bl.iwr
bl.iwr

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

lebensministerium.at

# Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

# AirPrex®

# Inhaltsverzeichnis

1 AirPrex® Verfahren ..... 5
1.1 Grundlagen allgemein ..... 5
1.1.1 Prozessskizze als STAN Modell ..... 6
1.1.2 Verfahrensbeschreibung ..... 7
1.1.3 Betriebsparameter AirPrex® Reaktor ..... 9
1.2 Datengrundlage für Bewertung ..... 9
1.2.1 Sachbilanz ..... 9
1.2.2 Stoffflussanalyse ..... 10
1.2.3 Charakteristik Endprodukt ..... 10
1.2.4 Umsetzung ..... 12
1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage ..... 12
1.2.6 Ökonomische Grundlagen ..... 13
1.3 Ergebnis AirPrex® Verfahren ..... 14
1.3.1 Technologie Bewertung ..... 14
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren) ..... 14
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung AirPrex® ..... 20
1.3.4 Ökonomische Bewertung ..... 24
1.3.5 Literatur ..... 30
1.4 Anhang ..... 31
1.4.1 Stoffflussanalyse AirPrex® ..... 31
1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess AirPrex® ..... 32

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: MAP Ablagerungen in Rohrsystemen ..... 5
Abbildung 2: Prozessskizze AirPrex® ..... 6
Abbildung 3: STAN Modell AirPrex® Verfahren ..... 6
Abbildung 4: STAN Modell Subprozess AirPrex® Reaktor ..... 6
Abbildung 5: STAN Modell AirPrex® gesamte Prozesskette ..... 7
Abbildung 6: Diskontinuierliche Entnahme des MAP ..... 8
Abbildung 7: Hydrozyklon (links) und Sandfang (rechts) ..... 8
Abbildung 8: Korrelation $PO_4$-P Konzentration auf Trockensubstanzgehalt ..... 9
Abbildung 9:P-Entfernungsraten (Bergmanns, 2011) ..... 10
Abbildung 10: AirPrex® Endprodukt Berliner Pflanze® ..... 11
Abbildung 11: AirPrex® Anlage Berlin Waßmannsdorf (links) und Mönchengladbach-Neuwerk (rechts) ..... 12
Abbildung 12: P-Stoffflussanalyse A(2 signifikante Stellen) ..... 15
Abbildung 13: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette ..... 15
Abbildung 14: Entfrachtungsleistung (Endprodukt:Klärschlamm) ..... 16
Abbildung 15: Ergebnis Güterflussanalyse AirPrex® ..... 17
Abbildung 16: $CO_2$ bzw. $SO_2$-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] AirPrex ® ..... 18
Abbildung 17: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren) ..... 19

Abbildung 18: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation ..... 21
Abbildung 19: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage AirPrex® 22
Abbildung 20: Nährstoffbezogene Schwermetallgehalte Berliner Pflanze® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)..... 23
Abbildung 21: Up- and Downscaling Faktoren Investitionskosten AirPrex® Mönchengladbach (Basis 550.000 EW)..... 24
Abbildung 22: Up- and Downscaling Faktoren Investitionskosten AirPrex® Berlin Waßmannsdorf (Basis 1.150.000 EW)..... 24
Abbildung 23: Produktspezifische Kosten AirPrex®; Variation Rücklösung und Anlagengröße ..... 26
Abbildung 24: Einwohnerspezifischen Kosten AirPrex®; Variation Rücklösung und Anlagengröße.... 27
Abbildung 25: Kostenaufgliederung AirPrex® 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)..... 27
Abbildung 26: Sensitivitätsanalyse AirPrex® ..... 29

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter AirPrex® Verfahren ..... 9
Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Berliner Pflanze®..... 10
Tabelle 3: Mikrobieller Befund Berliner Pflanze ..... 11
Tabelle 4: Löslichkeit in % bezogen auf $P_{ges}$ (Berliner Pflanze®) ..... 11
Tabelle 5: Umsetzungen AirPrex® Verfahren ..... 12
Tabelle 6: Flächenbedarf AirPrex® Verfahren ..... 12
Tabelle 7: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential AirPrex®..... 14
Tabelle 8: Einsparungen Abwasserreinigung..... 15
Tabelle 9: Ressourcenbedarf AirPrex® und molare Masse Fällmittel ..... 16
Tabelle 10: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf AirPrex® ..... 16
Tabelle 11: Spezifischer Energiebedarf AirPrex®..... 17
Tabelle 12: Indirekte SM-Emissionen AirPrex® ..... 18
Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand AirPrex®..... 18
Tabelle 14: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung AirPrex® ..... 20
Tabelle 15: Transportwege AirPrex® ..... 20
Tabelle 16: $CO_2$ bzw. $SO_2$-Äquivalente Prozesskette AirPrex®..... 20
Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette ..... 21
Tabelle 18: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation... 22
Tabelle 19: Bewertung Berliner Pflanze ® ..... 23
Tabelle 20: Entwicklung Investitionskosten in Abhängig der Ausbaugröße..... 25
Tabelle 21: Jahreskosten AirPrex® (Referenzkläranlage 100.000 EW) ..... 25
Tabelle 22: Einsparungen und Erlöse AirPrex® (Referenzkläranlage 100.000 EW)..... 26
Tabelle 23: Spezifische Kosten AirPrex® (100.000 EW) ..... 26
Tabelle 24: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße..... 28
Tabelle 25: Jahreskosten gesamte Prozesskette AirPrex® ..... 29

# 1 AirPrex® Verfahren

## 1.1 Grundlagen allgemein

Die Umstellung von einer chemischen auf eine Bio-P-Elimination kann unwillkommene Nebenwirkungen in der Schlammbehandlungslinie einer Kläranlage verursachen. Bei der anaeroben Stabilisierung des Klärschlammes kommt es teils zu signifikanten Rücklösungen von vormals biologisch gebundenem Phosphor. Gelöster Phosphor im Schlamm hat einen negativen Einfluss auf die Entwässerbarkeit des Schlammes, unerwünschte MAP Ablagerungen in Rohrleitungen und Pumpsystemen (Abbildung 1) treten auf und die P-Rückbelastungen zur Biologie wird erhöht. Zur Lösung dieser Probleme wurde das AirPrex® Verfahren von den Berliner Wasserbetrieben entwickelt und patentiert (Kern et al., 2008). Seit 2006 ist die P.C.S. GmbH, Hamburg alleiniger Lizenzinhaber zur Vermarktung des Verfahrens und des Reaktors. Dieses Recht wurde an die SH+E weitergegeben, die auch das exklusive Recht zum Bau dieser Anlagen besitzt.

*Abbildung 1: MAP Ablagerungen in Rohrsystemen*

Ziel ist die kontrollierte Fällung des gelöst vorliegenden Phosphors aus der Faulschlammphase. Die Prozesse werden in die pH-Wert Anhebung durch Luftstrippung, Fällung des gelösten Phosphors mit Magnesiumchlorid ($MgCl_2$), Abtrennung des MAP mittels Hydrozyklon oder einfachem Sandfang und Entwässerung des P-armen Faulschlammes unterteilt (Heinzmann, 2009).

Dieses Verfahren wurde primär mit dem Ziel der Verbesserung der Schlammentwässerung und der Vermeidung von Inkrustationen in der Schlammlinie durch Entfernung des gelöst vorliegenden Phosphors entwickelt. Der durch das AirPrex® Verfahren reduzierte Anteil an gelöstem Phosphor im Faulschlamm hat einen positive Effekt auf die Entwässerbarkeit des Schlammes. In der Regel kann die Trockensubstanz, bei gleichzeitiger geringerer Polymerzugabe um 3 - 6 %-Punkte erhöht werden. Das AirPrex® Verfahren ist rechnet sich bereits aufgrund der verbesserten Entwässerungsleistung und der daraus resultierenden geringeren Entsorgungskosten (Heinzmann und Engel, 2005 und 2006).

Die Rückgewinnung von Phosphor ist ein positiver Nebeneffekt dieses Verfahrens. Eine möglichst hohe Rückgewinnungsquote ist daher nicht Ziel dieses Verfahren. Die Rückgewinnungsquoten bezogen auf den Zulauf liegt im Bereich von 7 - 18 % und wird zum einen von den Rücklöseprozessen bei der Faulung als auch der Abtrennung des MAP aus dem Faulschlamm bestimmt. Zahlreiche MAP-Kristalle sind zu klein um gezielt aus der Schlammphase abgetrennt zu werden und passieren daher diese Stufe.

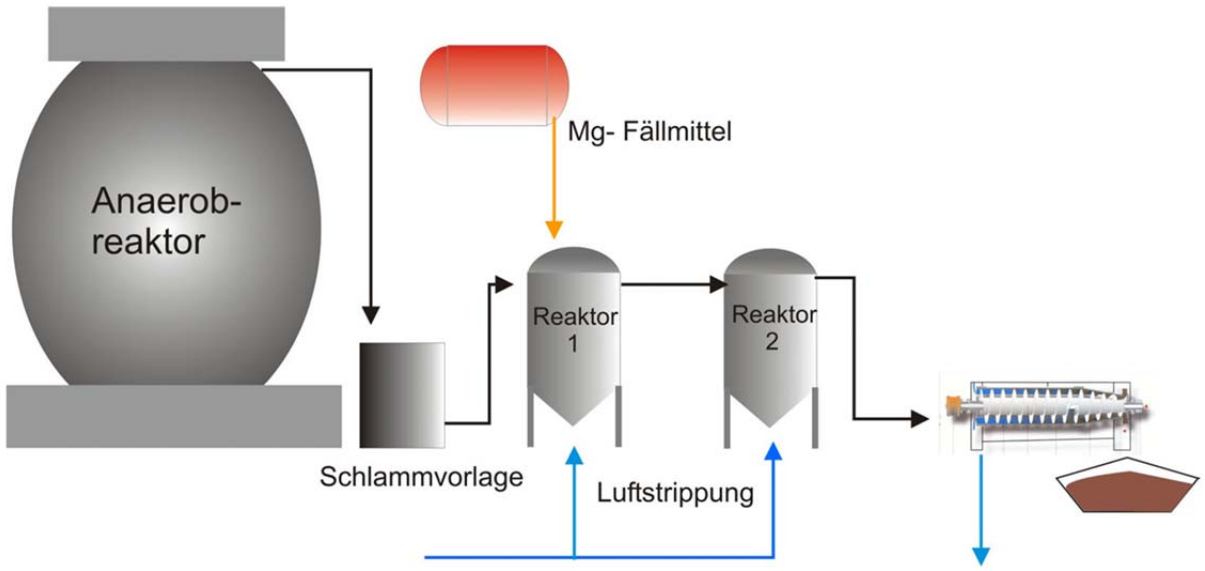



*Abbildung 2: Prozessskizze AirPrex®*

### 1.1.1 Prozessskizze als STAN Modell

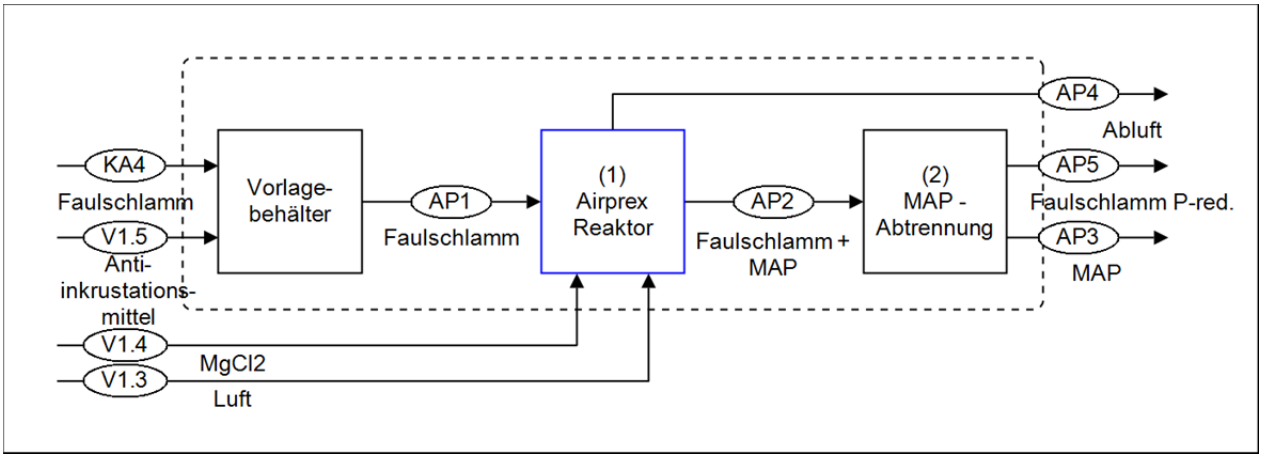



*Abbildung 3: STAN Modell AirPrex® Verfahren*

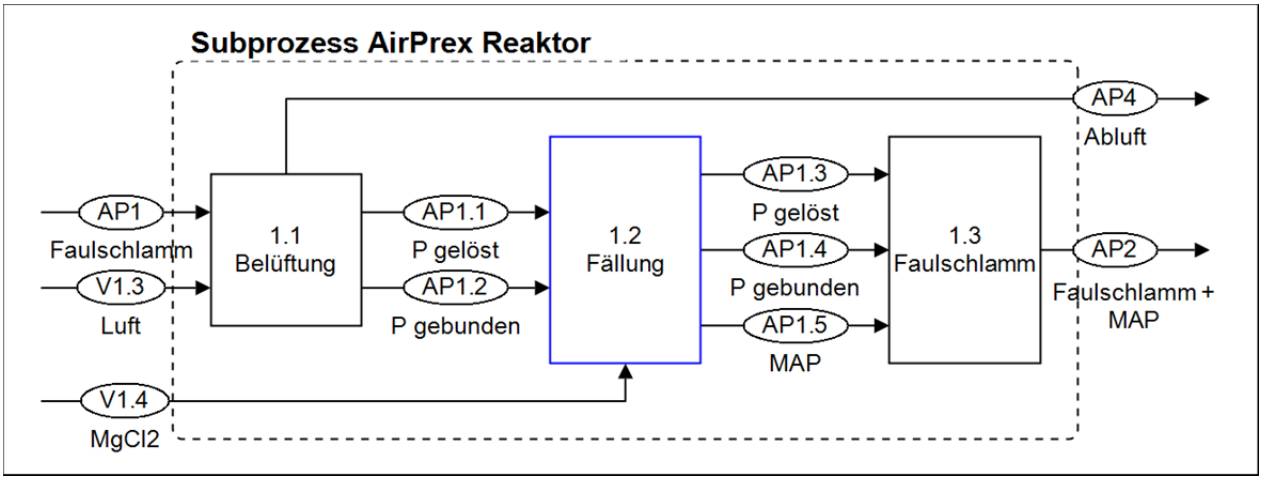



*Abbildung 4: STAN Modell Subprozess AirPrex® Reaktor*

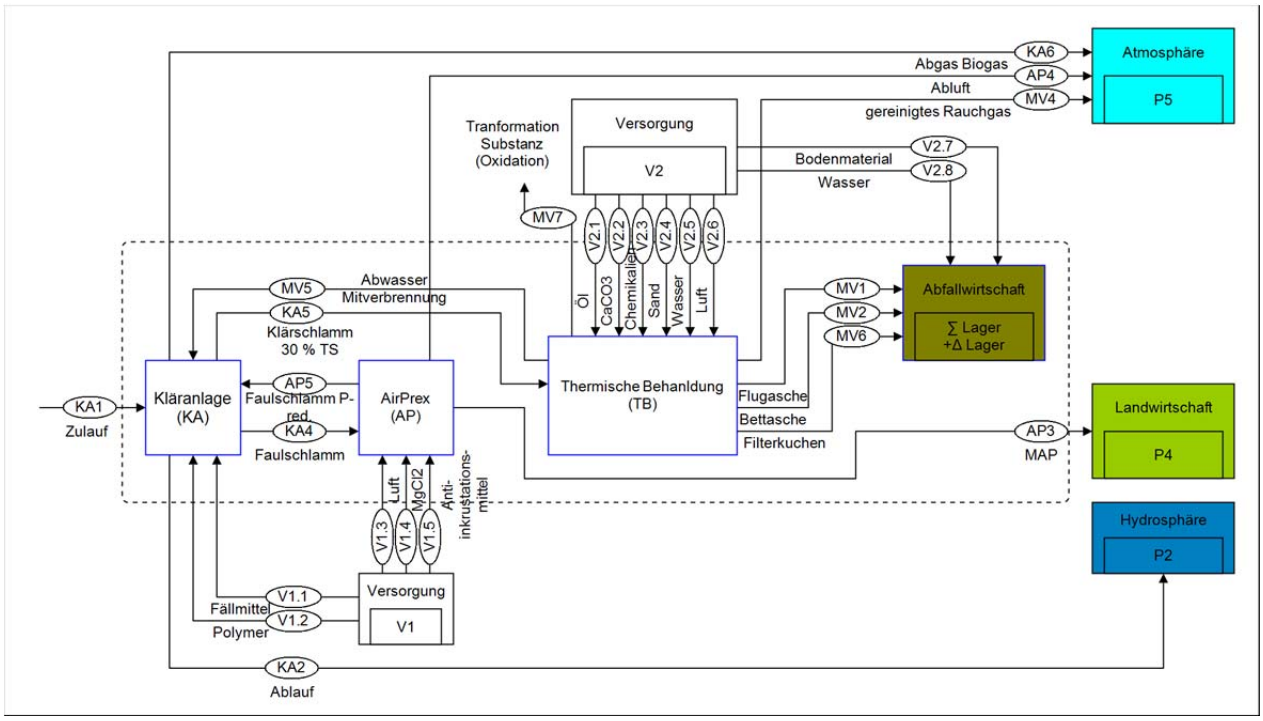



*Abbildung 5: STAN Modell AirPrex® gesamte Prozesskette*

### 1.1.2 Verfahrensbeschreibung

AirPrex® Reaktor (1)

Faulschlamm wird über einen Schlammvorlagebehälter dem AirPrex® Reaktor zugeführt. Der in Berlin Waßmannsdorf installierte Reaktor fasst rund 800 m³. Der Anteil an gelöstem Phosphat im Faulschlamm zwischen 10 - 30 % macht die Zugabe an Antiinkrustationsmittel zwischen Vorbehälter und Reaktor nötig um Ablagerungen in den Rohrleitungen zu verhindern. Mittels Luftstrippung (3.000 m³ Luft/h) wird der pH-Wert durch Ausgasen des gelösten $CO_2$ im Reaktor von anfänglich 7,2 auf 7,8 - 8 angehoben. Nach Zugabe des Fällmittels Magnesiumchlorids als 30 %ige Lösung wird bis zu 95 % des gelöst vorliegenden Phosphats gezielt als MAP ausgefällt. Schwermetalle und organische Verunreinigungen werden nur kaum bis gar nicht in das MAP eingebaut (siehe Charakteristik Endprodukt). Die Aufenthaltszeit liegt im Bereich von 8 h. Der AirPrex® Reaktor der Kläranlage Waßmannsdorf ermöglicht eine Reduktion des $PO_4$-P Gehaltes von anfänglich 350 mg/L auf < 50mg/L (Prozess 1.2). Die in der Einführung genannte Rückbelastung durch Schlammwasser wird dadurch verhindert. Der im Schlamm biologisch oder chemisch gebundene Phosphor kann nicht entfernt und damit nicht rückgewonnen werden. Der gesamte Fluss (MAP, gebundener Phosphor und gelöster Phosphor nicht gefällt) wird dem Prozess MAP Abtrennung zugeführt. Das MAP lagert sich aufgrund der Dichte von 1,7 g/m³ am Boden des Reaktors ab und wird kontinuierlich aus dem Reaktor entfernt. Das Faulschlamm/MAP Gemisch muss nun in einer weiteren Stufe gereinigt werden.

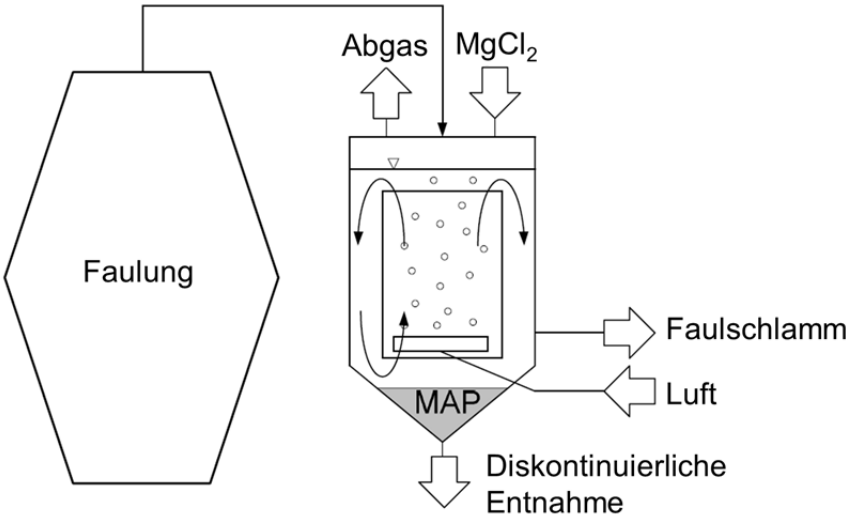



*Abbildung 6: Diskontinuierliche Entnahme des MAP*

MAP Abtrennung bzw. Entnahme (2)

MAP Kristalle weisen eine Dichte von 1,7 g/cm³ auf. Eine Analyse der Korngrößenverteilung zeigt, dass 95 % der Kristalle > 0,063 mm sind. Ab einer Korngröße von > 0,05 mm ist eine Abtrennung möglich.

Abhängig von der Viskosität des Schlammes sedimentieren unterschiedlich große Kristalle und können diskontinuierlich abgezogen werden. Für die Abtrennung des MAP wurden verschiedene Verfahren ausgetestet. Eine Möglichkeit ist die Separierung des MAP aus dem Faulschlamm/MAP Gemisch mittels eines Hydrozyklons. Eine anschließende Waschstufe dient der Reduktion des organischen Kohlenstoffanteils bei gleichzeitiger Erhöhung des Phosphoranteils. Diese Variante hat sich aber nicht durchgesetzt. Auf der Kläranlagen Berlin Waßmannsdorf ist einfacher Sandwäscher im Einsatz. Der Faulschlamm wird anschließend der Entwässerung geführt. Die großtechnische Umsetzung zeigt, dass die MAP Abtrennung aufgrund sehr kleiner MAP Korngrößen nicht optimal funktioniert und ein nicht zu vernachlässigender Teil des MAP im Schlamm verbleibt. Dies hat keinen Einfluss auf weiterführende Prozesse, allerdings wird damit das Rückgewinnungspotential deutlich reduziert

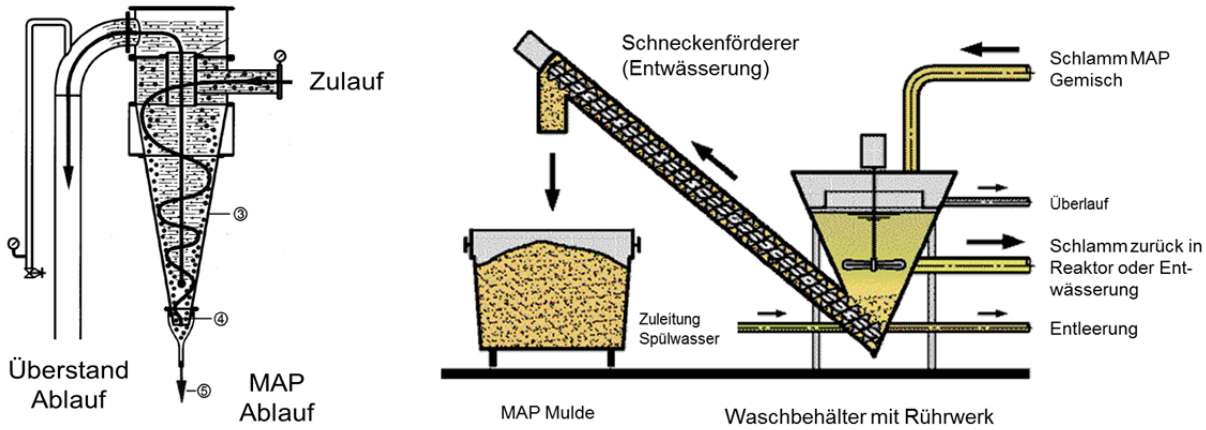



*Abbildung 7: Hydrozyklon (links) und Sandfang (rechts)*

Entwässerung

Der Entwässerung des Faulschlamms kommt bei der Implementierung des AirPrex® Verfahrens eine bedeutende Rolle bei der Betrachtung des Gesamtprozesses zu, wird aber nicht gesondert im Prozess AirPrex® dargestellt. Das Wasserbindevermögen des Faulschlamms wird aufgrund der Reduktion der gelösten Phosphate und der gleichzeitigen Erhöhung des Anteils an Metall-Ionen ($MgCl_2$) deutlich reduziert. Abbildung 8 zeigt die Korrelation zwischen dem Trockensubstanzaustrag und der $PO_4$-P Konzentration im Schlammwasser. Der Trockensubstanzgehalt kann deutlich erhöht und damit die Entsorgungskosten signifikant verringert werden. Im Vergleich zu üblicherweise mit Metallsalzen gefällten Schlamm

(Entwässerung: 30 % TS) ist die Entwässerbarkeit trotz Entfernung des gelösten Anteils des Phosphors deutlich schlechter.

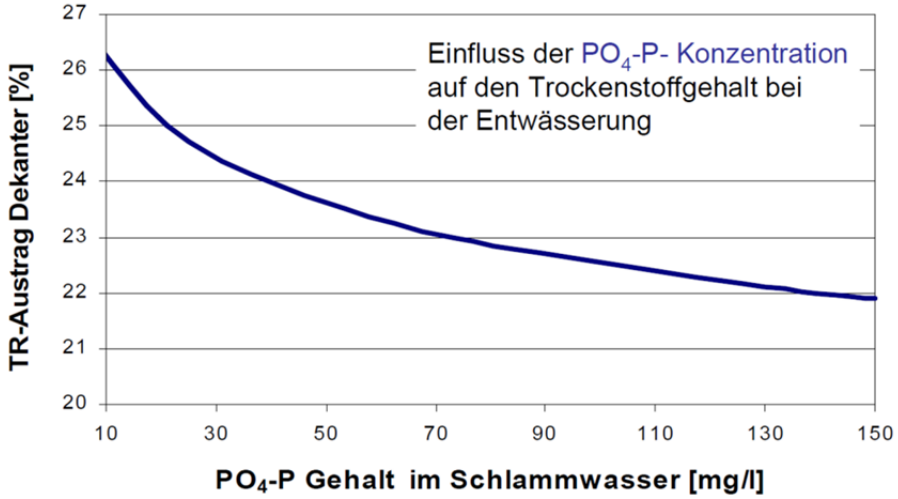



*Abbildung 8: Korrelation $PO_4$-P Konzentration auf Trockensubstanzgehalt*

### 1.1.3 Betriebsparameter AirPrex® Reaktor

Das Prinzip der MAP Fällung im Faulschlamm war unter anderem Thema zahlreicher Diplomarbeiten und privater Forschungsarbeiten auf der Kläranlage Waßmannsdorf sowie der Firma. P.C.S. Daraus werden zusammenfassend die optimalen Betriebsparameter für eine Phosphorrückgewinnung mit dem AirPrex® Verfahren dargestellt (Tabelle 1).

| Parameter | von | bis |
|---|---|---|
| pH | 7,8 | 8,2 |
| Mg:P | 1,1 | 1,3 |
| Aufenthaltszeit (h) | 6 | 10 |

*Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter AirPrex® Verfahren*

Bis zu 95 % des gelöst im Schlammwasser vorliegenden Phosphors bildet schwerlösliche Salze und kristallisiert als MAP aus. Durch den Einsatz eines optimierten Fällproduktes mit dem Namen „AirPrex MgPlus“ welches Additive zur Beeinflussung der Kristallstruktur des zu bildenden MAP-Salzes enthält, trägt zu einer optimalen Kristallisation bei.

<u>Mögliche Betriebsprobleme AirPrex® Reaktor</u>

- Keine bekannt

## 1.2 Datengrundlage für Bewertung

### 1.2.1 Sachbilanz

- Molares Verhältnis: P:Mg = 1:1,1 – 1,3 (++)
- Basenbedarf: keiner (++)
- Energieaufwand: 7,5 kWh/kg P bzw. 0,75 kWh/kg MAP(+)

Durch den Strippeffekt der Belüftung kann der ideale pH Wert durch Strippung von $CO_2$ ohne Zugaben von Basen erreicht werden. Der Energiebedarf ist hauptsächlich auf die Pumpen und die Gebläse zurückzuführen und liegt für die Referenzkläranlagen bei rund 75.000 kWh/a.

### 1.2.2 Stoffflussanalyse

**Transferkoeffizienten (TK) AirPrex® Reaktor**

Im pH-Bereich von 8,5 kann bis zu 95 % des gelöst vorliegenden P als MAP gefällt bzw. kristallisiert werden (TK für P = 90-95) (++). Die Effizienz der P-Entfernung ist zum einen von der Konzentration an gelöstem $PO_4$-P (siehe Kapitel $PO_4$-P Konzentration und Kristallisation) und zum anderen vom pH-Wert abhängig (Abbildung 9). Hinsichtlich des Verhaltens von Schwermetallen im Reaktor liegen keine Daten vor. Die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle werden deshalb anhand der Frachten im Klärschlamm der Referenzkläranlage und den Frachten im MAP-Endprodukt aus der Literatur ermittelt (o). Folglich müssen erhöhte Unsicherheit der SM-Transferkoeffizienten im Reaktor angenommen werden.

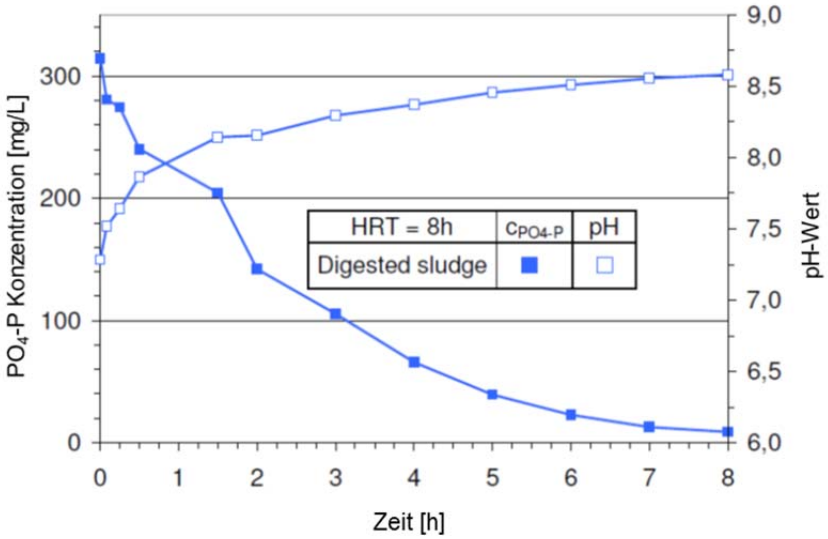



*Abbildung 9:P-Entfernungsraten (Bergmanns, 2011)*

### 1.2.3 Charakteristik Endprodukt

#### 1.2.3.1 Nährstoffe, (Schwer)-metalle und org. Spurenstoffe

Bei der Fällung/Kristallisation mit Magnesiumchlorid fällt ein Magnesiumammoniumphosphat ($MgNH_4PO_4 * 6H_2O$) an welches unter dem Namen Berliner Pflanze® vermarktet wird. Aufgrund des Abtrennvorganges sind im Endprodukt noch mit freiem Auge (organische) Fremdstoffe erkennbar. Das Produktdatenblatt weißt einen 20%igen Gehalt an organischen Kohlenstoffverbindungen, einen 10 %igen Gehalt an anorganischen Kohlenstoffverbindungen und einen 10 %igen Gehalt weiterer Mineralien wie z.B. Calcium und Kalium (+). Der P-Gehalt liegt im Bereich von 10 – 11,7% (++). Unabhängige Laborversuche bestätigen, dass die Schwermetallgehalte sowohl deutlich unter den rechtlich vorgegebenen Grenzwerten als auch deutlich unter den Schwermetallgehalten vergleichbarer Mineraldünger liegen (++). Nach Angaben von Lengemann (2012) sind im Endprodukt geringe Konzentrationen an AOX, PAK, PCB und PCDD/PCDF nachweisbar.

| Nährstoffe [g/kg TS] | | Schwermetalle [mg/kg TS] | | Org. Verunreinigungen [mg/kg TS] | |
|---|---|---|---|---|---|
| **P** | 100-117 | As | <10 | AOX | 55 |
| N | 50 | Cd | <0,5 | PAK | 7,2 |
| Mg | 70 | Cr | 3,5-8 | PCB | 0,03 |
| Ca | 7 | Cu | 16-35 | PCDD/F | 100 ng |
| K | 0,4 | Hg | <0,1 | | |
| **Metalle [mg/kg TS]** | | Ni | <2-3,6 | | |
| Al | - | Pb | 4,4-7,7 | | |
| Fe | - | Zn | 41-59 | | |

*Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Berliner Pflanze®*

Detaillierte mikrobielle Untersuchungen zeigen folgendes Ergebnis und verdeutlichen, dass der mikrobielle Befund als unproblematisch einzustufen ist.

| Exktraktionsmittel | Gehalte |
|---|---|
| Kolonienbildende Einheiten (KBE) 20°C | 600/1 ml |
| Kolonienbildende Einheiten (KBE) 36°C | 4100/1 ml |
| Coliforme Bakterien | 7380/100 ml |
| Escherichia coli | <1/100 ml |
| Clostridium perfringens | 400/100 ml |
| Enterokokken | 0/100 ml |
| Pseudomonas aeruginosa | 0/100 ml |

*Tabelle 3: Mikrobieller Befund Berliner Pflanze*

#### 1.2.3.2 P-Löslichkeit

Unabhängige Laboruntersuchungen bestätigen dem AirPrex® Endprodukt eine gute Pflanzenverfügbarkeit, ähnlich den bekannten MAP-Produkten. Die Wasserlöslichkeit ist gering, während eine nahezu vollständige Löslichkeit mittels Zitronensäure erreicht wird. Die gute Löslichkeit wird auch bei den Extraktionsversuchen mit Mineralsäure und Ammoncitrat bestätigt. In Topfversuchen kann eine sehr gute Aufnahme durch die Pflanzen bestätigt werden. Tests über einen Zeitraum von 53 Tagen zeigen, dass P aus dem MAP Produkt zu 67 bzw. 86 % von den Pflanzen aufgenommen wurde (Kern et al, 2008). Versuch auf zwei verschiedenen Böden mit pH 6,6 und 7,1 mit Reygras (Lolium perenne) Bewuchs zeigen eine gute Mobilität von P im gedüngten Boden, gute Verfügbarkeit und zufriedenstellendes Wachstum.

| Exktraktionsmittel | Löslichkeit [%] |
|---|---|
| Wasser | <3,5 |
| Zitronensäure | 100 |
| Ameisensäure | - |
| Mineralsäure | - |
| Ammoncitrat | - |

*Tabelle 4: Löslichkeit in % bezogen auf $P_{ges}$ (Berliner Pflanze®)*

#### 1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Das Düngeprodukt Berliner Pflanze® erfüllt die Kriterien gemäß den Anforderungen der EU-Düngemittelverordnung und wird in den Handel gebracht. Dazu werden die Pellets aus dem Reaktor im Anschluss an den Reaktor getrocknet, klassifiziert, zwischengelagert und in Big Bags abgepackt. Das Endprodukt ist staubfrei und kann problemlos gelagert werden.

*Abbildung 10: AirPrex® Endprodukt Berliner Pflanze®*

#### 1.2.3.4 Zu berücksichtigende Abfallstoffe

Keine

#### 1.2.3.5 Vermarktungskonzept

Das Endprodukt ist zertifizierter Dünger der unter dem Namen Berliner Pflanze zum Verkauf angeboten wird. Der Dünger wird z.B. abgepackt in 1 bzw. 2 kg Säcken zu 2,5 bzw. 4 € Verkauft. Hochgerechnet auf eine Tonne entspräche dies einem Verkaufswert von 2000 - 2500 €/t.

### 1.2.4 Umsetzung

Das AirPrex® Verfahren wurde bereits mehrfach in Deutschland und den Niederlanden großtechnische umgesetzt. Auswahl großtechnisch umgesetzter Anlagen:

| Großtechnische Anlagen | |
|---|---|
| Kläranlage Waßmannsdorf (D) | Großtechnisch (1.150.000 EW) |
| Kläranlage Mönchengladbach Neuwerk (D) | Großtechnisch (550.000 EW) |
| BS Steinhof (D) | Großtechnisch |
| Kläranlage West Amsterdam (NL) | Großtechnisch (in Planung) |
| Kläranlage Wieden-Echten (NL) | Großtechnisch |

*Tabelle 5: Umsetzungen AirPrex® Verfahren*

*Abbildung 11: AirPrex® Anlage Berlin Waßmannsdorf (links) und Mönchengladbach-Neuwerk (rechts)*

### 1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage

Aus Detailplänen kann der Flächenbedarf den Reaktor auf der Kläranlage Waßmannsdorf (1.150.000 EW) ermittelt werden. Der Bau erfolgt in offener Bauweise ohne Halle (+). Der Reaktor für die Kläranlage Mönchengladbach (550.000 EW) wurde deutlich kleiner und kompakter errichtet. Der Flächenbedarf variiert abhängig von der Bauweise. Die Behälter für die MAP-Kristallisation können abhängig vom verfügbaren Platz beliebig breit oder hoch entworfen werden. Eine festgelegte Abschätzung des Flächenbedarfs für eine Kläranlage mit 100.000 EW ist daher schwierig. Angenommen wird ein Reaktor mit einer Fläche von 10 mal 15 Meter.

| Anlagenteile | Flächenbedarf |
|---|---|
| AirPrex Reaktor (Berlin) | 144 m² (Ø ca. 12m) |
| Grundfläche | 290 m² |
| AirPrex Reaktor (Mönchengladbach) | 1/3 der Anlage in Berlin<br>100 m² |
| 100.000 EW Anlage | ~150 |

*Tabelle 6: Flächenbedarf AirPrex® Verfahren*

### 1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Die Investitionskosten für das AirPrex® Verfahren auf einer 550.000 EW Kläranlage belaufen sich auf ~ 850.000 €. In Berlin, einer 1.150.000 EW Kläranlagen werden die Investitionskosten für das AirPrex® Verfahren mit 2,3 Mio. € beziffert. In diesen Kostenangaben sind teilweise auch Fundamente, Einhausungen und unterirdisch verlegte Rohre inkludiert, die bei der Kostenrechnung nicht generell berücksichtigt werden dürfen. Nach Ewert (2013) liegen die reinen Investitionskosten für einen m³ Reaktorvolumen inklusiver der erforderlichen Dosieranlagen, Wäscheranlagen, Druckluftgebläsen, Elektrik sowie Mess- und Regelungstechnik bei rund 1.500 €. Der Personalaufwand kann mit 0,5 bzw. 1 MA/a angenommen werden. Kosten für die Chemikalien sind einzig auf das Magnesiumchlorid zurückzuführen. Der Magnesiumbedarf wird direkt über die gelöste P-Fracht im Reaktor berechnet. Kosten für Energie sind aus dem Unterpunkt Energiebedarf zu entnehmen. Generell sind die Betriebskosten stark von den $PO_4$-Konzentrationen in Faulschlamm abhängig. Je höher diese Konzentrationen sind, desto höher ist der Verbrauch an Fällmitteln ($MgCl_2$). Ersparnisse und Erlöse werden durch eine verbesserte Entwässerbarkeit bzw. den Verkauf von MAP berücksichtigt.

# 1.3 Ergebnis AirPrex® Verfahren

## 1.3.1 Technologie Bewertung

Mit dem AirPrex® Verfahren wird die Rückgewinnung des gelösten Phosphors direkt im Faulschlamm ermöglicht. Hinsichtlich der Komplexität, kann die Technologie der Fällung bzw. Kristallisation in einem Reaktor mit hoher Turbulenz als einfach eingestuft werden. Dieser technologische Ansatz ist erprobt und wurde auf verschiedenen Anlagen großtechnisch umgesetzt. Die Prozesse der Abwasserreinigung müssen nicht verändert werden bzw. sind keine Veränderung der weiterführenden Prozesse notwendig. Das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf liegt z.B. auf der Kläranlage Waßmannsdorf bei max. 7 % bzw. bei max. 16 % auf der Kläranlage in Mönchengladbach.

| Air Prex ® Verfahren | |
|---|---|
| Entwicklungsstand | Großtechnisch (mehrfach umgesetzt) |
| Komplexität Technologie | Fällung/Kristallisation (MAP) |
| Implementierung | Direkt im Anschluss Faulbehälter |
| Wartungsaufwand | Gering |
| Veränderung Schlammbehandlung | Verbesserte Entwässerung im Falle von Bio-P |
| Effektivität des Verfahrens | ~ 90 - 95 % |
| Potential bezogen auf KA-Zulauf | 7-16 % |
| Qualitativer Ressourcenaufwand | $MgCl_2$, Energie (elektrisch) |
| Abfallstoffe | keine |
| Negative Effekte auf Abwasserreinigung | keine |

*Tabelle 7: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential AirPrex®*

Basierend auf dem Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess können erst Auswirkungen, Einsparungen und Erlöse abgeleitet werden.

## 1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

### 1.3.2.1 Stoffflussanalyse P – Einfluss auf Abwasserreinigungsprozess

Im Vergleich zu konventionellen Schlämmen mit vorangegangener Metallsalzfällung (P-Rücklösung in Faulung: 5 %) wird ca. 20 ±10 % des vormals biologisch gebundenen Phosphors während der anaeroben Schlammbehandlung rückgelöst. Damit ist im Falle der Referenzkläranlage eine gelöste P-Fracht von rund 11.800 kg/a für die Rückgewinnung verfügbar. Unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 92,5 % des AirPrex® Reaktors und unter der Annahme einer sehr guten Abtrennleistung des MAP können jährlich rund 10.000 kg P rückgewonnen werden, womit jährlich 100.000 kg MAP anfallen (P-Gehalt im MAP = 10 %). Damit liegt das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf bei rund 15 %. Der nicht abtrennbare P in Form von MAP liegt nun im Faulschlamm gebunden vor. Das bedeutet, dass der P-Transfer ins Trübwasser im Vergleich zur Referenzsituation unverändert bei 5 % bleibt. Der N-Gehalt im Endprodukt beträgt 5 % und entspricht einer jährlichen Fracht von 5.050 kg N die zusätzlich rückgewonnen wird.

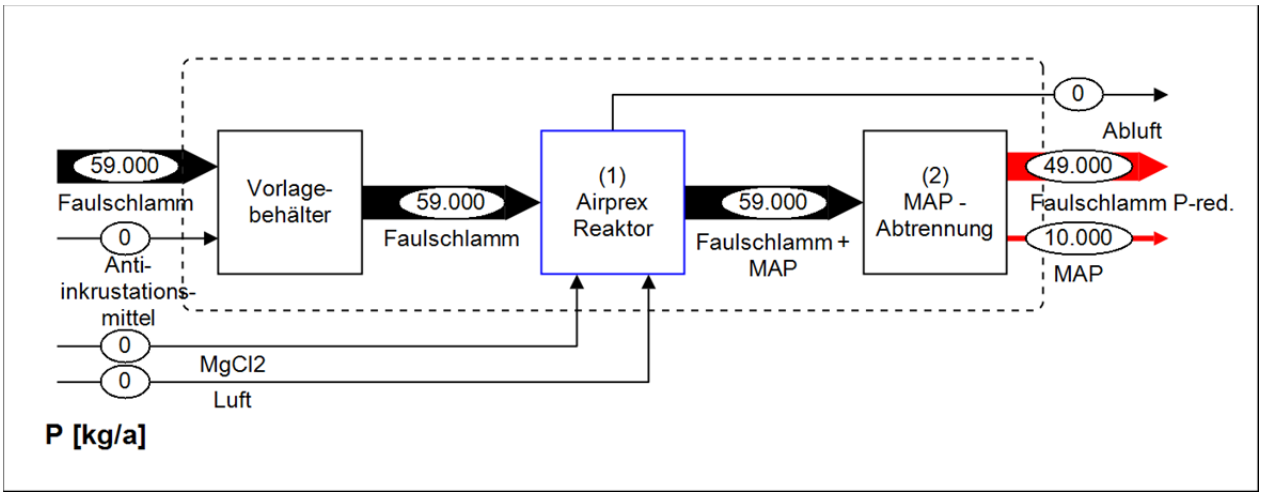



*Abbildung 12: P-Stoffflussanalyse A(2 signifikante Stellen)*

Für verschiedene Szenarien der ökonomischen Bewertung werden unter anderen auch höhere Rücklösungen in der Faulung von 25 % angenommen. Dementsprechend erhöht sich auch die zur Kristallisation verfügbare P-Fracht auf rund 13.500 kg/a.

### 1.3.2.2 P und N-Rückbelastung und Schlammreduktion

| | Reduktion [kg/a] | [€/kg Nährstoff] bzw. [€/t KS TS] | Einsparung [€/a] |
|---|---|---|---|
| Phosphor (P) | 2.700 | - | 6.400 |
| Stickstoff (N) | 5.050 | 0,75 | 3.800 |
| Schlammanfall | 18.400 | 290 | 5.300 |
| **Gesamt** | | | **47.500** |

*Tabelle 8: Einsparungen Abwasserreinigung*

**Vermeidung Inkrustationen**

Durch die gezielte Entfernung des gelösten Phosphors werden problematische Inkrustationen in Rohrleitungen und/oder Pumpen, die aufgrund der Umstellung auf eine biologische P-Elimination auftreten verhindert werden. Eine Abschätzung der monetären Einsparungen in Folge reduzierter Wartung ist nur sehr schwer bzw. gar nicht zu erfassen und wird daher nicht berücksichtigt.

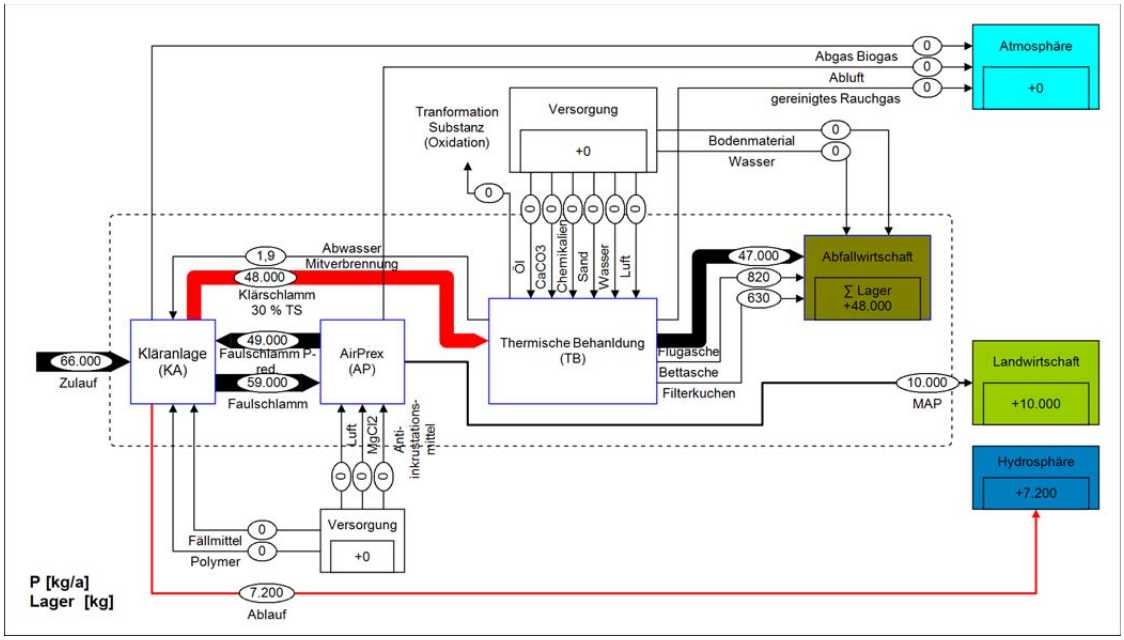



*Abbildung 13: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette*

#### 1.3.2.3 Stoffflussanalyse SM

Transfer Schwermetalle und org. Spurenstoffe

Die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle und organische Spurenstoffe werden aus den Frachten Faulschlamm der Referenzkläranlage und den Frachten im Struvit Endprodukt aus der Literatur ermittelt. Folglich müssen für Schwermetalle erhöhte Unsicherheit hinsichtlich der SM-Transferkoeffizienten im Reaktor angenommen werden.

#### 1.3.2.4 Entfrachtungsleistung

Im Falle des AirPrex® Verfahren kann von keiner tatsächlichen Entfrachtungsleistung gesprochen werden, da nur der gelöste P-Anteil ohne gezielte Rücklösung für die Rückgewinnung herangezogen wird. In diesem Fall wird einfach die P- und SM-Fracht im Faulschlamm der P- und SM-Fracht im Endprodukt gegenübergestellt. Auf Basis der vorliegenden Daten zu den Gehalten an organischen Spurenstoffen können diese auch für das AirPrex® Verfahren ausgewertet werden.

| Parameter | Zulauf KA [kg/a] | Endprodukt [kg/a] | Rückgewinnung bzw. Entfrachtung [%] | Tatsächliche Entfrachtung [% rel. zu P] |
|---|---|---|---|---|
| **P** | **59.000** | **13.054** | **17** | |
| As | 8,5 | 0,09 | 99,0 | 94 |
| Cd | 2,0 | 0,03 | 98,5 | 91 |
| Cr | 54 | 0,54 | 99,0 | 94 |
| Cu | 483 | 2,4 | 99,5 | 97 |
| Hg | 1,1 | 0,01 | 99,0 | 94 |
| Ni | 62 | 0,31 | 99,5 | 97 |
| Pb | 72 | 0,7 | 99,0 | 94 |
| Zn | 1.650 | 4,95 | 99,7 | 98 |
| AOX | 223 | 5,6 | 97,5 | 85 |
| PAK | 10,5 | 0,73 | 93,1 | 59 |
| PCDD/F [mg/a] | 33,1 | 1,7 | 94,9 | 70 |

*Abbildung 14: Entfrachtungsleistung (Endprodukt:Klärschlamm)*

#### 1.3.2.5 Ergebnisse Güterflussanalyse

Magnesium, als limitierendes Element für die Fällung bzw. Kristallisation von MAP im AirPrex® Reaktor, wird als $MgCl_2 * 6H_2O$ im P:Mg Verhältnis von ca. 1:1,2 zu dosiert. Zur Entfernung der jährlich anfallenden gelösten P-Fracht von ~11.800 kg/a im Faulschlamm der Referenzkläranlage müssen im Mittel rund 12.000 kg reines Mg zu dosiert werden. Sonstige Chemikalien sind nicht nötigt, da der pH-Wert durch die $CO_2$-Strippung erhöht wird. Jährlich fallen rund 100.000 kg MAP an.

| Fällmittelbedarf [kg/a] | |
|---|---|
| Input P | 11.800 |
| Mg Bedarf | 12.000 |
| $MgCl_2$ [100 %] | 47.200 |
| $MgCl_2 * 6H_2O$ | 100.700 |

| Molare Masse [u] | |
|---|---|
| P | 30,97 |
| Mg | 24,30 |
| Cl | 35,45 |
| H | 1,01 |
| O | 15,99 |

Magnesiumchloridhexahydrat:
$MgCl_2 * 6H_2O$
Wasseranteil: 43 %
Molare Masse: 203,3
Magnesiumchlorid:
$MgCl_2$
Wasseranteil: 0 %
Molare Masse: 95,2

*Tabelle 9: Ressourcenbedarf AirPrex® und molare Masse Fällmittel*

| | Produktspez. [kg $P_{rückg.}$] | Einwohnerspez. [EW*a] |
|---|---|---|
| $MgCl_2$ [100%] | 4,7 | 0,47 |
| MAP | 10,1 | 1,0 |

*Tabelle 10: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf AirPrex®*

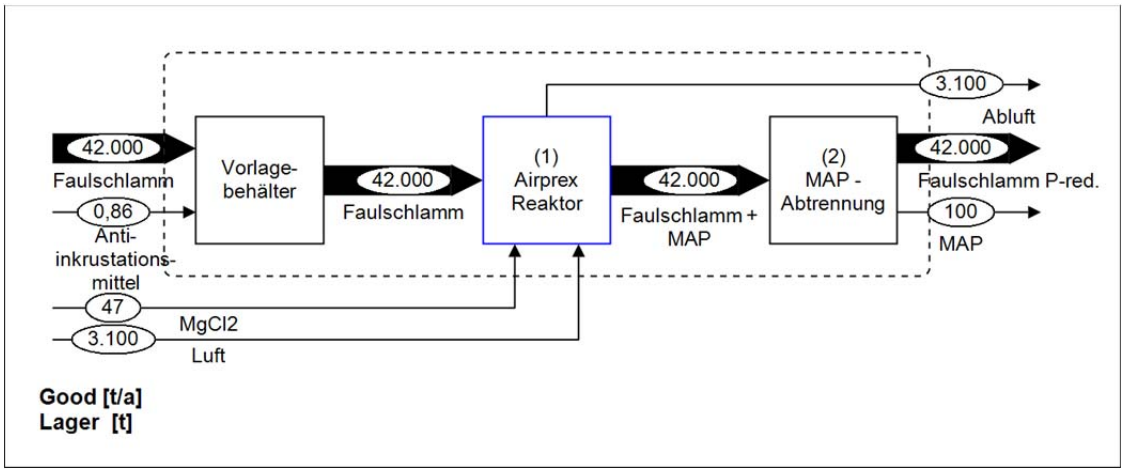



*Abbildung 15: Ergebnis Güterflussanalyse AirPrex®*

### 1.3.2.6 Ergebnisse Energieflussanalyse

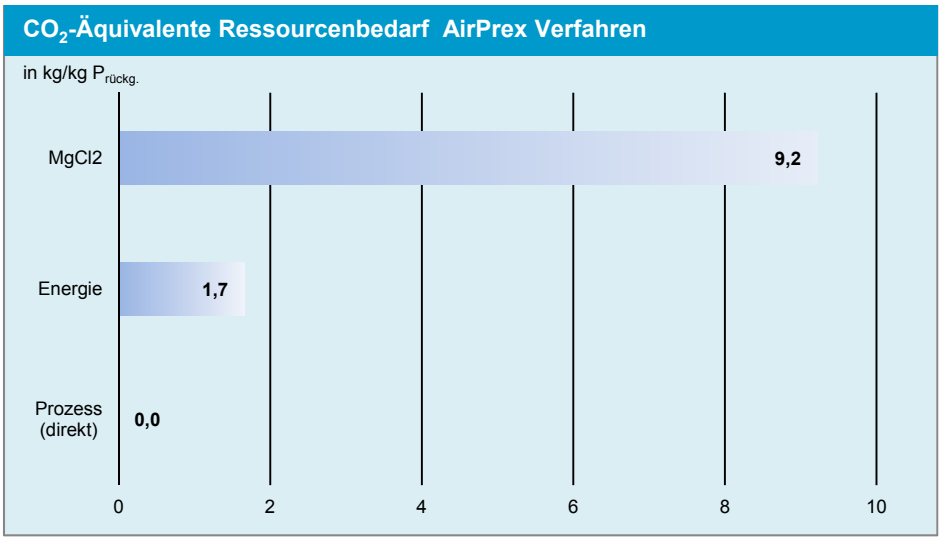
Auf Basis der Betreiberangaben wird der Energiebedarf für die Pumpen, das Gebläse und die MAP-Abtrennung mit rund 75.000 kWh/a angenommen (Tabelle 11).

| | Produktspez. [kg $P_{rückg.}$] | Einwohnerspez. [EW*a] |
|---|---|---|
| kWh | 7,5 | 0,75 |

*Tabelle 11: Spezifischer Energiebedarf AirPrex®*

### 1.3.2.7 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Auf Basis der Annahme einer Implementierung des AirPrex® Verfahrens auf der definierten Referenzkläranlage, der Ergebnisse der Güterflussanalyse und der indirekten Emissionen der notwendigen Ressourcen (GEMIS-Datenbank) kann ein jährlicher Ausstoß an $CO_2$-Äquivalenten bzw. $SO_2$-Äquivalenten von 109.100 kg bzw. 540 kg ermittelt werden. Die Emissionen bezogen auf 1 kg $P_{rückg.}$ werden anhand der jährlichen Emissionen und der rückgewonnen P-Fracht von 10.050 kg/a errechnet und sind aus Abbildung 16 zu entnehmen. Aus dem Prozess wird zwar $CO_2$ Ausgestrippt, allerdings werden diese Emissionen als $CO_2$-Neutral angesehen und werden damit bei den direkten Emissionen nicht berücksichtigten.



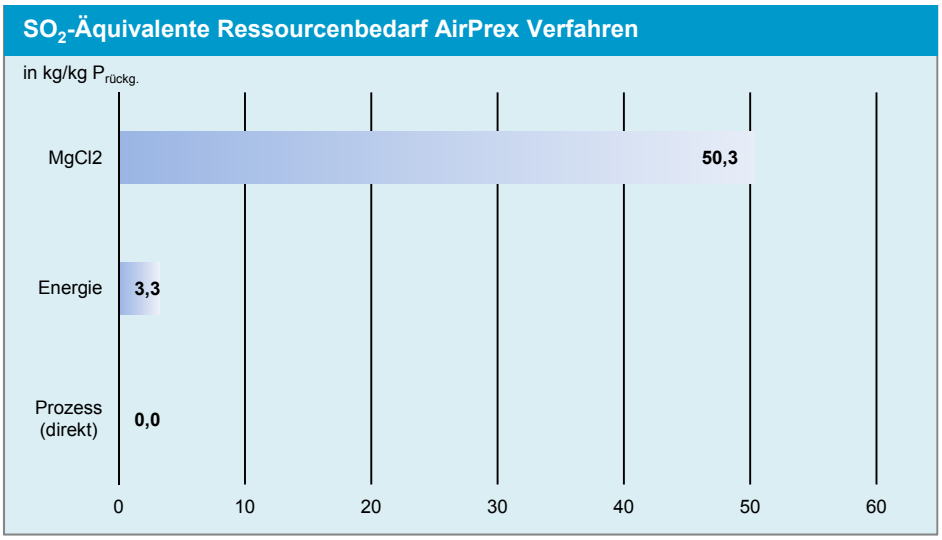



*Abbildung 16: $CO_2$ bzw. $SO_2$-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] AirPrex ®*

### 1.3.2.8 Indirekte Schwermetallemissionen AirPrex®

Die indirekten Schwermetallemissionen werden analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güterflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt.

| Indirekt Emissionen | Atmosphäre [g/a] | Hydrosphäre [mg/a] |
|---|---|---|
| As | 0,02 | 0,00003 |
| Cd | 0,01 | 0,00006 |
| Cr | 0,08 | 0,00006 |
| Cu | - | - |
| Hg | - | 0,00003 |
| Ni | 0,10 | - |
| Pb | 0,52 | 0,000039 |
| Zn | - | - |
| AOX | - | |
| PAK | 0,00007 | - |
| PCDD/F | 0,000001 | - |

*Tabelle 12: Indirekte SM-Emissionen AirPrex®*

### 1.3.2.9 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der kumulierte Energieaufwand wird analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güter- und Energieflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt.

| KEA | [kWh] | [kWh/EW*a] | [kWh/kg $P_{rückg.}$] |
|---|---|---|---|
| Chemikalien | 323.500 | 3,2 | 32,3 |
| Elektrische Energie Betrieb AirPrex® | 143.700 | 1,4 | 14,3 |
| **Gesamt** | **467.200** | **4,6** | **46,6** |

*Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand AirPrex®*

Abbildung 17 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen.

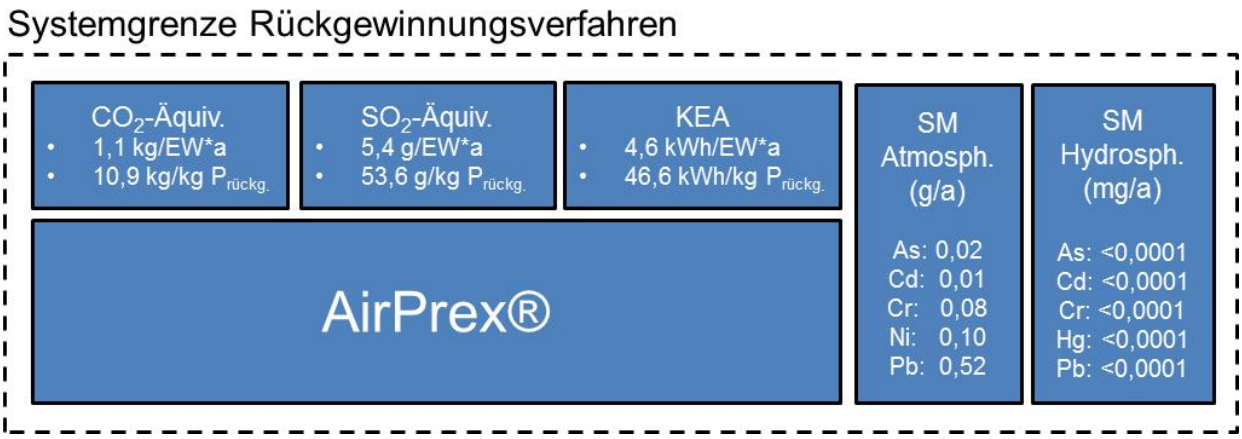



*Abbildung 17: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)*

### 1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung AirPrex®

Die Implementierung der AirPrex® Anlage hat Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess, der wiederum nachfolgende Prozesse beeinflussen kann, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

| Faktor | Einfluss auf |
|---|---|
| Reduktion Fällmittel (-6,2%) | Verringerte Rückbelastung – verringerter Fällmittelbedarf, verringerte indirekten Emissionen aus Fällmittelproduktion, Kosten Abwasserreinigung |
| Verringerte P und N Rückbelastung | Kosten Abwasserreinigung, Schlammanfall, Transport Klärschlamm, |
| Verringerter Schlammanfall (-1,2%) | Energieausbeute Verbrennung, Transportkosten, Entsorgungskosten, Ressourcenaufwand Verbrennung |
| Ressourcenaufwand AirPrex® | Indirekte Emissionen, Kosten |
| MAP-Produktion | Kosten (Erlöse), Gutschrift Emissionen |

*Tabelle 14: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung AirPrex®*

**Berücksichtigung Transport**

Infolge des AirPrex® Verfahrens sind aufgrund der angenommenen Referenzkläranlage nur geringfügige Veränderung des Klärschlammanfalles aufgrund der entfernten P-Fracht zu erwarten (Tabelle 15).

| Transportwege | [t/a] | [tkm] | [€/EW*a] |
|---|---|---|---|
| Klärschlamm – MonoV | 4.910 | 687.900 | 0,96 |
| Flug- und Bettasche - Reststoffdeponie | 716 | 71.600 | 0,10 |
| Filterkuchen - Untertagedeponie | 32 | 32.000 | 0,05 |
| **Gesamt Transport** | | **791.600** | **1,11** |

*Tabelle 15: Transportwege AirPrex®*

#### 1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation ist kaum eine Veränderung der treibhausrelevanten Gase (+9 %), sowie eine geringe Zunahme der Gase mit Versauerungspotential (+13 %) zu beobachten (Tabelle 16). Der dominante Anteil ist auf die Bio-P Entfernung und der damit entfallende Bedarf an Fällmitteln (indirekte Emissionen) zurückzuführen. Zusätzlich sinken infolge des verringerten Schlammanfalles die zu transportierenden Frachten, der Rohstoffbedarf bei der Verbrennung und die zu entsorgenden Reststoffe. Ähnlich verhält es sich beim kumulierten Energieaufwand. Die Reduktion beträgt +21 % in Relation zur Referenzsituation (*Verringerter Fällmittelbedarf, ** Verringerter Schlammanfall

Tabelle 17).

| $CO_2$-Äquivalente | [kg] | [$CO_2$-Äquiv./EW*a] |
|---|---|---|
| AirPrex® | 403.500 | 4,0 |
| Referenz | 368.600 | 3,7 |
| Δ | + 9% | |
| **$SO_2$-Äquivalente** | **[kg]** | **[$SO_2$-Äquiv./EW*a]** |
| AirPrex® | 1.420 | 0,014 |
| Referenz | 1.260 | 0,013 |
| Δ | + 13 % | |

*Tabelle 16: $CO_2$ bzw. $SO_2$-Äquivalente Prozesskette AirPrex®*

#### 1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

| KEA | Rohstoffe | Energie | [kWh/EW*a] |
|---|---|---|---|
| Kläranlage | 654.600 | 1.006.000 | 16,6 |
| AirPrex® | 323.500 | 143.700 | 4,7 |
| Monoverbrennung | 143.900** | 935.000** | 10,8 |
| Deponie | 13.100* | | 0,1 |
| Transport | 131.500** | | 1,3 |
| **Gesamt** | **3.351.400** | | 33,5 |
| Substitution Strom | -481.900 | | -4,8 |
| Substitution Wärme | -1.317.000 | | -13,2 |
| Substitution P+N-Dünger | -124.800 | | -1,2 |
| **Gesamt** | **1.427.800** | | **-14,3** |
| Referenz | 1.131.700 | | 11,32 |
| Δ | +26 % | | |

*Verringerter Fällmittelbedarf, ** Verringerter Schlammanfall

*Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette*

In Abbildung 16 werden die ökologisch relevanten Bewertungsparameter $CO_2$- und $SO_2$-Emissionen sowie der kumulierte Energieaufwand in Relation zur Referenzsituation zusammenfassend bezogen auf EW*a dargestellt. Die ökologische Bewertung verdeutlicht, dass infolge der Implementierung des AirPrex® Verfahrens geringe bzw. moderate Steigerungen der $CO_2$ bzw. $SO_2$-Emissionen zu erwarten sind.

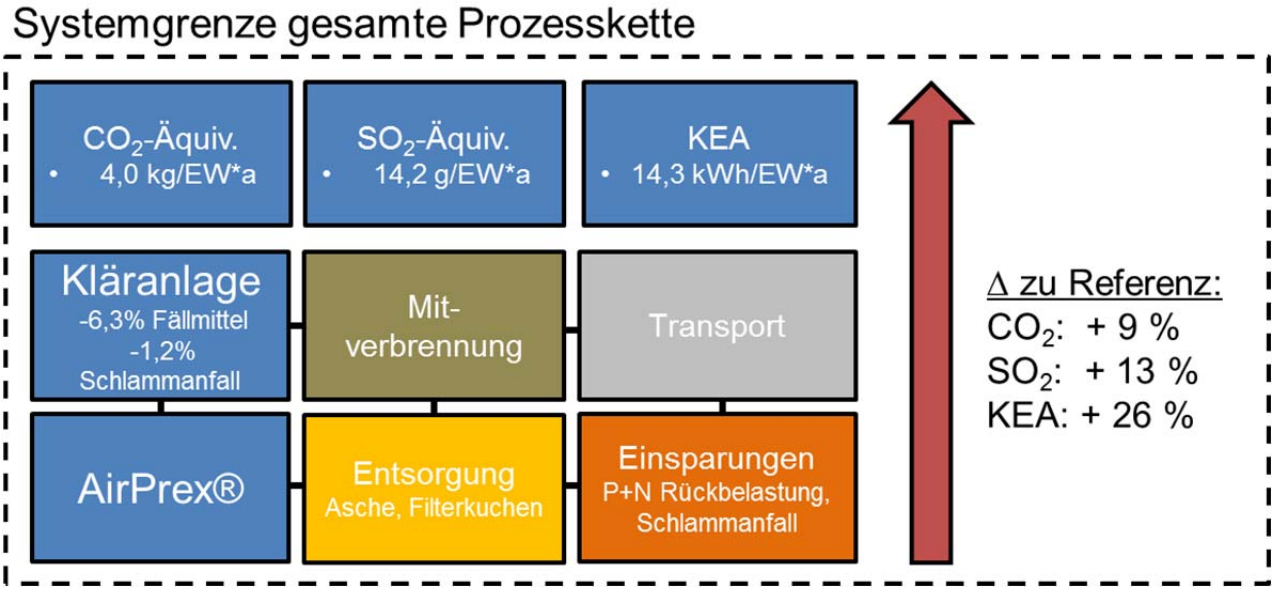



*Abbildung 18: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation*

#### 1.3.3.3 Ergebnisse Stoffflussanalyse Schwermetalle und organische Spurenstoffe

Auf Basis der Stoffflussanalysen können die Pfade von P und den ausgewählten Schwermetallen zu den Zielprozessen nachvollzogen werden (Abbildung 19). Im Vergleich zur Referenzsituation sind keine erhöhten Schwermetallfrachten in die Hydrosphäre oder Atmosphäre zu erwarten. Im Falle einer Ausbringung des Endproduktes nimmt die P- und Schwermetallfracht in die Landwirtschaft im Ausmaß der rückgewonnen P-Fracht bzw. der SM-Fracht im Endprodukt zu. Organische Spurenstoffe sind im Endprodukt nicht nachweisbar, womit auch keine Spurenstoffe über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

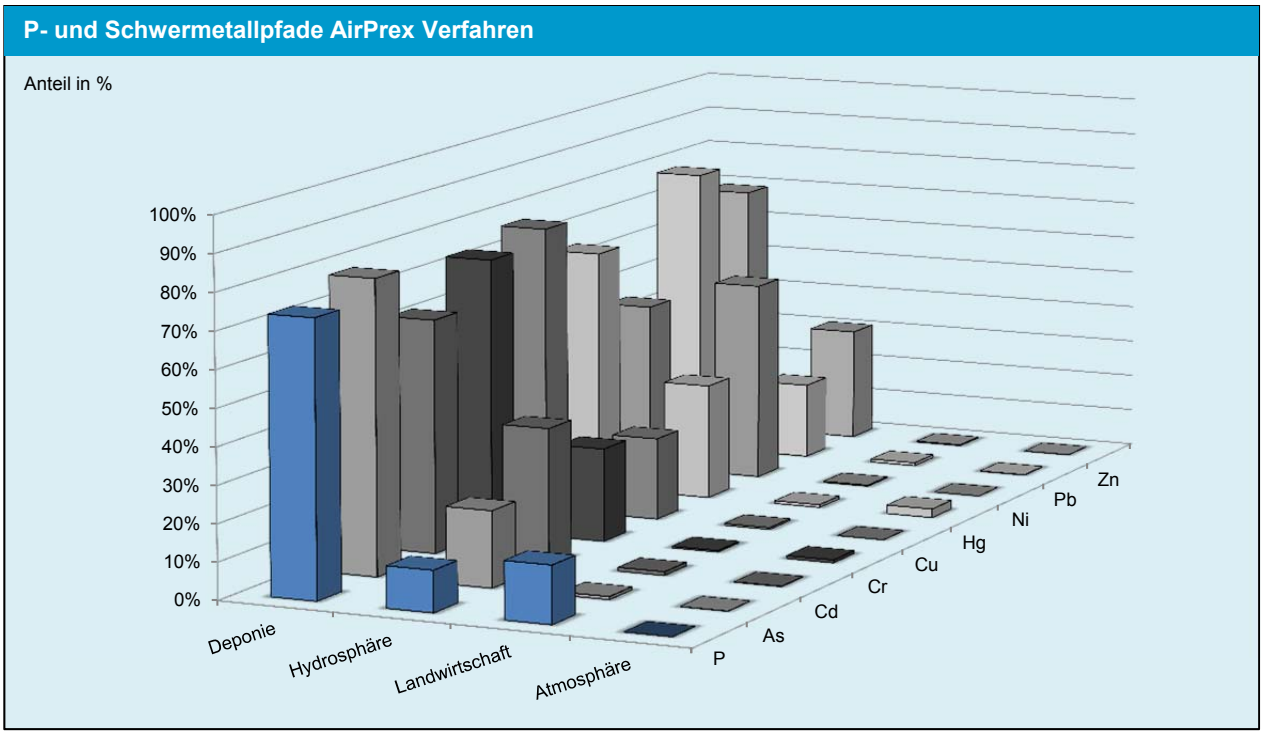



*Abbildung 19: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage AirPrex®*

### 1.3.3.4 Ergebnis Schwermetallemissionen

Verglichen mit den direkten SM-Emissionen haben die indirekten SM-Emissionen (Tabelle 12) nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamt-Schwermetallemissionen. Im Vergleich zur Referenzsituation kann Großteils eine Reduktion der Emissionen in die Atmosphäre und Hydrosphäre beobachtet werden. Die verringerten Emissionen in die Luft sind in erster Linie auf die fehlenden indirekten Emissionen aus dem Fällmittelbedarf zurückzuführen. Im Falle der Emissionen in die Gewässer ist die reduzierte Fracht hauptsächlich auf die entfallenden direkten Schwermetalleinträge aus dem Fällmittelverzicht zurückzuführen. Der Anteil der indirekten Emissionen in die Gewässer aus dem Verzicht der Fällmittel ist dagegen gering.

| Emissionen Gesamt | Atmosphäre [g/a] | Δ Referenz [%] | Hydrosphäre [kg/a] | Δ Referenz [%] |
|---|---|---|---|---|
| As | 7,9 | -6,7 | 2,1 | 2,3 |
| Cd | 4,3 | -6,7 | 1,2 | 0,1 |
| Cr | 45,6 | 1,8 | 25,9 | -0,1 |
| Cu | - | - | - | - |
| Hg | - | - | 0,48 | -1,4 |
| Ni | 50,8 | -16,5 | - | - |
| Pb | 128,1 | -1,6 | 24,9 | 0,6 |
| Zn | - | - | - | - |
| AOX | - | - | 338,7 | 0,0 |
| PAK | 0,2 | 0,01 | - | - |
| PCDD/F | 0,000001 | | - | - |

*Tabelle 18: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation*

### 1.3.3.5 Ergebnis Endprodukt

Endprodukt ist ein MAP mit geringen Schwermetallgehalten, die deutlich unter den Anforderungen der Düngemittelverordnung liegen. Bezogen auf den Hauptnähstoff Phosphor liegen alle Schwermetallkonzentrationen bis auf Cu teils deutlich unter jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP). Dies gilt vor allem für Cadmium, Chrom und Blei.

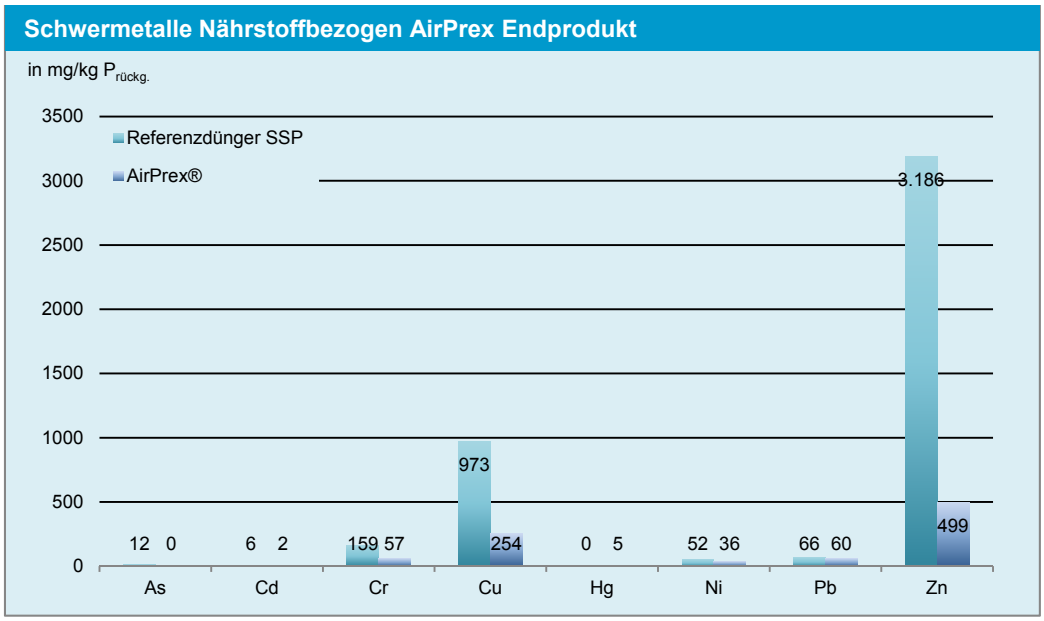



*Abbildung 20: Nährstoffbezogene Schwermetallgehalte Berliner Pflanze® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)*

| Bewertung Endprodukt | Berliner Pflanze ® | SSP |
|---|---|---|
| Löslichkeit | Gut | Sehr Gut |
| Düngewirksamkeit | Gut/Sehr Gut | Sehr Gut |
| Monetäre Wert [€/t Endprodukt] | 317 | 230 |
| **Anorganische Verunreinigungen** | | |
| SM:P [mg Cd/kg P] | 2,9 | 118 |
| Schadeinheit [SE/kg P] | 0,015 | 1,26 |
| Referenzbodenmethode [*limitierendes Element) | 15.300 (Hg*) | 1.450 (Cd*) |
| Tolerierbare Menge bezogen auf Cd | 4,8 | - |
| **Organische Verunreinigungen** | | |
| Keine organische Spurenstoffe | 3[2] | 5 |
| Keine hygienischen Bedenken | 5[1] | 5 |
| **Handhabung** | | |
| Einfache Lagerung möglich | 5 | 5 |
| Direkter Einsatz in LW möglich | 4 | 5 |

*Tabelle 19: Bewertung Berliner Pflanze ®*

Das Cd:P Verhältnis ist mit 2,9 mg Cd/kg P sehr gering und liegt deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Das Schadeinheitenmodell und die Referenzbodenmethode verdeutlichen die geringen Gehalte an Schwermetallen. Theoretisch kann die Berliner Pflanze ® rund 15.300 Jahre aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. In diesem Fall ist Quecksilber das limitierende Element. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, könnte das AirPrex® Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 4,8 häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe als sind nach Angaben des Herstellers in geringen Konzentrationen im Endprodukt nachweisbar. Mikrobiologische Untersuchen weisen auf Bakterien hin, stellen aber keine hygienischen Bedenken dar. Aufgrund der Prozessführung fällt das Endprodukt sehr grobkörnig kristallin an. Eine direkte landwirtschaftliche Umsetzung wäre damit durchaus möglich. Eine langfristige Lagerung ist sehr gut möglich.

## 1.3.4 Ökonomische Bewertung

### 1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten AirPrex®

Wesentliche Voraussetzung für größenabhängige Kostenkalkulationen ist die Annahme und Festlegung von Up- und Downscalingfaktoren. Auf Basis der vorliegenden Investitionskosten für das AirPrex® Verfahren unterschiedlicher Größenordnung (550.000 EW und 1.150.000 EW) wird eine Beziehung zur Ausbaugröße, den entsprechenden Kosten und dem rückgewinnbaren P-Potential hergestellt.

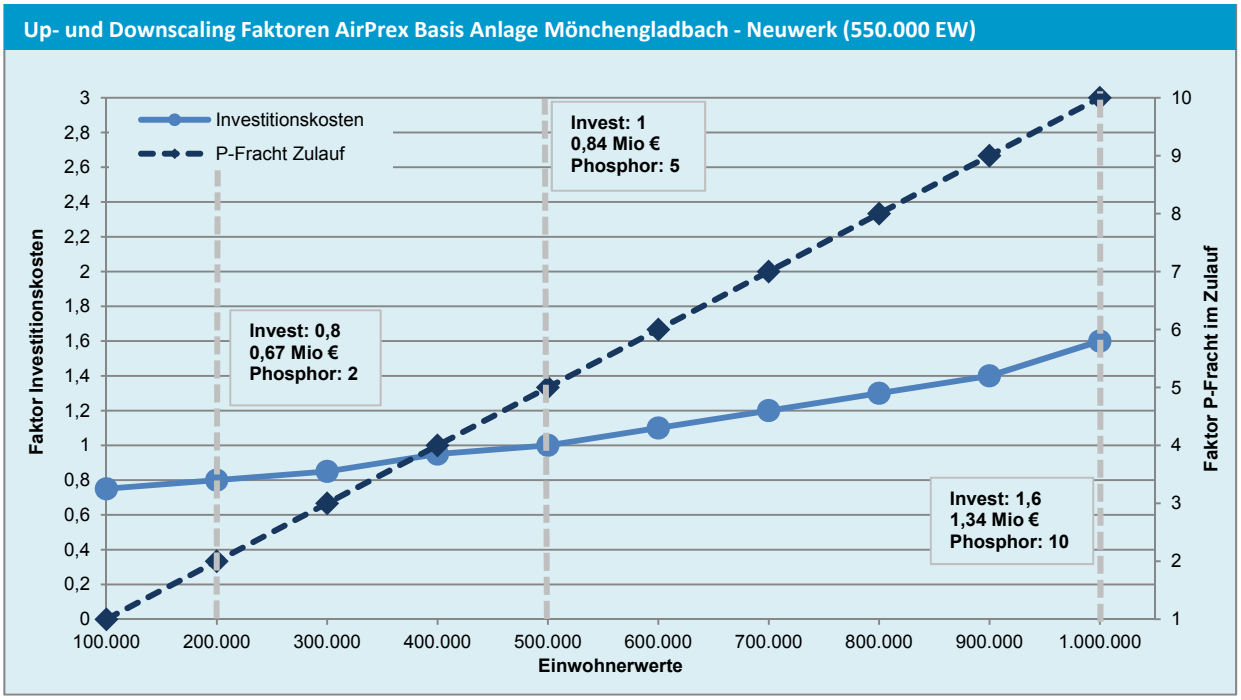



*Abbildung 21: Up- and Downscaling Faktoren Investitionskosten AirPrex® Mönchengladbach (Basis 550.000 EW)*

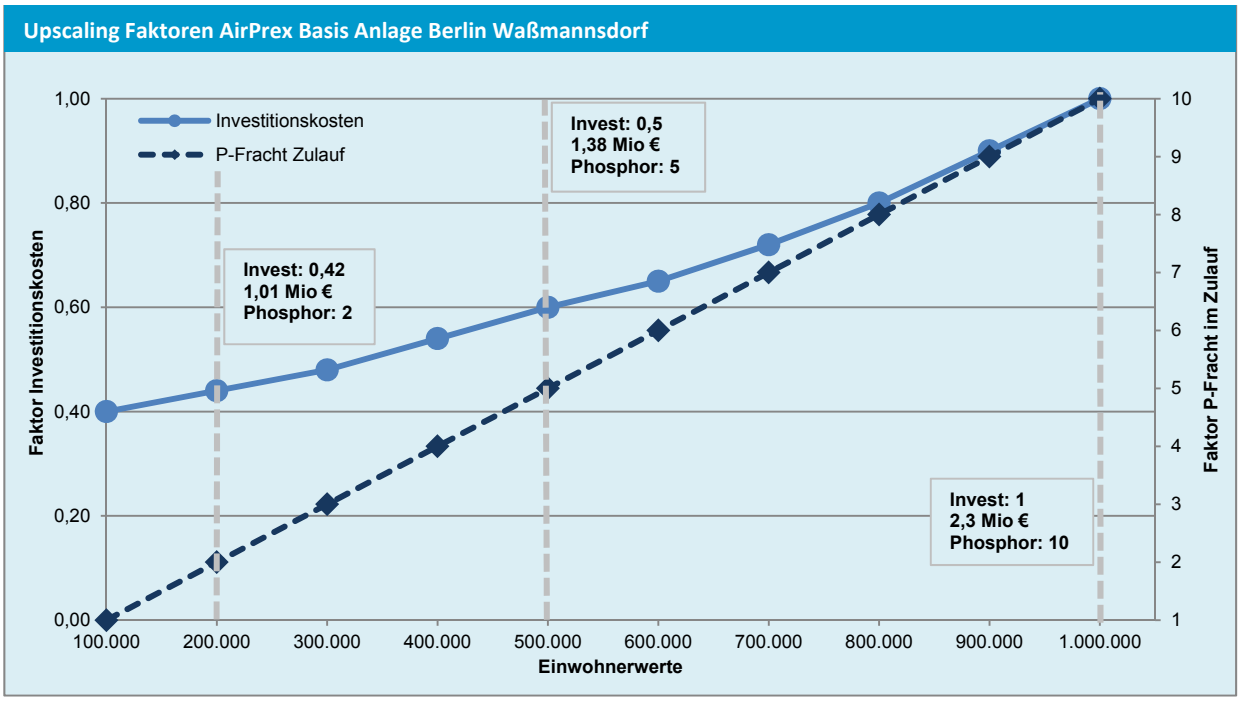



*Abbildung 22: Up- and Downscaling Faktoren Investitionskosten AirPrex® Berlin Waßmannsdorf (Basis 1.150.000 EW)*

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Entwicklung der Kosten zum einen auf Basis der Investitionskosten für eine Anlage mit 550.000 EW und eine Anlage mit 1.150.000 EW. Daraus resultieren teils deutlich voneinander Abweichende Investitionskosten für z.B. die Referenzkläranlage mit 100.000 EW (630.000 – 920.000 €). Die Kostenkalkulation wird aufgrund der Ausbaugröße, auf Basis der Anlage in

Mönchengladbach-Neuwerk durchgeführt. Folgendermaßen ist Abbildung 21 zu interpretieren: Ausgangssituation ist die Errichtung des AirPrex® Verfahrens auf einer 550.000 EW Anlage (Beispiel Mönchengladbach). Das Investitionsvolumen beträgt dabei im Mittel 0,84 Mio. €. Das P-Potential im Zulauf entspricht dabei dem fünffachen der definierten Referenzkläranlage (Faktor 5). Auf Grundlage der Erkenntnisse über Up-und Downscalings von Reaktoren (siehe Ostara®) wird für das Downscaling auf eine 100.000 EW Anlage ein Faktor von 0,75 bzw. ein Faktor von 0,8 für eine 200.000 EW Anlage angenommen. Für den Ausbau auf einer Anlage mit 1.000.000 EW wird ein Faktor von 1,6 berücksichtigt wodurch Investitionskosten von1,34 Mio. zu erwarten sind (Tabelle 20).

| Jahreskosten | 100.000 EW | 200.000 EW | 500.000 EW | 1.000.000 EW |
|---|---|---|---|---|
| | **Berechnung auf Basis 500.000 EW** | | | |
| **Faktoren** | 0,75 | 0,8 | **840.000** | 2 |
| Investitionskosten | **630.000** | **672.000** | **-** | **1.680.0001** |
| | **Berechnung auf Basis 1.000.000 EW** | | | |
| **Faktoren** | 0,4 | 0,44 | 0,6 | **2.300.000** |
| Investitionskosten | **920.000** | **1.012.000** | **1.380.000** | **-** |
| | **Berechnung auf Basis Angaben von Ewert (2013)** | | | |
| Investitionskosten | **90.000** | **180.000** | **270.000** | **360.000** |

*Tabelle 20: Entwicklung Investitionskosten in Abhängig der Ausbaugröße*

Nach Angaben von Ewert (2013) liegen die Kosten für 1 m³ Reaktorvolumen bei 1.500 €. Berücksichtigt werden dabei die Dosier- und Wäscheranlagen, Druckluftgebläse, Elektrik und Mess- und Regelungstechnik. Unter der Voraussetzung eines jährlichen Faulschlammanfalles von 1.495 t TS (~43.800 t FS), das entspricht einem täglichen Durchsatz von ~120 t FS und einer Reaktionszeit von 6 h wird ein Reaktorvolumen von rund 30 m³ benötigt. Mit Freiboard und für höhere Durchsätze wird ein Reaktorvolumen von 60 m³ angenommen. Daraus errechnen sich Investitionskosten für die Referenzanlage von gerade einmal 90.000 €.

#### 1.3.4.2 Jahreskosten

Die Investitionskosten für das AirPrex® Verfahren liegen für einen Reaktor für 550.000 EW bei rund 840.000 €. Das entspricht Investitionskosten von 1,5 €/EW. Die Investitionskosten für eine 1.150.000 EW Anlage beträgt rund 2,3 Mio. € was ca. 2 €/EW entspricht. Diese Ergebnisse sind konträr zu den bisherigen Annahmen, dass die Kosten nicht proportional zur Anlagegröße zunehmen.

Für eine Umsetzung auf einer 100.000 EW Anlage wird ein Downscalingfaktor von 1,25 angesetzt, womit rund 630.000 € als Investitionskosten angenommen werden. 60 % der Kosten entfallen auf die Bautechnik (ND 30 Jahre) und 40 % auf die Maschinentechnik (ND 15 Jahre). Aufgrund des sehr wartungsarmen Betriebes werden die Wartungskosten mit 0,5 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand ist gering und kann mit 0,1-0,15 MA/Jahr angenommen werden.

| Jahreskosten | | Preis/Einheit | €/a |
|---|---|---|---|
| **Kapitalkosten** | | | **44.500** |
| Wartung + Reparaturen | | | 3.200 |
| $MgCl_2$*6 $H_2O$ | 100.700 | 110 €/t | 11.100 |
| Energie | 75.000 | 0,1 €/kWh | 7.500 |
| Personal | 0,1 | 50.000 €/MA | 5.000 |
| Sonstiges | - | - | - |
| Entsorgung | - | - | - |
| **Betriebskosten** | | | **21.700** |
| **Gesamt** | | | **66.200** |

*Tabelle 21: Jahreskosten AirPrex® (Referenzkläranlage 100.000 EW)*

| Einsparungen/Erlöse | Menge (kg) | Preis/Einheit | €/a |
|---|---|---|---|
| MAP Erlöse | 101.000 | 317 | 32.000 |
| P-Reduktion | | | 6.400 |
| N-Reduktion | 5.050 | 0,75 | 3.800 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Schlammreduktion | 18.500 | 290 | 5.300 |
| **Gesamt** | | | **47.500** |

*Tabelle 22: Einsparungen und Erlöse AirPrex® (Referenzkläranlage 100.000 EW)*

| Spezifische Kosten | € (ohne Erlöse) | € (mit Erlöse) |
|---|---|---|
| €/kg $P_{rückgewonnen}$ | 6,6 | 1,9 |
| €/EW*a | 0,7 | 0,2 |
| €/E*a | 1,4 | 0,4 |

*Tabelle 23: Spezifische Kosten AirPrex® (100.000 EW)*

#### 1.3.4.3 Variantenrechnung nach Investitionskostenkurve

Die Berechnungen zeigen, dass das AirPrex® Verfahren unter den gegebenen Voraussetzungen (Referenzkläranlage 100.000 EW nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Grund dafür ist die zu geringe P-Fracht der Referenzkläranlage in Relation zum damit überdimensionierten Reaktor. Allerdings zeigt sich, dass die Kosten für 1 kg P nach Berücksichtigung von Einsparungen und Erlösen (Erlöse = monetäre Wert des Endproduktes) bei 2,4 € und damit im Bereich der derzeit üblichen Marktpreise von rund 2,3 €/kg P.

Anhand der Annahme unterschiedlicher Kläranlagengrößen sowie einer Steigerung der Rücklösung von 20 auf 25 % können die spezifischen Kosten des Verfahrens deutlich reduziert werden (1,2 €/kg P und 0,2 €/EW*a). Bereits bei einer Kläranlagengröße von 200.000 EW, das entspricht der doppelten Phosphorzulauffracht, kann das AirPrex® Verfahren unter der Berücksichtigung der Einsparungen und Erlöse wirtschaftlich betrieben werden, wenn die Rücklösungen in der Faulung ausreichend hoch sind. (Abbildung 24). Das heißt, die Jahreskosten werden durch die möglichen Einsparungen und Erlöse gedeckt bzw. es kann ein Überschuss erwirtschaftet werden. Die Kosten können weiter gesenkt werden, wenn das AirPrex® Verfahren auf einer Kläranlage ab 500.000 EW implementiert wird. Während die P-Fracht direkt proportional zur Kläranlagengröße zunimmt, gilt dies für die Investitionskosten für einen größeren Reaktor nicht. Auch direkt proportional steigen die Kosten für Fällmittel während die Kosten für Energie, Wartung und Personal nicht direkt proportional ansteigen.

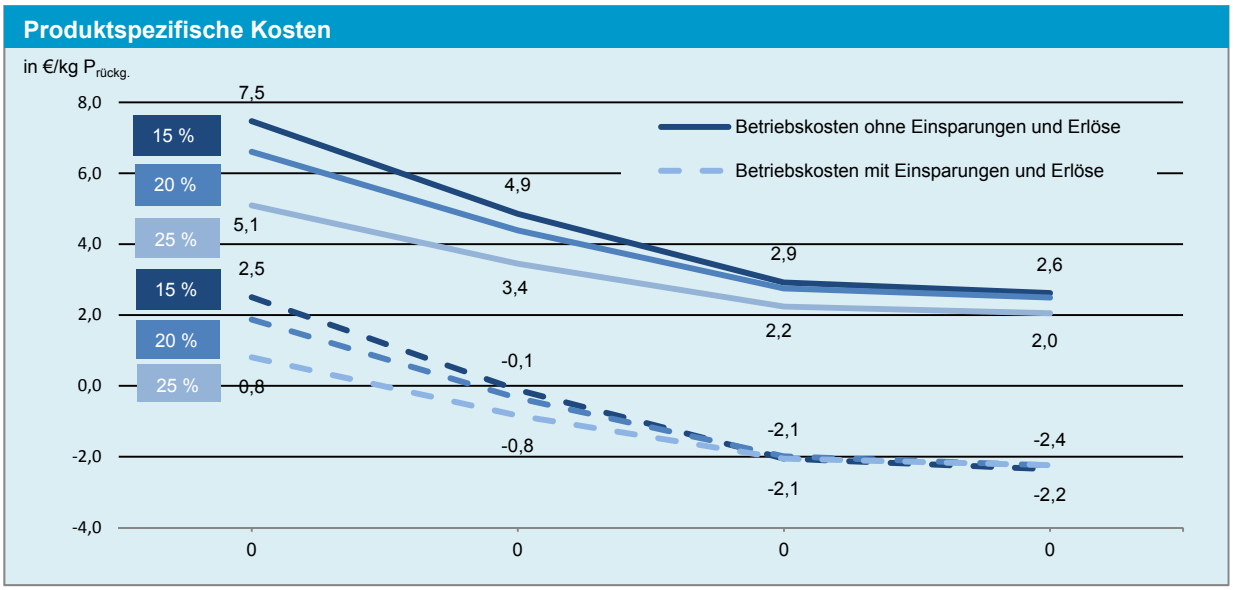



*Abbildung 23: Produktspezifische Kosten AirPrex®; Variation Rücklösung und Anlagengröße*

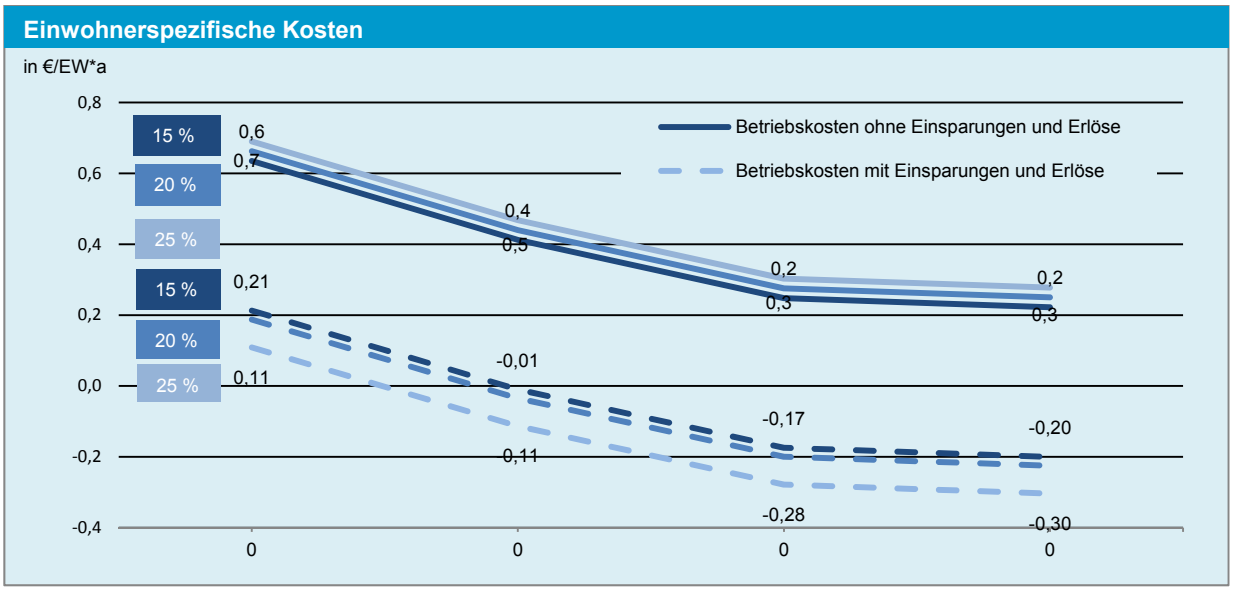



*Abbildung 24: Einwohnerspezifischen Kosten AirPrex®; Variation Rücklösung und Anlagengröße*

In Abbildung 24 werden die produktspezifischen Kosten, im Falle einer Umsetzung des AirPrex® Verfahrens auf Kläranlagen mit unterschiedlicher Belastung, der zeitlichen Preisentwicklung von Phosphor gegenübergestellt. Daraus wird deutlich, dass die Kosten für die Herstellung eines P-Düngers aus dem Schlammwasser mit dem AirPrex® Verfahren, ab einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit 200.000 EW, die am Markt üblichen P-Preise deutlich unterschreitet.

#### 1.3.4.4 Variantenrechnung nach Investitionskosten nach Ewert (2013)

#### 1.3.4.5 Kostenaufgliederung

Anhand der Kostenaufgliederung wird deutlich, dass der Anteil der Kapitalkosten mit größerer Ausbaustufe deutlich reduziert und damit auch die Gesamtkosten verringert werden können. Während im Falle der Referenzkläranlage die Kapitalkosten bei nahezu 2/3 liegen, können diese bei einer Umsetzung auf rund 40 % reduziert werden.

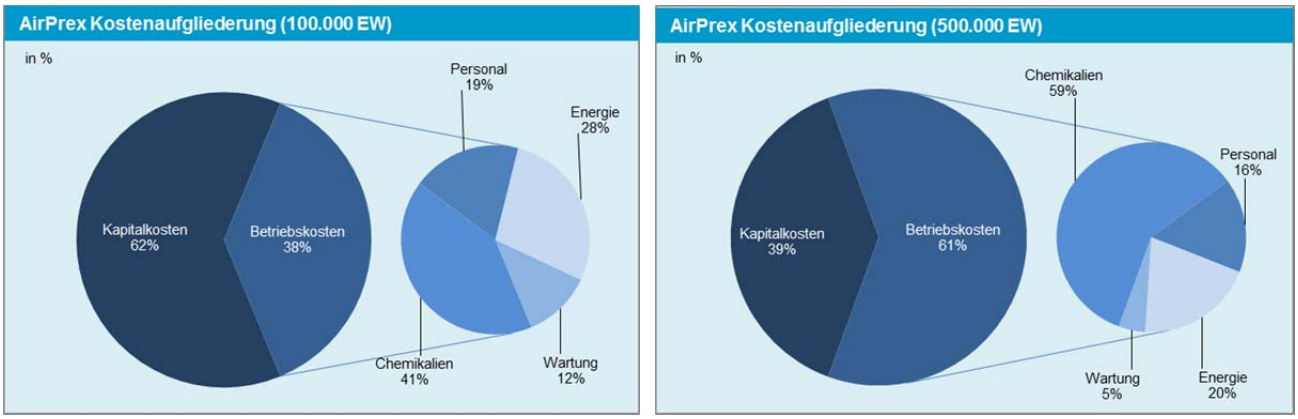



*Abbildung 25: Kostenaufgliederung AirPrex® 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)*

#### 1.3.4.6 Amortisation

Anhand der Kapitalwertmethode (Jahreskosten ohne Kapitalkosten abzüglich sämtlicher Einsparungen bzw. Erlöse) wird für die 100.000 EW Anlage und eine Amortisationszeit von 18 bzw. 19 Jahren errechnet. Das bedeutet, dass keine Amortisierung der Anlage vor der Neuinvestition der Maschinentechnik nach 15 Jahren stattfindet. Grund dafür ist in primär die zu geringe P-Fracht in Relation zu dem auf höhere Frachten ausgelegten AirPrex®.

| Anlagengröße | Amortisationszeit [a] |
|---|---|
| 100.000 EW | >15 |

| | |
|---|---|
| 200.000 EW | 15 |
| 500.000 EW | 7 |
| 1.000.000 EW | 7 |

*Tabelle 24: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße*

#### 1.3.4.7 Kosten gesamte Prozesskette

Die Umsetzung des AirPrex® Verfahrens hat einen positiven Einfluss auf die P und N Rückbelastung und damit die Kosten zur Entfernung der Nährstoffe (Fällmittelbedarf: -6,2 %) und den Schlammanfall (-1,2 %). Der verringerte Schlammbedarf hat zum einen geringen Einfluss auf die Kosten der thermischen Behandlung als auch die Transportkosten. Einsparungen resultieren aus dem genannten reduzierten Fällmittelbedarf, dem reduzierten Energiebedarf zur N-Entfernung, den verringerten Entsorgungskosten für den Klärschlamm. Die Erlöse stammen aus dem Verkauf des MAP. Im Vergleich zur Referenzsituation ist mit geringfügig höheren Kosten von rund 11,30 €/EW*a zu rechen. Das entspricht absoluten Mehrkosten von 0,1 €/EW*a bzw. + 1 %. Im Fall einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit größerer Belastung sind aufgrund der reduzierten Verfahrenskosten, in erster Linie der Investitionskosten des AirPrex® Verfahrens, gleiche Kosten (-1 % 200.000 EW) bzw. eine Reduktion (-4 %) der Kosten im Vergleich zur Referenzsituation möglich.

| Kostenstellen (Kosten in €/EW*a) | 100.000 EW | 200.000 EW | 500.000 EW |
|---|---|---|---|
| **Kläranlage** | | | |
| Abwasserreinigung | 4,50 | 4,50 | 4,50 |
| Schlammbeh. inkl. Entwässerung | 1,50 | 1,50 | 1,50 |
| Kosten Kläranlage | 6,00 | 6,00 | 6,00 |
| **Rückgewinnungsverfahren** | 0,66 | 0,44 | 0,28 |
| **Verbrennung (Mitverbrennung)** | 3,54 | 3,54 | 3,54 |
| **Entsorgung** | | | |
| Asche/Schlacke/Flugasche | 0,36 | 0,36 | 0,36 |
| Filterkuchen | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| **Transport** | | | |
| Schlamm zu Verbrennung | 0,96 | 0,96 | 0,96 |
| Asche zu Deponie | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Filterkuchen zu Untertagedeponie | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| **Summe Kosten** | 11,72 | 1,55 | 11,16 |
| **Einsparungen und Erlöse** | | | |
| Verringerte P+N Rückbelastung | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| Verringerter Schlammanfall | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Erlös Endprodukt | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| Summe Einsparungen und Erlöse | 0,47 | 0,47 | 0,47 |
| Gesamtkosten | 11,25 | 11,03 | 10,72 |
| **Δ zu Referenz** | **+1%** | **-1%** | **-4%** |

*Tabelle 25: Jahreskosten gesamte Prozesskette AirPrex®*

#### 1.3.4.8 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 26 zeigt, dass Preisänderung bei den Rohstoffen (+20 %) bzw. höhere Investitionskosten (+20 %) moderate Auswirkungen auf die Jahreskosten haben (z.B. + 14 % bei höheren Investitionskosten). Szenario 4 zeigt den Einfluss der reduzierten Kosten, die im Falle einer höheren Rücklösung bei der anaeroben Behandlung (25 statt 20%) und damit einer höheren Rückgewinnungsquote anfallen.

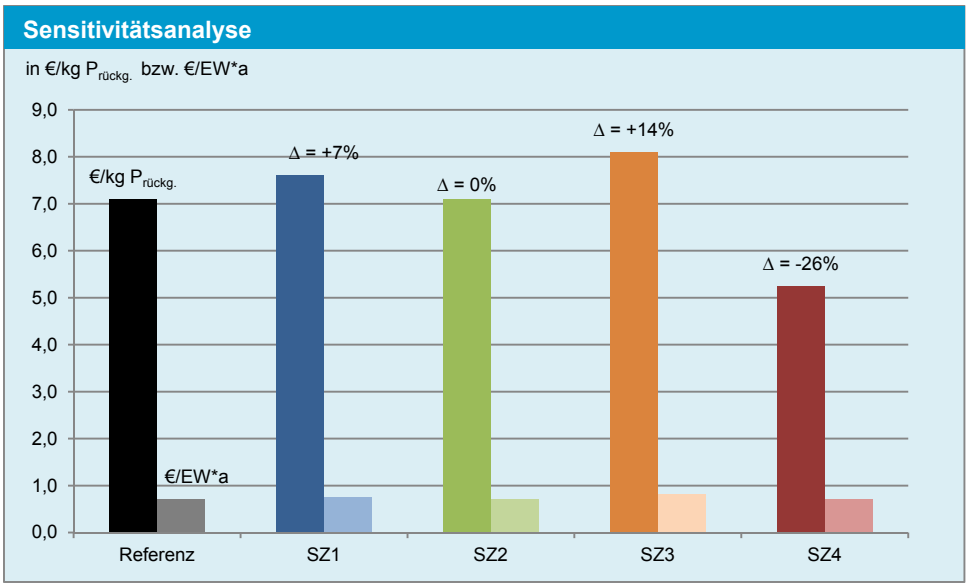



*Abbildung 26: Sensitivitätsanalyse AirPrex®*

### 1.3.5 Literatur

Bergmans, B. (2011) Thesis. Struvite recovery from digested sludge at WWTP West. Delft University of Technology Sanitary Engineering Section. Delft.

Ewert, W. (2009) Verfahren zur Optimierung der anaeroben Schlammbehandlung bei Anwendung der biologischen Phosphatelimination. In: 6. Klärschlammtage in Fulda. DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.). Fulda.

Heinzmann, B., Engel, B. (2005) Phosphorus recycling in sewage treatment plants with biological phosphorus removal. Water Science Technology 52 (10-11), pp. 543 - 548.

Heinzmann, B., Engel, B. (2006) Induced Magnesium Ammonia Phosphate Precipitation to Prevent Incrustations and Measures for Phosphorus Recovery. Water Practice & Technology 1.

Heinzmann, B. (2009) P-Recycling in Berlin - from Pilot Scale Experiments to large Scale Application. Präsentation. Balitc 21 - Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice. 28 - 30. September 2009, Berlin.

Heinzmann, B, Lengemann, A. (2011) Stand des Phosphorrückgewinnung in Berlin – von wissenschaftlichen Untersuchungen zur großtechnischen Anwendung" (Phosphorus Recovery in Berlin – From Scientific Investigations to Large Scale Application). Proceedings of the International Symposium Re-Water Braunschweig, Wiederverwertung Energie Wasser und Nährstoffe, 21 - 22 November 2011.

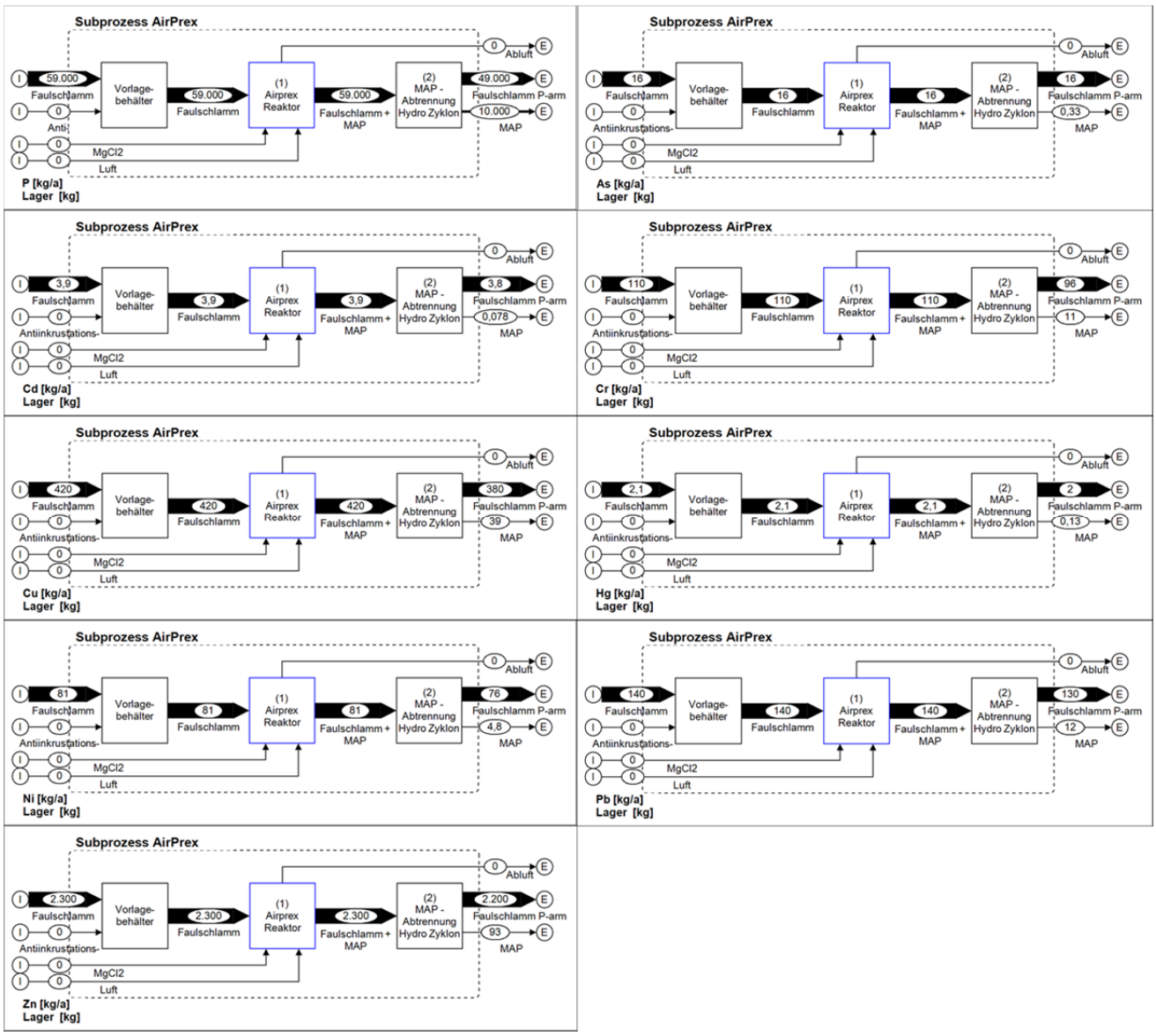
Kern, J., Heinzmann, B., Markus, B., Kaufmann, A.-C., Soethe, N., Engels, C. (2008) Recycling and Assessment of Struvite Phosphorus from Sewage Sludge. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, Volume X.

P.C.S (o.J) Kristallisation im Schlammbereich kommunaler Kläranlagen. Potential oder Problem? AirPrex®-Verfahren.

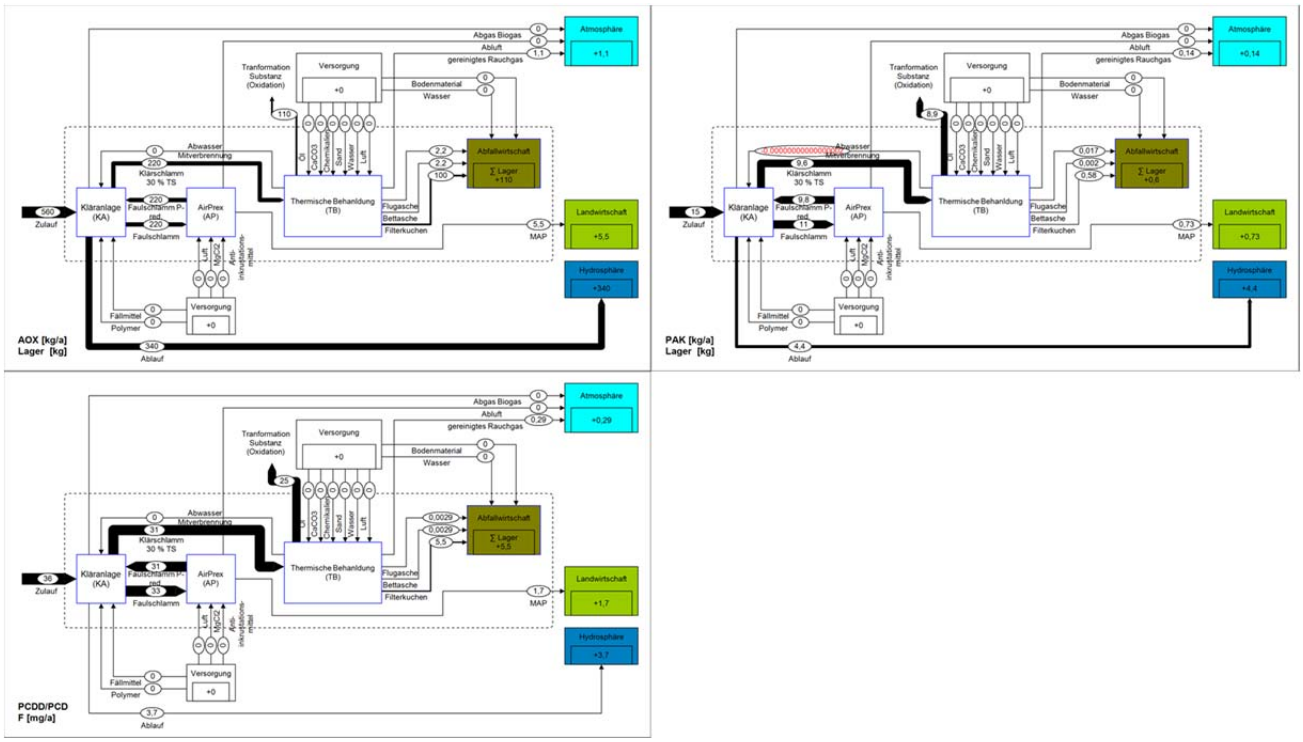
A. Lengemann (2011, 2012) Besichtigung der Kläranlage Waßmannsdorf 12.9.11 und Persönliche Mitteilungen (E-Mail, Telefon)

# 1.4 Anhang

## 1.4.1 Stoffflussanalyse AirPrex®



## 1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess AirPrex®


AOX [kg/a]
Lager [kg]
PAK [kg/a]
Lager [kg]
PCDD/PCD
F [mg/a]
Atmosphäre
Landwirtschaft
Hydrosphäre
Abfallwirtschaft
Versorgung
Thermische Behanldung (TB)
Kläranlage (KA)
AirPrex (AP)
Zulauf
Ablauf
Abgas Biogas
Abluft
gereinigtes Rauchgas
Tranformation Substanz (Oxidation)
Bodenmaterial
Wasser
Abwasser
Mitverbrennung
Klärschlamm 30 % TS
Faulschlamm P-red
Faulschlamm
Flugasche
Bettasche
Filterkuchen
MAP
Fällmittel
Polymer
Luft
MgCl2
Anti-inkrustations-mittel