfraktionen: Phosphor im Schlamm aus chemischer Fällung  $C_{P-Fäll}$ ; Phosphor im Schlamm aus der biologischen P-Elimination  $C_{BioP}$ ; Phosphor in der Biomasse  $C_{P-BM}$ .

In Ergänzung zu Abbildung 10 zeigt Abbildung 11 die jeweilig resultierenden P-Frachten (P-Fracht im chemisch gefällten Schlamm  $B_{d,P-Fäll}$ ; P-Fracht im biologisch eliminierten Schlamm  $B_{d,BioP}$ ; P-Fracht in der Biomasse  $B_{d,P-BM}$ ; P-Fracht im Primärschlamm  $B_{d,P-VKB}$ ; P-Fracht im Ablauf der Nachklärung  $B_{d,P-AN}$ ). In allen Szenarien findet sich der Anteil Phosphor durch den Zellaufbau in der heterotrophen Biomasse und damit im Überschussschlamm wieder. In Szenario 1 wird aufgrund der fehlenden Fällung nur ein geringer Anteil der P-Fracht in den Überschussschlamm überführt mit einer entsprechend geringen Konzentration im Überschussschlamm (12 g P/kg TM), womit die erforderlichen Phosphorablaufwerte nicht eingehalten werden können.

Für die Szenarien 2 bis 5 ist der Eintrag von Phosphor in den Überschussschlamm aufgrund der Bio-P, Fällung bzw. deren Kombination im Vergleich zu Szenario 1 deutlich höher. Für

Szenario 2 mit Simultanfällung ergibt sich eine Konzentration von 32 g P/kg TM im Überschussschlamm. Die Ablaufgrenzwerte werden aufgrund der entsprechenden Zugabe von Fällmitteln eingehalten. Für Szenario 3 ist die Einhaltung der Ablaufgrenzwerte für Phosphor nicht gegeben, wenngleich sich 29 g P/kg TM im Überschussschlamm wiederfinden. Die Kombination von Bio-P und chemisch-physikalischer Fällung in den Szenarien 4 und 5 führt zu 34 bzw. 31 g P/kg TM. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass höhere CSB-Konzentrationen im Zulauf der Belebung zu einer höheren Überschussschlammproduktion führt (2.492 kg TM/d in Szenario 3 bis 2.804 kg TM/d in Szenario 5), woraus sich in Folge geringere Konzentrationen im Überschussschlamm wiederfinden. Veränderungen in der Klärschlammproduktion ergeben sich ebenfalls in Abhängigkeit der Temperatur.

Während der anaeroben Stabilisierung erfolgt ein Abbau der Organik. Im Überschussschlamm biologisch gebundener Phosphor kann während der anaeroben Stabilisierung vermehrt freigesetzt werden. Dies ist einerseits auf den Metabolismus der polyphosphatspeichernden Bakterien zurückzuführen, im Wesentlichen jedoch auf die Degradation der Biomasse. Allerdings finden innerhalb des Faulturms Prozesse zur erneuten Fixierung von Phosphor statt. In Abhängigkeit der Inhaltsstoffe, von großer Bedeutung sind insbesondere Konzentrationen an Calcium, Magnesium, Aluminium, Eisen, Zeolithen und Huminsäuren, finden Adsorptions-, Fällungs- und Komplexierungsvorgänge statt, die die Löslichkeit deutlich reduzieren. Zudem nehmen Temperatur und pH-Wert auf die jeweiligen Prozesse Einfluss (Jardin 1995; Wild *et al.* 1996).

Unter der Annahme einer Refixierung, folgen daraus entsprechend höhere Konzentrationen von Phosphor im Vergleich zum Überschussschlamm. DWA M 368 gibt für einen Rohschlamm, der sich in gleichen Teilen aus Primärschlamm und Überschussschlamm zusammensetzt einen Abbaugrad von 35 % bezogen auf die Trockenmasse an (DWA 2014). Unter dieser vereinfachten Annahme erhöhen sich somit die Phosphorkonzentrationen im Faulschlamm für die jeweiligen Szenarien auf 19 g P/kg TM (Szenario 1), 49 g P/kg TM (Szenario 2), 45 g P/kg TM (Szenario 3), 52 g P/kg TM (Szenario 4) und 48 g P/kg TM (Szenario 5).

Die Berechnung von  $C_{P,BM}$  und  $C_{P,BioP}$  auf Basis der CSB-Zulaufkonzentration nach DWA A 131 (2016) verdeutlicht die Auswirkungen des CSB/P-Verhältnisses auf die Gesamtkonzentration von P im Überschussschlamm sowie auf die entsprechenden Phosphorfraktionen. Des Weiteren zeigen die vereinfachten Bilanzen die Auswirkungen auf die Phosphorkonzentration im Überschussschlamm bzw. im Faulschlamm. Es ist grundsätzlich zu beachten, dass die Berechnungen auf den entsprechenden einwohnerspezifischen Frachten zur Dimensionierung des Belebtschlammverfahrens basiert.

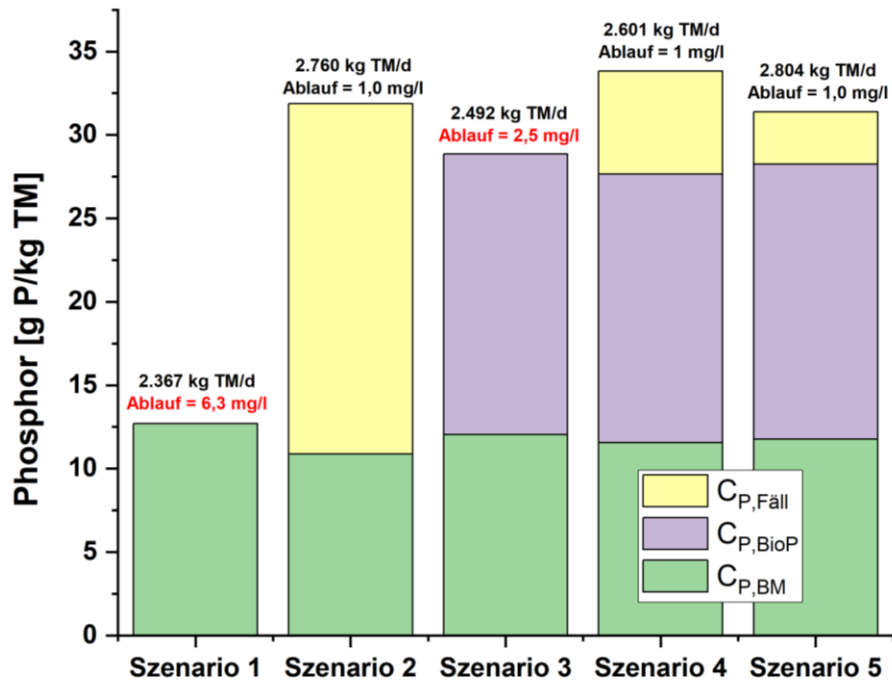


Abbildung 10: Anteilige Fraktionen der P-Konzentrationen für unterschiedliche P-Eliminationsstrategien nach DWA A 131 (2016)

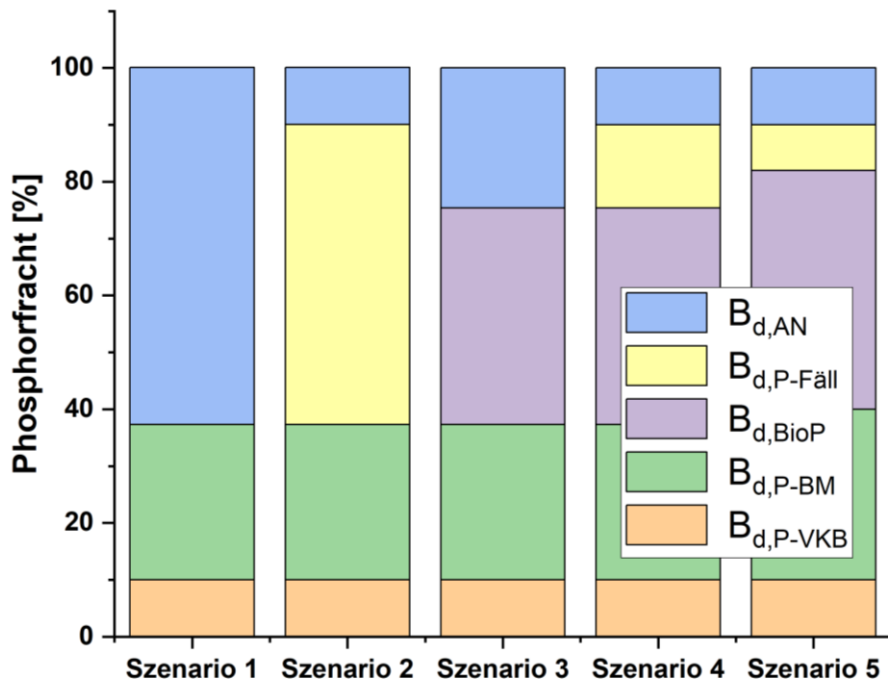


Abbildung 11: Anteilige Fraktionen der P-Frachten für unterschiedliche P-Eliminationsstrategien nach DWA A 131 (2016)

### **Schlammalter**

Das Schlammalter hat Einfluss auf das Schlammvolumen sowie auf die Menge an extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) im Klärschlamm. Eine zunehmende EPS Konzentration bedingt eine schlechtere Entwässerbarkeit des Schlammes (Kopp und Benisch 2018). EPS kann im selben Zuge auch zu einer erhöhten Pufferkapazität im Klärschlamm führen, was hinsichtlich einer Rücklösung von Phosphat mittels Säure zu berücksichtigen ist.

### **Faulung**

Während der Faulung finden, wie bereits erwähnt, zahlreiche metabolische und hydrolytische Prozesse sowie Fällungsreaktionen konkurrierend oder parallel zu einander statt. Durch den Abbau der biologischen Masse zu Methan und Kohlenstoffdioxid wird biologisch gebundenes Phosphat freigesetzt. Parallel findet eine Phosphataufnahme durch acido-, aceto- und methanogene Bakterien statt.

Zudem finden im Reaktor verschiedene Umlagerungsprozesse statt, vor allem von simultan ablaufenden chemisch-physikalischen Refixierungsvorgängen unter Beteiligung von Zeolithen. Des Weiteren kann es zur Kristallisation von MAP kommen.

Auch die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Fällungsprozesse. Im Allgemeinen sinkt die Löslichkeit mit sinkender Temperatur. Faultürme weisen hinsichtlich der Temperatur einen gewissen Spielraum auf. So kann eine Temperaturerhöhung von 35 auf 43°C aus verfahrenstechnischer Sicht hingenommen werden (Hubert *et al.* 2019).

Des Weiteren ist zu beachten, dass gerade bei Kläranlagen mit erhöhter biologischer Phosphorelimination eine Dosierung von Eisensalzen in die Faulung zur Vermeidung von Schwefelwasserstoff und Inkrustationen/Ablagerungen in Rohrleitungen sowie ggf. zur Verbesserung der Klärschlammmentwässerung erfolgt.

### **Klärschlammmentwässerung**

Im Zusammenspiel mit Fetten und Proteinen haben Phosphate eine wasserspeichernde Wirkung, was eine zentrale Rolle bei den Entwässerungseigenschaften haben kann (DWA 2019). Um die rückgelösten Phosphate zu gewinnen erfolgt in aller Regel zunächst eine Abtrennung der Flüssigphase vom Faulschlamm bzw. Rohschlamm (Klärschlammmentwässerung). Da eine Entwässerung von 100 % nicht erreicht werden kann, verbleibt ein Teil der gelösten Phosphate im Schlammwasser und steht der Rückgewinnung nicht zur Verfügung.

Die Leistung der Entwässerung variiert in der Regel zwischen 20 und 30 % TR (DWA 2019). Unter der Annahme einer Kläranlage der Ausbaugröße von 50.000 EW und einem Faulschlammanfall von 38 g TM/(E·d) (DWA 2014), einem Phosphorgehalt von 30 g P/kg TM, einem TR im Faulschlamm von 3 % sowie einem Grad der Rücklösung von 90 % ergeben sich allein durch den Rückhalt des gelösten Phosphors im entwässerten Faulschlamm Verluste in Höhe von 7 % (3,8 kg P/d) bei einer Entwässerungsleistung von 30 % TR und 12 % (6,5 kg P/d) bei einer Leistung von 20 %. Aufgrund dieser Tatsache haben insbesondere Verfahren deutliche Vorteile, die die Entwässerbarkeit bei der Schlammmentwässerung deutlich verbessern.

***Klärschlamm Entsorgung***

Die Beschaffenheit und Zusammensetzung von Klärschlamm hat einen Einfluss auf den Entsorgungsweg. Nach AbfklärV (2017) stehen nach einer Abreicherung von Phosphor etablierte Entsorgungswege nach wie vor zur Verfügung.

Insbesondere in der Zementindustrie besteht eine Nachfrage nach P-armen Brennstoffen. Erhöhungen/Anreicherungen von Chlorid oder Sulfat können sich allerdings nachteilig auf den Verbrennungsprozess auswirken. Vor allem Chlorid kann zur Korrosion von Anlagenteilen führen.



## 4 Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm

### 4.1 Gesamtverfahrensübersicht zur Phosphorrückgewinnung

Abbildung 12 zeigt die grundsätzlichen Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in Verbindung mit den verschiedenen Wegen der Klärschlammverwertung/-entsorgung.

Fokus der Studie ist die Untersuchung der Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung, d.h. es werden keine Verfahren betrachtet, die Phosphor aus der Asche zurückgewinnen.

Thermische, thermochemische Verfahren (Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Metallurgie etc.) zur Klärschlammbehandlung sowie Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm-Asche werden im Rahmen der Studie nicht betrachtet.

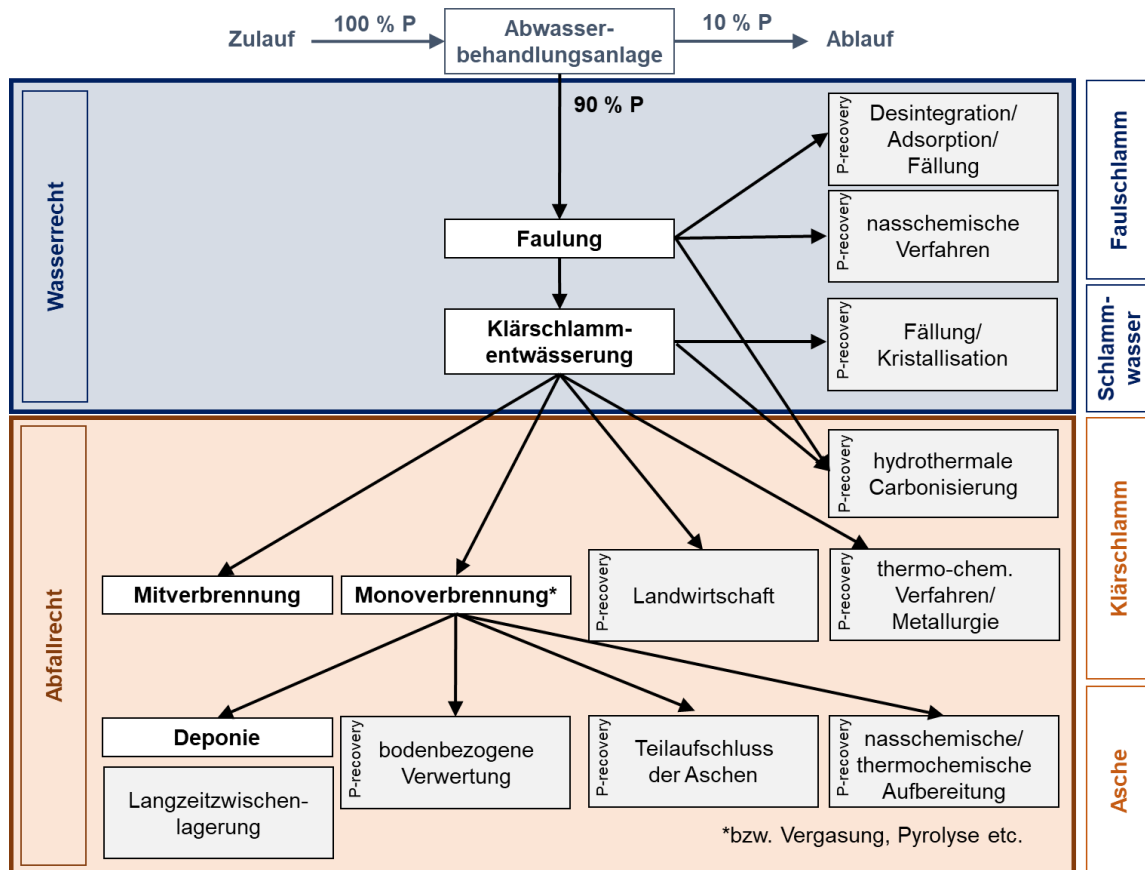


Abbildung 12: Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, verändert nach Schaum und Cornel (2013)

## 4.2 Verfahren zur Fällung/Kristallisation/Adsorption von Phosphor

Grundsätzlich kann die Fällung/Kristallisation entweder direkt im Faulschlamm oder nach der Klärschlammmentwässerung aus dem Prozesswasser erfolgen, womit sich verschiedene Verfahrenstechnologien entwickelt haben.

### 4.2.1 Fällung/Kristallisation im Faulschlamm

Die Verfahren zeichnen sich durch die Zugabe von Magnesiumsalzen in Verbindung mit einer pH-Wert-Erhöhung durch Strippung von Kohlenstoffdioxid mittels Lufteintrag oder Vakuumentgasung (ggf. in Verbindung mit einer Zugabe von Lauge) aus. Abhängig vom Verfahrensanbieter unterscheiden sich vor allem die Ausbildung der Reaktoren. Es bildet sich MAP, welches aus dem Faulschlamm separiert werden kann. Die Trennung erfolgt über den Dichteunterschied zwischen MAP-Kristallen und dem Schlamm, wobei ein Großteil (bis zu 40 %) der MAP-Kristalle nicht abgetrennt werden kann.

Die Verfahren wurden vor allem zur Vermeidung von Betriebsproblemen bei der Klärschlammmentwässerung (Vermeidung von Inkrustationen) entwickelt, vgl. Heinzmann (2005) oder Ortwein (2018). Diese positiven Effekte werden bereits mit der Bildung von MAP erreicht. Somit existieren diverse Umsetzungen, die auf eine Abtrennung von MAP verzichten. Ein Überblick über die Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Faulschlamm ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Als eine Sonderform wurde der Einsatz von Calcium-Silikat-Hydrat (CSH) zur Bindung von Phosphor im Faulschlamm untersucht (FixPhos-Verfahren), vgl. Petzet (2013). Auf der Kläranlage Hildesheim erfolgte hierzu auch ein großtechnischer Versuch. Hauptmotivation war dabei die Vermeidung von Betriebsproblemen während der Klärschlammmentwässerung, daher erfolgte auch keine Abtrennung der „beladenen“ CSH-Partikel.

Aufgrund der geringen Rücklösung von Phosphat nach einer chemischen Fällung eignen sich die Verfahren ausschließlich in Kombination mit dem Bio-P-Verfahren. Hier bieten sie zudem den Vorteil, dass Entwässerungseigenschaften verbessert und Ablagerungen vermieden werden.



Tabelle 3: Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Faulschlamm, teilweise realisiert ohne Separation von MAP

| Verfahren | Anbieter  | P-Rezyklat | Referenzen   |
|-----------|---|------------|--|
| AirPrex   | CNP-Technology<br>Water and Biosolids GmbH<br>(Deutschland) | MAP        | u.a. Berlin, Mönchengladbach,<br>Amsterdam, Salzgitter, Wolfsburg,<br>Uelzen (keine Separation von P),<br>TRL 9 <sup>1</sup> |
| NuReSys   | Nuresys - Nutrients Recovery<br>Systems (Niederlande)       | MAP        | u.a. Apeldoorn (Niederlande)   |
| EloPhos   | ELIQUO STULZ GmbH<br>(Deutschland)                          | MAP        | Lingen (keine Separation von P)  |

#### 4.2.2 Fällung/Kristallisation aus Prozesswasser

Alternativ zur Fällung/Kristallisation im Faulschlamm kann ebenfalls eine Fällung/Kristallisation im Prozesswasser erfolgen. Wenngleich die positiven Effekte zur Vermeidung von Betriebsproblemen bei der Klärschlammmentwässerung geringer ausfallen, so haben die Verfahren aus Sicht der Phosphorrückgewinnung den Vorteil, dass einerseits keine Feststoffe den Fällungs-/Kristallisationsprozess stören andererseits gezielt die Produktqualität gesteuert werden kann, wodurch sich höhere Marktwerte im Vergleich zu den Verfahren im Faulschlamm, erzielen lassen.

Das Grundprinzip bleibt dabei vergleichbar: In einem Fällungs-/Kristallisationsreaktor, der bei den unterschiedlichen Anbietern entsprechend unterschiedlich ausgebildet ist, erfolgt durch Zugabe von Magnesium- oder Calciumsalzen in Verbindung mit einer pH-Wert-Einstellung eine Fällung/Kristallisation von MAP bzw. Calciumphosphat (vgl. Abbildung 13). Diverse Verfahren sind großtechnisch seit vielen Jahren im Einsatz.

<sup>1</sup> Montag *et al.* (2019) klassifizierte den aktuellen Entwicklungsstand von Verfahren gemäß dem Technologiereifegrad (Technology Readiness Level, TRL), TRL 1 „Beobachtung und Beschreibung des grundsätzlichen Prinzips“ bis TRL 9 „Intensiver Nachweis des erfolgreichen Einsatzes in Betriebsumgebung, einschließlich sämtlicher Dokumentation“; alle weiteren Angaben zu TRL gemäß Montag *et al.* (2019)

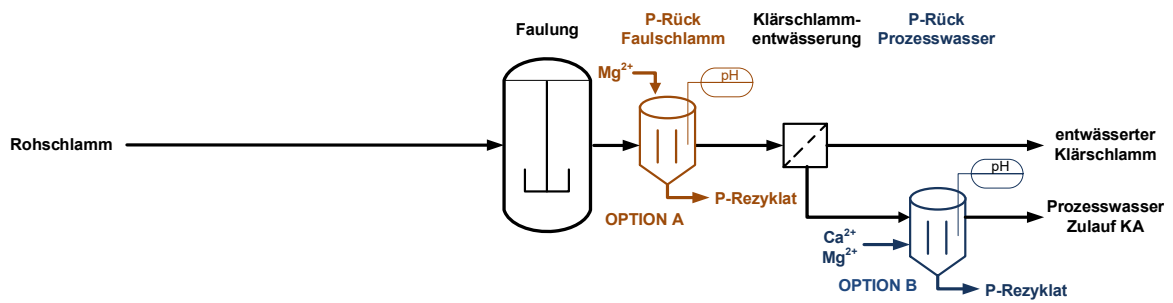


Abbildung 13: Vereinfachtes Schema einer Fällung/Kristallisation im Fautschlamm (OPTION A) bzw. im Prozesswasser (OPTION B)

Eine Sonderform stellt das P-RoC-Verfahren dar, welches durch die Zugabe von Calcium-Silikat-Hydrat (CSH) Phosphor als Calciumphosphat bindet, vgl. Berg *et al.* (2007). Ein Überblick über die Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Fautschlamm ist in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Prozesswasser

| Verfahren     | Anbieter   | P-Rezyklat      | Referenzen  |
|---------------|--|-----------------|---|
| Pearl         | Ostara Nutrient Recovery Technologies (Canada)     | MAP             | 22 großtechnische Anlagen (TRL 9); u.a. Amersfoort (Niederlande), Madrid (Spanien), Chicago (USA), Portland (USA) |
| Phosphogreen  | SUEZ treatment infrastructures (Frankreich)        | MAP             | Villiers-Saint-Frédérique, Sausheim-Mulhouse (beide Frankreich)   |
| Phospaqa      | Paques Technology (Niederlande)                    | MAP             | 11 großtechnische Anlagen (v.a. Industrieabwasser)  |
| Struvia       | Veolia Water Technologies (Frankreich)             | MAP             | Helsingør (Dänemark) Pilotanlage  |
| NuReSys       | Nuresys - Nutrients Recovery Systems (Niederlande) | MAP             | Land Van Cuijck (Niederlande)   |
| Crystallactor | Royal HaskoningDHV (Niederlande)                   | Calciumphosphat | Geestmerambacht (Niederlande) (außer Betrieb?)  |
| P-RoC         | KIT (Deutschland)                                  | Calciumphosphat | Bachgau, Großostheim (TRL 5 – 9)  |

### 4.2.3 Beispiele für eine großtechnische Umsetzung<sup>2</sup>

#### *RWZI Amsterdam-West, Niederlande*

Die Kläranlage Amsterdam-West betreibt seit vier Jahren eine Phosphorrückgewinnung mittels AirPrex-Verfahren. Die Phosphorelimination erfolgt ausschließlich biologisch. Die Ausbaugröße beträgt für den Klärschlamm Pfad 2.000.000 EW. Neben den auf der Kläranlage anfallenden Klärschlämmen werden ebenfalls externe Klärschlämme verwertet. Die

<sup>2</sup> Die „Beispiele für eine großtechnische Umsetzung“ beziehen sich auf eine exemplarische Darstellung von realisierten Verfahren auf Basis von Vor-Ort-Terminen bei den Kläranlagen oder (telefonischen) Rückfragen bei den Betreibern oder Verfahrensentwicklern.

Motivation zur Installation einer AirPrex-Anlage lag in der Behebung von Inkrustationen infolge einer unkontrollierten Struvit-Fällung, sowie in der Verbesserung der Entwässerungseigenschaften des Schlammes (entsprechend liegt die Phosphorkonzentration im Klärschlamm auch nach dem AirPrex-Verfahren deutlich über 20 g P/kg TM). Die Investitionen beliefen sich auf 3.000.000 € während die Betriebskosten mit ca. 700.000 €/a beziffert werden. (Veltman und de Danschutter 2019)

Seit Einführung des Systems konnte eine Erhöhung der TR-Konzentration im entwässerten Klärschlamm von 21 % auf 23,5 % festgestellt werden. Zudem konnten die Inkrustationen und somit der Wartungsaufwand reduziert werden. Erhöhte Abrasionen und Verstopfungen aufgrund der MAP-Kristalle führten an nachgeschalteten Aggregaten zu Problemen, weshalb ein Ablaufsystem ohne Pumpen nachgerüstet wurde. Derzeit werden rund 300 Mg P/a an der Anlage produziert. Die Abnahme des Struvits erfolgt durch die Firma ICL Fertilizers bei einem Preis von 60 - 80 €/Mg. Das Struvit wird als Ausgangsmaterial zur Herstellung von konventionellen Düngemitteln verwendet (Veltman und de Danschutter 2019).

#### *Kläranlage Berlin-Waßmansdorf*

Die Ausbaugröße der Kläranlage Berlin-Waßmansdorf beträgt 1.000.000 EW. Täglich fallen rund 2.000 m<sup>3</sup> Faulschlamm an. Dieser wird im AirPrex-Verfahren zur kontrollierten Kristallisation von MAP zur Vermeidung von Inkrustationen behandelt. Während des Prozesses fallen rund 2.500 kg/d MAP der mit einem Marktwert von 60 - 80 €/Mg als Berliner Pflanze vermarktet wird (Ewert und Wagenbach 2014).

#### *Kläranlage Neuburg an der Donau*

In Neuburg an der Donau soll ebenfalls eine Anlage zur Phosphorrückgewinnung installiert werden. Nach derzeitiger Planung soll Prozesswasser ein mit CSH gefülltes Festbett durchströmen, wo das gelöste Phosphat ausfällt bzw. adsorbiert. Die Inbetriebnahme ist für Ende 2020 geplant. Das Verfahren soll insbesondere für Verfahren < 50.000 EW Anwendung finden. In Großostheim wird derzeit das P-RoC-Verfahren mit Rührreaktor im Pilotmaßstab erprobt. Die Anlage wird mit einem Volumenstrom von 0,1 m<sup>3</sup>/h getestet (DPP 2018).

### **4.2.4 Zwischenfazit**

Selbst für eine Kläranlage mit überwiegender biologischer Phosphorelimination ist eine Unterschreitung des Schwellenwertes von 20 g P/kg TM unwahrscheinlich, für Kläranlagen mit chemisch-physikalischer Phosphorelimination aktuell unmöglich. Spörri (2017) gibt für die Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem Prozesswasser eine maximale Effizienz von 15 % an, wodurch nur Schlämme mit einem Phosphorgehalt von 23 g P/kg TM den Schwellenwert erreichen. Somit ist eine Kombination mit weiteren Verfahren notwendig, die die Phosphatrücklösung aus dem Klärschlamm erhöhen mittels physikalischer, biologischer oder chemischer Verfahren.

Allerdings ist zu beachten, dass es sich um praxiserprobte Verfahren handelt, vor allem eingesetzt zur Verminderung von Betriebsproblemen bei der Klärschlammbehandlung (Vermeidung von Inkrustationen, Optimierung Klärschlamm-entwässerung).

### 4.3 Erhöhte Rücklösung mittels physikalischer Verfahren

#### 4.3.1 Verfahrenstechnisches Grundprinzip

Besonders hervorzuheben ist die thermische Hydrolyse, welche als Klärschlamm-desintegrationsverfahren zur Erhöhung der Faulgasausbeute und Verbesserung der Klärschlammmentwässerung entwickelt wurde.

Bei einer Desintegration werden die im Schlamm enthaltenen Mikroorganismen aufgeschlossen, wodurch es zu einer vermehrten Freisetzung von Phosphaten kommt. Dabei wird zwischen der thermischen Hydrolyse unter  $100^{\circ}\text{C}$  und über  $100^{\circ}\text{C}$ , der sogenannten Thermodruckhydrolyse, unterschieden. Aufgrund des vergleichsweise guten biologischen Abbaus des Primärschlammes, wird die thermische Desintegration häufig auf den Überschussschlamm beschränkt.

Aufgrund der erneuten partikulären Einbindung der Phosphate durch Fäll- und Umwandlungsprozesse im Faulturn wird der Effekt der thermischen Hydrolyse teilweise kompensiert. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass es durch den thermischen Aufschluss zu einer Reduktion der Trockenmasse kommt, d. h. durch die Erhöhung des Abbaugrads wird mehr organische Masse abgebaut, die sich letztendlich auf den gleichbleibenden Phosphor verteilt. D. h. es ist unbedingt zu beachten, dass sich die positiven Effekte für die Phosphorrücklösung/Phosphorrückgewinnung durch den erhöhten Abbaugrad aufheben.

Hydrolyse-Verfahren mit der Option einer Phosphorrückgewinnung findet sich an der Kläranlage Lingen (LysoTherm) sowie eine Anlage mit thermischer Hydrolyse nach der Faulung auf der Kläranlage in Braunschweig (aktuell in Ausführung). Die Einbindung der physikalischen Rücklösung in die Klärschlammbehandlung ist in Abbildung 14 dargestellt.

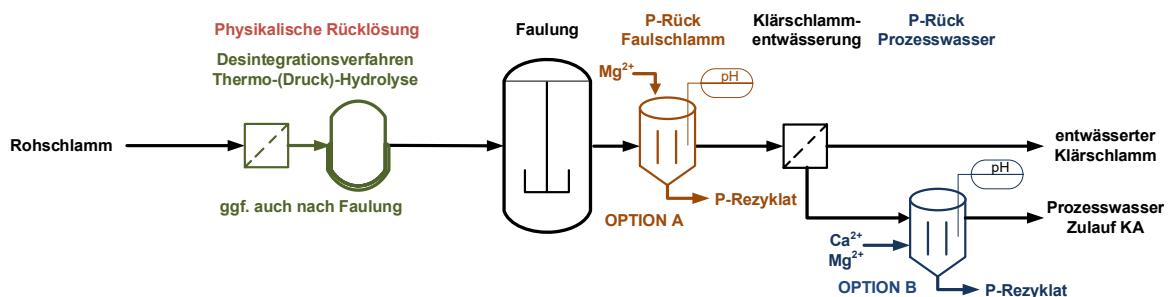


Abbildung 14: Vereinfachtes Schema einer physikalischen Rücklösung von Phosphor

Spörri *et al.* (2017) geht davon aus, dass durch die thermischen Desintegrationsverfahren in Verbindung mit einer Phosphorrückgewinnung ein maximaler Wirkungsgrad von 25 % erzielt werden kann. Auch Ewert und Stephan (2019) gehen davon aus, dass nur Klärschlämme mit einem hohen Bio-P-Anteil den Schwellenwert unterschreiten können.

Neben der thermischen Hydrolyse gibt es auch andere physikalische/mechanische Desintegrationsverfahren, die zu einer erhöhten Freisetzung von Phosphor führen. Verbreitet ist hierbei die Ultraschall-desintegration. Die Rücklösung ist hierbei im Vergleich zu den thermischen Verfahren deutlich limitiert.

### 4.3.2 Beispiele für eine großtechnische Umsetzung

#### *RWZI Amersfoort, Niederlande*

Die Kläranlage Amersfoort besitzt eine Ausbaugröße von 300.000 EW. Auf der Kläranlage wurden sowohl das WASSTRIP als auch das Pearl Verfahren umgesetzt. Zudem verfügt die Kläranlage über eine thermische Hydrolyse (Lysotherm). Im Rahmen des WASSTRIP Verfahrens wird das zuvor in den Mikroorganismen eingelagertes Bio-P zurückgelöst. Das P angereicherte Schlammwasser wird anschließend mit dem ammoniumreichen Prozesswasser aus der Entwässerung vermischt und einem Pearl-Reaktor zur gezielten Kristallisation von MAP zugeführt. Während des Prozesses fallen unterschiedliche Größen an MAP-Pellets an, die in vier verschiedene Größenklassen zugeordnet werden. Eine Abnahme der Produkte erfolgt durch die Firma Ostaro, wobei ein Preis in Abhängigkeit der Qualität des Produktes von bis zu 350 €/Mg erzielt wird. Derzeit kann die Anlage aus verfahrenstechnischen Gründen nicht ausschließlich mit biologischer P-Elimination betrieben werden, wodurch der Wirkungsgrad der Rückgewinnung auf 15 - 20 % begrenzt ist (Kraus und Kabbe 2017).

#### *Kläranlage Göppingen*

Die Kläranlage Göppingen besitzt eine Ausbaugröße von 330.000 EW. Das anfallende Abwasser weist eine ungewöhnlich niedrige Phosphorkonzentration von 2,5 % im Faulschlamm auf. Nach der Durchführung mehrerer Studien wurde ein modifiziertes System auf Basis des AirPrex-Verfahrens installiert. Zusätzlich findet eine vorgeschaltete Hydrolyse mit Schwefelsäure bei einem pH-Wert von 6 statt (Maier 2019).

#### *Kläranlage Felsalbe*

An der Kläranlage Felsalbe wird derzeit ein Verfahren zur Phosphorrückgewinnung im großtechnischen Maßstab errichtet. Die Fertigstellung ist für April 2020 geplant. Die Phosphorelimination während der Abwasserbehandlung erfolgt dabei überwiegend biologisch. Der phosphorangereicherte Überschussschlamm wird getrennt vom Primärschlamm in einer Hochlastfaulung behandelt und anschließend einer Thermodruckhydrolyse zugeführt. Nach einer Ammoniakstrippung wird MAP ausgefällt. Der P-arme Schlamm wird anschließend gemeinsam mit dem Primärschlamm einer konventionellen Faulung zugeführt.

#### *Kläranlage Braunschweig (Steinhof)*

Aktuell befindet sich eine Verfahrenskombination aus Faulung (ausschließlich Überschussschlamm), Vorentwässerung, Thermodruckhydrolyse und Entwässerung in der Inbetriebnahmephase. Das Prozesswasser aus der Vorentwässerung sowie ggf. Entwässerung wird einem Kristallisationsreaktor (NuReSys) zugeführt mit dem Ziel der Gewinnung von MAP. Die Verfahrenskombination zielt insbesondere auf eine Prozessoptimierung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung und nicht auf eine Unterschreitung des Schwellenwerts (20 g P/kg TM).

### *Kläranlage Lingen*

Auf der Kläranlage Lingen, ausgebaut auf 195.000 EW, wird eine Kombination einer Thermodruckhydrolyse (Lysotherm) und Faulung mit anschließendem AirPrex-Verfahren betrieben. Die Zielsetzung liegt in der Prozessoptimierung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung, sodass keine Abtrennung des gebildeten MAP erfolgt.

#### **4.3.3 Zwischenfazit**

Aktuell existiert keine Referenzanlage, die nachweisen kann, dass die Anforderungen der AbfKlärV (2017) mit der Umsetzung eines Desintegrationsverfahrens eingehalten werden können. Auch hier ist zu vermuten, dass Klärschlämme aus Kläranlagen mit einem hohen Anteil biologischer Phosphorelimination besser geeignet sind. Laut Literatur kann die Effizienz der Phosphorrückgewinnung durch die thermische Vorbehandlung auf 25 % erhöht werden (Spörri *et al.* 2017).

Allerdings ist zu beachten, dass es sich um praxiserprobte Verfahren handelt, eingesetzt zur Optimierung der Klärschlammbehandlung, vor allem zur Erhöhung der Faulgasausbeute sowie Verbesserung der Klärschlammmentwässerung. Gleichzeitig sind aber auch mögliche negative Auswirkungen, bspw. Erhöhung der Stickstoffrückbelastung oder Erhöhung des refraktären CSB zu beachten.

## **4.4 Erhöhte Rücklösung mittels biologischer Verfahren**

### **4.4.1 Verfahrenstechnisches Grundprinzip**

Im Gegensatz zu anderen Rückgewinnungsverfahren, setzen biologische Verfahren vor der Faulung an. In einem vorgeschalteten Reaktor findet zunächst eine Versäuerung des Klärschlammes statt. Die Hydrolyse/Versäuerung bedingt die Bildung organischer Säuren und führt zu einem Absinken des pH-Werts. Durch die Freisetzung von leicht verfügbarer organischer Substanz, ggf. auch in Verbindung mit niedrigem pH-Wert, erfolgt bei Klärschlämmen mit einem hohen Bio-P-Anteil eine Rücklösung von Phosphor. Die Effekte bei Klärschlämmen aus einer chemisch-physikalischen Phosphorelimination werden limitiert sein. Es folgt die Entwässerung des versäuerten Klärschlammes und die Fällung/Kristallisation von Phosphor aus dem Prozesswasser. Nach erfolgter Fällung/Kristallisation werden Klärschlamm und Prozesswasser dem Faulturm zugeführt. Die Einbindung der biologischen Rücklösung in die Klärschlammbehandlung ist in Abbildung 15 dargestellt.

Beim WASSTRIP Verfahren erfolgt ebenfalls eine Versäuerung und Freisetzung von Phosphat (hier zusammen mit Zugabe von Primärschlamm). Nach einer Eindickung wird das Prozesswasser mit dem Prozesswasser der Klärschlammmentwässerung nach der Faulung verschnitten, so dass eine Kristallisation von MAP im Pearl Reaktor möglich ist, vgl. Gysin *et al.* (2018).

Es ergeben sich ggf. Synergien mit der Faulgasgewinnung (ggf. aber auch negative Effekte, da ein Teil der organischen Säuren für die Phosphorrücklösung verbraucht wird), da die organischen Bestandteile während der Versäuerung in leicht verfügbare Fraktionen umgewandelt werden. Die Verfahren lassen sich sinnvoll nur vor der Faulung installieren, wodurch ein weiteres Entwässerungsaggregat von Nöten ist. Ein Überblick über die Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Faulschlamm ist in Tabelle 5 aufgeführt.

Grundsätzlich ist die Verfahrensidee nicht neu und setzt die Entwicklung zur erhöhten biologischen Phosphorelimination im Nebenstrom fort, vgl. z.B. PHOSTRIP-Verfahren (Kaschka und Weyrer 1999). Montag (2008) führte umfangreiche Untersuchungen zur biologischen Rücklösung von Phosphor von Klärschlämmen aus Kläranlagen mit erhöhter biologischer Phosphorelimination durch (PRISA-Verfahren). Basierend auf einer exemplarischen Phosphorbilanz für eine Kläranlage mit dem PRISA-Verfahren resultierte eine Phosphorkonzentration im entwässerten Faulschlamm vom 21 g P/kg TM.

Eine neuere Entwicklung der Vorversäuerung stellt das CalPrex-Verfahren dar. Während der Vorversäuerung, welche zwischen 12 – 36 h beträgt, wird Bio-P aufgrund des sich einstellenden anaeroben Milieus in Lösung gebracht. Der aufgrund der Versäuerung abfallende pH-Wert auf ca. 5 unterstützt die Freisetzung der Anionen. Das phosphatangereicherte Schlammwasser wird anschließend von den Feststoffen getrennt und das Phosphat durch Zugabe von Calciumhydroxid ausgefällt.

Durch Zugabe von leicht abbaubaren Zuckern und entsprechenden Betriebsparametern, welche die mikrobiologische Produktion von Milchsäure fördert, soll eine erhöhte Freisetzung auch an Eisen gebundenen Phosphaten zu beobachten sein. Die Milchsäure führt zu einer Reduktion von  $\text{Fe}^{3+}$  zu  $\text{Fe}^{2+}$ , wodurch das Phosphat vermehrt in Lösung gehen kann (Daumer *et al.* 2019).

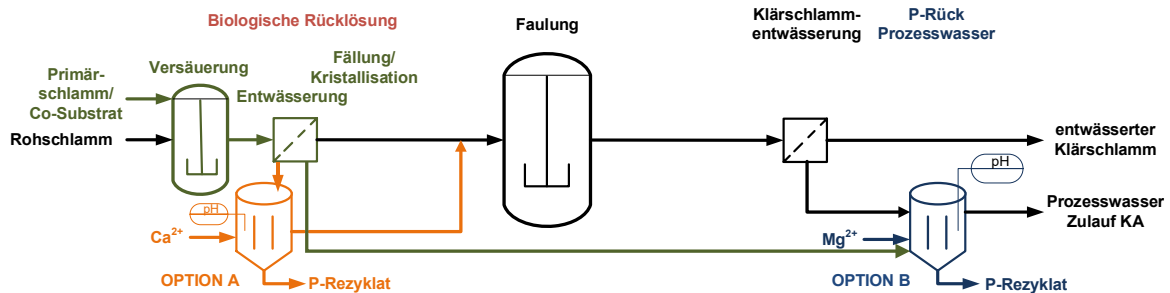


Abbildung 15: Vereinfachtes Schema einer biologischen Rücklösung von Phosphor, OPTION A: CalPrex; OPTION B: WASSTRIP



Tabelle 5: Verfahren zur biologischen Rücklösung von Phosphor

| Verfahren | Anbieter  | P-Rezyklat           | Referenzen                                    |
|-----------|---|----------------------|---|
| WASSTRIP  | Ostara Nutrient Recovery Technologies (Canada)        | MAP                  | u.a. Amersfoort (Niederlande), Portland (USA) |
| PhosForce | Veolia Water Technologies (Frankreich)                | Calciumphosphat/ MAP | Schönebeck (Elbe) Pilotanlage                 |
| CalPrex   | CNP-Technology Water and Biosolids GmbH (Deutschland) | Calciumphosphat      | Pilotanlage in Planung                        |

#### 4.4.2 Zwischenfazit

Aktuell existiert keine Referenzanlage, die nachweisen kann, dass die Anforderungen der AbfklärV (2017) mit der Umsetzung einer biologischen Rücklösung eingehalten werden können. Grundsätzlich wird Voraussetzung sein, dass der Klärschlamm aus einer Kläranlage mit biologischer Phosphorelimination stammt (Analogie zu den Verfahren zur erhöhten biologischen Phosphorelimination im Nebenstrom); der Einsatz bei Klärschlämmen aus Kläranlagen mit chemisch-physikalischer Phosphorelimination wird limitiert sein.

### 4.5 Erhöhte Rücklösung mittels chemischer Verfahren

#### 4.5.1 Verfahrenstechnisches Grundprinzip

Durch eine pH-Wert-Absenkung wird Phosphor in Lösung gebracht und anschließend durch eine Fest-Flüssig-Trennung vom Klärschlamm getrennt (vgl. Abbildung 16). Durch Anhebung des pH-Wertes im Prozesswasser erfolgt die Fällung/Kristallisation des P-Produktes überwiegend als MAP oder auch Calciumphosphat. Bedingt durch die pH-Wert-Absenkung kommt es auch zu einer Rücklösung von (Schwer-)metallen, womit sich in Abhängigkeit vom Klärschlamm und der Prozessführung auch Eisen- oder Aluminiumphosphate bilden können, die die Produktverwertung erschweren bzw. den Wirkungsgrad reduzieren.

Die Anlagentechnik ist im Vergleich zu den Verfahren zur Rückgewinnung aus Prozesswasser deutlich anspruchsvoller und der Einsatz von Chemikalien ist deutlich erhöht. Dies bedeutet aber auch, dass ein Einsatz unabhängig von der Art der Phosphorelimination möglich erscheint. Ein Überblick über die Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Faulschlamm ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Durch die pH-Wert-Absenkung im Faulschlamm kann es zu Beeinträchtigungen (bspw. Korrosion) nachgeschalteter Aggregate (z.B. Pumpen, Rohrleitungen etc.) und Prozesse kommen. Abhängig von den eingesetzten Verfahren ist sowohl im Klärschlamm als auch im Prozesswasser eine Erhöhung der Chlorid- oder Sulfatkonzentrationen zu erwarten, ggf.

verbunden mit negativen Auswirkungen auf die Klärschlamm Entsorgung (vor allem bei der Mitverbrennung) bzw. im Ablauf der Kläranlage.

Auf der Kläranlage Gifhorn wurde das Gifhorner-Verfahren (modifiziertes Seaborne-Verfahren) seit 2007 großtechnisch im Betrieb erprobt, vgl. Esemén (2012) sowie Günther (2011). Das Stuttgarter-Verfahren (Weideler 2010) wird auf der Kläranlage Offenburg seit 2011/2012 im halb- bis großtechnischen Maßstab untersucht, vgl. Meyer *et al.* (2018). Sowohl beim Gifhorner- als auch beim Stuttgarter-Verfahren erfolgt zur Rücklösung von Phosphor eine pH-Wert-Absenkung mittels Säure.

In Gifhorn wurde eine gezielte Schwermetallabtrennung erprobt, wobei diese aufgrund von technischen und ökonomischen Gründen außer Betrieb genommen wurde. Das Stuttgarter-Verfahren dosiert Zitronensäure für eine Komplexierung der (Schwer-)metalle. Der pH-Wert-Einstellung kommt eine wichtige Bedeutung zu, da hiermit die Rücklösung von Phosphor aber auch der Schwermetalle eingestellt werden kann.

Die Zugabe von Säure führt in der Regel zu einer Verschlechterung des Entwässerungsergebnisses. In dieser Hinsicht muss auf jeden Fall die Auswahl des Polymers, dessen Wirkung stark pH-Wert-abhängig ist, neu bewertet werden. Im Rahmen der Erprobung des Stuttgarter-Verfahrens kam es zu einer Verschlechterung der Entwässerungsleistung (Schönberger *et al.* 2017). Zudem können aufgrund des sauren pH-Wertes verwendete Polymere unwirksam werden.

Im Rahmen der Erprobung des Stuttgarter-Verfahrens wurde ein pH-Wert von 3 als Grenze identifiziert. Dadurch wird die Rücklösung bei einem chemischen Aufschluss bereits um 40 – 50 % (Maier und Steinmetz 2014) bzw. 20 % (Schönberger *et al.* 2017) reduziert. Des Weiteren lässt sich basierend auf den Ergebnissen von Schönberger *et al.* (2017) eine Vervielfachung der Sulfatkonzentration im Prozesswasser erwarten. Salze können sowohl in der Abwasser- und Klärschlammbehandlung als auch im Oberflächengewässer negative Auswirkungen haben.

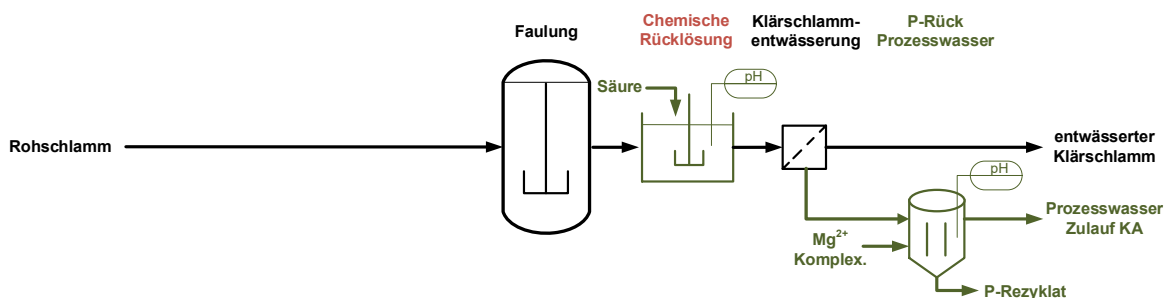


Abbildung 16: Vereinfachtes Schema einer chemischen Rücklösung von Phosphor mittels Säure

Das ExtraPhos-Verfahren (Schnee und Opitz 2018) wird zzt. im halbtechnischen Maßstab erforscht (u.a. auf der Kläranlage Mainz-Mombach und Itzehoe), dabei erfolgt der Aufschluss mittels Kohlenstoffdioxid unter Druck. Wenngleich diverse Forschungsarbeiten zum ExtraPhos-Verfahren durchgeführt wurden, so sind Ergebnisse zur Phosphorbilanz, vor allem zum Potential der Phosphorrücklösung, bislang kaum publiziert.

Des Weiteren gab es bereits in den 1970er Jahren in Kanada und den USA Untersuchungen zur Rücklösung von Phosphor mittels chemischer (saurer) Klärschlammbehandlung, vgl. Scott und Horlings (1975) sowie EPA (1980). In den 1990er Jahren wurde in Schweden das Krepro-Verfahren entwickelt, die Rücklösung von Phosphor erfolgt dabei mittels thermo-chemischem (saurem) Aufschluss, vgl. Naturvårdsverket (1997).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass mittels chemischer Rücklösung, eine Abreicherung des Klärschlammes auf  $< 20$  g P/kg TM überwiegend möglich sein wird, vgl. Spörri *et al.* (2017), wobei mit zunehmendem Wirkungsgrad auch der Chemikalienverbrauch steigen wird. Allerdings konnte an der halbtechnischen Anlage in Offenburg festgestellt werden, dass ab einem pH-Wert  $< 4$  zunehmend die Klärschlammmentwässerung mittels Kammerfilterpresse beeinträchtigt wird.

Tabelle 6: Verfahren zur Fällung/Kristallisation im Faulschlamm

| Verfahren             | Anbieter                          | P-Rezyklat      | Referenzen  |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------|---|
| Gifhorer Verfahren    | -                                 | MAP             | Gifhorn<br>(außer Betrieb)                              |
| Stuttgarter Verfahren | iat - Ingenieurberatung GmbH      | MAP             | Offenburg<br>(zzt. außer Betrieb),<br>TRL 7 - 8         |
| Stuttgarter Verfahren | MSE-Mobile Schlammwässerungs GmbH | MAP             | Mobile Versuchsanlage<br>(zzt. außer Betrieb),<br>TRL 7 |
| ExtraPhos Verfahren   | Chemische Fabrik Budenheim KG     | Calciumphosphat | Mainz-Mombach<br>(zzt. außer Betrieb),<br>TRL 5         |

#### 4.5.2 Beispiele für eine großtechnische Umsetzung

##### *Kläranlage Gifhorn*

Seit 2006 ist eine Anlage zur Phosphorrückgewinnung (Gifhorer-Verfahren, modifiziertes Seaborne-Verfahren) in Betrieb. Aktuell erfolgt nach Ansäuerung und Fest-Flüssig-Trennung eine Erzeugung von MAP. Die zeitweise betriebene Schwermetallabtrennung und Ammoniakstrippung wurde aufgrund prozesstechnischer Probleme eingestellt. Eine Vermarktung des Fällungsproduktes findet zzt. nicht statt. Ziel des Betriebs ist aktuell die Prozessoptimierung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung

##### *Kläranlage Offenburg*

Auf der Kläranlage Offenburg wurde ab 2012 eine großtechnische Versuchsanlage nach dem Stuttgarter-Verfahren erprobt. Die Anlage wurde für 10.000 EW dimensioniert und im Teilstrom betrieben. Im Stuttgarter-Verfahren wird gebundenes Phosphat durch pH-Wert-

Absenkung mittels Schwefelsäure in Lösung gebracht. Anschließend erfolgt nach vorheriger Schwermetallkomplexierung durch Zitronensäure eine Fällung von MAP durch Zugabe von Magnesiumsalzen. Aktuell wird die Anlage nicht mehr betrieben (Schönberger *et al.* 2017).

#### 4.5.3 Zwischenfazit

Durch eine chemische Rücklösung von Phosphor können prinzipiell die Anforderungen der AbfKlärV (2017) eingehalten werden. Wenngleich der Chemikalienverbrauch von der Zusammensetzung des Klärschlammes abhängt, so kann davon ausgegangen werden, dass eine Rücklösung unabhängig von der Art der Phosphorelimination möglich ist.

Die Verfahrensumsetzungen sind dabei im Vergleich zu den anderen Verfahrensprinzipien aufwändiger und mit einem Chemikalienverbrauch verbunden. Sofern der Aufschluss mit Säure erfolgt, sind mögliche negative Auswirkungen durch eine Erhöhung der Salzkonzentration sowie auf die Klärschlamm-entwässerung (TR-Konzentration und Polymer) zu beachten. Da sich im sauren Milieu auch (Schwer-)metalle lösen, ist zur Separation von MAP (oder auch Calciumphosphat) eine Komplexierung der Metalle ggf. notwendig.

### 4.6 Hydrothermale Carbonisierung (HTC)

#### 4.6.1 Verfahrenstechnisches Grundprinzip

Bei der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) wird bei Temperaturen zwischen 180 und 250 °C organisches Material zu Biokohle umgewandelt. Eine Rückgewinnung von Phosphor stand zunächst nicht im Fokus der Prozessentwicklungen.

Um den Phosphor aus dem erzeugten Biokohleschlamm zurückzugewinnen, muss unter Einsatz von Extraktionsmitteln der Phosphor in Lösung gebracht werden. Die entwickelten Verfahren setzen hierfür Schwefelsäure oder auch Salpetersäure ein (Kusche 2019a; Yalcin *et al.* 2019). Anschließend wird der angesäuerte Biokohleschlamm entwässert und der Phosphor im Prozesswasser durch Zugabe von Ca/Mg-basierten Fällmitteln ausgefällt (Kusche 2019a; Yalcin *et al.* 2019). Die Einbindung der HTC in die Klärschlammbehandlung ist in Abbildung 17 dargestellt.

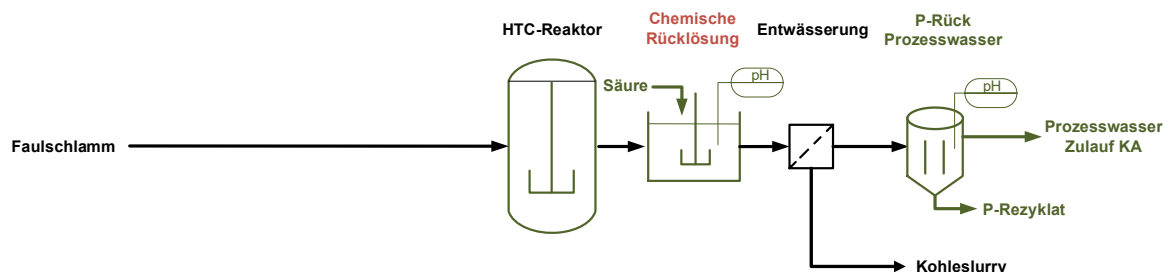


Abbildung 17: Vereinfachtes Schema der HTC mit anschließender P-Rücklösung

Im cleanphos-Verfahren erfolgt eine zweistufige Fällung, um zunächst durch Zugabe von Natronlauge das Eisen abzutrennen (Glaser 2018).

Im Vergleich zu den reinen extraktionsbasierten Rückgewinnungsverfahren bietet die Carbonisierung den Vorteil einer hohen Entwässerbarkeit, die einen TR von bis zu 65 % TR erreichen kann (DWA 2016). Theoretisch ist auch eine Rückführung der Prozesswässer in die Faulung möglich, wodurch höhere Faulgasausbeuten erzielt werden können. Hohe Konzentrationen an Schwefelsäure und Ammonium im Prozesswasser können allerdings zu einer Beeinträchtigung der Faulungsprozesse führen. Zudem können weitere Verfahren zur Stickstoffelimination im Prozesswasser erforderlich sein. HTCycle plant in dieser Beziehung ein Gesamtsystem anzubieten, welches eine Prozesswasserreinigung inkludiert (Kusche 2019b; Kusche 2019a).

Entsprechend der thermischen Hydrolyse ist auch bei den HTC-Verfahren mit einem Anstieg des refraktären CSB zu rechnen.

Eine Pilotanlage wurden in Karlsruhe zwischen 2015 und 2017 mit einem Volumen der Rückgewinnungsstufe von 500 L (cleanphos) betrieben (Glaser 2018). Eine halbtechnische Anlage soll auf der Kläranlage Duisburg-Kaßlerfeld (TerraNova), die im Rahmen des Projektes CarBioPhos bis 2020 getestet werden (Buttmann 2019; TerraNova 2019) .

#### **4.6.2 Zwischenfazit**

Die HTC-Verfahren bieten den Vorteil, dass sie zu einer deutlichen Verbesserung der Entwässerungseigenschaften der Schlämme führen und somit anfallende Transportkosten senken.

Den Vorteilen stehen der (teilweise) energieintensive Prozess, eine Ammonium Rückbelastung, Erhöhung des refraktären CSBs sowie eine, aufgrund der Druckbehälter, anspruchsvolle Technik gegenüber. Neben dem refraktärem CSB können sich auch Stoffe bilden, die zu einer Hemmung der biologischen Abwasser- und Klärschlammprozesse führen können.

#### **4.7 Weitere Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwasser/Klärschlamm**

In der Vergangenheit wurden zahlreiche weitere Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser/Klärschlamm entwickelt, die nach derzeitigem Stand nicht mehr weiterentwickelt werden. Darunter finden sich Verfahren zur überkritischen Nassoxidation (Aqua-Reci), Oxidationsverfahren (Phoxnan), Filtrationsverfahren, Adsorptionsverfahren mit Superparamagnetischen Nanopartikel und Ionenaustauschverfahren (PHOSIEDI, REM NUT), vgl. auch Schaum (2007).



## 5 Bewertung der Rezyklate nach DüMV

Für die Markteinführung und Marktfähigkeit eines Rezyklates müssen zunächst die Einhaltung der rechtlichen Vorgaben erfüllt werden. Diese sind auf nationaler Ebene in der Düngemittelverordnung (DüMV) festgehalten. Auf europäischer Ebene ist am 16. Juli 2019 die Verordnung 2019/1009 zur Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt in Kraft getreten (gilt ab dem 16. Juli 2022).

Neben diesen grundsätzlichen Bedingungen spielen bei der Vermarktung die Reinheit, Farbe und Korngrößenverteilung sowie enthaltene Fremdstoffe eine wesentliche Rolle. Bzgl. diesen Aspekten weist das Ostara-Verfahren bereits eine hohe Qualität auf, wohingegen das AirPrex-Verfahren deutliche Schwächen aufzeigt. Da nur vereinzelt Fällungsprodukte der Verfahren vorliegen, soll im Rahmen dieser Studie keine weitere Bewertung hinsichtlich des Vermarktungspotentials der Produkte erfolgen.

### 5.1 Bewertung nach DüMV

Für die Rezyklate MAP und Dicalciumphosphat (DCP) kommen gemäß Anlage 1 der DüMV (2017) die Kennzeichnung 1.2.1 (Dicalciumphosphat mit Magnesium) und 1.2.2 (Dicalciumphosphat mit Tricalciumphosphat) in Frage. Falls diese nicht zutreffen, findet 1.2.9 (Phosphatdünger aus bestimmten mineralischen Düngemitteln) Anwendung unter der Voraussetzung, dass die unter Anlage 2 Punkt 6.2.4 (Phosphatfällung) aufgeführten Fällungsmittel verwendet wurden. Demnach muss für die Bezeichnung 1.2.1 ein Mindestgehalt von 20 %  $P_2O_5$  und für 1.2.2 von 8 %  $P_2O_5$  im Rezyklat nachgewiesen werden. Im Falle der Bezeichnung 1.2.1 erfolgt die Bewertung des Phosphates als alkalisch-ammoncitrat-lösliches  $P_2O_5$ . Für die Bezeichnung 1.2.9 sind Mindestgehalte an  $P_2O_5$  von 10 % definiert, davon müssen 2,5 % des vorliegenden  $P_2O_5$  wasserlöslich, 5 % neutral-ammoncitratlösliches und wasserlösliches Phosphat und 2 % ausschließlich mineral säurelösliches Phosphat sein (Anlage 2 Punkt 5.7, DüMV (2017)).

Tabelle 7 zeigt die Phosphorgehalte der jeweiligen Verfahren, soweit vorhanden, auf.

Tabelle 7: Phosphorgehalte und -löslichkeiten der jeweiligen Rezyklate (LfU 2015)

| Verfahren   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -<br>Konzentration | wasserlös.<br>Phosphat | zitronen-<br>säurelös.<br>Phosphat | alkalisch-<br>ammoncitrat-lösl.<br>Phosphat |
|-------------|--|------------------------|------------------------------------|---|
|             | [%]  | [%]                    | [%]                                | [%]   |
| AirPrex     | 26   | 1,8                    | 88                                 | 22  |
| P-RoC       | 13   | 1,5                    | 81                                 | 70  |
| Stut.-Verf. | 20   | 0,9                    | 85                                 | 44  |
| Giff.-Verf. | 20   | 3,0                    | 112*                               | 62  |

\* Im Vergleich zur Schwefelsäure war Zitronensäure das stärkere Laugungsmittel

In Tabelle 8 sind die Grenzwerte der DüMV den Ergebnissen der Analysen der jeweiligen Rezyklate gegenübergestellt. Die vorhandenen Messwerte unterschreiten die Grenzwerte deutlich. Allerdings fehlen in allen Fällen Befunde zu Salmonellen und thermo-resistenten Viren. Für zahlreiche Verfahren fehlen entsprechende Messungen gänzlich.



**Tabelle 8:** Gegenüberstellung der Grenzwerte nach DüMV Anlage 2 Tabelle 1.4 mit den vorliegenden Analysen der Rezyklate in mg/kg TM, \*Cadmium: 50 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> für Düngemittel ab 5 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (FM), sonst 1,5 mg/kg TM (LfU 2015; Daly 2017; Saerens 2019)

| Parameter                | Grenzwert          | AirPrex | NuReSys | Pearl | P-Roc | Stut.-Verf. | Giff.-Verf. |
|--------------------------|--------------------|---------|---------|-------|-------|-------------|-------------|
| Arsen                    | 40                 | 0,7     | < 2     | 0,45  | 0,6   | 3,2         | 0,3         |
| Blei                     | 150                | 11,2    | < 10    | 0,16  | <0,1  | <0,1        | 1,8         |
| Cadmium                  | 1,5 / 50*          | 0,4     | <0,2    | -     | <0,1  | <0,1        | 0,3         |
| Chrom (ges)              | -                  | 7       | 8,2     | -     | 17    | <5          | 5           |
| Chrom (VI)               | 2                  | <0,3    | -       | < 0,1 | <0,3  | <0,3        | <0,3        |
| Nickel                   | 80                 | 6,4     | < 3     | 0,39  | 10    | 19,2        | 3,8         |
| Quecksilber              | 1                  | 0,15    | < 0,07  | 0,005 | <0,01 | 0,03        | 0,06        |
| Thallium                 | 1                  | <0,01   | -       | -     | <0,01 | <0,01       | 0,03        |
| Perfluorierte Tenside    | 0,1                | -       | -       | -     | -     | -           | -           |
| Summe Dioxine und dl-PCB | 30 ng              | 3,41    | -       | -     | 0,28  | 0,59        | -           |
| Salmonellen              | 50 g (ohne Befund) | -       | 0       | -     | -     | -           | -           |
| thermo-resistente Viren  | kein Befund        | -       | -       | -     | -     | -           | -           |

## 5.2 Bewertung im europäischen Kontext

Die Bewertung bezieht sich auf die Verordnung 2019/1009 des europäischen Parlaments und des Rates mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngerprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen Nr. 1069/2009 und Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung Nr. 2003/2003, nachfolgend EG-Verordnung (vom 5. Juni 2019).

Die MAP/DCP-Rezyklate werden in diesem Kontext der Produktfunktionskategorie PFC 1(C)(I)(a)(ii) - Festes anorganisches Mehrnährstoff-Makronährstoff-Düngemittel zugeordnet.

Gemäß dieser Bestimmung muss für diese Kategorie folgender Tatbestand vorliegen:

a. Es liegt mehr als ein Primär-Makronährstoff (N, P, K) vor.

oder

b. Es liegt mehr als ein Sekundär-Makronährstoff (Ca, Mg, Na, S) vor und es liegt kein Primär-Makronährstoff (N, P, K) vor.

Tabelle 9 zeigt die einzuhaltenden Konzentrationen im Dünger an, wobei gemäß obiger Definition nicht alle Mindestkonzentrationen eingehalten werden müssen. Für das AirPrex-, Stuttgarter- und dem Pearl-Verfahren sind die Bedingungen erfüllt.

*Tabelle 9: Untere Grenzwerte nach dem aktuellen Stand der EG-Verordnung in % (LfU 2015; EU 2019)*

| Stoff                         | Min. gehalt* | AirPrex | Pearl | Stut.-Verf. |
|-------------------------------|--------------|---------|-------|-------------|
| N                             | 3            | 5       | 5     | 5           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 3            | 26      | 28    | 27          |
| K <sub>2</sub> O              | 3            | -       | -     | -           |
| MgO                           | 1,5          | 12      | 10    | 16          |
| CaO                           | 1,5          | >1,5    | >1,5  | >1,5        |
| SO <sub>3</sub>               | 1,5          | -       | -     | -           |
| Na <sub>2</sub> O             | 1            | -       | -     | -           |

*\*enthält das Einnährstoff-Makronährstoff-Düngemittel nur einen deklarierten Makronährstoff (Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na) oder Schwefel (S)), muss der Makronährstoffgehalt mindestens folgende Werte betragen: 10 % N, 12 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 6 % K<sub>2</sub>O, 5 % MgO, 12 % CaO, 10 % SO<sub>3</sub>, 1 % Na<sub>2</sub>O*

Tabelle 10 zeigt die jeweils einzuhaltenden Grenzwerte gemäß dem aktuellen Stand der EG-Verordnung. Auch hier werden die Grenzwerte, soweit Analysenergebnisse vorhanden sind, die Bedingungen gemäß Verordnung einhalten.

**Tabelle 10:** Grenzwerte nach dem aktuellen Stand der EG-Verordnung in mg/kg TM (LfU 2015; Daly 2017; EU 2019; Saerens 2019)

| Stoff       | Grenzwert | AirPrex | NuReSys | Pearl | P-ROC | Stut.-Verf. | Giff.-Verf. |
|-------------|-----------|---------|---------|-------|-------|-------------|-------------|
| Arsen       | 40        | 0,7     | < 2     | 0,45  | 0,6   | 3,2         | 0,6         |
| Blei        | 120       | 11,2    | < 10    | 0,16  | <0,1  | <0,1        | <0,1        |
| Cadmium     | 3 (60*)   | 0,4     | <0,2    | -     | <0,1  | <0,1        | <0,1        |
| Chrom (VI)  | 2         | < 0,3   | -       | < 0,1 | <0,3  | <0,3        | <0,3        |
| Kupfer      | 600       | -       | 6,8     | 1,6   | -     | -           | -           |
| Nickel      | 100       | 6,4     | < 3     | 0,39  | 10    | 19,2        | 10          |
| Quecksilber | 1         | 0,15    | < 0,07  | 0,005 | <0,01 | -           | -           |
| Zink        | 1.500     | -       | 41      | 2,26  | -     | -           | -           |
| Biuret      | 12        | -       | -       | -     | -     | -           | -           |
| Perchlorat  | 50        | -       | -       | -     | -     | -           | -           |

\* Cadmium: bei Massenanteil an Gesamtphosphor (P) von mindestens 5 % ( $P_2O_5$ )-Äquivalent aufweist; bei kleiner 5 % sind entsprechend 3 mg/kg TM einzuhalten

Für ein anorganisches Düngemittel das einen Massenanteil an organischem Kohlenstoff von mehr als 1 % aufweist, müssen zudem Grenzwerte hinsichtlich Krankheitserreger eingehalten werden, vgl. Tabelle 11.

**Tabelle 11:** Zu untersuchende Mikroorganismen einschließlich der Grenzwerte gemäß EU-Verordnung;  $n$  = Anzahl der zu untersuchenden Proben,  $c$  = Anzahl der Proben, in denen die Keimzahl zwischen  $m$  und  $M$  liegt,  $m$  = Schwellenwert der als zufriedenstellend erachteten Keimzahl,  $M$  = Höchstwert für die Keimzahl (EU, 2019).

| Mikroorganismen                          | Probenahme |   |   | Grenzwert                      |
|--|------------|---|---|--------------------------------|
|  | n          | c | m | M                              |
| Salmonella spp                           | 5          | 0 | 0 | kein Befund in 25 g oder 25 ml |
| Escherichia coli<br>oder Enterococcaceae | 5          | 5 | 0 | 1.000 in 1 g oder 1 ml         |



## **6 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis**

### **6.1 Herausforderungen der Klärschlammverordnung**

Für Kläranlagenbetreiber ist die Einhaltung einer hohen Entsorgungssicherheit bei der Klärschlammverwertung von großer Bedeutung. Mit dem Inkrafttreten der AbfKlärV (2017) kam es bereits zu deutlichen Veränderungen bei der Entsorgungsstruktur des Klärschlammes, was sich zzt. vor allem an einem Anstieg der Entsorgungskosten zeigt, vgl. Döing (2019).

Die Umsetzungspflicht für eine Phosphorrückgewinnung betrifft dabei Kläranlagen > 100.000 EW mit einer Übergangsfrist von 12 Jahren (ab dem 01.01.2029) bzw. > 50.000 EW mit einer Übergangsfrist von 15 Jahren (ab dem 01.01.2032). Die wichtigsten Kenngrößen sind hierbei die Unterschreitung eines Schwellenwertes für im Klärschlamm verbleibenden Phosphor von 20 g P/kg TM oder ein Wirkungsgrad der Phosphorrückgewinnung von mindestens 50 %. Bereits zum 31.12.2023 müssen alle Kläranlagenbetreiber, die kommunales Abwasser behandeln und den Klärschlamm bodenbezogenen verwerten, der zuständigen Behörde einen Bericht über deren geplante Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung vorlegen (Schneichel 2019).

Insgesamt zeigt die Gesamtsituation in Deutschland einen starken Trend zur thermischen Klärschlammentsorgung in Monoklärschlammverbrennungsanlagen (Döing 2019). Es wird dann davon ausgegangen, dass eine externe Verwertung der Aschen erfolgt.

Des Weiteren gibt es die Möglichkeit einer Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm, womit anschließend eine Entsorgung des Restschlammes auch über die Mitverbrennung möglich ist. Da hierbei die Randbedingungen der AbfKlärV (2017), insbesondere die Unterschreitung des Schwellenwertes von 20 g P/kg TM einzuhalten sind, wurde im Rahmen der Studie der aktuelle Stand der Umsetzbarkeit untersucht.

### **6.2 Möglichkeiten und Grenzen einer P-Rückgewinnung aus Klärschlamm**









Unter konventionellen Randbedingungen liegt die Phosphorkonzentration im Faulschlamm bei min. 30 g P/kg TM. Dies bedeutet, dass zur Einhaltung der AbfKlärV (2017) eine Abreicherung notwendig ist, d.h. der im Klärschlamm gebundene Phosphor muss in Lösung gebracht werden, um diesen anschließend vom zu entsorgenden Klärschlamm zu separieren. Dies kann mit folgenden Verfahrenstechniken erfolgen:

- Verfahren zur Fällung/Kristallisation/Adsorption im Faulschlamm/Prozesswasser
- Erhöhte Rücklösung mittels physikalischer Verfahren
- Erhöhte Rücklösung mittels biologischer Verfahren
- Erhöhte Rücklösung mittels chemischer Verfahren

Die Wahl der entsprechenden Verfahrenstechnik ist im hohen Maße von den gegebenen Randbedingungen der Kläranlage abhängig. Im Rahmen der Studie wurde auf die jeweiligen verfahrenstechnischen Grundprinzipien fokussiert, vor allem da sich die einzelnen herstellereinspezifischen Verfahren nur wenig grundlegend voneinander unterscheiden.

Für die Verfahrensauswahl zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ist die Art der Phosphorelimination von herausragender Bedeutung. Die Fällung/Kristallisation im Faulschlamm bzw. Prozesswasser ggf. in Kombination mit physikalischen, biologischen und chemischen Verfahren können (vermehrt) biologisch gebundenen Phosphor rücklösen, wohingegen die Bindung von chemisch-physikalisch gebundenem Phosphor im Klärschlamm nur mit chemischen Verfahren effizient gelöst werden können. Zusammenfassend ergeben sich demnach die in Tabelle 12 vereinfacht dargestellte Beurteilung der Verfahrensart der Phosphorrückgewinnung in der Unterscheidung der Phosphorelimination auf Kläranlagen mit reiner Bio-P und Fällung sowie deren Auswirkungen bei der Umsetzung.

**Tabelle 12:** Vereinfachte Zusammenfassung der Beurteilung der Verfahrensart zur Einhaltung der AbfKlärV sowie Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen; rot: Nach dem aktuellen Stand der Umsetzungen/Forschung konnte bislang keine Unterschreitung von 20 g P/kg TM nachgewiesen werden; gelb: Forschungsarbeiten zeigen, dass ggf. eine Unterschreitung von 20 g P/kg TM möglich sein kann; grün: Unterschreitung von 20 g P/kg TM ist möglich.

| Verfahrensart  | Unterschreitung<br>20 g P/kg TM   |   | Herausforderungen<br>bei Umsetzung   | Positive Synergieeffekte bei<br>Umsetzung                     |
|--|---|---|--|---|
|  | Kläranlagen<br>mit Bio-P  | Kläranlagen<br>mit P-Fällung  |  |   |
| <b>Fällung/<br/>Kristallisation im<br/>Faulschlamm und<br/>Prozesswasser</b> |  |  | Betriebskosten   | Verbesserung<br>Entwässerung,<br>Vermeidung<br>Inkrustationen |
| <b>erhöhte Rücklösung<br/>mittels physikalischer<br/>Verfahren</b>           |  |  | Invest./Betriebskosten<br>Erhöhung<br>Rückbelastung  | Erhöhung Faulgasausbeute,<br>Verbesserung<br>Entwässerung     |
| <b>erhöhte Rücklösung<br/>mittels biologischer<br/>Verfahren</b>             |  |  | Invest./Betriebskosten,<br>Verfahrenstechnik<br>Bio-P  | Verbesserung<br>Entwässerung                                  |
| <b>erhöhte Rücklösung<br/>mittels chemischer<br/>Verfahren</b>               |  |  | Invest./Betriebskosten, aufwendige<br>Verfahrenstechnik,<br>Rücklösung von<br>(Schwer-)metallen,<br>Verschlechterung der<br>Entwässerung | -   |

Verfahren zur direkten Fällung/Kristallisation/Adsorption im Faulschlamm bzw. Prozesswasser auch in Kombination mit einer Erhöhung der Rücklösung mittels physikalischer und/oder biologischer Verfahren werden unter konventionellen Bedingungen (u.a. kommunale Abwasserzusammensetzung) nur mit einem überwiegenden Anteil an biologischer Phosphorelimination den Schwellenwert von 20 g P/kg TM im Faulschlamm unterschreiten. Wenngleich entsprechende Verfahren bereits großtechnisch realisiert wurden (und werden), so liegt zzt. die Motivation darin, den Betrieb der Abwasser- und Klärschlammbehand-

lung zu optimieren (Vermeidung von Inkrustationen, Verbesserung der Klärschlammwässerung etc.). Momentan kann keine der Verfahren mittels Fällung/Kristallisation sowie physikalische und biologische Verfahren/Verfahrenskombinationen die Anforderungen der AbfKlärV (2017) für eine konventionelle, kommunale Abwasserbehandlung erfüllen. Wenngleich dies mit chemischen Verfahren möglich ist, wird derzeit keines der Verfahren in Deutschland großtechnisch wirtschaftlich betrieben.

Nur unter besonderen Randbedingungen, bspw. bei einer entsprechend geringeren Phosphorkonzentration im Faulschlamm bedingt durch bspw. Industrieeinleiter, kann eine Unterschreitung von 20 g P/kg TM möglich sein.

Es ist zu beachten, dass die Art der Phosphorelimination auch weitere Auswirkungen auf die Abwasser- und Klärschlammbehandlung hat, bspw. auf die Klärschlammwässerung. Somit sollte bei einer möglichen geplanten Anpassung der Phosphorelimination eine ganzheitliche Betrachtung erfolgen. Des Weiteren ist zu beachten, dass auch die Verfahren zur Erhöhung der Rücklösung von Phosphor mittels physikalischer und/oder biologischer Technologien Auswirkungen auf die weitere Abwasser- und Klärschlammbehandlung haben können (sowohl negativ als auch positiv, bspw. Veränderung Klärschlammwässerung, Bildung von refraktärem CSB, Erhöhung der Faulgasausbeute etc.).

Bei Faulschlamm aus Kläranlagen mit einer überwiegenden Phosphorelimination mittels Fällung, aber auch Faulschlämme mit einer erhöhten Phosphorkonzentration, kann mittels chemischer Rücklösung 20 g P/kg TM unterschritten werden. Abhängig von dem zu erzielenden Wirkungsgrad ist eine deutliche Absenkung des pH-Wertes notwendig. Hieraus können sich wiederum negative Effekte für die weitere Abwasser- und Klärschlammbehandlung ergeben (vgl. Tabelle 12).

Als Alternative wäre es möglich den Faulschlamm mittels HTC-Verfahren zu behandeln. Nach einer hydrothermalen Carbonisierung würde dann eine Phosphorrückgewinnung aus der erzeugten Kohle erfolgen. Die Schwierigkeit in der Verfahrensbewertung liegt zzt. darin, dass sich bislang kein Verfahren zur hydrothermalen Carbonisierung im Bereich der Klärschlammbehandlung durchsetzen konnte.

Im letzten Schritt bleiben dann die Möglichkeiten der thermischen Klärschlammverwertung in Kombination mit einer simultanen oder auch nachgeschalteten Phosphorrückgewinnung aus der Asche.

Abbildung 18 visualisiert die Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in Abhängigkeit der Phosphorelimination sowie Phosphorkonzentration im Faulschlamm.

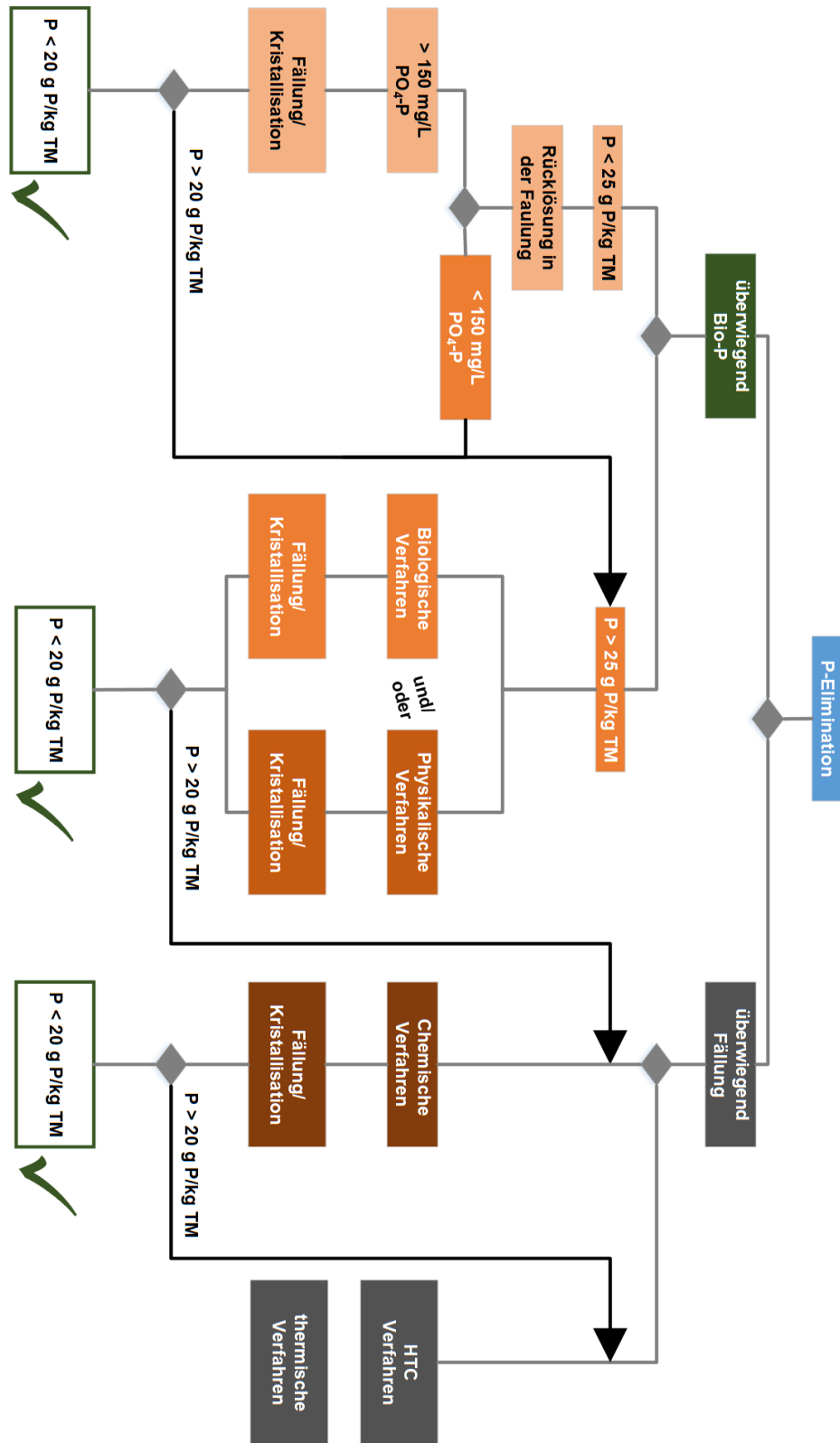


Abbildung 18: Verfahrensmöglichkeiten zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm



Wenngleich die grundsätzliche Machbarkeit der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm nachgewiesen werden muss, so sollte die Fragestellung der Produktverwertung direkt mit betrachtet werden. Überwiegend wird Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) erzeugt, wofür es mittlerweile eine umfangreiche Produktbewertung gibt, auch mit entsprechenden positiven Verwertungsbeispielen. Aktuell regelt die AbfKlärV (2017) allerdings ausschließlich die Phosphorrückgewinnung über die Unterschreitung eines Schwellenwertes bzw. die Einhaltung eines Wirkungsgrads. Somit gibt es zzt. keine weiteren Vorgaben, in welcher Form das zurückgewonnene Phosphat zu verwerten ist.

### 6.3 Hinweise zum Vorgehen zur Verfahrenswahl für Kläranlagenbetreiber

Da zzt. die überwiegende Anzahl der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm vor allem für eine Optimierung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung installiert sind, sollte vor dem Planungsstart eine eindeutige Zieldefinition erfolgen. Vor allem da im Einzelfall die Umsetzung einer entsprechenden Technologie sinnvoll sein kann, auch wenn damit nicht die Anforderungen der AbfKlärV (2017) eingehalten werden können.

Im Rahmen der Grundlagenermittlung sollten die aktuellen Rahmenbedingungen der installierten Abwasser- und Klärschlammbehandlung erfasst werden:

- Installierte Verfahrenstechnik, vor allem Art der P-Elimination
- Erfassung von Betriebsproblemen (bspw. erhöhte Phosphatrücklösung in der Faulung, Bildung von Ablagerungen etc.)
- Auswertung der Betriebsdaten, Erstellung einer Phosphorbilanz
- Ermittlung von Kennzahlen zur P-Elimination bspw.  $K_P$ -Wert, vgl. DWA (2011), sowie P-Fraktionierung nach DWA A 131.
- Soweit nicht vorhanden, Durchführung von weiteren Analysen der Phosphorkonzentration im Klärschlamm (Primär-, Überschuss-, Faulschlamm) sowie der  $PO_4$ -P-Konzentration im Schlammwasser, ggf. auch Analyse der verschiedenen Phosphorfractionen, vgl. Röske und Schönborn (1994), Uhlmann *et al.* (1990).

Das Ergebnis der Grundlagenermittlung sollte eine Abschätzung des Potentials für die Einhaltung der gesetzten Ziele enthalten.

Aufbauend auf der Grundlagenermittlung kann die Entwicklung eines Konzeptes durchgeführt werden:

- Entwicklung von Verfahrenskombinationen unter Berücksichtigung einer physikalischen, biologischen und/oder chemischen Rücklösung sowie ggf. dem HTC-Verfahren
- Abschätzung der Veränderung der Phosphorbilanz aus der Grundlagenermittlung
- Ermittlung der „Nebenwirkungen und Synergieeffekte“ wie z.B. Energie- und Chemikalienbedarf, Auswirkung auf Klärschlammwässerung, Rückbelastung etc.
- Abschätzung der möglichen Wege für eine Produktverwertung
- Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten (soweit möglich in diesem Stadium)

Das Ergebnis der Konzeptentwicklung sollte die Gesamtbewertung des entwickelten Konzeptes – auch in Bezug auf die gesetzte Zieldefinition – sein, vor allem als Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen.

Da die Verfahren weitgehend noch nicht als Stand der Technik definiert werden können, sollte eine halb-/großtechnische Erprobungsphase in Erwägung gezogen werden, vor allem zur Verifizierung der getroffenen Annahmen im Rahmen der Konzeptentwicklung. Zudem ist derzeit die Unterschreitung von 20 g P/kg TM mit den aktuell, verfügbaren Verfahren nur unter besonderen Randbedingungen möglich, bspw. geringere Phosphorkonzentration im Faulschlamm oder Auswahl von chemischen Verfahren.

Abbildung 19 zeigt ein vereinfachtes Schema zum Vorgehen der Verfahrenswahl für Kläranlagenbetreiber.

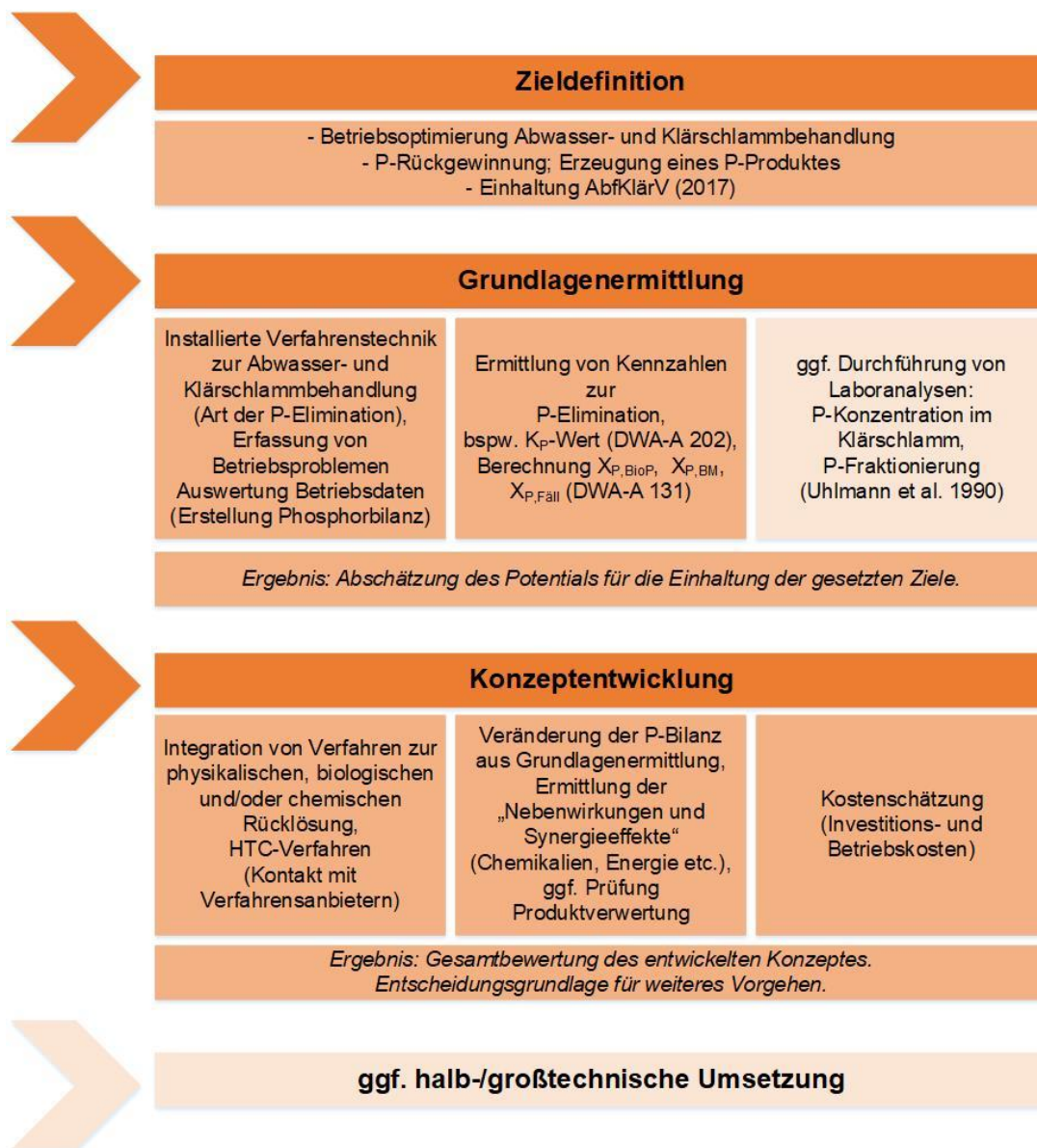


Abbildung 19: Hinweise zum Vorgehen zur Verfahrenswahl für Kläranlagenbetreiber

## 6.4 Ausblick

Wenngleich diverse großtechnische Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm betrieben werden (Motivation der Optimierung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung), so stellt die sichere Einhaltung des Schwellenwertes von 20 g P/kg TM zzt. eine große Herausforderung dar. Hier müssten zukünftige Forschungsarbeiten zeigen, ob durch die Kombination mit einer biologischen Phosphorelimination eine Unterschreitung möglich ist. Dabei sollte eine ganzheitliche Betrachtung erfolgen, damit auch die entsprechenden Auswirkungen der Phosphorelimination erfasst werden.

Aktuell gibt es große Förderinitiativen (u.a. „Regionales Phosphor-Recycling“ (RePhoR) im Rahmen des Förderprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA3)“ des Bundesministerium für Bildung und Forschung oder „Förderung von Versuchsanlagen und großtechnischen Pilotanlagen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammmasche“ EFRE Förderung des Landes Baden-Württemberg) in dessen Rahmen auch Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm erprobt werden.



## 7 Literaturverzeichnis

- AbfKlärV (2017). Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung - AbfKlärV), 27. September 2017, Berlin.
- ATV-DVWK (2000). Arbeitsblatt ATV-DVWK A 131 - Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Hennef.
- b.is (2017). Abwasserbehandlung: Gewässerbelastung, Bemessungsgrundlagen, Mechanische Verfahren, Biologische Verfahren, Reststoffe aus der Abwasserbehandlung; Weitergehende Abwasserreinigung, Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme (b.is), Arbeitsgruppe Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, 4. überarbeitete Auflage, Weimar: Universitätsverlag, 2017.
- Berg U., Knoll G., Kaschka E., Kreutzer V., Weidler P. G. und Nuesch R. (2007). P-RoC-Phosphorus recovery from wastewater by crystallisation of calcium phosphate compounds. *Journal of Residuals Science & Technology* 4(3), 121-6.
- Bratby J. (2018). Phosphorus removal in wastewater treatment plants in: Schaum, C.: Phosphorus: Polluter and Resource of the Future: Removal and Recovery from Wastewater, IWA-Publishing, ISBN 9781780408354 , London.
- Buttmann M. (2019). Persönliche Mitteilung im Rahmen eines im Forschungsvorhaben geführten Interviews mit der Firma TerraNova Energy GmbH bzgl. Phosphorrückgewinnung auf kommunalen Kläranlagen mittels HTC. 23.09.2019, Neubiberg.
- Cornel P. (2002). Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammaschen, Bio- und Restabfallbehandlung VI, ISBN 3-928673-38-6, Witzenhausen-Institut, Witzenhausen.
- DABay (2018). Auswertung aus DABay für das Bezugsjahr 2018. Zur Verfügung gestellt vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU).
- Daly M. (2017). Crystal Green® as an Organic Fertiliser. In: ESPP IFOAM Organic Farming, Brüssel.
- Daumer M.-L., Bareha Y. und Saoudi M. (2019). Potential for increasing phosphorus recovery from sewage sludge by bio-acidification. In: 5th European Conference on Sludge Management, Liege.
- Destatis (2018a). Produzierendes Gewerbe. Düngemittelversorgung. Wirtschaftsjahr 2017/2018. Fachserie 4 Reihe 8.2. Statistisches Bundesamt (Destatis).

- Destatis (2018b). Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2018. Online abgerufen am 22.01.2020 unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/ks-013-klarschlamm-verwert-art-2018.html>.
- Döing M. (2019). Klärschlamm Entsorgung: Planungsboom in der Monoverbrennung - Bedarf, Projekte, (Über-)Kapazitäten?, Tagungsunterlagen, 5. Phosphor-Kongresses am 19./20. November 2019, Bad Cannstatt.
- DPP (2018). Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung auf der Kläranlage - P-RoC. In: e.V. DP-PD (ed.).
- DüMV (2017). Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV), Stand: 12.4.2017.
- Durth A., Schaum C., Meda A., Wagner M., Hartmann K. H., Jardin N., Kopp J. und Otte-Witte R. (2005). Ergebnisse der DWA-Klärschlammhebung. KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall 52(10).
- DWA (2005). Stand der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in Deutschland: Ergebnisse der DWA-Klärschlammhebung 2003, DWA-Themen, Hennef.
- DWA (2011). Arbeitsblatt DWA-A 202 - Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser, Hennef.
- DWA (2014). Merkblatt DWA-M 368 - Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, Hennef.
- DWA (2016). Merkblatt DWA-M 302. Klärschlamm desintegration, Hennef.
- DWA (2019). Kennwerte der Klärschlamm entwässerung. DWA-Regelwerk. Merkblatt DWM-M 383. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef.
- EPA (1980). Removal and recovery of metals and phosphates from municipal sewage sludge, Forschungsbericht, EPA-600/2-80-037, Municipal Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA.
- Esemen T. (2012). Untersuchungen zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der Nährstoffrückgewinnung aus Klärschlamm. Ges. zur Förderung des Inst. für Siedlungswasserwirtschaft, Braunschweig.
- EU (2019). Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003.
- Ewert W. und Stephan K. J. (2019). Phosphor-Fällung im Schlammprozess: Erfahrungen, Grenzen und neue Möglichkeiten, DWA-Klärschlamm Tage 2019, Tagungsunterlagen, Würzburg.

- Ewert W. und Wagenbach A. (2014). AirPrex: MAP-Kristallisation in Verbindung mit Bio-P-Fällung. In: Workshop Abwasser - Phosphor - Dünger, Berlin.
- Glaser M. (2018). AVA cleanphos. Entwicklung und Erprobung eines ressourcenschonenden Verfahrens zur Kreislaufführung von Phosphor auf Basis der hydrothermalen Karbonisierung von Klärschlamm. Abschlussbericht.
- Günther L. (2011). Großtechnische Nährstoffrückgewinnung und Schadstoffausschleusung aus kommunalen Klärschlämmen. Ges. zur Förderung des Inst. für Siedlungswasserwirtschaft, Braunschweig.
- Gysin A., Lycke D. und Wirtel S. (2018). The Pearl and WASSTRIP processes (Canada). In: Phosphorus: Polluter and Resource of the Future Schaum C (ed.), IWA Publishing, London, pp. 359 - 66.
- Harant M. (2018). Die Klärschlammstrategie in Bayern. Vortrag auf dem Innsbrucker Abfall- und Ressourcentag 2018. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Heinzmann B. (2005). Phosphorus recycling in sewage treatment plants with biological phosphorus removal. *Water Sci Technol* 52(10-11), 543-8.
- Helmreich B., Huber M., Muntau M., Athanasiadis K. und Steinle E. (2017). Abschlussbericht zum F + E-Vorhaben. Analyse einer möglichst weitestgehenden Phosphorelimination bei kommunalen Kläranlagen. Auftraggeber Landesamt für Umwelt (LfU). 30. Juni 2017.
- Hubert C., Steiniger B., Schaum C., Michel M. und Spallek M. (2019). Variation of the digester temperature in the annual cycle – using the digester as heat storage. *Water Practice and Technology* 14(2), 471-81.
- Jardin N. (1995). Untersuchungen zum Einfluß der erhöhten biologischen Phosphorelimination auf die Phosphordynamik bei der Schlammbehandlung. In: WAR S (ed.), Schriftenreihe WAR, Darmstadt.
- Jardin N. (2002). Phosphorbilanz bei der Abwasser- und Klärschlammbehandlung. Beitrag im Tagungsband: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche. 66. Darmstadter Seminar - Abwassertechnik. Schriftenreihe Institut IWAR 147.
- Kaschka E. und Weyrer S. (1999). Phostrip Handbuch, 4. Auflage, Phostrip Abwassertechnik GmbH, Innsbruck, Österreich.
- Kopp J. (2010). Beurteilung der Entwässerbarkeit von Klärschlämmen. *F & S Filtrieren und Separieren*. Jahrgang 24 (2010) Nr. 4.
- Kopp J. (2017). Einsatz oder Ersatz synthetischer Polymere bei der Entwässerung von Klärschlämmen und Gärrückständen zur Verwertung. 192. Abwassermeister-Weiterbildungsveranstaltung 21.06 – 23.06.2017.
- Kopp J. und Benisch M. (2018). Phosphorus: Polluter and Ressource of the Future. IWA Publishing, London.

- Kraus F. und Kabbe C. (2017). Phosphorrückgewinnung in der Praxis – so funktioniert es in den Niederlanden. *Korrespondenz Abwasser* 64(2), 96-8.
- Krause S. (2018). Phosphorus in wastewater in: Schaum, C.: Phosphorus: Polluter and Resource of the Future: Removal and Recovery from Wastewater, IWA-Publishing, ISBN 9781780408354 , London.
- Kusche S. (2019a). Alternative Klärschlammverwertungskonzept – Bauvorhaben zum Wert- und Nährstoffrecycling in Wolgast. In: 5. HTP-Fachforum 2019 DBFZ (ed.), DBFZ, Leipzig, pp. 148-65.
- Kusche S. (2019b). Persönliche Mitteilung im Rahmen eines im Forschungsvorhaben geführten Interviews mit der Firma HTCycle AG bzgl. Phosphorrückgewinnung auf kommunalen Kläranlagen mittels HTC. 23.09.2019, Neubiberg.
- LfU (2015). Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen. Abschlussbericht. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg.
- LfU (2018a). Hausmüll in Bayern - Bilanzen 2018. Informationen aus der Abfallwirtschaft. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg.
- LfU (2018b). Umsetzung der EG-Kommunalabwasserrichtlinie in Bayern. Lagebericht 2018. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg.
- LfU (2019). Daten Bayerisches Klärschlammnetz, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.
- Maier W. (2019). Versuchsanlage zur Phosphorrückgewinnung auf dem Klärwerk Göppingen. In: 5. KONGRESSPHOSPHOR – EIN KRITISCHER ROHSTOFF MIT ZUKUNFT, Stuttgart.
- Maier W. und Steinmetz H. (2014). Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm - Machbarkeitsstudie, Stuttgart.
- Meyer C., Preyl V., Steinmetz H., Maier W., Mohn R.-E., Schönberger H. und Pierson T. (2018). The Stuttgart Process (Germany). In: Phosphorus: Polluter and Ressource of the Future Schaum C (ed.), IWA Publishing, London, pp. 375-90.
- Montag D. (2008). Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung – Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen.
- Montag D., Ehm J.-H. und Pinnekamp J. (2019). Überblick und Entwicklungsstand halb- und großtechnischer erprobter Verfahren zur P-Rückgewinnung, DWA-Klärschlammtag 2019, Tagungsunterlagen, Würzburg.
- Naturvårdsverket (1997). Fosfor och energi ur avloppsslam, Studie, Rapport 4822, Naturvårdsverket Förlag, Stockholm, Schweden, übersetzt durch Kemira: Recovery of Phosphorus and Energy our of Waste Water Sludge - KREPRO a recycling project, Helsingborg, Schweden.



- Ortwein B. (2018). AirPrex sludge optimization and struvite recovery from digested sludge. In: Phosphorus: Polluter and Ressource of the Future Schaum C (ed.), IWA Publishing, London, pp. 343-50.
- Petzet S. (2013). Phosphorrückgewinnung in der Abwassertechnik : neue Verfahren für Klärschlamm und Klärschlammaschen, Dissertation, WAR Schriftenreihe, Band 220, Darmstadt.
- Röske I. und Schönborn C. (1994). Interactions between chemical and advanced biological phosphorus elimination. *Water Research* 28(5), 1103-9.
- Saerens B. (2019). Phosphorous recovery as struvite from digested sludge experience from the full scale. In: 5th European Conference on Sludge Management, Liege.
- Schaum C. (2007). Verfahren für eine zukünftige Klärschlammbehandlung – Klärschlammkonditionierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche, Dissertation, IWAR Schriftenreihe 185, Darmstadt.
- Schaum C. und Cornel P. (2013). Wertstoffrückgewinnung aus Klärschlämmen, DWA-WasserWirtschafts-Kurs O/4 - Klärschlammbehandlung, Kassel, ISBN 978-3-944328-26-3, Hennef.
- Schaum C., Hubert C., Krause S. und Steiniger B. (2020). Phosphorus Removal and Recovery in Water Resource Recovery Facilities, Gude, V. G. (Hrsg.): Resource Recovery from Wastewater: Advances in Microbiology, Processes, and Technologies, Apple Academic Press, in Druck.
- Schnee R. und Opitz E. (2018). The ExtraPhos process (Germany). In: Phosphorus: Polluter and Ressource of the Future Schaum C (ed.), IWA Publishing, London, pp. 391-4.
- Schneichel H. (2019). LAGA-Vollzugshilfe zur AbfklärV - Inhalte und Stand des Verfahrens. Berliner Klärschlammkonferenz. 4. und 5. November 2019. Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten, Rheinland-Pfalz.
- Schönberger H., Mwyer C., Peryl V., Maier W., Poppe B. und Mohn R.-E. (2017). Pilotanlage (AZV Raum Offenburg) zur großtechnischen Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm, Stuttgart.
- Scott D. S. und Horlings H. (1975). Removal of phosphates and metals from se-wage sludge, Forschungsbericht, Nr. 73-5-7, Wastewater Technology Centre - Canada Centre for Inland Waters - Environment Canada, Toronto, Kanada.
- Spörri A., Erny I., Hermann L. und Hermann R. (2017). Beurteilung von Technolgien zur Phosphor-Rückgewinnung, Ernst Basler + Partner AG, Bundesamt für Umwelt BAFU AAuR.
- Stubenrauch R. und Steinle E. (2017). Magnesium-Ammonium-Phosphat: Ursache von Betriebsstörungen und gleichzeitig Ressource?, Ressource Klärschlamm: Ansätze für zukunftsfähige Nutzungsstrategien, UniBw München, Vortragsveranstaltung mit Fachausstellung 26.04.2017, Ottobrunn/München.

- Stumm W. und Morgan J. J. (1996). Aquatic chemistry : chemical equilibria and rates in natural waters. Wiley, New York.
- Szabó A., Takács I., Murthy S., Daigger G. T., Licskó I. und Smith S. (2008). Significance of Design and Operational Variables in Chemical Phosphorus Removal. *Water Environment Research* 80(5), 407-16.
- Tchobanoglous G. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery. 5th Edition. International Student Edition. McGraw-Hill, New York, NY.
- Tchobanoglous G., Stensel H. D., Tsuchihashi R. und Burton F. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill Education, New York.
- TerraNova (2019). Innovationsprojekt TerraNova® Ultra vom Bundesforschungsministerium gefördert - Phosphorrückgewinnung und Erzeugung zusätzlichen Faulgases zur Energieerzeugung durch Karbonisierung von Klärschlamm. <http://terranova-energy.com/wp-content/uploads/2015/04/TerraNova-Energy-CarBioPhos-de.pdf> (accessed 28.08.2019 2019).
- Uhlmann D., Röske I., Hupfer M. und Ohms G. (1990). A simple method to distinguish between polyphosphate and other phosphate fractions of activated sludge. *Water Research* 24(11), 1355-60.
- Veltman A. und de Danschutter J. (2019). 4 years of phosphorus recovery at WWTP Amsterdam. In: 3rd IWA Resource Recovery Conference, Venice.
- Weideler A. (2010). Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP). Oldenbourg, München.
- Wild W., Kisliakova A. und Siegrist H. (1996). P-Fixation by Mg, Ca, Zeolite A during stabilization of excess sludge from enhanced biological P-removal. *Water Science and Technology* 34(1-2), 391-8.
- Yalcin E., Pohl M. und Wirth B. (2019). Entwicklung eines integrierten Verfahrens zur Carbonisierung von Klärschlamm, Erzeugung von Biogas und Rückgewinnung von Phosphor in industriellem Maßstab (CarBioPhos). In: 5. HTP Fachforum 2019 DBFZ (ed.), DBFZ, Leipzig, pp. 166-77.





## Mitteilungen / Institut für Wasserwesen

- |         |   |                   |
|---------|---|-------------------|
| Heft 1  | Darstellung des Instituts für Wasserwesen an der Hochschule der Bundeswehr München, 1978  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 2  | Ansprachen und Vorträge anlässlich der Inbetriebnahme der Laboratorien des Instituts für Wasserwesen an der Hochschule der Bundeswehr München, 1979                 | <i>vergriffen</i> |
| Heft 3  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1980  |                   |
| Heft 4  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1980  |                   |
| Heft 5  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1981  |                   |
| Heft 6  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1982  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 7  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1982  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 8  | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1983  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 9  | Koch, K.<br>Physikalisch-chemische Messung von Geruchsemissionen auf kommunalen Kläranlagen, 1983   | <i>vergriffen</i> |
| Heft 10 | Vogel, G.<br>Instationäre Strömung von Wasser-Feststoff-Gemischen in Druckrohrleitungen, 1983   |                   |
| Heft 11 | Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen, 1983   |                   |
| Heft 12 | Schrimpf, W. und Steinle, E.<br>Untersuchung an horizontal durchströmten Sandfängen zur Verbesserung der Sandabscheidung und Vorreinigung kommunaler Abwässer, 1984 | <i>vergriffen</i> |
| Heft 13 | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1984  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 14 | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1985  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 15 | Koplitz-Weißgerber, G.<br>Bewirtschaftung von Bewässerungssystemen in semiariden Regionen, 1985   |                   |
| Heft 16 | Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1986  |                   |
| Heft 17 | Keser, G.<br>Der Einfluss der hydrologischen Unsicherheit auf die Versorgung durch Wasserkraftspeicher, 1986  |                   |
| Heft 18 | Färber, K.<br>Stochastische Modelle zur Simulation des Transportes nicht kohäsiver Sedimente in offenen Gerinnen, 1987  |                   |
| Heft 19 | Vetter, M.<br>Der Transport suspendierter Feststoffe in offenen Gerinnen, 1987  | <i>vergriffen</i> |
| Heft 20 | Schrimpf, W.<br>Ein Beitrag zur Berechnung der Sedimentation von Feststoffen in horizontal durchströmten Sandfängen, 1987   |                   |

- Heft 21 Färber, K.  
Stochastische Modelle der Bewegung suspendierter Partikel in turbulenter Strömung, 1987
- Heft 22 Steinle, E.  
Untersuchungen zur Energiebilanz konventioneller beheizter Faulbehälter - Konsequenzen für die Bemessung von Faulgasspeichern sowie Faulraumheizungen, 1987
- Heft 23 Hoffmann, H.  
Die Leistungsfähigkeit von Belebungsverfahren in Kaskadenschaltung, 1987
- Heft 24 Kaiser, K. und Teichmann, H. *vergriffen*  
Vergleichende Geruchsmessungen auf Abwasserreinigungsanlagen, 1987
- Heft 25 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1987
- Heft 26 Vetter, M.  
Gesamttransport von Sedimenten in offenen Gerinnen, 1988
- Heft 27 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen, 1988
- Heft 28 Grußadressen und Vorträge anlässlich der 10-Jahres-Feier des Instituts für Wasserwesen (1978 - 1989), 1988
- Heft 29 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989
- Heft 30 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989
- Heft 31 Montaña Vargas, J. L.  
Prognose von Niederschlagsfeldern, 1989
- Heft 32 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989
- Heft 33 Bever, J. G.  
Die Monodeponie als eine Möglichkeit zur Entsorgung von kommunalem Klärschlamm, 1989
- Heft 34 Niekamp, O.  
Der Betrieb von Speichersystemen mit Überleitung unter Berücksichtigung von Nutzungsänderungen, 1989
- Heft 35 Øverland, H.  
Einfluss der Landnutzung auf Hochwasserabfluss und Schwebstofftransport, 1990
- Heft 36 Patt, H. *vergriffen*  
Hydromechanische Untersuchungen an einem belüfteten Sandfang, 1990
- Heft 37 Stein, A.  
Ein Beitrag zur Bemessung belüfteter Sandfänge kommunaler Kläranlagen, 1990
- Hefte 38 Beiträge der 5. Wissenschaftlichen Tagung „Hydrologie und Wasserwirtschaft“: 38a/38b Folgen anthropogener Einflüsse auf den Wasserhaushalt und die Wasserbewirtschaftung, 1990
- Heft 39 Zottmann, W. L. M. *vergriffen*  
Zur Entstehung von Riffeln und Dünen, 1991
- Heft 40 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1992

- Heft 41 Norgauer, U.  
Untersuchung der Abhängigkeit des Wirkungsgrades der  
Schlammfäulung von der Durchmischung im Faulbehälter, 1992
- Heft 42 Vetter, M.  
Ein Beitrag zur Berechnung des Feststofftransports in offenen Gerinnen, 1992
- Heft 43 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1992
- Heft 44 Hagen, N.  
Steuerung von Speichern unter dem Aspekt der Wassergüte, 1992
- Heft 45 Kleeberg, H.-B. und Øverland, H.  
Möglichkeiten der Abflußmodellierung unter Nutzung von  
Geoinformationssystemen, 1993
- Heft 46 Urbaniak, S.  
Phosphorelimination durch Vor-, Simultan- und Nachfällung mit  
Kalk bei Abwasser mit geringer Säurekapazität, 1993
- Heft 47 Hagen, N. und Kleeberg, H.-B. *vergriffen*  
Möglichkeiten der Modellierung des großräumigen Stofftransportes  
auf Landflächen Güte- Simulationsmodelle für stehende Gewässer  
- Eine Literaturanalyse, 1993
- Heft 48 Bechteler, W., Broich, K., Hartmann, S., Kulisch, H., Nuji, M., Otto, A. J.  
Simulationsmodelle zur Berechnung von Damnbrüchen  
und 1- bzw. 2-dimensionaler Ausbreitung der Flutwelle im Gelände, 1993
- Heft 49 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen 1988 - 1993, 1993
- Heft 50 Sattel, H. *vergriffen*  
Wandschubspannung an umströmten Körpern, 1994
- Heft 51 Geitz, M.  
Einfluss der räumlichen Niederschlagsvariabilität auf Ergebnisse  
von Niederschlag-Abfluss- Berechnungen, 1994
- Heft 52 Patt, H.  
Der naturnahe Gewässerausbau - Grundlagen und Anwendungen, 1995
- Heft 53 Mayer, O. *vergriffen*  
Auslegung und Simulation photovoltaischer  
Wechselstrompumpensysteme, 1995
- Heft 54 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1995
- Heft 55 Kleeberg, H.-B. und Niekamp, O.  
Vorstudie zur Formulierung von Forschungen zur  
Verfügbarkeit von Wasser, 1995
- Heft 56 Tagungsband Klimaänderung und Wasserwirtschaft  
- Internationales Symposium 27./28. November 1995  
im Europäischen Patentamt München, 1996
- Heft 57 Baier, V.  
Bestimmung und Beschreibung der Form von Schwebstoffpartikeln  
mittels Unterwasservideomikroskop und digitaler Bildverarbeitung, 1996
- Heft 58 Bechteler, W., Vollmers, H.-J., Wieprecht, S.  
DFG - Rundgespräch Geschiebe am 7./8. 12. 1995 in Würzburg, 1996

- Heft 59 Tasdemir, A.  
Experimentelle und numerische Ermittlung der freien Wasseroberfläche, 1997
- Heft 60 Hartmann, S.  
Entwicklung einer Strategie zur in situ-Ermittlung der kritischen Erosionsgeschwindigkeit, 1997
- Heft 61 Broich, K.  
Computergestützte Analyse des Dammerosionsbruchs, 1998
- Heft 62 Nujic, M.  
Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen, 1998
- Heft 63 Shen, Z.  
Veränderung des Geschiebetransports durch naturnahe Sohleneinbauten, 1998
- Heft 64 Urbaniak, S.  
Belastungsschwankungen und ihre Auswirkungen auf die Leistung von Abwasserreinigungsanlagen, 1998
- Heft 65 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen 1993 -1998, 1998
- Heft 66 Festveranstaltung 20 Jahre Institut für Wasserwesen  
Ehrendoktorwürde Prof. Dr.-Ing. Habil. J. Giesecke, 1999
- Heft 67 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1999
- Heft 68 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1999
- Heft 69 Günthert, F. W. und Osswald, M.  
Minimierung des Schlammmanfalls auf Kläranlagen durch Desintegration - Bestandsaufnahme auf großtechnischen Anlagen, 1999
- Heft 70 Kleeberg, H.-B. und Mayer, U.  
Hydrologische Extreme - Gefährdungspotentiale in Fließgewässern durch Trockenperioden, 1999
- Heft 71<sup>1</sup> Hügel, T.  
Abflussberechnung mit Hilfe Neuronaler Netze, 2000  
ISBN 3-486-26499-0
- Heft 72<sup>1</sup> Schmid, A.  
Das Phänomen der „biologischen Resonanz“:  
Basis zur Optimierung biologischer Reinigungsstufen, 2000  
ISBN 3-486-26444-3
- Heft 73<sup>1</sup> Mück, R.  
Räumliche und zeitliche Verteilung von Starkregen und deren Wahrscheinlichkeiten, 2000  
ISBN 3-486-26500-8
- Heft 74<sup>1</sup> Bechteler, W. und Günthert, F. W.  
Zerstörungsfreie Dichtheitsprüfung von Grundstücksentwässerungsleitungen, 2001  
ISBN 3-486-26517-2
- Heft 75<sup>1</sup> Wieprecht, S.  
Entstehung und Verhalten von Transportkörpern bei groben Sohlenmaterial, 2001  
ISBN 3-486-26518-0



- Heft 76<sup>1</sup> Günthert, F. W., Eder, B., Krause, S., Herb, S., Hagemeyer, G.  
Einsatz von Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung von trübstoffhaltigem  
und mikrobiologisch belastetem Karst-, Grund- und Quellwässern, 2001  
ISBN 3-486-26519-9
- Heft 77<sup>1</sup> Günthert, F. W., Narr, N., Reicherter, E.  
Beiträge zum Bau von Abwasserleitungen: Zeitaufwand,  
Kosten und Verlegeverfahren, 2001  
ISBN 3-486-26520-2
- Heft 78<sup>1</sup> Günthert, F. W. et al.  
Feststoffabtrennung auf Kläranlagen: Theorie und Praxis, 2001  
ISBN 3-486-26525-3
- Heft 79<sup>1</sup> Kulisch, H.  
Ausbreitung von Dammbuchwellen im physikalischen Modell, 2002  
ISBN 3-486-26
- Heft 80<sup>1</sup> Krause, S.  
Huminstoffe im Sickerwasser von Klärschlamm-Monodeponien, 2002  
ISBN 3-486-26538-5
- Heft 81<sup>1</sup> Farshi Haghro, D.  
Two-Dimensional Simulation of Sediment Transport on Unstructured Mesh,  
2003  
ISBN 3-486-26557-1
- Heft 82<sup>1</sup> Dick, T.  
Variabilität hydrologischer Regressionsmodelle, 2003  
ISBN 3-486-26540-7
- Heft 83<sup>1</sup> Maurer, M.  
Zuverlässigkeit von Berechnungen des Feststofftransports, 2003  
ISBN 3-486-26558-X
- Heft 84<sup>1</sup> Reicherter, E.  
Untersuchungen zu Kennzahlen als Grundlage für Kostenbetrachtungen  
in der Abwasserentsorgung, 2003  
ISBN 3-486-26553-9
- Heft 85 Festveranstaltung zur Verabschiedung *vergriffen*  
von Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Bechteler  
und Prof. Dr.-Ing. Hans-B. Kleeberg
- Heft 86<sup>1</sup> Vestner, R.  
Leistung und CBS-Bemessung der vorgeschalteten Denitrifikation  
unter erhöhter Sauerstofflimitierung für Tropfkörper-Anlagen, 2003  
ISBN 3-486-26554-7
- Heft 87<sup>1</sup> Walther, G.  
In-situ-Versuche zu Planung und Bau von Ver- und Entsorgungsleitungen  
mit dem Pflugverfahren, 2003  
ISBN 3-486-26562-8
- Heft 88<sup>1</sup> Vogel, S.  
Ansätze zur Bemessung rauer Rampen in aufgelöster Bauweise, 2003  
ISBN 3-486-26563-6

- Heft 89 Bofinger, A. *vergriffen*  
Das stationäre Transportgleichgewicht natürlicher geschiebeführender  
Fließgewässer - Empfindlichkeit hydromechanischer Parameter in  
eindimensionalen Modellen, 2003
- Heft 90 Günthert, F. W.  
Einführung und Umsetzung der getrennten Abwassergebühr, 2004
- Heft 91<sup>1</sup> Komaei, S.  
A Robust Implicit Shallow Water Equations Solver on Unstructured Grid, 2004  
ISBN 3-486-63072-5
- Heft 92<sup>1</sup> Eder, B  
Untersuchungen zur Verbesserung des Stoffstrommanagements auf  
Kläranlagen - Auslegungsansätze von Ultraschallanlagen zur  
Klärschlammbehandlung, 2004  
ISBN 3-486-63071-7
- Heft 93<sup>1</sup> Günthert, F. W. und Krause, S.  
Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung, 2004  
ISBN 3-486-63067-9
- Heft 94<sup>1</sup> Khedr, A. M.  
Socio-Economic Assessment of Water Supply in Rural Egypt, 2006  
ISBN 3-8356-3121-7, ISBN 978-3-8356-3121-2
- Heft 95 Wolf, M. *vergriffen*  
Untersuchung zu Sanierungsstrategien von Abwasserkanalnetzen  
und deren Auswirkungen auf Wertentwicklung und Abwassergebühren, 2006
- Heft 96<sup>1</sup> Goebel, H.  
Entwicklung einer Benchmarking - Methode für die Verbesserung  
der Gewässerstrukturen von Fließgewässern, 2006  
ISBN 3-8356-3111-X, ISBN 978-3-8356-3111-3
- Heft 97<sup>1</sup> Rapp-Fiegle, S.  
Ermittlung von Leitkennzahlen als Grundlage zur Optimierung  
siedlungswasserwirtschaftlicher Prozesse, 2006  
ISBN 3-8356-3110-1, ISBN 978-3-8356-3110-6
- Heft 98<sup>1</sup> Günthert, F. W.  
Tagungsband zu den Seminaren Wirtschaftliches Handeln in  
Bayerischen Kommunen und Mikrobiologische Probleme  
bei Schlammseparation und Schlammbehandlung, 2007  
ISBN 978-3-8356-3136-6
- Heft 99<sup>2</sup> Yörük, A.  
Unsicherheiten bei der hydrodynamischen Modellierung von  
Überschwemmungsgebieten, 2009  
ISBN 978-3-8322-8723-8
- Heft 100<sup>1</sup> Disse, M., Kalk, M., Rieger, W.  
Tagungsband zum Seminar Wasserrückhalt in der Fläche  
- Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes, 2008  
ISBN 978-3-8356-3173-1

- Heft 101<sup>2</sup> Schönherr, F.  
Halbtechnische Untersuchungen zum Einfluss des pH-Wertes auf die Nitrifikation beim Belebungsverfahren in Abhängigkeit des Kohlensäuresystems, 2009  
ISBN 978-3-8322-8888-4
- Heft 102<sup>2</sup> Günthert, F. W. und Obermayer, A.  
Tagungsband zum Kanalseminar: Grundstücksentwässerungsanlagen, Fremdwasser und Überflutung, 2009  
ISBN 978-3-8322-8628-6
- Heft 103<sup>2</sup> Cvaci, D.  
Zustandserfassung und Bewertung von Grundstücksentwässerungsanlagen unter Einbeziehung einer optimierten organisatorischen Vorgehensweise, 2009  
ISBN 978-3-8322-8658-3
- Heft 104<sup>2</sup> Hirschbeck (geb. Schwarz), C.  
Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von belüfteten Sandfängen auf Kläranlagen, 2010  
ISBN 978-3-8322-9093-1
- Heft 105<sup>2</sup> Günthert, F. W., Obermayer, A., Krause, S.  
Charakterisierung von Rohwässern bezüglich ihrer Eignung für die Aufbereitung mit Membranverfahren, 2010  
ISBN 978-3-8322-9243-0
- Heft 106<sup>2</sup> Schütter, J.  
Wissensmanagement in der Wasserwirtschaft - am Beispiel der Planung und Umsetzung des integrierten Hochwasserschutzkonzeptes Obere Iller, 2010  
ISBN 978-3-8322-9249-2
- Heft 107<sup>2</sup> Heinisch, T.  
Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Anpassung an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft, 2010  
ISBN 978-3-8322-9519-6
- Heft 108<sup>2</sup> Putzar, B., Marques, W., Fernandes, E., Malcherek, A.  
An Integrated Modeling System for the Patos Lagoon in Brazil - Final Project Report, 2010  
ISBN 978-3-8322-9244-7
- Heft 109 Günthert, F. W., Disse, M., Malcherek, A.  
Tagungsband zum Institutsseminar, Oktober 2010  
Risiko und Sicherheit in der Wasserwirtschaft, 2010
- Heft 110<sup>2</sup> Günthert, F. W., Krause, S., Obermayer, A.  
Tagungsband zum Seminar Wasserversorgung, 2010  
ISBN 978-3-8322-9563-9
- Heft 111<sup>2</sup> Malcherek, A. und Cha, H.  
Zur Rheologie von Flüssigschlickern: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze - Projektbericht, 2011  
ISBN 978-3-8440-0136-5
- Heft 112<sup>2</sup> Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.  
Tagungsband zum 3. Seminar Wasserversorgung, 2011  
ISBN 978-3-8440-0387-1

- Heft 113<sup>2</sup> Pakosch, S.  
Development of a fuzzy rule based expert system for flood forecasts  
within the meso-scale Upper Main basin, 2011  
ISBN 978-3- 8440-0611-7
- Heft 114<sup>2</sup> Schardt, V.  
Vergleich hydrologischer und hydrodynamischer Modelle und  
Konsequenzen für die praktische Anwendung, 2012  
ISBN 978-3- 8440-1208-8
- Heft 115<sup>2</sup> Wehr, D.  
An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics, 2012  
ISBN 978-3- 8440-0860-9
- Heft 116<sup>2</sup> Rieger, W.  
Prozessorientierte Modellierung dezentraler  
Hochwasserschutzmaßnahmen, 2012  
ISBN 978-3- 8440-1209-5
- Heft 117<sup>2</sup> Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.  
Tagungsband zum 4. Seminar Wasserversorgung, 2012  
ISBN 978-3- 8440-1294-1
- Heft 118<sup>2</sup> Winter, F.  
Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung und -konzentration  
auf verschlammungsgefährdeten landwirtschaftlichen Nutzflächen, 2013  
ISBN 978-3- 8440-2242-1
- Heft 119 Günthert, F. W. und Schlederer, S.  
Tagungsband zum 1. Abfallwirtschaftlichen Seminar: Kommunale  
biogene Reststoffe als regionale Energieträger, 2013
- Heft 120<sup>2</sup> Günthert, F. W. und Krause, S.  
Tagungsband zum 5. Seminar Wasserversorgung, 2013  
ISBN 978-3-8440-2179-0
- Heft 121<sup>2</sup> Walter, W. K.  
Recommendations for Small Water Supply Systems in Newly Industrialized  
Countries on the Example of Assessment in the State of Minas Gerais,  
Brazil, 2013  
ISBN 978-3-8440-2238-4
- Heft 122<sup>2</sup> Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.  
Tagungsband zum 6. Seminar Wasserversorgung, 2014  
ISBN 978-3-8440-2986-4
- Heft 123<sup>2</sup> Krause, S.  
Tagungsband zum 7. Seminar Wasserversorgung, 2015  
ISBN: 978-3-8440-3806-4
- Heft 124<sup>2</sup> Platschek, C.  
Technische und organisatorische Strukturuntersuchung von kleinen  
Wasserversorgungsunternehmen zur Ableitung von unterstützenden  
Handlungsempfehlungen, 2015  
ISBN 978-3-8440-4021-0

- Heft 125<sup>2</sup> Baselt, I.  
Die Steffturbine - Experimentelle und theoretische Untersuchungen  
zu einer Kleinwasserkraftanlage mit Bindegliedfunktion zwischen  
ober- und unterschlächtiger Wirkungsweise, 2016  
ISBN 978-3-8440-4387-7
- Heft 126<sup>2</sup> Krause, S.  
Tagungsband zum 8. Seminar Wasserversorgung, 2016  
ISBN 978-3-8440-4719-6
- Heft 127<sup>2</sup> Krause, S. und Schaum, C.  
Tagungsband zum 9. Seminar Wasserversorgung, 2017  
ISBN 978-3-8440-5468-2
- Heft 128<sup>2</sup> Krause, S. und Schaum, C.  
Tagungsband zum 10. Seminar Wasserversorgung, 2018  
ISBN 978-3-8440-5468-2
- Heft 129<sup>2</sup> Putzar, B.  
Simulating Large-Scale Morphodynamics of a Tidally Dominated Mixed Energy  
Coast Fundamentals - Applications - Limits  
ISBN: 978-3- 8440-6240-3

<sup>1</sup> Oldenbourg Industrieverlag GmbH  
Rosenheimer Straße 145  
81671 München

<sup>2</sup> Shaker Verlag GmbH  
Am Langen Graben 15a  
52353 Düren

[www.unibw.de/wasserwesen](http://www.unibw.de/wasserwesen)

**ISBN 978-3-943207-45-3**