TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

lebensministerium.at

Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

OSTARA®

PEARL® Prozess

Inhaltsverzeichnis

Ostara® (PEARL® Verfahren) 5
1.1 Grundlagen allgemein 5
1.1.1 Prozessskizze PEARL® Verfahren 5
1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell 5
1.1.3 Verfahrensbeschreibung 6
1.1.4 Betriebsparameter PEARL® Verfahren 7
1.2 Datengrundlage für Bewertung 8
1.2.1 Sachbilanz 8
1.2.2 Stoffflussanalyse 8
1.2.3 Charakteristik Endprodukt 8
1.2.4 Umsetzung 11
1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage 11
1.2.6 Ökonomische Grundlagen 11
1.3 Ergebnis PEARL® Verfahren 12
1.3.1 Technologie Bewertung 12
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren) 12
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung PEARL® 18
1.3.4 Ökonomische Bewertung 22
1.3.5 Literatur 27
1.4 Anhang 28
1.4.1 Stoffflussanalyse PEARL® 28
1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess PEARL® 29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessskizze Implementierung PEARL® Reaktor auf Kläranlagen 5
Abbildung 2: STAN Modell PEARL® Reaktor inkl. MAP Aufbereitung 5
Abbildung 3: STAN Modell PEARL® gesamte Prozesskette 6
Abbildung 4:P-Entfernungsraten (Fattah, 2002; Adnan, 2004) 8
Abbildung 5: PEARL® Endprodukt Crystal Green® 10
Abbildung 6: Großtechnische Umsetzung PEARL® Verfahren 11
Abbildung 7: P-Stoffflussanalyse PEARL® (2 signifikante Stellen) 12
Abbildung 8: Veränderte TK Eindicker/Entwässerung und Effekt auf Schlammbehandlung (2 signifikante Stellen) 13
Abbildung 9: Einfluss PEARL® auf P-Emission Gewässer und P-Fracht Klärschlamm (2 signifikante Stellen) 14
Abbildung 10: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette (2 signifikante Stellen) 14
Abbildung 11: Ergebnis Güterflussanalyse PEARL® 15
Abbildung 12: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] PEARL® 16
Abbildung 13: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren) 17

Abbildung 14: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation 19
Abbildung 15: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (PEARL®) 20
Abbildung 16: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung PEARL® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)..... 21
Abbildung 17: Upscaling Faktoren Investitionskosten PEARL® 22
Abbildung 18: Produktspezifische Kosten PEARL®; Variation Rücklösung und Anlagengröße 24
Abbildung 19: Produktspezifische Kosten PEARL®; Variation Rücklösung und Anlagengröße 24
Abbildung 21: Kostenaufgliederung PEARL® 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts) 25
Abbildung 22: Kosten gesamte Prozesskette PEARL® Verfahren 100.000 EW Anlage 26
Abbildung 23: Kosten gesamte Prozesskette PEARL® Verfahren 500.000 EW Anlage 26
Abbildung 24: Sensitivitätsanalyse PEARL® 27

Tabellenverzeichnis

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

Ostara® (PEARL® Verfahren)

1.1 Grundlagen allgemein

Das PEARL® Verfahren (Adnan, 2002; Adnan et al., 2002; Fattah, 2004, Britton et al. 2008; Britton, 2009; Rieck, 2011-12) ist ein von der Firma Ostara® in Kanada entwickeltes, vor allem in Nordamerika und vereinzelt auch in Europa eingesetztes und erprobtes Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor als MAP aus dem Schlammwasser. Hintergrund der Entwicklung dieser Technologie ist in erster Linie die Vermeidung unkontrollierte Struvit-Ablagerungen in Rohren und Pumpen infolge zu hoher Orthophosphat (PO_4^{3-}) und Ammonium (NH_4) Konzentrationen im Schlammwasser. Diese können auftreten, wenn bei der anaeroben Behandlung des Primär- und Überschussschlamms Teile des vormals biologisch gebundenen Phosphors rückgelöst werden. Das bedeutet, dass die biologische P-Elimination (Bio-P) ohne Fällmitteleinsatz eine wesentliche Voraussetzung ist. Im PEARL® Kristallisationsreaktor (Abbildung 1) kann durch Zugabe von Fällmitteln (z.B. $MgCl_2$) und optimaler Milieubedingungen (v.a. pH) über 90 % des gelösten Phosphors entfernt und ein marktfähiger Dünger erzeugt werden. Dieser wird im Falle des PEARL® Verfahrens unter dem Handelsnamen Crystal Green® verkauft. Das Prinzip der Kristallisierung wird zudem durch zahlreiche weitere Vefahren eingesetzt. Bekannt sind: Unitaka Phosnix, Nishihara, Sydney Water Board Reactor, Kläranlage Treviso, Kurita Festbettreaktor, NuReSys (Industrielles Abwasser, Kartoffelindustrie). Das PEARL® Verfahren wird in diesem Fall, in erster Linie aufgrund der guten Datengrundlage, repräsentativ für die bekannten Kristallisationsverfahren bewertet.

1.1.1 Prozessskizze PEARL® Verfahren

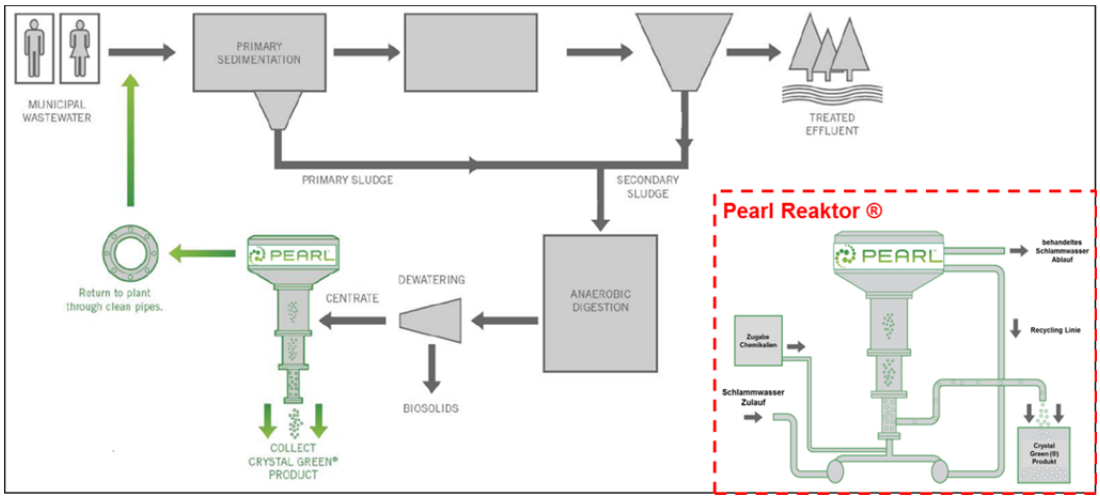


Abbildung 1: Prozessskizze Implementierung PEARL® Reaktor auf Kläranlagen

1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell

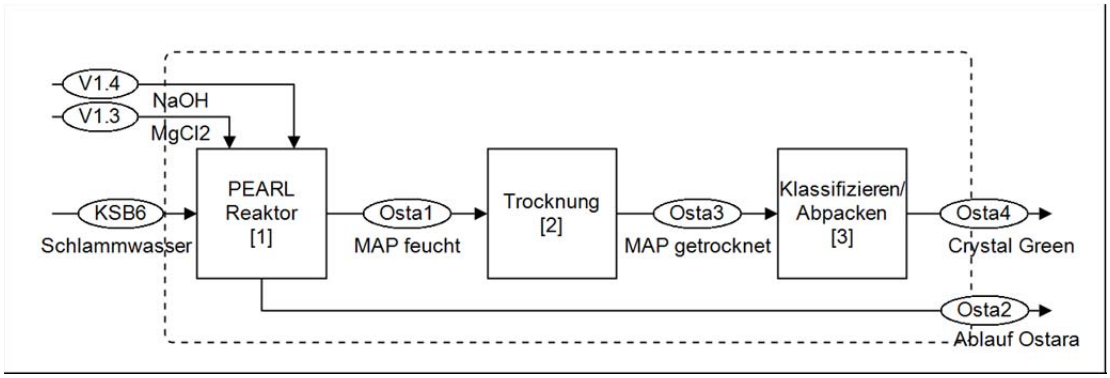


Abbildung 2: STAN Modell PEARL® Reaktor inkl. MAP Aufbereitung

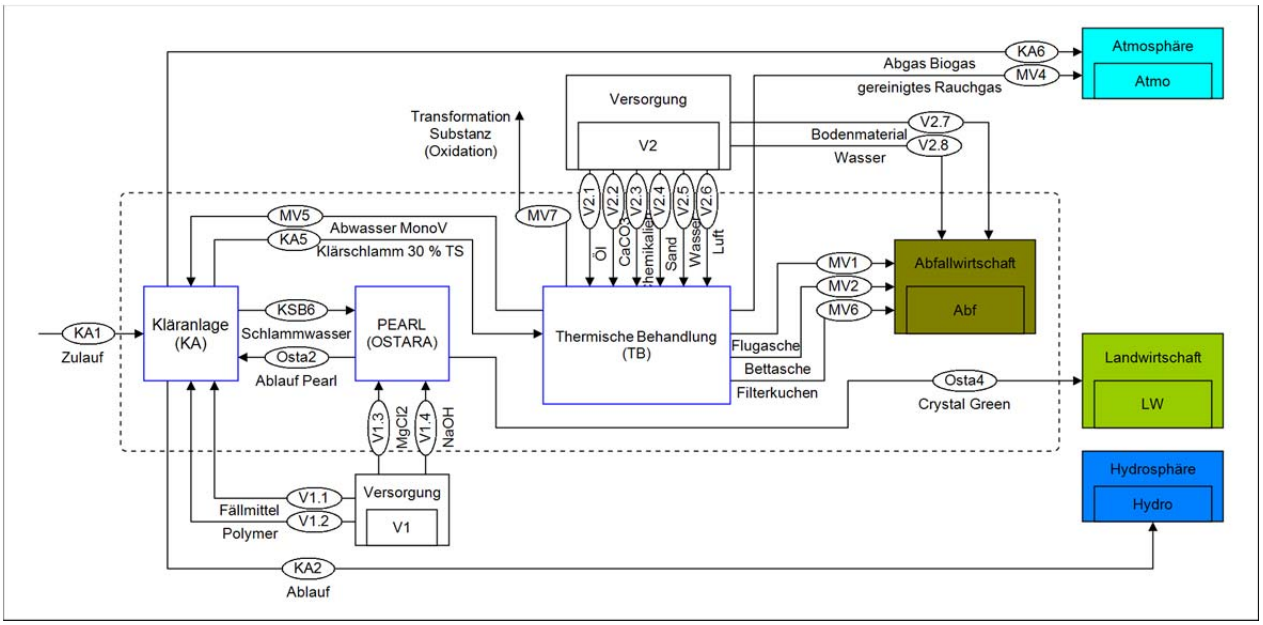


Abbildung 3: STAN Modell PEARL® gesamte Prozesskette

1.1.3 Verfahrensbeschreibung

Die Prozesse Faulung und Entwässerung werden bei der Verfahrensbeschreibung mitberücksichtig. Es handelt sich dabei um wesentliche Elemente für den stabilen und wirtschaftlichen Betrieb des PEARL® Verfahrens.

<u>Faulung + Entwässerung</u>

Im Fall einer Rückgewinnung des Phosphors aus dem Schlammwasser ist das Ziel die größtmögliche Rücklösung des biologisch gebundenen P durch anaerobe Schlammbehandlung (Faulung). Im Vergleich zu konventionellen Schlämmen mit vorangegangener Metallsalzfällung wird dabei rund 20 ±10% des vormals biologisch gebundenen Phosphors rückgelöst. Eine kontrollierte und wirtschaftliche Betriebsführung des Rückgewinnungsverfahrens ist gegeben, wenn im Anschluss an die Entwässerung der PO_4^{3-}-Gehalt im Schlammwasser bei ca. 75 mg/L liegen. Die Phosphorkonzentration hat direkten Einfluss auf den Kristallisationsprozess im Reaktor (Kapitel Kristallisation). Mit zunehmender PO_4^{3-}-Konzentration, sinkt der notwendige pH-Wert zur Kristallisation. Damit hat die Phosphorkonzentration direkten Einfluss auf den Basenbedarf und somit auch auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

<u>PEARL® Reaktor [1]</u>

Im eigentlichen Rückgewinnungsprozess wird das Schlammwasser zur Aufrechterhaltung einer Turbulenz mit hoher Geschwindigkeit in den Kristallisationsreaktor bzw. Fließbettreaktor gepumpt. Ideale Kristallisationsbedingungen liegen bereits bei einem pH von 7,9 – 8,3 vor. Optional kann durch Zugabe von Natronlauge (NaOH) der pH-Wert verändert werden. Allerdings wird dieser pH-Wert aus wirtschaftlichen Gründen in der Praxis nicht immer angestrebt. Der zusätzliche Basenaufwand in Form von NaOH für die pH Einstellung steht in manchen Fällen nicht in Relation zu den nur gering verbesserten Rückgewinnungsraten. Die Kristallisation wird daher auch im Bereich von 7,3 - 7,6 betrieben. Als Fällmittel wird Magnesiumchlorid ($MgCl_2$) zur Bildung von Magnesiumammoniumphosphat (MAP) eingesetzt. $MgCl_2$ wird beim PEARL® Verfahren in Form von Magnesiumchloridhexahydrat ($MgCl_2 * 6H_2O$) zugegeben. In der Praxis wird die Kristallisation mit einem sehr engen Mg:P Verhältnis von maximal 1,05 – 1,1:1 betrieben. Im Vergleich zu Fällungsverfahren ist das stöchiometrische Mg:P Verhältnis deutlich geringer, womit der $MgCl_2$-Bedarf deutlich reduziert werden kann.

1.1.4 Betriebsparameter PEARL® Verfahren

Das Prinzip der Kristallisation aus dem Schlammwasser im PEARL® Reaktor war Gegenstand zahlreicher Diplomarbeiten und Forschungsprojekte an der Universität British Columbia. Daraus werden zusammenfassend die optimalen Betriebsparameter für eine Phosphorrückgewinnung mit dem PEARL® Verfahren dargestellt (Tabelle 1).

Parameter	von	bis
pH	7,9	8,3
Mg:P	1,0	1,1
N:P	100	200
Aufenthaltszeit (d)	8	12

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter PEARL® Verfahren

Bis zu 90 % des gelöst im Schlammwasser vorliegenden Phosphors bildet schwerlösliche Salze und kristallisiert als MAP aus. Das Pearl® Verfahren ist ein kontinuierlicher Prozess. Bei der Produktentnahme verbleiben die kleineren Pellets (jung) im Reaktor und wachsen zu Pellets mit Zielgröße heran. Nur bei der Inbetriebnahme wird feinkörniges MAP als Kristallisationskeim zugegeben. Dies verkürzt die Zeit bis zur 1. Produktentnahme deutlich. Allerdings ist dies auch ohne Zugabe von Kristallisationskeimen möglich.

Trocknung [2] und Klassifizieren/Abpacken [3]

Das feuchte MAP wird anschließend getrocknet (Energiebedarf), nach der Pelletgröße klassifiziert und anschließend verpackt. Ostara® erzeugt damit ein verkaufsfertiges Düngemittel. Auffällig ist die Optik des Endproduktes (Pelletform), welches ohne weitere Behandlungsschritte gewöhnlichen Mineraldüngern sehr ähnlich sieht. Neben dem Phosphor wird abhängig von der NH_4-Konzentration auch Stickstoff aus dem Schlammwasser entfernt und als Ammonium im Endprodukt gebunden (Abbildung 4). Das Endprodukt wird unter dem Handelsname Crystal Green® vermarktet

Optional: Zusätzlicher Prozess WASSTRIP ®

Bereits während der Schlammbehandlung (Faulung, Eindickung und Entwässerung) können unkontrollierte und unerwünschte MAP Ausfällungen vor der eigentlichen Kristallisation auftreten. Zur Vermeidung dieser Inkrustationen kann der patentierte WASSTRIP® Prozess vor den Eindicker und die Faulung geschalten werden. In einem anaeroben Becken wird der von den Mikroorgansimen überschüssig gebundene P freigesetzt. Neben P wird dabei auch Mg rückgelöst. Die flüssige Phase mit dem gelösten P und Mg wird vom Schlamm abgetrennt und direkt in den PEARL® Reaktor geleitet. Damit werden unerwünschte MAP Ablagerungen im Faulturm oder Entwässerungseinrichtungen deutlich reduziert. Der Überschussschlamm der BioP Anlage weißt anschließend ähnliche Eigenschaften wie ein Überschussschlamm aus einer konventionellen Kläranlage auf. Generell liegt die Entwässerbarkeit eines BioP Klärschlammes niedriger als die Entwässerbarkeit eines simultan gefällten Klärschlammes. Mittels dieser Behandlung kann die Entwässerbarkeit des BioP Schlammes allerdings verbessert werden.

Mögliche Betriebsprobleme Kristallisationsreaktor

- Verkleben der Pellets an den Einspritzdüsen (Gegenmaßnahme: hohe Turbulenz)
- Algenwachstum im Behälter (unproblematisch)

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Sachbilanz

- Molares Verhältnis: P:Mg = 1:1,05 (++)
- Basenbedarf: 2 - 10 % des Mg-Bedarfs (-)
- Energieaufwand: 0,6 - 0,8 kWh/kg MAP bzw. 5 - 6,5 kWh/kg $P_{rückg.}$ (+)

Der Basenbedarf zur Einstellung des idealen pH-Wertes wird mit 2 - 10 % des Mg-Bedarfs festgelegt. Dieser Wert ist jedoch mit hohen Unsicherheiten behaftet, da der pH Wert des Schlammwassers abhängig von der Kläranlage stark schwanken kann und damit auch der Aufwand an Basen. Der Energiebedarf kann in den Energiebedarf für den Reaktor und die anschließende MAP Aufbereitung und Trocknung unterteilt werden. Rund 1/3 der Energie entfällt auf die Nachbehandlung des MAP. Nach Angaben von Ostara® liegt der Energiebedarf bei 0,6 - 0,8 kWh/kg MAP (Crystal Green). Bezogen auf den P-Gehalt des Endproduktes entspricht dies rund 5 - 6,5 kWh/kg P rückgewonnen.

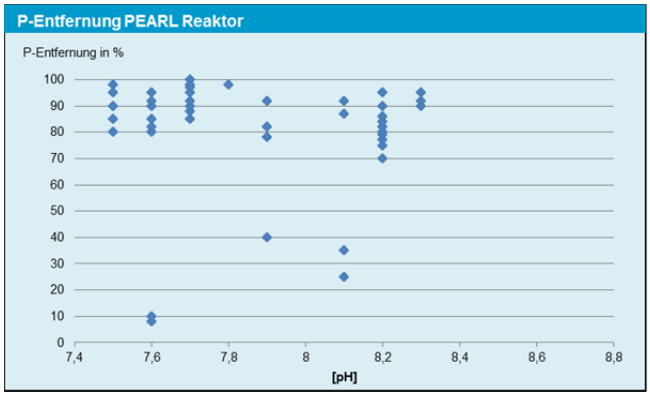
1.2.2 Stoffflussanalyse

Transferkonfizienten (TK) Entwässerung

Aufgrund der vorangegangen biologischen P-Elimination und der damit erhöhten Rücklöseprozesse während der Faulung werden die Transferkoeffizienten für Phosphor im Vergleich zur Referenzanlage angepasst. Für P wird der TK von 5 auf 20 % (+) verändert, während für Schwermetalle und org. Spurenstoffe die Transferkoeffizienten unverändert bleiben (-).

TK PEARL® Reaktor

Im pH-Bereich von 7,9 - 8,3 kann 80 - 100 % des P in den Rückläufen aus der Entwässerung und Eindickung entfernt werden (TK für P = 90) (+). Die Effizienz der P-Entfernung ist zum einen von der Konzentration an gelöstem Phosphat (siehe Kapitel PO_4-P Konzentration und Kristallisation) und zum anderen vom pH-Wert abhängig (Abbildung 4). Hinsichtlich des Verhaltens von Schwermetallen während der Kristallisation liegen keine Daten vor. Die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle werden deshalb anhand der Frachten im Schlammwasser der Referenzkläranlage und den Frachten im MAP-Endprodukt aus der Literatur ermittelt (-). Folglich müssen erhöhte Unsicherheit der Schwermetall-Transferkoeffizienten im Reaktor angenommen werden. Allerdings wird ein sehr reines Endprodukte erzeugt, wodurch der Transfer in das Endprodukt gering ist.



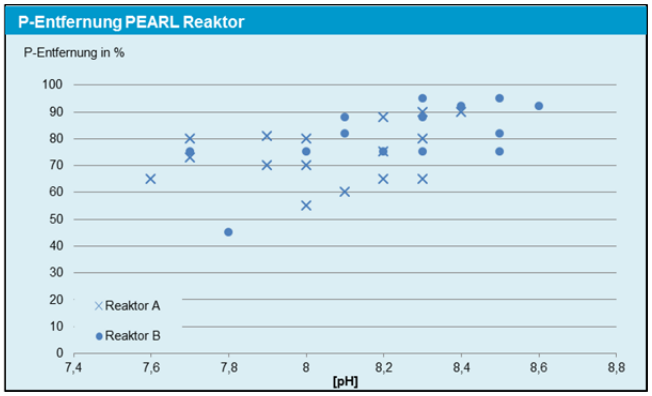


Abbildung 4:P-Entfernungsraten (Fattah, 2002; Adnan, 2004)

1.2.3 Charakteristik Endprodukt

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

Bei der Kristallisation mit Magnesiumchlorid fällt ein sehr reines Magnesiumammoniumphosphat ($MgNH_4PO_4$ * $6H_2O$) mit einer Reinheit von 96 - 99 % und einem Phosphorgehalten von rund 12,6 % an (+). Die P, N und Mg Gehalte liegen im Bereich eines reinen MAP. 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

Ostara® ist das MAP Endprodukt frei von organischen Spurenstoffen wie z.B. PCBs und organischen Chlorverbindungen, als auch frei von pathogenen Keimen wie E-coli, Coliforme Bakterien und Salmonellen (++).

Nährstoffe [g/kg TS]		Schwermetalle [mg/kg TS]		Org. Spurenstoffe [mg/kg TS]	
P	126	As	1-4	AOX	0
N	50	Cd	0,5-0,8	PAK	0
Mg	100	Cr	2,1-3,6	PCDD/F	0
Ca	8	Cu	67-265		
K		Hg	-		
Metalle [mg/kg TS]		Ni	8,7-15,1		
Al	101-203	Pb	-		
Fe	289-2018	Zn	29-100		

Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Crystal Green® Endprodukt

1.2.3.2 P-Löslichkeit

Unabhängige Laboruntersuchungen zeigen eine schlechte Wasserlöslichkeit, aber eine sehr gute Zitronenlöslichkeit (++). Weitere explizite Informationen zur Löslichkeit des Crystal Green® Endproduktes in weiteren standardisierten Extraktionsmitteln liegen nicht vor (Tabelle 3). Zusätzlich wurden zahlreiche Feldversuche von Universitäten und privaten Düngemittelproduzenten durchgeführt. Diese zeigen eine sehr gute Verfügbarkeit mit einer langsamen Abgabe der Nährstoffe. Das MAP-Endprodukt wird als daher als Langzeitdünger eingestuft (++). Als Anwendungsgebiete kommen Rasenflächen, Golfplätze, hochwertige Nahrungsmittelpflanzen wie Beeren und Baumfrüchte, Forstwirtschaft, Gartenbau und Baumschulen in Frage.

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

Tabelle 3: Löslichkeit in % bezogen auf Pges (Crystal Green®)

1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Crystal Green® erfüllt die Anforderungen der Düngemittelverordnung und ist in Amerika und Teilen Europas zugelassener Dünger. Die entstehenden Pellets aus dem Reaktor werden im Anschluss an den Reaktor getrocknet, klassifiziert und in Big Bags abgepackt. Das Endprodukt ist staubfrei und kann problemlos gelagert werden und direkt in der Landwirtschaft ausgebracht werden (Abbildung 5) (++). Der PEARL® Reaktor wurde so entwickelt, dass sich im unteren schmalen Bereich die großen Pellets ansammeln und abgezogen werden. Nach oben hin nimmt der Durchmesser bis zur Absetzzone zu. In diesem Bereich konzentrieren sich die Pellets mit kleineren Durchmessern. Somit können in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer beliebig große Pellets hergestellt werden (rechts unten).

Abbildung 5: PEARL® Endprodukt Crystal Green®

1.2.3.4 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus PEARL® Verfahren

Keine

1.2.3.5 Vermarktungskonzept

Ostara® liefert den Reaktor einschließlich der benötigten Peripherie, den Anlagen zur Aufbereitung der Betriebsmittel Natronlauge und Magnesiumchlorid, Siebe, Trocknungs- und Absackanlage. Für den Kläranlagenbetreiber bietet Ostara® zwei Geschäftsmodelle an.

- **Kaufmodell**

Der Kläranlagenbetreiber kauft die Anlage und trägt sämtliche Kapital- und Betriebskosten. Durch die Erlöse aus dem Verkauf des Endproduktes werden die Betriebskosten gedeckt. Ostara® garantiert die Abnahme des Endproduktes in Abhängigkeit von den Kostenfaktoren zu 150 – 200 €/kg MAP und übernimmt die Vermarktung.

- **Behandlungskostenmodell**

Ostara® stellt die Anlage auf eigene Kosten auf. Der Kläranlagenbetreiber zahlt einen festgelegten Betrag, der von der Erfüllung von Mindeststandards bei der P-Entfernung abhängig ist. In beiden Fällen wird das anfallende Endprodukt von Ostara® vermarket, womit der Kläranlagenbetreiber eine Abnahmegarantie hat. Zur Überprüfung ob eine Anlage machbar und wirtschaftlich Umsetzbar ist, bietet Ostara® kostenpflichtige Versuche mit einer mobilen Pilotanlage im Maßstab 1:100 zur industriellen Anlage an. Im Falle einer großtechnischen Umsetzung werden 50 % der entstandenen Kosten für die Pilotanlage rückerstattet.

Ostara® bietet verschiedenen Größenklassen an Kristallisatoren an. Der PEARL® 500 ist auf eine tägliche MAP-Produktion von ca. 500 kg ausgelegt. Das entspricht umgerechnet einer Schlammwasserbehandlung von 300 m³/d. Der PEARL® 2000 ist auf die vierfache tägliche MAP Menge ausgelegt. Der Volumendurchsatz pro Tag beträgt 1.200 m³/d. Für sehr große Anlagen ist auch ein PEARL® 10.000 Reaktor verfügbar (10 t MAP /d entspricht rund 6.000 m³/d). Möglich für größere Anlagen ist auch eine Kombination mehrerer Reaktoren z.B. 2 x PEARL® 2.000, wobei die Anlagenperipherie wie Trocknung und Klassifizierung gemeinsam für beide Reaktoren genutzt werden kann.

1.2.4 Umsetzung

Auswahl großtechnisch und im Pilotmaßstab umgesetzter Anlagen:

Umsetzung	
Edmonton, Alberta (CAN)	Großtechnisch
Portland, Oregon (USA)	Großtechnisch
Rock Cree, Oregon (USA)	Großtechnisch
Suffolk, Virginia (USA)	Pilotanlage
York, Pennsylvania (USA)	Pilotanlage
Slough (UK)	Groß/Pilot

Tabelle 4: Umsetzungen PEARL® Verfahren

Die Anlage in London, die erste im europäischen Raum, wird voraussichtlich 2013 in Slough in Betrieb genommen.

Abbildung 6: Großtechnische Umsetzung PEARL® Verfahren

1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage

Aus Detailplänen kann der Flächenbedarf für die Reaktoren (PEARL® 500 und PEARL® 2000), die Trocknungsanlage, Klassifizierungsanlage, Abfüllanlage, Lagerung der Pellets, NaOH und $MgCl_2$ Lagerbehälter entnommen werden. Sämtliche Anlagenteile, mit Ausnahme der $MgCl_2$ Lagerbehälter, werden in einer Halle eingebaut (++).

Anlagenteile	Flächenbedarf
Reaktor PEARL® 500 mit Halle	120 m²
Nur Reaktor	20 m²
Reaktor PEARL® 2000 mit Halle	320 m²
Nur Reaktor	16 m²

Tabelle 5: Flächenbedarf PEARL® Verfahren

1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Die Investitionskosten für einen PEARL® 500 liegen im Bereich von 1,0 – 1,7 Mio. € (ohne Ingenieurleistungen). Die Kosten für eine PEARL® 2000 betragen rund 2,3 Mio. € (+). Nach Angaben von Ostara® beträgt die Amortisationszeit, abhängig von der Kläranlage, 3 – 7 Jahre. Die Anlage läuft vollautomatisch, der Personalaufwand daher gering und wird mit 0,1 MA/a festgelegt. Chemikalien- und Energiekosten können aus den Güterfluss- bzw. Energieflussanalysen abgeleitet werden. Erlöse für eine Tonne pelletiertes MAP liegen nach Angaben von Ostara® im Bereich von 150 – 200 €.

1.3 Ergebnis PEARL® Verfahren

1.3.1 Technologie Bewertung

Das PEARL® Verfahren ist ein Verfahren welches sich einfach im Nebenstrom von bestehenden Kläranlagen implementieren lässt und eine Rückgewinnung des gelösten Phosphors mit geringem technischem Aufwand aus dem Schlammwasser ermöglicht. Hinsichtlich der Komplexität, kann die Technologie der Kristallisation in einem Reaktor mit hoher Turbulenz als einfach eingestuft werden. Dieser technologische Ansatz ist erprobt und wird weltweit auf mehreren Anlagen großtechnisch betrieben. Die Prozesse der Abwasserreinigung müssen nicht verändert werden bzw. sind keine Veränderung der weiterführenden Prozesse notwendig. Das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf ist mit 15 - 25 % gering.

PEARL® Verfahren	
Entwicklungsstand	Großtechnisch (vielfach umgesetzt)
Komplexität Technologie	Kristallisation (MAP)
Implementierung	Nebenstrom, Schlammwasser
Wartungsaufwand	gering
Veränderung Schlammbehandlung	keine
Effektivität des Verfahrens	~ 90 %
Potential bezogen auf KA-Zulauf	15-25 %
Qualitativer Ressourcenaufwand	NaOH, $MgCl_2$, Energie (elektrisch)
Abfallstoffe	keine
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 6: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential PEARL®

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 rückgelöst. Damit ist im Falle der Referenzkläranlage eine gelöste P-Fracht von rund 14.400 kg/a für die Rückgewinnung verfügbar. Diese P-Fracht sollte aber unter dem Aspekt möglicher natürlich Schwankungen bereits im normalen Kläranlagenbetrieb kritisch hinterfragt werden. Unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 90 % des PEARL® Reaktors können jährlich 13.050 kg P rückgewonnen werden, womit jährlich 103.600 kg MAP anfallen (P-Gehalt im MAP = 12,6 %). Damit liegt das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf bei rund 20 %. Der Reaktorablauf mit einer P-Fracht von 1.450 kg P gelang zurück in den Kläranlagenzulauf. Der N-Gehalt im Endprodukt beträgt 5 % und entspricht einer jährlichen Fracht von 5.180 kg N die aus dem Schlammwasser entfernt werden.

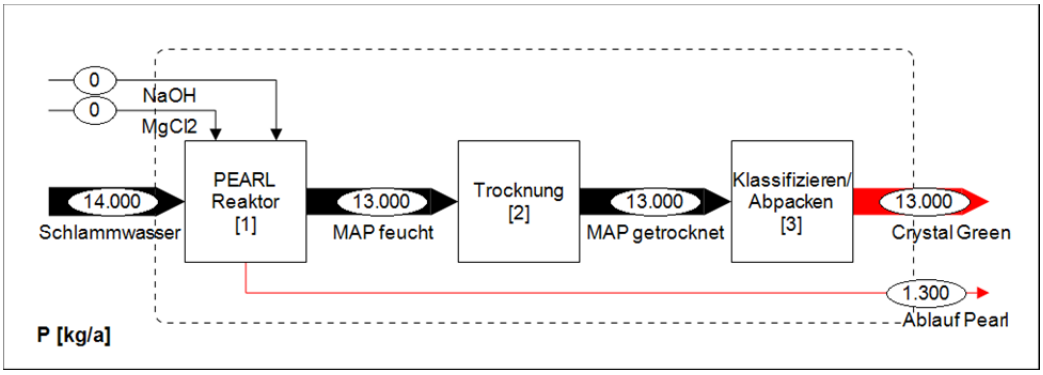
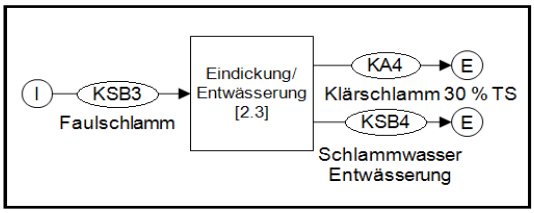


Abbildung 7: P-Stoffflussanalyse PEARL® (2 signifikante Stellen)

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 17.450 kg/a.



TK [%]	KA4	KSB4	UL
P	**80**	**20**	1,0
As	**92**	**8**	1,5
Cd	**96**	**4**	1,5
Cr	**96**	**4**	1,5
Cu	**88**	**12**	1,5
Hg	**96**	**4**	1,5
Ni	**88**	**12**	1,5
Pb	**98**	**2**	1,5
Zn	**96**	**4**	1,5
AOX	**98**	**2**	1,5
PAK	**96**	**4**	1,5
PCDD/F	**98**	**2**	1,5

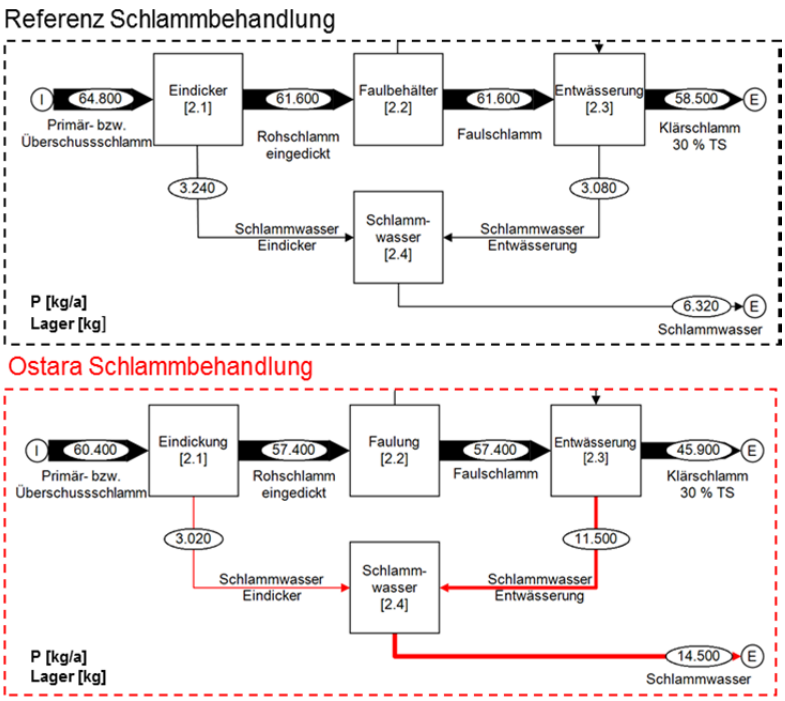


Abbildung 8: Veränderte TK Eindicker/Entwässerung und Effekt auf Schlammbehandlung (2 signifikante Stellen)

1.3.2.2 Einsparung P- und N-Rückbelastung und Schlammreduktion

Im Vergleich zur Referenzkläranlage mit einer P-Rückbelastung im Schlammwasser von rund 6.320 kg/ kann diese mit dem PEARL® Reaktor auf 1.450 kg P reduziert werden. Die reduzierte P-Rückbelastung wird direkt als Einsparung an benötigten Fällmitteln umgerechnet. Im Falle des PEARL® Verfahrens beträgt die eingesparte Fällmittelmenge im Vergleich zur Referenz 11,1 %. Mit verringertem Fällmitteleinsatz wird auch die anfallende Schlammmenge im Ausmaß von 2,5 kg TS/ kg Eisen reduziert, was einer Schlammreduktion im Vergleich zur Referenzkläranlagen von 2,2% oder 33 t/a entspricht. Zusätzlich wird die Stickstoffrückbelastung um 5.200 reduziert.

	Reduktion [kg/a]	[€/kg Nährstoff] bzw. [€/t KS TS]	Einsparung [€/a]
Phosphor (P)	4.900	-	11.400
Stickstoff (N)	5.200	0,75	3.900
Schlammanfall	33.000	290	9.500
Gesamt			**24.800**

Tabelle 7: Einsparungen Abwasserreinigung

Vermeidung Inkrustationen

Durch die gezielte Entfernung des gelösten Phosphors können problematische Inkrustationen in Rohrleitungen und/oder Pumpen verhindert werden. Eine Abschätzung der monetären Einsparungen in Folge reduzierter Wartung ist schwer bzw. gar nicht zu erfassen und wird daher nicht berücksichtigt.

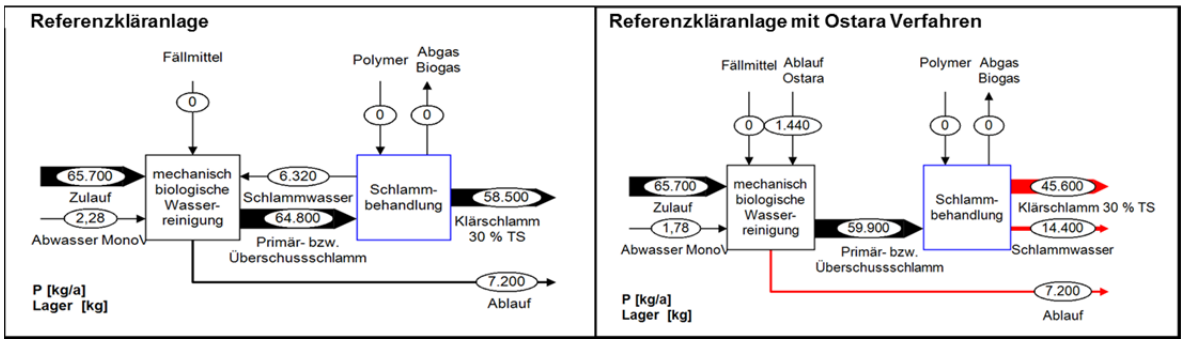


Abbildung 9: Einfluss PEARL® auf P-Emission Gewässer und P-Fracht Klärschlamm (2 signifikante Stellen)

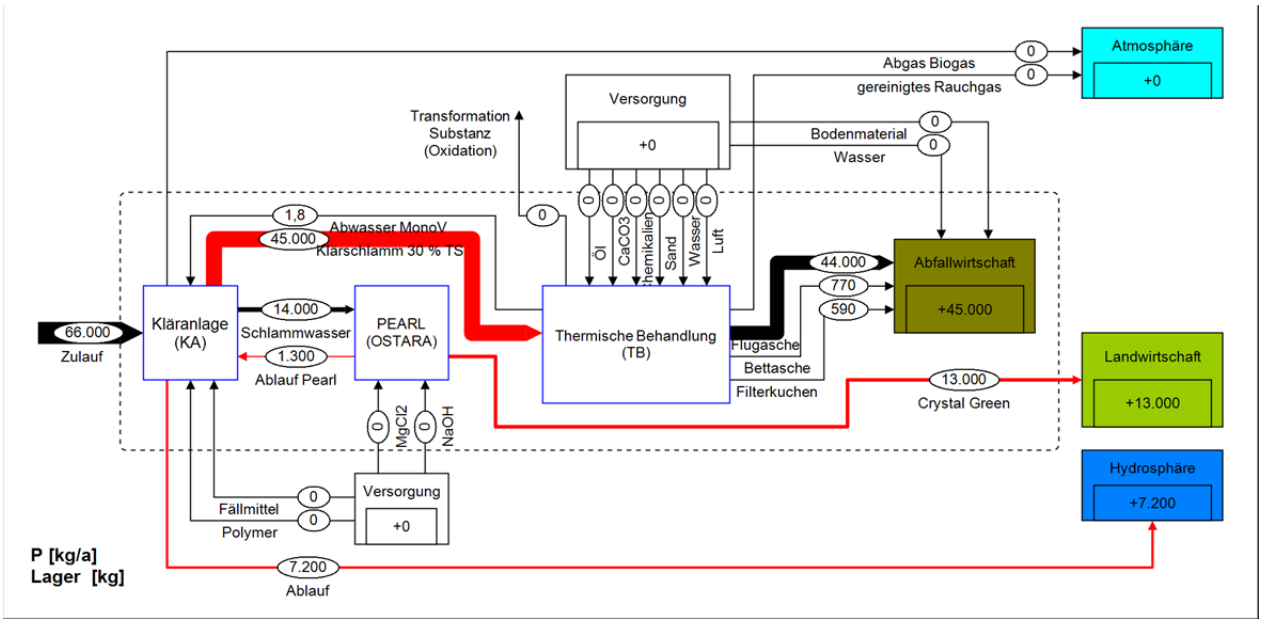


Abbildung 10: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette (2 signifikante Stellen)

1.3.2.3 Stoffflussanalyse SM

<u>Transfer Schwermetalle und org. Spurenstoffe</u>

Die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle und organische Spurenstoffe werden aus den Frachten im Schlammwasser der Referenzkläranlage und den Frachten im Struvit Endprodukt aus der Literatur ermittelt. Die Schwermetallfracht im Schlammwasser ist bereits auf aufgrund der Veränderung der Transferkoeffizienten in Folge der Rücklösung in der Faulung mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Das bedeutet, dass die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle im PEARL® Reaktor zum einen von der Unsicherheit der Rücklösung der Schwermetalle in der Schlammlinie und den Schwermetallgehalten des Endproduktes abhängig sind. Folglich müssen für Schwermetalle erhöhte Unsicherheit hinsichtlich der SM-Transferkoeffizienten im Reaktor angenommen werden.

1.3.2.4 Ergebnisse Güterflussanalyse

Magnesium, als limitierendes Element für die Kristallisation von MAP im PEARL® Reaktor, wird als $MgCl_2 * 6H_2O$ im P:Mg Verhältnis von ca. 1:1,05 zu dosiert. Zur Entfernung der jährlich anfallenden P-Fracht von ~13.050 kg/a im Schlammwasser der Referenzkläranlage müssen 11.950 kg reines $MgCl_2$ zu dosiert werden. Natronlauge kann optional, abhängig vom pH Wert, eingesetzt werden. Im Falle der Referenzkläranlage werden 2.800 kg reines NaOH eingesetzt. Jährlich fallen rund 103.600 kg MAP an.

Fällmittelbedarf [kg/a]	
Input P	14.505
Mg Bedarf	11.950
$MgCl_2$ [100 %]	46.821
$MgCl_2 * 6H_2O$	99.977
Basenbedarf [kg/a]	
NaOH [100 %]	2.800

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 8: Ressourcenbedarf PEARL® und molare Masse Fällmittel

	Produktspez. [kg $P_{rückg.}$]	Einwohnerspez. [EW*a]
$MgCl_2$ [100%]	3,59	0,47
NaOH [100 %]	0,22	0,03
MAP	7,9	1,04

Tabelle 9: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf PEARL®

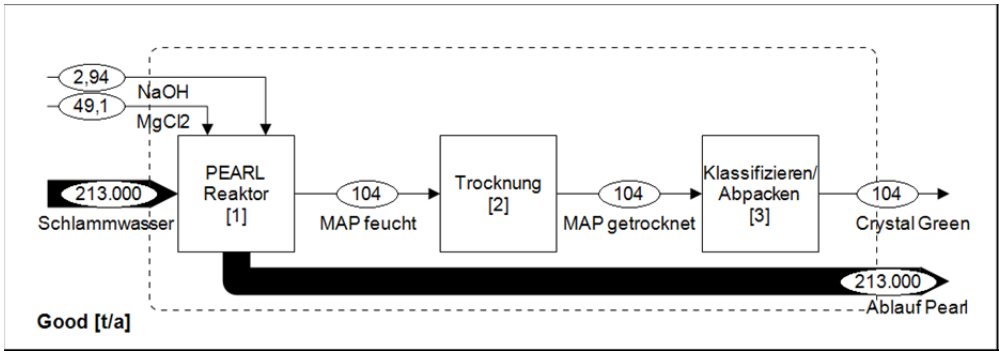


Abbildung 11: Ergebnis Güterflussanalyse PEARL®

1.3.2.5 Ergebnisse Energieflussanalyse

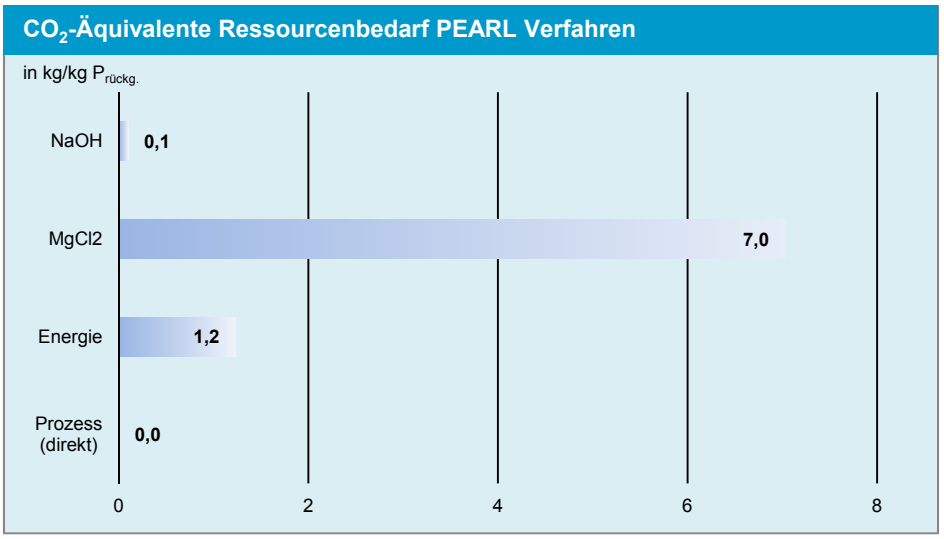
Auf Basis der Betreiberangaben zum Energiebedarf von 0,6 - 0,8 kWh/kg MAP wird im Fall der Implementierung des PEARL® Verfahren auf der Referenzkläranlage ein jährlicher Bedarf an elektrischer Energie von rund 72.500 kWh ermittelt (Tabelle 10). Darin enthalten sind neben dem Betrieb des Reaktors auch der Betrieb der Trocknung und der Einrichtung zur Klassifizierung und Abpackung des Endproduktes. Bezogen auf die Referenzkläranlage mit einem Gesamtenergiebedarf von 23,15 kWh/EW*a beträgt der zusätzliche Energieaufwand für den Betrieb rund 2 - 3 %.

	Produktspez. [kg $P_{rückg.}$]	Einwohnerspez. [EW*a]
kWh	5,56	0,73

Tabelle 10: Spezifischer Energiebedarf PEARL®

1.3.2.6 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Auf Basis der Annahme einer Implementierung des PEARL® 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 109.200 kg bzw. 530 kg ermittelt werden. Die Emissionen bezogen auf 1 kg $P_{rückg.}$ werden anhand der jährlichen Emissionen und der rückgewonnen P-Fracht von 13.050 kg/a errechnet und sind aus Abbildung 12 zu entnehmen. Aus dem Prozess sind keine direkten gasförmigen Emissionen zu berücksichtigten. Dominierende Emissionsquelle ist die Produktion des Mg-Fällmittels.



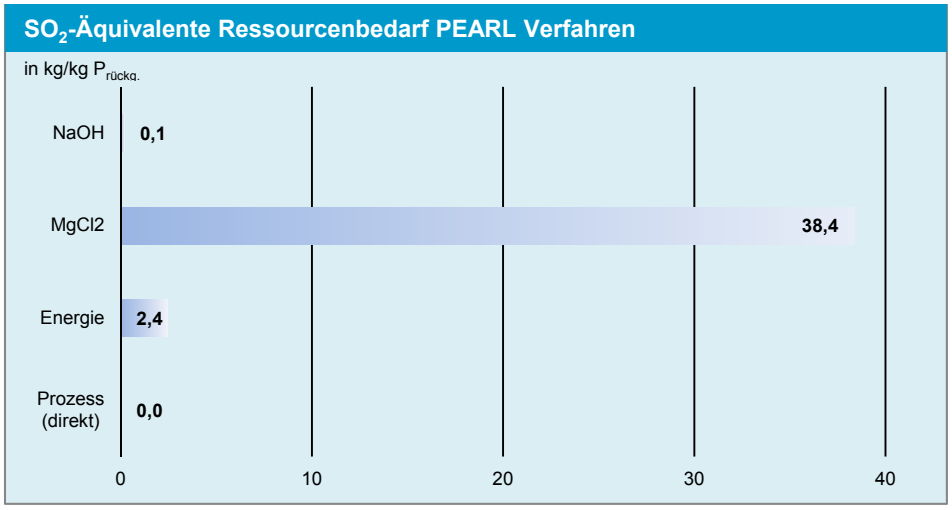


Abbildung 12: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] PEARL®

1.3.2.7 Indirekte Schwermetallemissionen PEARL®

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	0,03	0,00003
Cd	0,02	0,00006
Cr	0,10	0,00006
Cu	-	-
Hg	-	0,00003
Ni	0,12	-
Pb	0,56	0,000041
Zn	-	-
AOX	-	
PAK	0,00007	-
PCDD/F	0,000001	-

Tabelle 11: Indirekte SM-Emissionen PEARL®

1.3.2.8 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	327.100	3,3	25,1
Elektrische Energie Betrieb PEARL®	139.000	1,4	10,6
Gesamt	**466.100**	**4,7**	**35,7**

Tabelle 12: Kumulierter Energieaufwand PEARL®

Abbildung 13 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen.

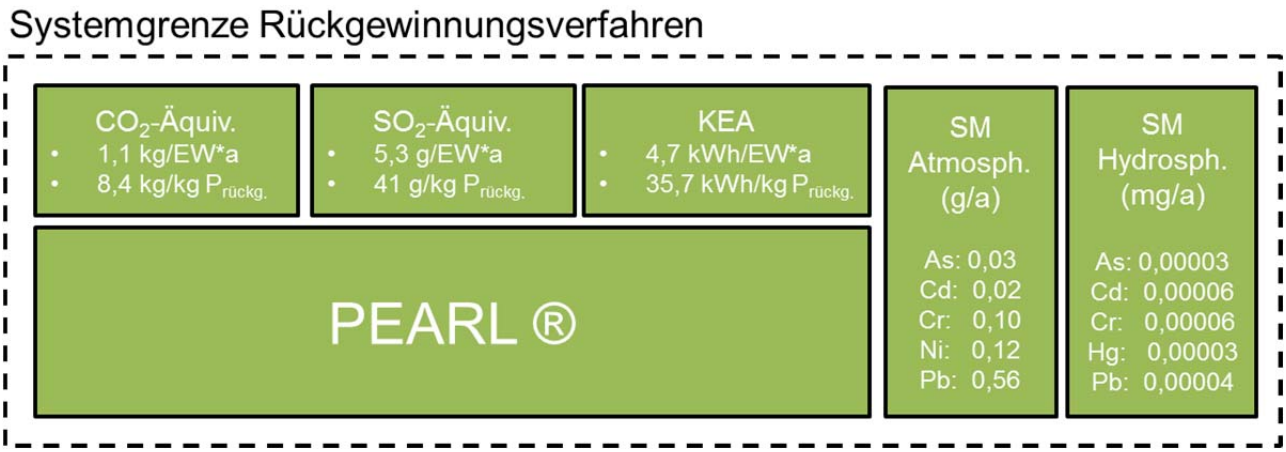


Abbildung 13: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)

1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung PEARL®

Die Implementierung der PEARL® 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 (-11,1%)	Verringerte Rückbelastung – verringerter Fällmittelbedarf, verringerte indirekten Emissionen aus Fällmittelproduktion, Kosten Abwasserreinigung
Bio-P und Faulung	Erhöhte Rücklösung von P und SM ->Veränderung SFA
Verringerte P und N Rückbelastung	Kosten Abwasserreinigung, Schlammanfall, Transport Klärschlamm,
Verringerter Schlammanfall (-2,2%)	Energieausbeute Verbrennung, Transportkosten, Entsorgungskosten, Ressourcenaufwand Verbrennung
Ressourcenaufwand PEARL®	Indirekte Emissionen, Kosten
MAP-Produktion	Kosten (Erlöse)

Tabelle 13: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung PEARL®

Berücksichtigung Transport

Infolge des verringerten Klärschlammanfalles (-2,2 %) verringert sich sowohl die Klärschlammfracht zur Verbrennung als auch die Fracht zur Entsorgung der anfallenden Aschen und Filterkuchen (Tabelle 14).

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€/EW*a]
Klärschlamm – Mitverbrennung	4.865	681.200	0,97
Flug- und Bettasche - Reststoffdeponie	716	71.600	0,10
Filterkuchen - Untertagedeponie	32	32.000	0,05
Gesamt Transport		**784.800**	**1,11**

Tabelle 14: Transportwege PEARL®

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation ist kaum eine Veränderung der treibhausrelevanten Gase (+ 11 %), sowie eine geringe Zunahme der Gase mit Versauerungspotential (+ 8 %) zu beobachten (Tabelle 15). Infolge des verringerten Schlammanfalles sinken die zu transportierende Schlammfracht, der Rohstoffbedarf bei der Verbrennung und die zu entsorgenden Reststoffe. Ähnlich verhält es sich beim kumulierten Energieaufwand. Die Zunahme beträgt +21 % in Relation zur Referenzsituation (Verringerter Fällmittelbedarf, ** Verringerter Schlammanfall

Tabelle 16).

CO_2-Äquivalente	[kg]	[CO_2-Äquiv./EW*a]
PEARL®	404.000	4,0
Referenz	368.600	3,7
Δ	+ 10%	
SO_2-Äquivalente	**[kg]**	**[SO_2-Äquiv./EW*a]**
PEARL®	1.340	0,013
Referenz	1.260	0,013
Δ	+ 7 %	

Tabelle 15: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente Prozesskette PEARL®

1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA	Rohstoffe	Energie	[kWh/EW*a]
Kläranlage	623.700*	1.006.000	16,3
PEARL®	327.100	138.900	4,7
Monoverbrennung	142.500**	925.800**	10,7
Deponie	13.100*		0,1
Transport	130.500**		1,3
Gesamt	**3.307.400**		33,1
Substitution Strom	-481.800		4,8
Substitution Wärme	-1.366.400		13,6
Substitution P+N-Dünger	-142.400		1,4
Gesamt	**1.366.400**		**13,7**
Referenz	1.131.700		11,3
Δ	+21 %		

Verringerter Fällmittelbedarf, ** Verringerter Schlammanfall

Tabelle 16: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

In Abbildung 14 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 PEARL® Verfahrens nur geringe bzw. moderate Steigerungen der CO_2 bzw. SO_2-Emissionen zu erwarten sind.

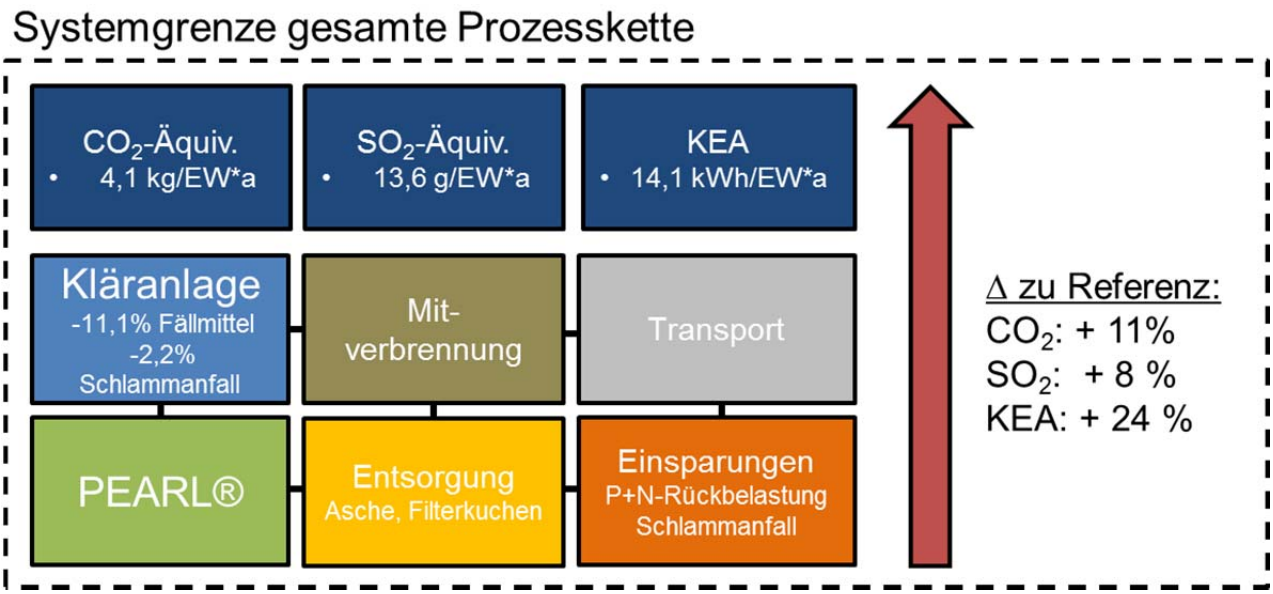


Abbildung 14: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation

1.3.3.3 Ergebnisse Stoffflussanalyse Schwermetalle und organische Spurenstoffe

Auf Basis der Stoffflussanalyse können die Phosphor- und Schwermetallpfade in eine mögliche finale Senke (Deponie), Atmosphäre, Hydrosphäre oder Landwirtschaft dargestellt werden (Abbildung 15). Die Phosphorbilanz verdeutlicht, dass in Relation zum P-Input einer Kläranlage mit dem PEARL® Verfahren rund 20 % in die Landwirtschaft gebracht werden kann. Jener P-Anteil der in die Gewässer geleitet wird bleibt konstant. Folglich gelangen rund 60 % des Phosphors auf eine Deponie. Aufgrund des geringen Transfers von SM in das Schlammwasser und folglich in das Endprodukt, gelangt der überwiegende Anteil der Schwermetalle nicht auf die landwirtschaftlichen Flächen. Hinsichtlich potentiell höherer SM-Einträge in Hydrosphäre oder Atmosphäre mit dem P-RoC, sind aufgrund der Prozessführung keine signifikanten Veränderungen gegenüber der Referenzsituation 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.

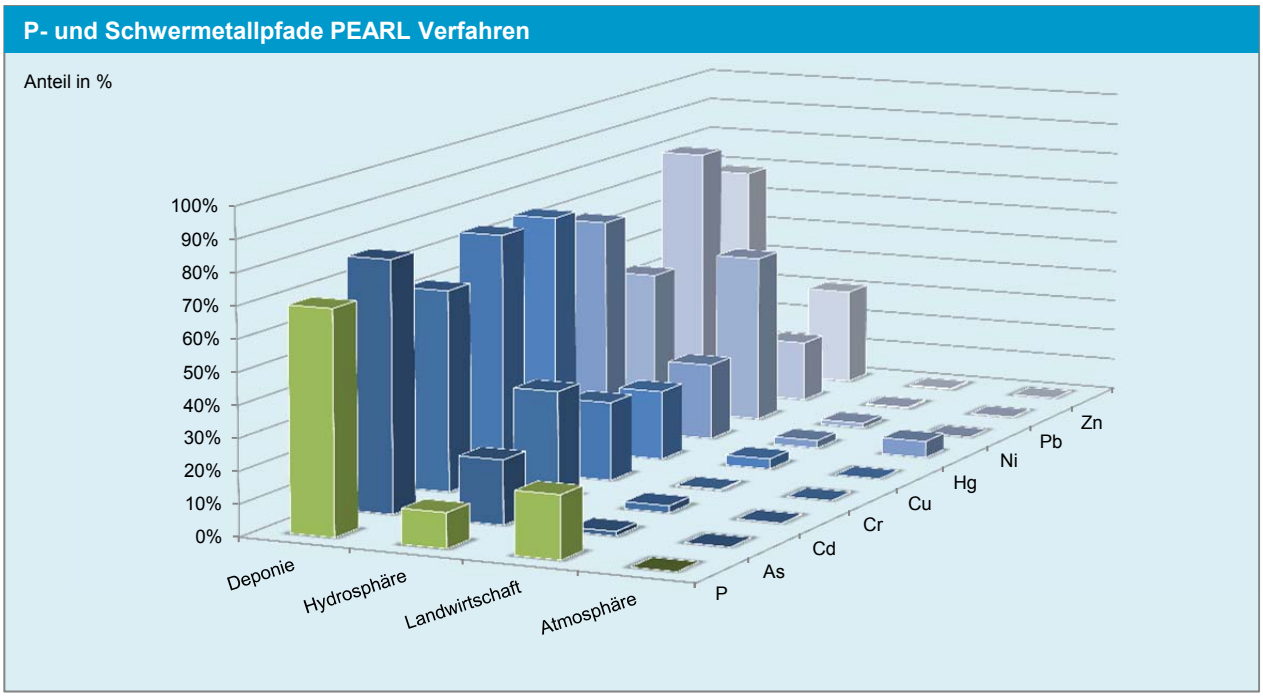


Abbildung 15: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (PEARL®)

1.3.3.4 Ergebnis Schwermetallemissionen

Verglichen mit den direkten SM-Emissionen machen die indirekten SM-Emissionen (Tabelle 11) nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamt-Schwermetallemissionen aus. Durch die Implementierung des PEARL® Verfahrens auf einer Anlage werden die direkten Emissionen nicht verändert. Geringe Veränderungen sind bei den indirekten Emissionen aufgrund des verringerten Fällmittelbedarfs und geringerem Schlammanfall (Transportaufwand, Ölbedarf bei Verbrennung), sowie durch Gutschriften der Nährstoffe P und N im Endprodukt zu erwarten. Die Veränderungen der Emissionen im speziellen in die Hydrosphäre sind aufgrund des kleinen Anteils der veränderlichen indirekten Emissionen, aber der als statisch angenommenen direkten Emissionen, sehr gering und liegen im Bereich der Unschärfe der Datensicherheit.

Emissionen Gesamt	Atmosphäre [g/a]	Δ Referenz [%]	Hydrosphäre [kg/a]	Δ Referenz [%]
As	7,9	-6,4	2,1	2,3
Cd	4,5	-4,3	1,2	0,1
Cr	45,8	-1,4	25,6	-0,1
Cu	-	-	-	-
Hg	-	-	0,47	-1,4
Ni	53,9	-11,3	-	-
Pb	130,3	-1,0	25,1	0,6
Zn	-	-	-	-
AOX	-	-	338,7	0,0
PAK	155,5	0,15	-	-
PCDD/F	0,000001	-137,4	-	-

Tabelle 17: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation

1.3.3.5 Ergebnis Endprodukt

Endprodukt ist ein sehr reines MAP mit geringen Schwermetallgehalten, die deutlich unter den Anforderungen der Düngemittelverordnung liegen. Bezogen auf den Hauptnähstoff Phosphor liegen die Schwermetallkonzentrationen teils deutlich unter jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP). Dies gilt vor allem für Cadmium, Chrom und Blei. Lediglich beim Kupfer schneidet Crystal Green® schlecht aber.

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass nur Daten zu zwei Endprodukten vorliegen, die sich hinsichtlich der Messung von Cu und Zn deutlich voneinander unterscheiden (Cu: 67 – 265 bzw. Zn 29 – 100 mg/kg TS)

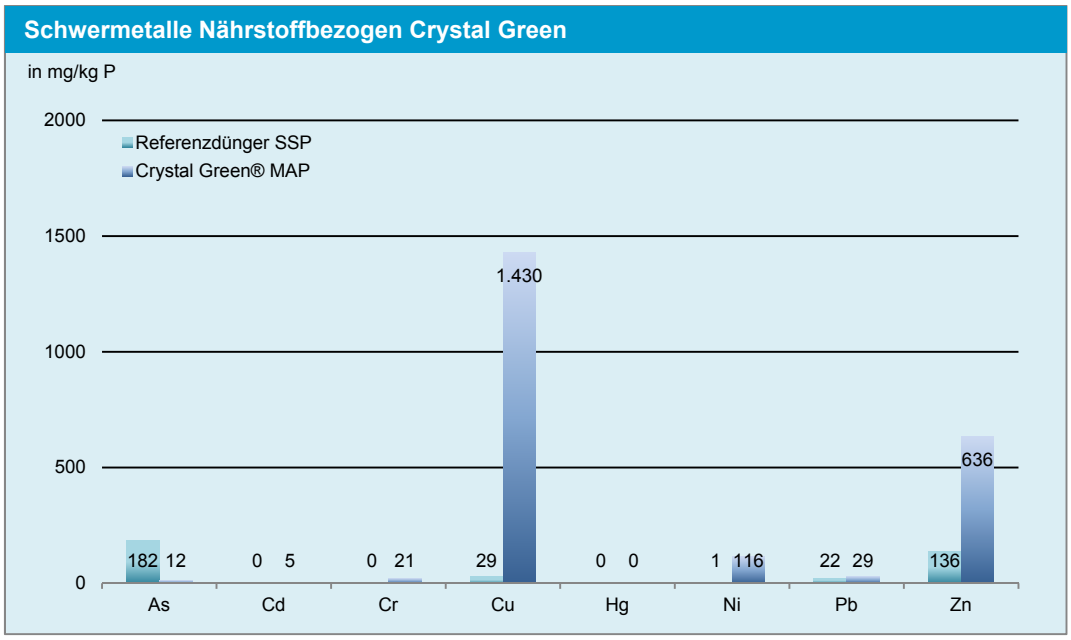


Abbildung 16: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung PEARL® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)

Bewertung Endprodukt	Crystal Green ®	SSP
Löslichkeit	Gut	Sehr Gut
Düngewirksamkeit	Sehr Gut	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	371	230
Anorganische Verunreinigungen		
SM:P [mg Cd/kg P]	4,1	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,02	1,26
Referenzbodenmethode [*limitierendes Element)	13.600 (Ni*)	1.450 (Cd*)
Tolerierbare Menge bezogen auf Cd	2,4	-
Organische Verunreinigungen		
Keine organische Spurenstoffe	5[1]	5[1]
Keine hygienischen Bedenken	5[1]	5[1]
Handhabung		
Einfache Lagerung möglich	5	5
Direkter Einsatz in LW möglich	5	5

Tabelle 18: Bewertung Crystal Green ®

Das Cd:P Verhältnis ist mit 4,1 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 Crystal Green® rund 13.600 Jahre aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. In diesem Fall ist Kupfer das limitierende Element. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, könnte das PEARL® Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 2,4 häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe bzw. hygienische Bedenken sind nach Angaben des Herstellers keine nachweisbar (+[1]) bzw. nicht gegeben (+[1]). Aufgrund der Verfahrenstechnik (Kristallisation) und damit der Herstellung von Pellets anschließender Größenklassifizierung kann das Endprodukt gelagert oder direkt mithilfe moderner Ausbringungsgeräte in der Landwirtschaft ausgebracht werden.

1.3.4 Ökonomische Bewertung

1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten PEARL®

Wesentliche Voraussetzung für größenabhängige Kostenkalkulationen ist die Annahme und Festlegung von Up- und Downscalingfaktoren. Auf Basis der vorliegenden Investitionskosten für PEARL® Rektoren unterschiedlicher Größenordnung wird eine Beziehung zur Ausbaugröße, den entsprechenden Kosten und dem rückgewinnbaren P-Potential hergestellt.

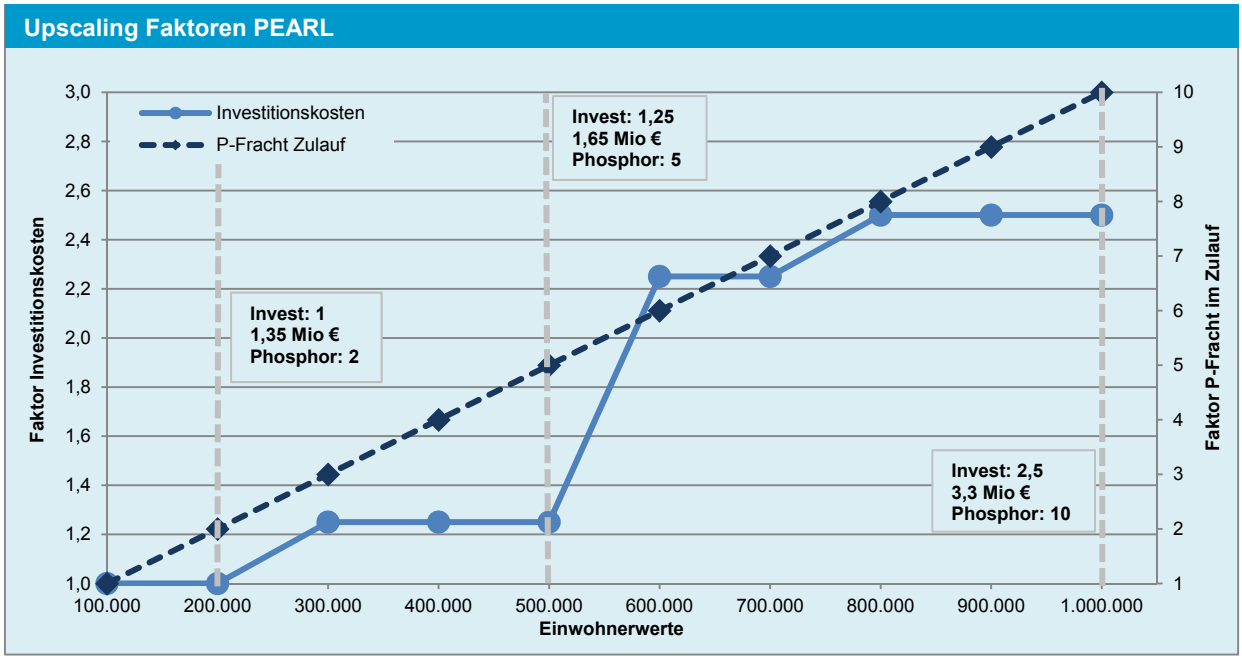


Abbildung 17: Upscaling Faktoren Investitionskosten PEARL®

Folgendermaßen ist Abbildung 17 zu interpretieren: Ausgangssituation ist die Errichtung der kleineren Variante des PEARL® Reaktors auf der 100.000 EW Anlage. Das Investitionsvolumen beträgt dabei im Mittel 1,35 Mio. €. Das P-Potential im Zulauf entspricht jenem der definierten Referenzkläranlage (Faktor 1). Derselbe Reaktor kann aufgrund der Kapazität auch auf einer 200.000 EW Anlage errichtet werden. Das bedeutet, dass bei gleichbleibenden Investitionskosten eine gleichzeitig doppelt so großes P-Potential vorliegt (Faktor Invest: 1, Faktor Phosphor: 2). Ab einer Kläranlagengröße von 300.000 EW kommt die größere Reaktorvariante zum Einsatz. Soll der PEARL® Reaktor auf einer 500.000 EW Anlage errichtet werden, liegt im Vergleich zur 100.000 EW Anlage das P-Potential um den Faktor 5 höher, während die Investitionskosten nur um den Faktor 1,25 steigen. Für eine 1.000.000 EW Kläranlage werden 2 große Reaktoren benötigt (Faktor Invest: 2,5, Phosphor: 10)

1.3.4.2 Jahreskosten

Die Investitionskosten für die kleinere Reaktorvariante liegen im Bereich von 1 – 1,7 Mio. Euro. Als Berechnungsgrundlage werden 1,35 Mio. € veranschlagt. 60 % der Kosten entfallen auf die Bautechnik (ND 30 Jahre) und 40 % auf die Maschinentechnik (ND 15 Jahre). Aufgrund des wartungsarmen Betriebes werden die Wartungskosten mit 0,5 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand ist gering und kann mit 0,1 MA/Jahr angenommen werden.

Jahreskosten	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a (gerundet)
Kapitalkosten			**95.400**
Wartung + Reparaturen			6.750
$MgCl_2$*6 H_2O	99.980	110 €/t	11.000
NaOH	2.800	330 €/t	900
Energie	72.520	0,1 €/kWh	7.250
Personal	0,1	50.000 €/MA	5.000
Sonstiges	-	-	-

Entsorgung	-	-	-
Betriebskosten			**30.900**
Gesamt			**126.300**

Tabelle 19: Jahreskosten PEARL® (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Einsparungen/Erlöse	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a
MAP Erlöse	103.600	372	38.500
P-Reduktion	4.900	-	11.400
N-Reduktion	5.180	0,75	3.900
Schlammreduktion	32.900	290	9.500
Gesamt			**63.300**

Tabelle 20: Einsparungen und Erlöse PEARL® (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Spezifische Kosten	€
€/kg $P_{rückgewonnen}$	9,7
€/EW*a	1,3
€/E*a	2,6

Tabelle 21: Spezifische Kosten PEARL® (100.000 EW)

1.3.4.3 Variantenrechnung/Kostendegression

Die Berechnungen zeigen, dass das PEARL® Verfahren unter den gegebenen Voraussetzungen (Referenzkläranlage 100.000 EW und PEARL® Reaktor 500) nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Grund dafür ist die zu geringe P-Fracht der Referenzkläranlage in Relation zum damit überdimensionierten Reaktor.

Anhand der Annahme unterschiedlicher Kläranlagengrößen sowie einer Steigerung der Rücklösung von 20 auf 25 % können die spezifischen Kosten des Verfahrens deutlich reduziert werden. Entwicklung der produktspezifischen Kosten. Bereits bei einer Kläranlagengröße von 200.000 EW, das entspricht der doppelten Phosphorzulauffracht, kann das PEARL® Verfahren nahezu kostendeckend betrieben werden (Abbildung 18). Das heißt, die Jahreskosten werden durch die möglichen Einsparungen und Erlöse gedeckt. Abhängig von der P-Rücklösung und damit der P-Fracht im Schlammwasser kann bereits bei dieser Ausbaugröße ein Überschuss erwirtschaftet werden. Grund dafür ist der Einsatz desselben PEARL® Reaktors 500 der aufgrund seiner Dimensionierung auch im Falle der 200.000 EW Anlage implementiert werden kann. Die Kosten können weiter gesenkt werden, wenn das PEARL® Verfahren auf einer Kläranlage ab 500.000 EW implementiert wird. In diesem Fall kann die größere Variante des PEARL® Reaktors 2.000 installiert werden. Während die P-Fracht direkt proportional zur Kläranlagengröße zunimmt, gilt dies für die Investitionskosten für den größeren Reaktor beim Up-Scaling nicht. Auch direkt proportional steigen die Kosten für Fällmittel, Basen und Energie, während die Kosten für Wartung und Personal gleich bleiben. Für den PEARL® Reaktor 2.000 liegen die Investitionskosten im Bereich von 1,3 - 2 Mio. €, im Vergleich zu Investitionskosten von 1,0 - 1,7 Mio. € für den PEARL® Reaktor 500. Im Falle einer Installation auf einer Kläranlage mit einer Belastung von 1.000.000 EW werden zwei große Reaktoren aufgestellt, womit keine weitere Reduktion der Kapitalkosten möglich ist.

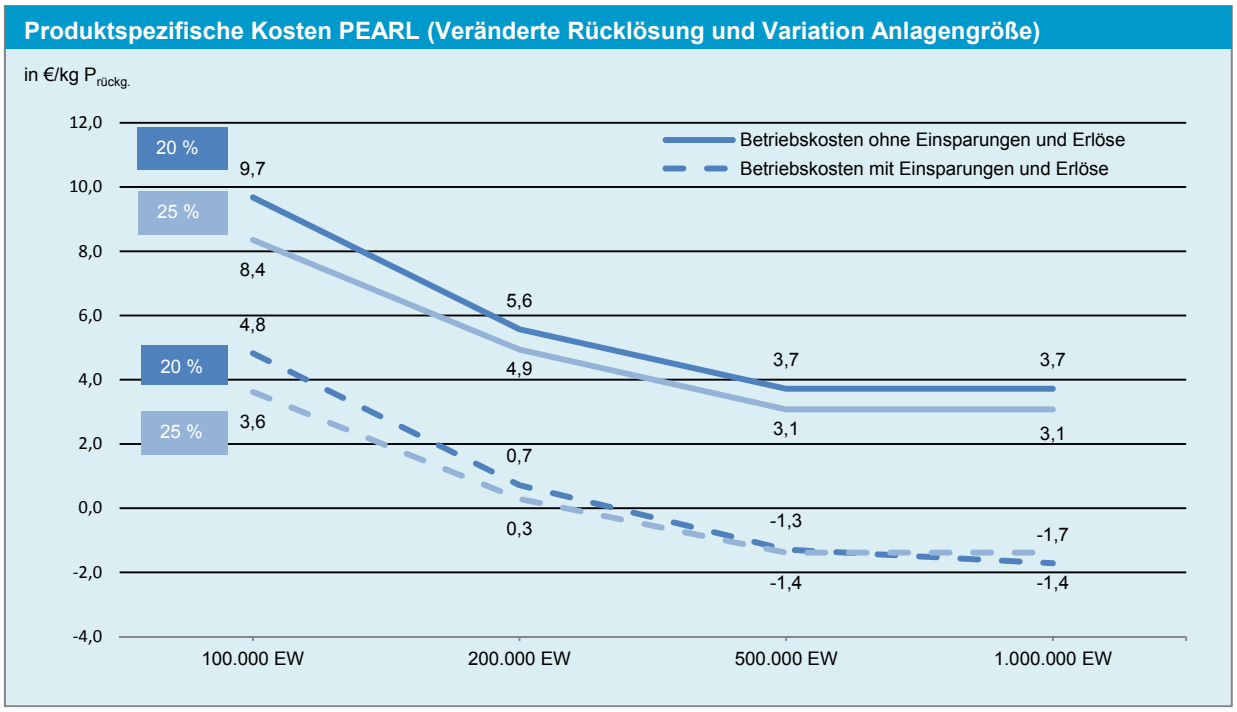


Abbildung 18: Produktspezifische Kosten PEARL®; Variation Rücklösung und Anlagengröße

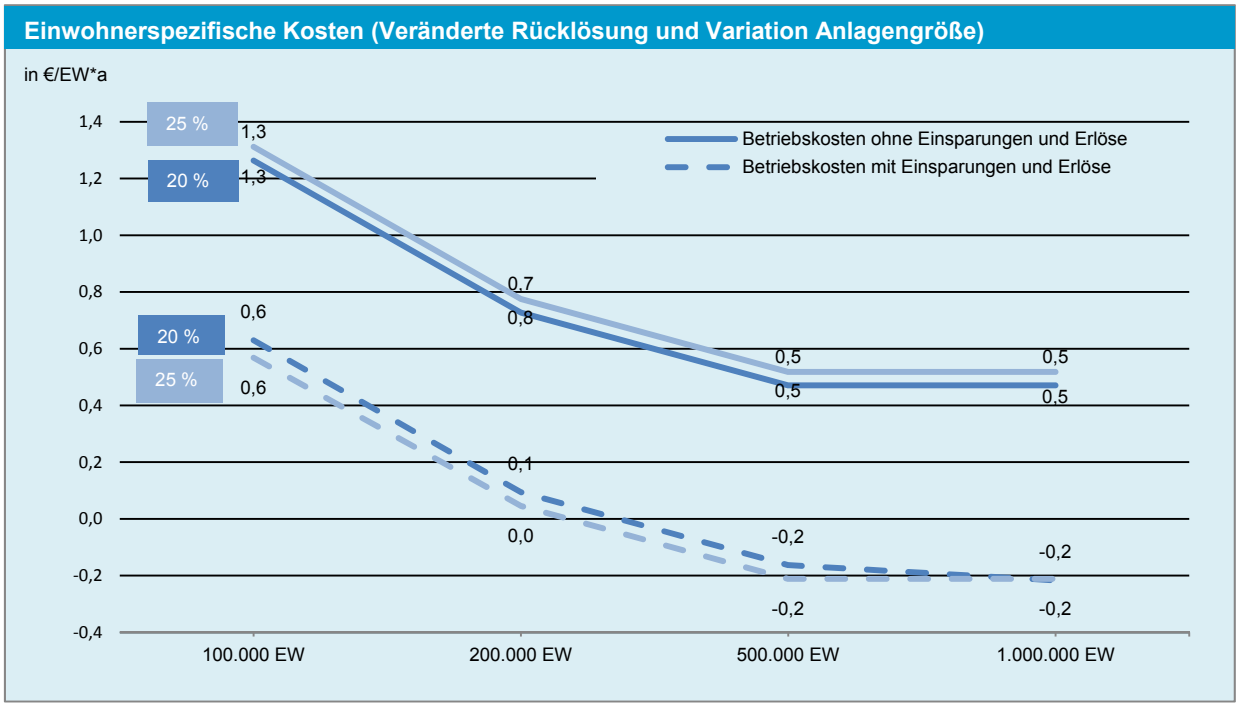


Abbildung 19: Produktspezifische Kosten PEARL®; Variation Rücklösung und Anlagengröße

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** werden die produktspezifischen Kosten, im Falle einer Umsetzung des PEARL® 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 PEARL® Verfahren, ab einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit 200.000 EW, die am Markt üblichen P-Preise deutlich unterschreitet.

1.3.4.4 Kostenaufgliederung

Anhand der Kostenaufgliederung wird deutlich, dass die Kapitalkosten infolge der hohen Investitionskosten für den kleinen Reaktor die Gesamtkosten dominieren und damit auch Hauptverantwortlich für den unwirtschaftlichen Betrieb sind. Im Fall des Einsatzes des größeren Reaktors (PEARL® 2000) kann der Anteil der Kapitalkosten auf rund die Hälfte der Jahreskosten gedrückt werden.

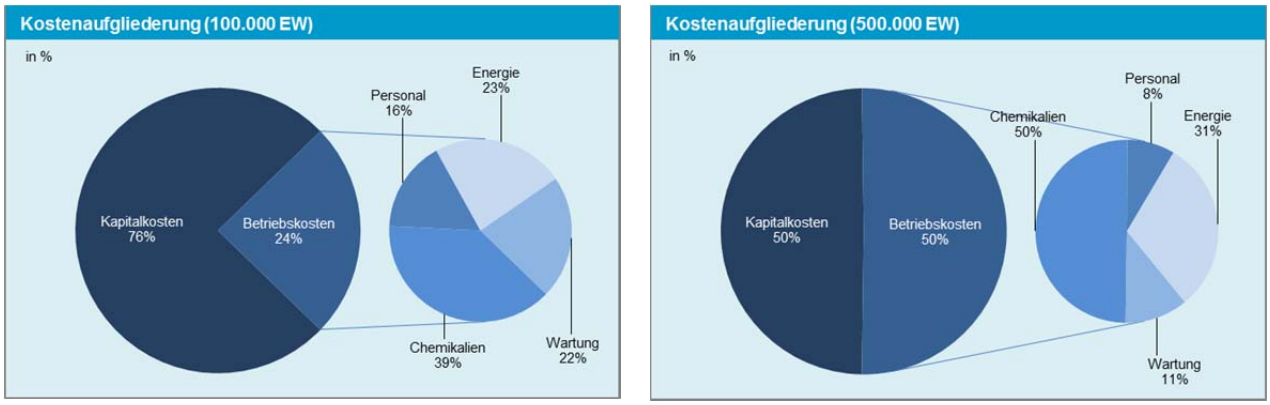


Abbildung 20: Kostenaufgliederung PEARL® 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)

1.3.4.5 Amortisation

Anhand der Kapitalwertmethode (Jahreskosten ohne Kapitalkosten abzüglich sämtlicher Einsparungen bzw. Erlöse) wird für die 100.000 EW Anlage und eine Amortisationszeit von über 15 Jahren errechnet. Das bedeutet, dass keine Amortisierung der Anlage vor der Neuinvestition der Maschinentechnik nach 15 Jahren stattfindet.

Anlagengröße	Amortisationszeit [a]
100.000 EW	>15
200.000 EW	11-12
500.000 EW	5-6
1.000.000 EW	5-6

Tabelle 22: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße

1.3.4.6 Kosten gesamte Prozesskette

Die Umsetzung des PEARL® Verfahrens hat einen positiven Einfluss auf die P und N Rückbelastung und damit die Kosten zur Entfernung der Nährstoffe (Fällmittelbedarf: - 11,1 %) und den Schlammanfall (-2,2 %). Der verringerte Schlammbedarf hat zum einen geringen Einfluss auf die Kosten der Mitverbrennung als auch auf die Transportkosten. Einsparungen resultieren aus dem bereits 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 11,75 €/(EW*a) zu rechen. Das entspricht absoluten Mehrkosten von 0,6 €/EW*a bzw. + 6 %. Im Fall einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit größerer Belastung ist aufgrund der reduzierten Verfahrenskosten, in erster Linie der Investitionskosten des PEARL® Verfahrens, ein geringer Anstieg (+ 1 % 200.000 EW) der Kosten bzw. eine Reduktion (- 2 %) der Kosten im Vergleich zur Referenzsituation möglich (Tabelle 23).

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	1,26	0,73	0,47
Verbrennung (Mitverbrennung)	3,50	3,50	3,50
Entsorgung			
Asche/Schlacke/Flugasche	0,36	0,36	0,36

Filterkuchen	0,06	0,06	0,06
Transport			
Schlamm zu Verbrennung	0,95	0,95	0,95
Asche zu Deponie	0,10	0,10	0,10
Filterkuchen zu Untertagedeponie	0,04	0,04	0,04
Summe Kosten	12,28	11,75	11,49
Einsparungen und Erlöse			
Verringerte P+N Rückbelastung	0,15	0,15	0,15
Erlös Endprodukt	0,39	0,39	0,39
Summe Einsparungen und Erlöse	0,54	0,54	0,54
Gesamtkosten	11,75	11,21	10,95
Δ zu Referenz	**+6%**	**+1%**	**-2%**

Tabelle 23: Jahreskosten gesamte Prozesskette PEARL®

Kläranlage	Mit-verbrennung	PEARL®	Entsorgung Asche, Filterkuchen	Transport	Einsparungen Rückbelastung N+P, Schlammanfall, Verkauf MAP
6,0 €	3,5 €	1,3 €	0,4 €	1,1 €	0,5 €
Gesamt: 11,8 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: + 0,6 €/EW*a; Δ %: + 6 %					

Abbildung 21: Kosten gesamte Prozesskette PEARL® Verfahren 100.000 EW Anlage

Kläranlage	Mit-verbrennung	PEARL®	Entsorgung Asche, Filterkuchen	Transport	Einsparungen Rückbelastung N+P, Schlammanfall, Verkauf MAP
6,0 €	3,5 €	0,5 €	0,4 €	1,1 €	0,5 €
Gesamt: 11,0 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: - 0,2 €/EW*a; Δ %: - 2 %					

Abbildung 22: Kosten gesamte Prozesskette PEARL® Verfahren 500.000 EW Anlage

1.3.4.7 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 23 verdeutlicht, dass die Preisänderung für Rohstoffe (+ 20 %) bzw. ein Anstieg der Säurepreise keinen großen bzw. keinen Einfluss auf die Gesamtkosten dieses ressourcenarmen Verfahrens haben. Vielmehr haben aufgrund des hohen Anteils der Kapitalkosten, höheren Investitionskosten (+20 %) einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten (+32 %). Szenario 4 zeigt die Kostenveränderung, die im Falle einer höheren Rücklösung bei der anaeroben Behandlung (25 statt 20%) und damit einer höheren Rückgewinnungsquote anfallen.

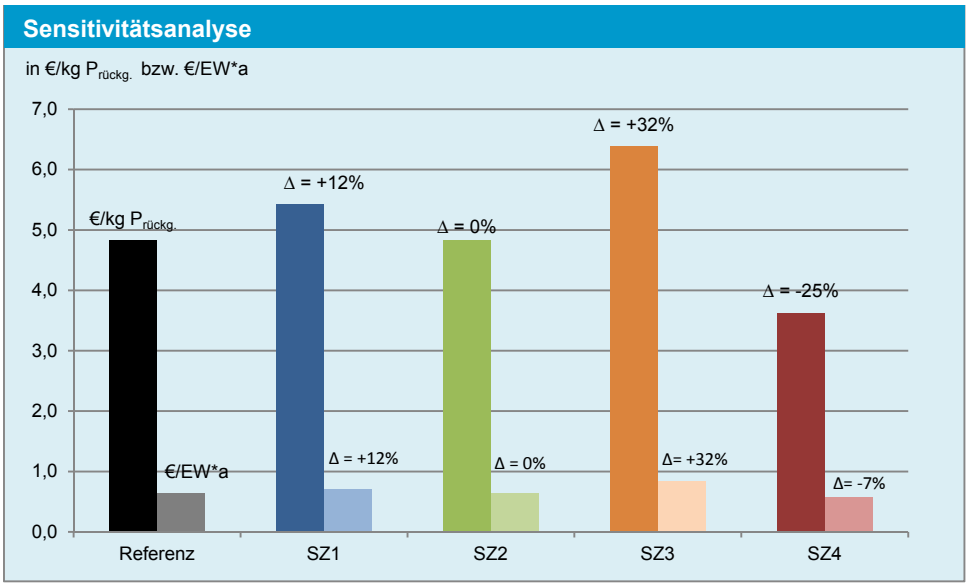


Abbildung 23: Sensitivitätsanalyse PEARL®

1.3.5 Literatur

Adnan, A. (2002) Pilot-scale study of phosphorus recovery through struvite crystallization. Master Thesis. Faculty of Graduate Studies. Department of Civil Engineering. University of British Columbia.

Adnan, A., Mavinic, D.S., Koch, F.A. (2002) Pilot-scale study of phosphorus recovery through struvite crystallization – Examining the feasibility of applying the process technology. Journal of Environmental Engineering and Science 2, pp. 315-324.

Britton, A.T., Sacluti, F., Oldham, W.K., Mohammed, A., Mavinic, D.S., Koch, F.A. (2008) Value From Waste - Struvite Recovery at the City of Edmonton's Gold Bar WWTP. Council of European Professional Informatics Societies. Zugriff am 8.11.2011.

Britton A.T. (2009) P-Recovery in North America - Ostara's PEARL Process. BALTIC 21 - Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice, 28.-30. September 2009, Berlin.

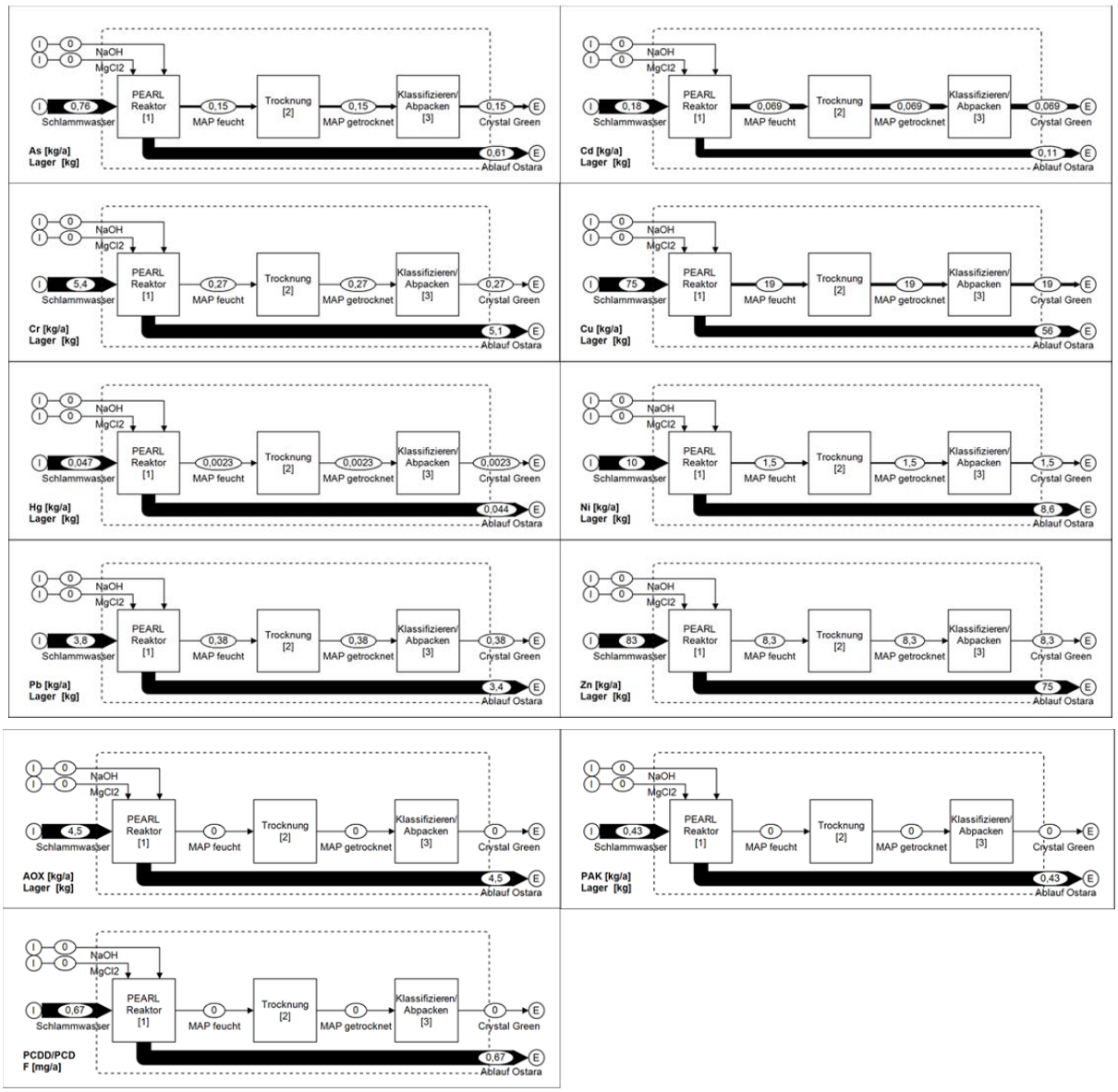
Fattah, K.P. (2004) Pilot scale struvite recovery potential from centrate at Lulu Island Wastewater Treatment Plant. Master Thesis. Faculty of Applied Science. Department of Civil Engineering. University of British Columbia.

Produktdatenblatt Crystal Green (2009) Media Backgrounder, September 2009

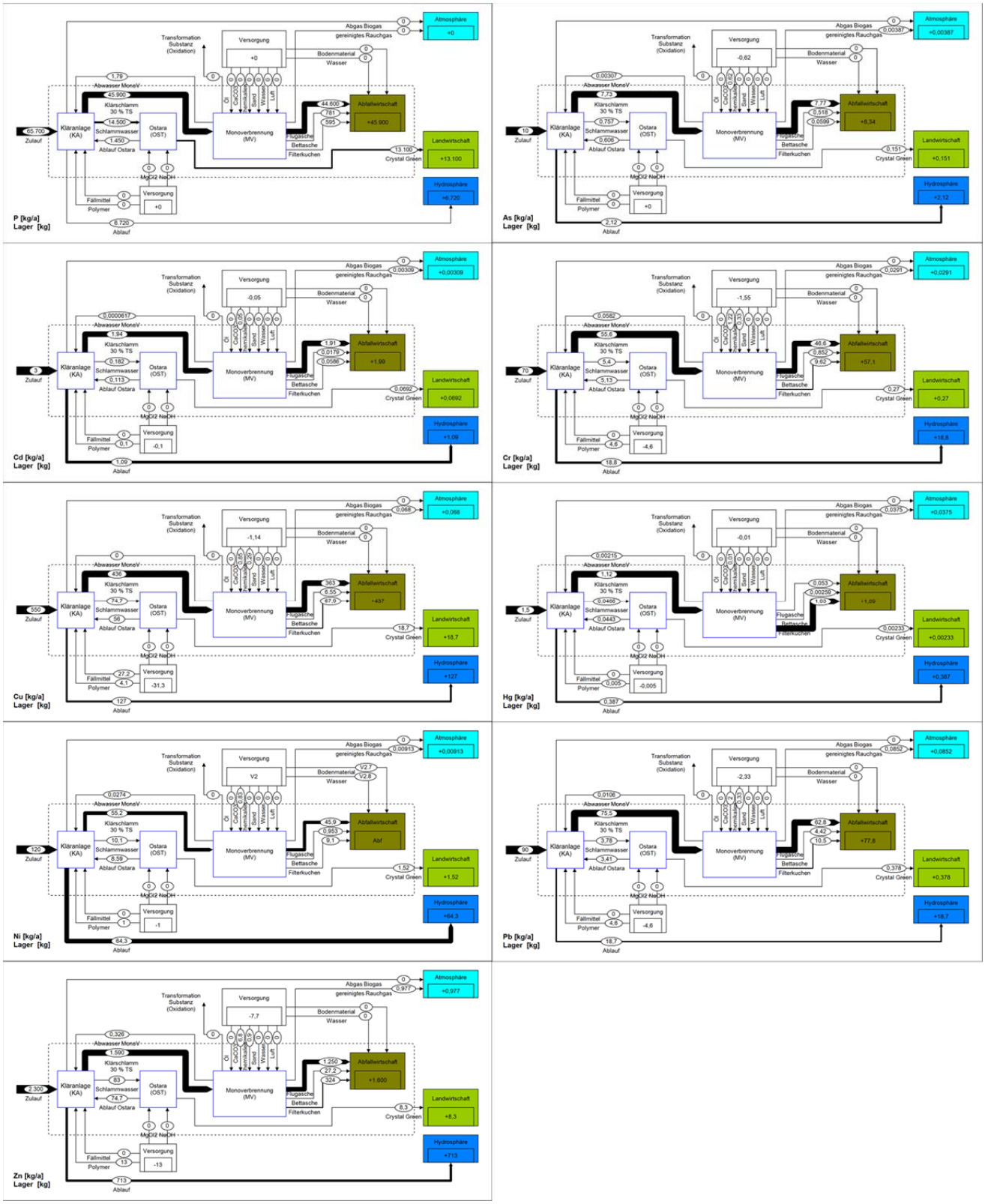
Rieck, T (2011-2012) Persönliche Auskunft (Verfahrenstechnik, Pläne, Ressourcenaufwand)

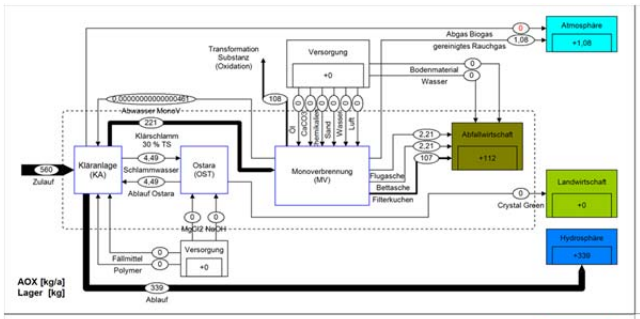
1.4 Anhang

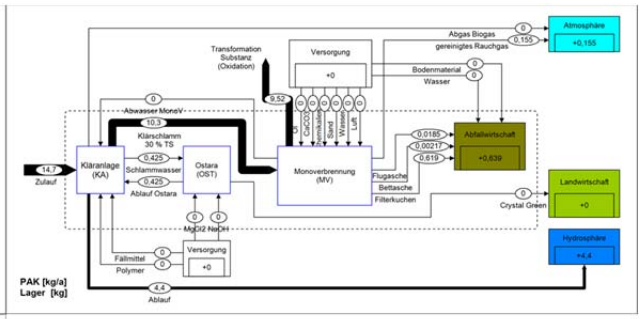
1.4.1 Stoffflussanalyse PEARL®

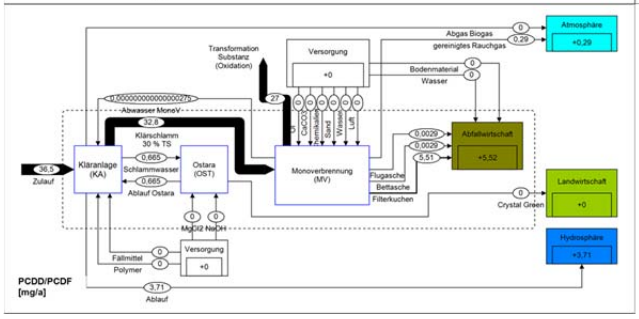


1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess PEARL®




Atmosphäre
+1,08
Abgas Biogas
gereinigtes Rauchgas
Transformation
Substanz
(Oxidation)
Versorgung
+0
Bodenmaterial
Wasser
Abwasser MonoV
Klärschlamm
30 % TS
Schlammwasser
Ablauf Ostara
Kläranlage
(KA)
Ostara
(OST)
Monoverbrennung
(MV)
Flugasche
Bettasche
Filterkuchen
Abfallwirtschaft
+112
Landwirtschaft
+0
Crystal Green
Hydrosphäre
+339
Zulauf
Fällmittel
Polymer
Ablauf
AOX [kg/a]
Lager [kg]


Atmosphäre
+0,155
Abgas Biogas
gereinigtes Rauchgas
Transformation
Substanz
(Oxidation)
Versorgung
+0
Bodenmaterial
Wasser
Abwasser MonoV
Klärschlamm
30 % TS
Schlammwasser
Ablauf Ostara
Kläranlage
(KA)
Ostara
(OST)
Monoverbrennung
(MV)
Flugasche
Bettasche
Filterkuchen
Abfallwirtschaft
+0,639
Landwirtschaft
+0
Crystal Green
Hydrosphäre
+4,4
Zulauf
Fällmittel
Polymer
Ablauf
PAK [kg/a]
Lager [kg]


Atmosphäre
+0,29
Abgas Biogas
gereinigtes Rauchgas
Transformation
Substanz
(Oxidation)
Versorgung
+0
Bodenmaterial
Wasser
Abwasser MonoV
Klärschlamm
30 % TS
Schlammwasser
Ablauf Ostara
Kläranlage
(KA)
Ostara
(OST)
Monoverbrennung
(MV)
Flugasche
Bettasche
Filterkuchen
Abfallwirtschaft
+5,52
Landwirtschaft
+0
Crystal Green
Hydrosphäre
+3,71
Zulauf
Fällmittel
Polymer
Ablauf
PCDD/PCDF
[mg/a]