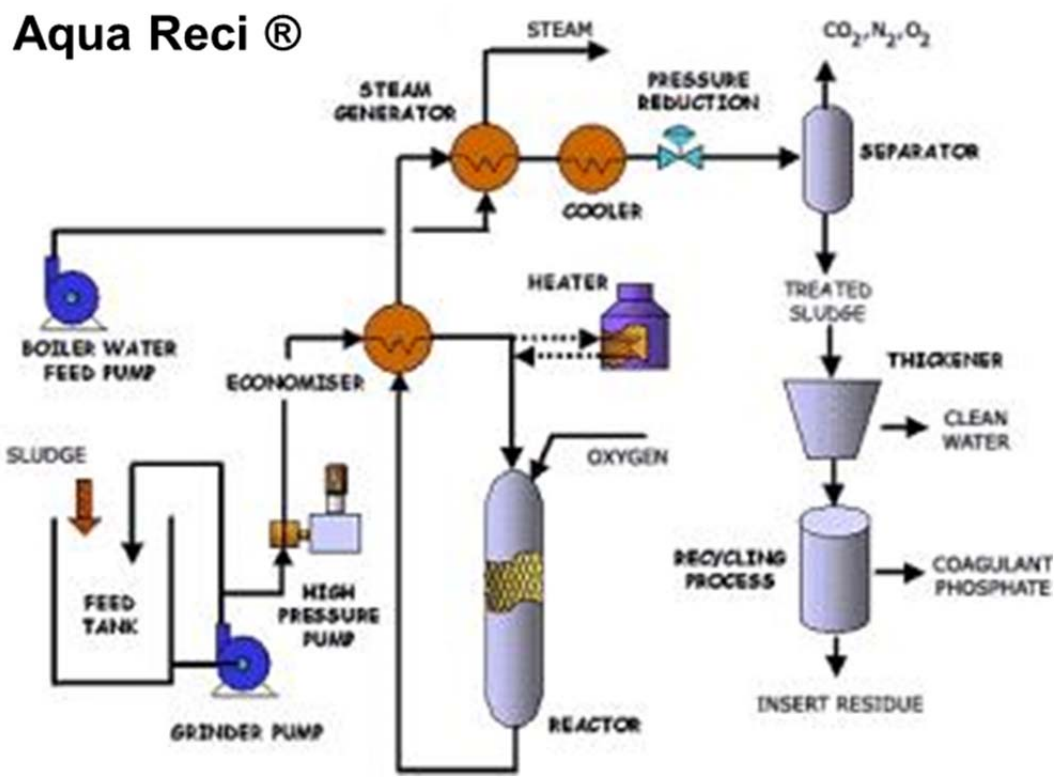
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

lebensministerium.at

Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

Aqua Reci®



Inhaltsverzeichnis

1 Aqua Reci® 5
1.1 Grundlagen allgemein 5
1.1.1 Prozessskizze als STAN Modell 6
1.1.2 Verfahrensbeschreibung 7
1.2 Datengrundlage für Bewertung 9
1.2.1 Sachbilanz 9
1.2.2 Stoffflussanalyse 11
1.2.3 Charakteristik Endprodukt 12
1.2.4 Umsetzung 13
1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage 13
1.2.6 Ökonomische Grundlagen 13
1.3 Ergebnis Aqua Reci® Verfahren 14
1.3.1 Technologie Bewertung 14
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren) 14
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung Aqua Reci® 20
1.3.4 Ökonomische Bewertung 24
1.3.5 Literatur 28
1.4 Anhang 29
1.4.1 Stoffflussanalyse Aqua Reci® 29
1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess Aqua Reci® 30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemskizze Aqua Reci® Super Critical Water Oxidation (SCWO; modifiziert nach Stenmark, 2003) 5
Abbildung 2: Systemskizze Rückgewinnungsprozess (modifiziert nach Stenmark, 2003) 6
Abbildung 3: STAN Modell Aqua Reci® + Recycling 6
Abbildung 4: STAN Modell Subprozess P-Recycling Aqua Reci® 6
Abbildung 5: STAN Modell Aqua Reci® gesamte Prozesskette 7
Abbildung 6: Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von Organik und Anorganik 7
Abbildung 7: (1) Schlamminput, (2) behandelter Schlamm bzw. anorganische Phase SCWO Prozess (3)und Überstandswasser nach FFT (Stenmark (2003) 8
Abbildung 8: Aufbereitung Eisenphosphat zu Phosphorsäure 9
Abbildung 9: Vergleich Säure- und Basenbedarf zur P-Rücklösung aus SCWO Asche 9
Abbildung 10: Energiebilanz Aqua Reci® bei Implementierung Referenzkläranlage (100.000 EW) 11
Abbildung 11: (2) anorganischer Fest-Reststoff aus Aqua Reci® Reaktor 13
Abbildung 12: P-Stoffflussanalyse Aqua Reci® (2 signifikante Stellen) 15
Abbildung 13: P-Stoffflussanalyse Subprozess P-Recycling Aqua Reci® (2 signifikante Stellen) 15
Abbildung 14: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette 15
Abbildung 15: Entfrachtungsleistung (Endprodukt:Klärschlamm) 16
Abbildung 16: Ergebnis Güterflussanalyse Rückgewinnungsprozess Aqua Reci® 17
Abbildung 17: CO_2- bzw. SO_2-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] Aqua Reci® 18

Abbildung 18: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren) ... 19
Abbildung 19: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation mit Wärmegutschrift ... 21
Abbildung 20: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation ohne Wärmegutschrift ... 22
Abbildung 21: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (Aqua Reci®) ... 22
Abbildung 22: Nährstoffbezogene Schwermetallgehalte Aqua Reci® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP) ... 23
Abbildung 23: Einwohnerspezifische Kosten Aqua Reci® CaP; Variation Anlagengröße inkl. Einsparungen und Erlöse ... 25
Abbildung 24: Einwohnerspezifische Kosten Aqua Reci® CaP; Variation Anlagengröße inkl. Einsparungen und Erlöse ... 25
Abbildung 25: Kostenaufgliederung Aqua Reci® 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts) ... 26
Abbildung 26: Kosten gesamte Prozesskette Aqua Reci® Verfahren 100.000 EW Anlage ... 27
Abbildung 27: Kosten gesamte Prozesskette Aqua Reci® Verfahren 500.000 EW Anlage ... 27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Transfer ausgewählter Elemente während der SCWO ... 8
Tabelle 2: Energiebilanz Aqua Reci® Reaktor ... 10
Tabelle 3: P-Transferkoeffizienten Aqua Reci® ... 11
Tabelle 4: Verhalten Schwermetalle Laugung und Fest-Flüssig Trennung ... 11
Tabelle 5: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Aqua Reci® Endprodukt ... 12
Tabelle 6: Löslichkeit in % bezogen auf P_{ges} (Aqua Reci®) ... 12
Tabelle 7: Umsetzungen Aqua Reci® Verfahren ... 13
Tabelle 8: Investitionskosten Aqua Reci® ... 13
Tabelle 9: Investitionskosten in Abhängigkeit der Kläranlagengröße ... 14
Tabelle 10: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Aqua Reci® ... 14
Tabelle 11: Ressourcenbedarf Fällung Aqua Reci® und molare Masse Fällmittel ... 16
Tabelle 12: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf Aqua Reci® ... 16
Tabelle 13: Spezifischer Energiebedarf Aqua Reci® ... 17
Tabelle 14: Indirekte SM-Emissionen Aqua Reci® ... 18
Tabelle 15: Kumulierter Energieaufwand Aqua Reci ® ... 18
Tabelle 16: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Aqua Reci® ... 20
Tabelle 17: Transportwege Aqua Reci® ... 20
Tabelle 18: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente Prozesskette Aqua Reci® ... 20
Tabelle 19: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette ... 21
Tabelle 20: Bewertung Aqua Reci® ... 23
Tabelle 21: Investitionskosten in Abhängigkeit der Kläranlagengröße ... 24
Tabelle 22: Jahreskosten Aqua Reci® (Referenzkläranlage 100.000 EW) ... 24
Tabelle 23: Einsparungen und Erlöse Aqua Reci® (Referenzkläranlage 100.000 EW) ... 24
Tabelle 24: Spezifische Kosten Aqua Reci® (100.000 EW) ... 24
Tabelle 25: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße ... 26
Tabelle 26: Jahreskosten gesamte Prozesskette Aqua Reci® ... 27

1 Aqua Reci®

1.1 Grundlagen allgemein

Aqua Reci® ist ein in Zusammenarbeit von Feralco AB (Helsingborg, Schweden) und Chematur Engineering (Karlskago, Schweden) entwickeltes Verfahren (Stenmark, 2003) Es zielt darauf ab, die organischen Anteile des Klärschlammes in einem Druckreaktor mit superkritischen Zustand (Temperatur > 374 °C, Druck > 221 bar) vollständig zu oxidieren. Dieser Prozess läuft autothermal ab und die dabei erzeugte Wärme kann genutzt werden. Kohlenstoff oxidiert während der überkritischen Phase zu CO_2, organischer und anorganischer Stickstoff wird zu reinem N_2, Phosphor zu löslichem P_2O_5 und (Schwer-)-Metalle oxidieren zu deren höchsten Valenz. Die entstehende anorganische Asche ist hoch reaktiv, wodurch Schwermetalle und Phosphor durch Säurezugabe sehr leicht löslich sind. Die zur Rücklösung notwendig Säure bzw. Laugenmenge kann aufgrund der vorangegangen Behandlung stark reduziert werden. Die einzelnen Prozesse untergliedern sich in die überkritische Wasseroxidation, die Gasabtrennung, das Eindicken und den Recyclingprozess (Stendahl, et al, 2003 Stendahl et al., 2004). Im Anschluss an den SCWO-Prozess können grundsätzlich zwei Recyclingverfahren angewendet werden. Zum einen kann mittels eines Säureaufschlusses bis zu 100 % des Phosphors rückgelöst werden und anschließend als Eisenphosphat rückgewonnen werden, während bei der zweiten Variante der Phosphors basisch mit Natronlauge rückgelöst wird (ca. 70 %) und mittels Kalkzugabe ($CaCO_3$) ein Calciumphosphat erzeugt wird. In der Pilotanlage an der Kläranlage Helsingborg, Öresundsverkert konnten mit dem sauren Aufschluss der reaktiven Asche Rückgewinnungsquoten bezogen auf den eingesetzten Schlamm von 90 % erzielt werden. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf können bis zu 85 % des Phosphors rückgewonnen werden. Da es sich beim Eisenphosphat (FeP) um kein Düngemittelmittel im weiteren Sinn handelt, wird bei der Bewertung des Aqua Reci® Verfahrens nur die Variante mit Herstellung eines Calciumphosphates betrachtet (Aqua Reci® Ca P).

Prozessskizze

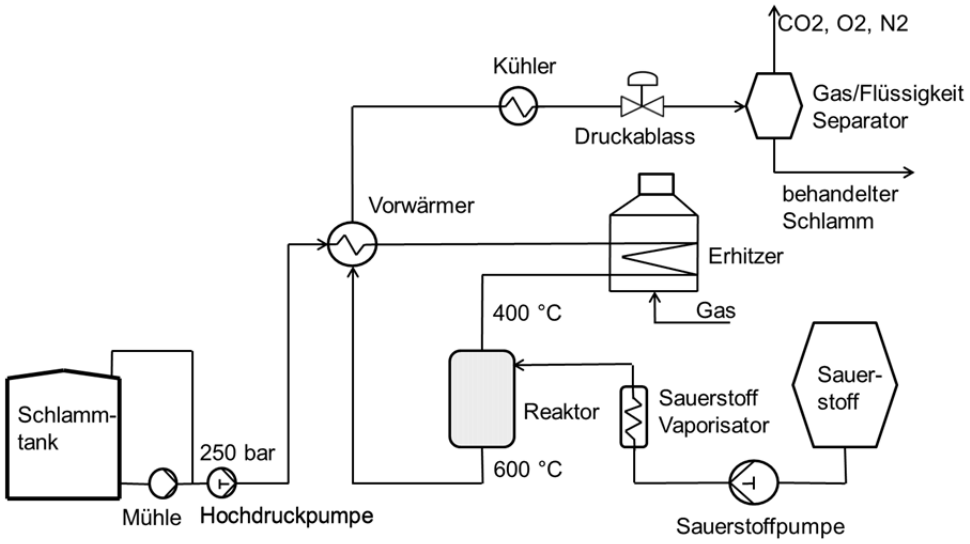


Abbildung 1: Systemskizze Aqua Reci® Super Critical Water Oxidation (SCWO; modifiziert nach Stenmark, 2003)

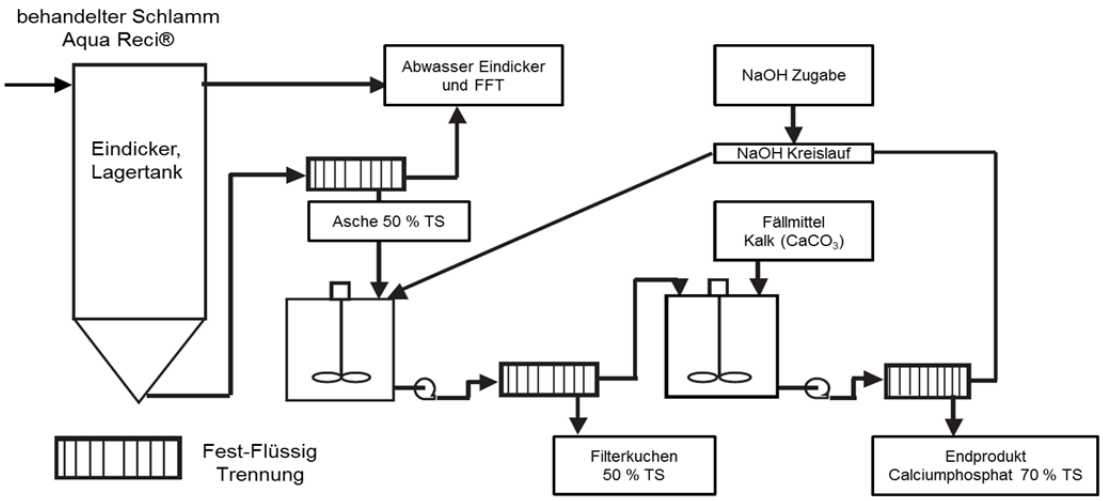


Abbildung 2: Systemskizze Rückgewinnungsprozess (modifiziert nach Stenmark, 2003)

1.1.1 Prozessskizze als STAN Modell

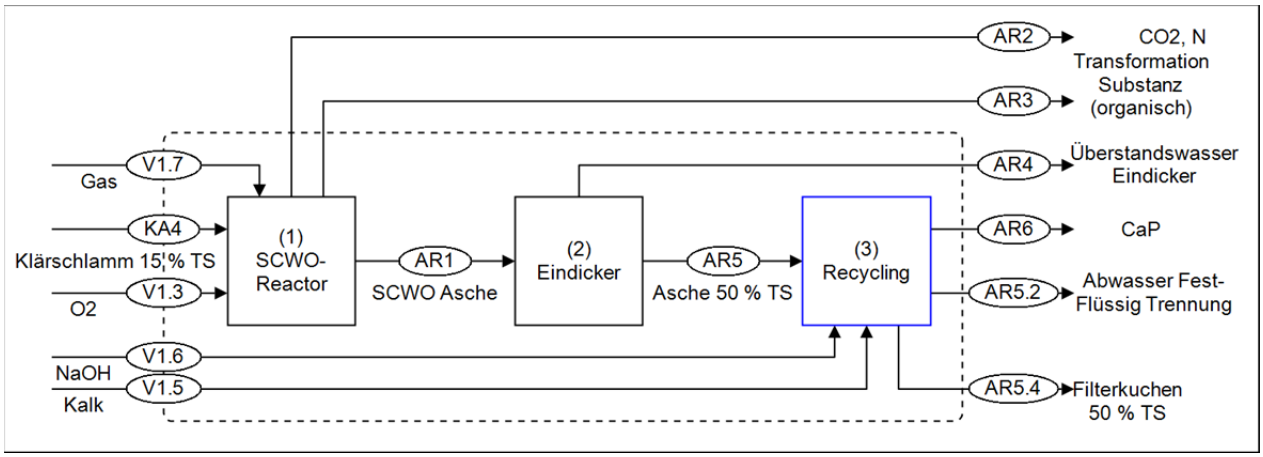


Abbildung 3: STAN Modell Aqua Reci® + Recycling

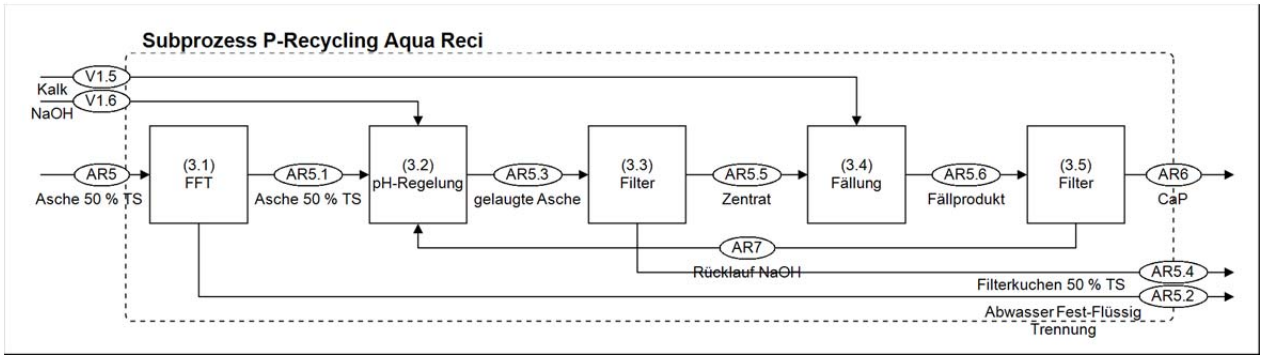


Abbildung 4: STAN Modell Subprozess P-Recycling Aqua Reci®

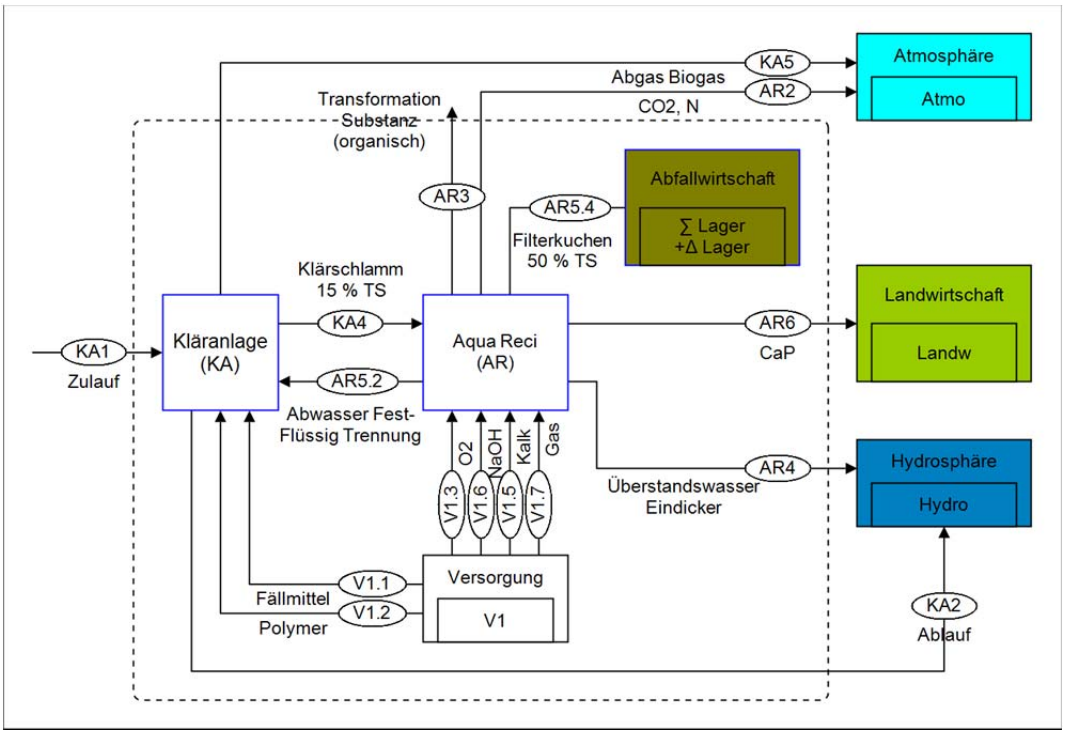


Abbildung 5: STAN Modell Aqua Reci® gesamte Prozesskette

1.1.2 Verfahrensbeschreibung

<u>Überkritische Wasseroxidation [1]</u>

Grundlage des Verfahrens ist die Überführung des verdünnten Klärschlammes (~ 10 – 15 % TS) in eine überkritische Phase. Die überkritische Phase wir bei Temperaturen von über 375°C und einem Druck von mehr als 220 bar erreicht. Die Eigenschaft von Wasser liegt in dieser Phase zwischen einem Gas und einer Flüssigkeit. Nahezu alle Stoffe ändern ihre Eigenschaft in dieses Phase gravierend. Die im Klärschlamm enthaltene Organik wird zu 100% löslich, während anorganische Stoffe nahezu unlöslich werden (Stendahl und Jaäfverstroöm, 2004)

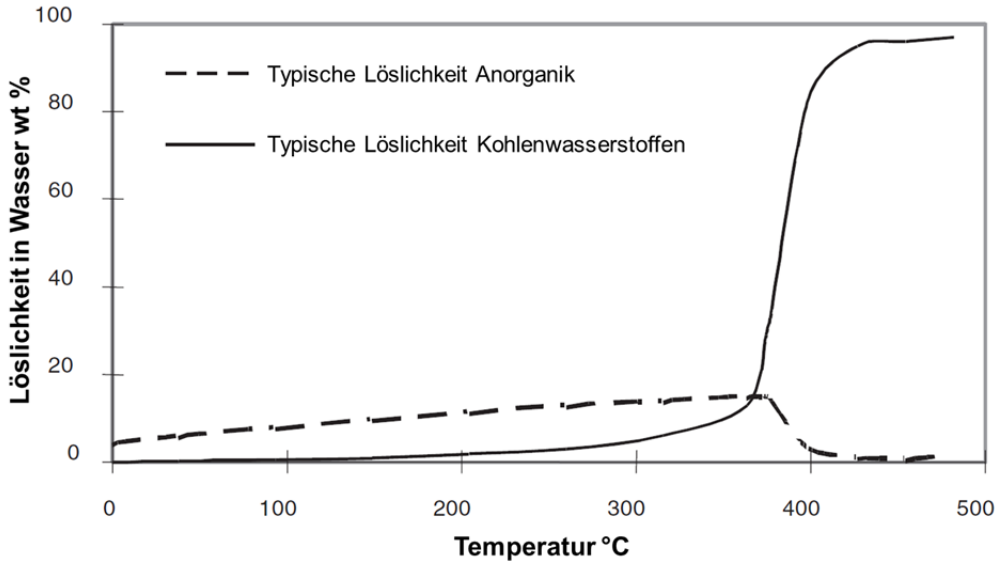


Abbildung 6: Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von Organik und Anorganik

Das Verhalten ausgewählte Elemente während der SCWO und damit der Transfer in der festen bzw. flüssigen Phase wird in Tabelle 1 dargestellt.

	Anorganischen Phase Festen Phase	Überstandswasser flüssige Phase
P	99	1
Ca	87	13
Mg	97	3
Cu	98	2
Fe	100	0
Schwermetalle	100	0

Tabelle 1: Transfer ausgewählter Elemente während der SCWO

Während der überkritischen Wasseroxidation und der Zugabe von Sauerstoff als Oxidationsmittel können folgende Transformationsprozesse beobachtet werden:

- Organischer Kohlenstoff -> CO_2
- Org.- und Anorganischer Stickstoff -> N_2
- Halogenide -> Fluoride bzw. Chloride
- Sulfone -> Schwefelsäure
- Metalle -> Oxidation zu deren höchsten Valenz
- Phosphor -> P_2O_5

Die Reaktionszeit zur vollständigen Zerstörung des organischen Anteils kann mit 60 Sekunden angenommen werden. Die Oxidationsprozesse im superkritischen Zustand laufen exotherm ab, womit Energie in Form von Wärme aus diesem Prozess rückgewonnen werden kann.

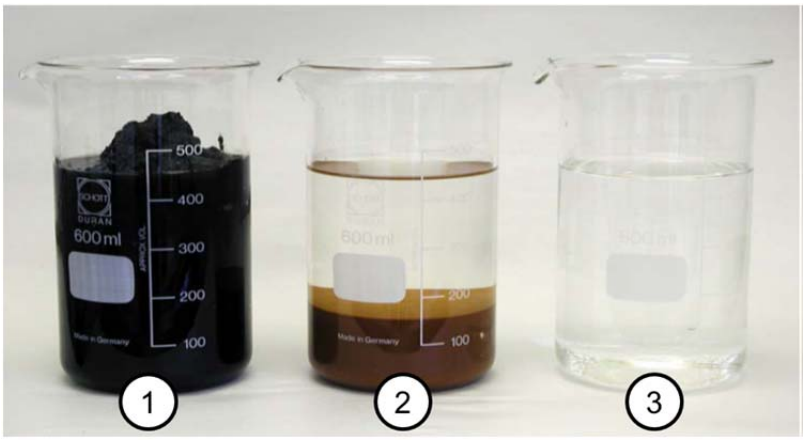


Abbildung 7: (1) Schlamminput, (2) behandelter Schlamm bzw. anorganische Phase SCWO Prozess (3)und Überstandswasser nach FFT (Stenmark (2003)

Eindickung [2]

Die anorganische Asche mit deutlich verbesserten Absetzeigenschaften wird der Eindickung zugeführt. Das saubere Überstandswasser wird aus dem Prozess abgezogen und kann ohne weitere Behandlung in den natürlichen Wasserkreislauf zurückgeführt werden. Der Phosphor liegt vollständig im anfallenden Feststoff vor und kann im Anschluss durch zwei verschiedene Verfahrensansätze rückgewonnen werden.

Saure Rücklösung: P-Recycling [3] als Eisenphosphat

Im ersten Schritt wird die Asche mit Schwefelwasserstoff (pH 1,3) angesäuert wodurch der gesamte Phosphor und alle Metalle in Lösung gehen. Eine Möglichkeit die Komponenten, in erster Linie Phosphor aus der flüssigen Phase rückzugewinnen ist ein 3--stufiger Neutralisierungsprozess mit Magnesiumoxid .In eine ersten Schritt wird der pH auf 2 eingestellt, bei welchem 3-wertiges Eisenphosphat ($FePO_4$) praktisch unlöslich ist, während die weiteren Metalle in Lösung blieben. Das reine Eisenphosphat kann dabei separiert werden. In der zweiten Stufe wird ein pH von 4,5 eingestellt, bei welchem Aluminium und Resteisen als Alunite ($NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6$) und Jarosite ($NaFe_3^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$) gefällt werden. Im letzten Schritt werden alle Schwermetalle bei einem pH von 7 - 8 gefällt. Der anfallende Schwermetallschlamm muss entsorgt werden.

Das erzeugte Eisenphosphat kann nicht als Dünger eingesetzt werden, wodurch eine weitere Aufbereitung notwendig ist. Durch Zugabe von Salzsäure wird aus dem Eisenphosphat ein Eisenchlorid sowie

Phosphorsäure hergestellt, welches wiederum in der Phosphorindustrie als Grundlage zur Düngerherstellung eingesetzt werden kann (Abbildung 8).

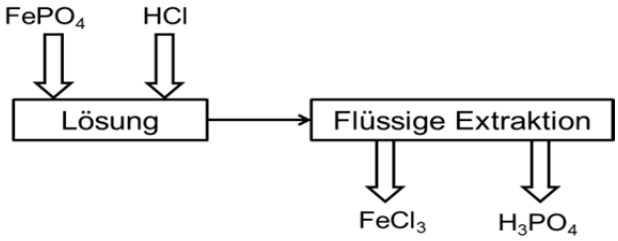


Abbildung 8: Aufbereitung Eisenphosphat zu Phosphorsäure

Basische Rücklösung: Phosphorrecycling [3] als Calciumphosphat

Eine Rückgewinnung des Phosphors als Calciumphosphat aus der reaktiven Asche der überkritischen Phase erfolgt über die Anordnung von Rücklösungs- bzw. Fällungsbecken und Filtern. Die anorganische Phase wird mit einer Base (NaOH) aufgeschlossen, wodurch ca. 70 % des Phosphors in Lösung geht. Im Vergleich zur Säurerücklösung kann durch den Einsatz von Basen nur ein geringerer Anteil des Phosphors rückgelöst werden. Um mittels Baseneinsatz Rücklöseraten von 80 % zu erreichen, liegt der Bedarf bei 5 M.

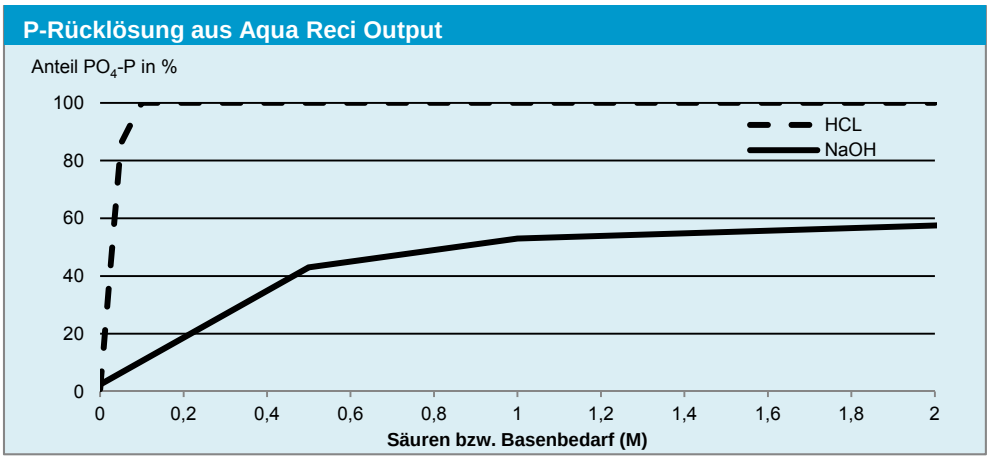


Abbildung 9: Vergleich Säure- und Basenbedarf zur P-Rücklösung aus SCWO Asche

Wesentlicher Vorteil einer basischen Extraktion ist die geringe Rücklösung an Schwermetalle. Sie werden anschließend als nicht rücklösbarer Anteil bei der Fest-Flüssig-Trennung abgeschieden. Im nächsten Schritt wird der gelöst vorliegende Phosphor durch Zugabe von Kalk ($CaCO_3$) als Calciumphosphat ausgefällt und mittels eines Filters abgeschieden. Der basische Überstand wird zur Wiederverwendung in die Rücklösung geführt.

Mögliche Betriebsprobleme Aqua Reci®

- Ablagerungen in Druckreaktor der SCWO (vor allem im Bereich des Auslasses)
- Hohe Werkstoffbeanspruchung infolge der komplexen SCWO Verfahrenstechnik (geringe Nutzungsdauer)
- Bildung von inertem und damit nicht abbaubarem CSB in SCWO Reaktor

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Sachbilanz

- Sauerstoffbedarf: 0,88 kg/kg Klärschlamm TS (++)
- Energieaufwand elektrisch Aqua Reci: 450.000 kWh/a (o)
- Energieaufwand elektrisch Rückg.: rund 5 % des Energiebedarfs Aqua Reci® (-)
- Gasbedarf 3,22 kWh/kg Klärschlamm TS (+)

Chemikalienbedarf CaP Erzeugung:

- Basenbedarf (NaOH): 0,013 kg/kg TS (o)
- Molares Verhältnis Fällung: Ca:P = 2:1 - 2,5:1 (+)

Der Fällmittelbedarf wird auf Basis des P-Inputs (siehe Stoffflussanalyse) in den Fällreaktor unter Annahme des Ca:P Verhältnisses von 2:1 bzw. 2,5:1 ermittelt. Ein wesentlicher Faktor, nämlich die Rücklösung von Ca und damit Fällionen aus der hoch reaktiven SCWO Asche, ist unbekannt. Theoretisch kann durch eine gleichzeitige Ca-Rücklösung der Fällmittelbedarf deutlich reduziert werden. Rücklöseversuche bei pH 2 aus der Asche zeigen, dass rund 70 % des Calciums rückgelöst werden kann. Die Berechnung wird in diesem Fall ohne Berücksichtigung dieses potentiellen Ca-Quelle durchgeführt, sollte aber in der Diskussion berücksichtigt werden.

Der elektrische Energiebedarf wird auf Basis des elektrischen Energiebedarfes für einen Reaktor mit einem jährlichen Durchsatz von 10.000 t TS/a (5,7 Mio. kWh/a) für die Referenzkläranlage mit einem Klärschlammanfall von rund 1.492 t TS/a abgeleitet und mit rund 450.000 kWh/a angenommen. Das liegt im Vergleich zum Energiebedarf des LOPROX® Reaktors mit 320.000 kWh/a in der gleichen Größenordnung.

Energiebilanz Aqua Reci ® (Svanström et al, 2004a+b)

Die Oxidation des Klärschlammes ist ein autothermer Prozess bei dem Wärmeenergie erzeugt wird. Wesentlich ist, dass der Schlamm auf 333 °C vorerhitzt werden muss. Unter der Annahme einer Schlammtemperatur von 25 °C muss der Schlamm um ~310 °C erhitzt werden. Die Klärschlammfracht bei einem TS-Gehalt von 15 % entspricht jährlich 9.950 m³. Der Energiebedarf um die Temperatur von 1 L Wasser um 1 °C zu erhöhen liegt bei rund 1,16 Wh. Der Energieaufwand für das Vorheizen liegt demnach bei rund 4.093.800 kWh/a. Unter Berücksichtigung eines 85 %igen Wirkungsgrades des gasbetriebenen Vorheizers wird jährlich Gas mit einem Energieinhalt von 4.816.200 kWh/ benötigt. Das entspricht rund 3,2 kWh/kg Klärschlamm Trockensubstanz.

Die Sauerstoffzugabe pro kg Klärschlamm TS wird laut Stendahl (2003) mit 0,88 kg angenommen. Für die 1.492 t KS Trockensubstanz der Referenzkläranlagen sind damit rund 1.306.000 kg O_2 pro Jahr nötig. Auf Basis der Berechnungen von Debellfontaine (2000) wird in dem Reaktor durch die Reaktion des Sauerstoffes mit dem Schlamm pro mol Sauerstoff ein Heizwert von 435 kJ/Mol O_2. Umgerechnet in kWh entspricht dies einem Heizwert des Schlammes von 4.931.200 kWh. Über die Annahme des Energieinhaltes des Schlammes von 3,34 kWh/kg TS kann der Heizwert des Klärschlammes mit einer guten Übereinstimmung überprüft werden. Unter Berücksichtigung der notwendigen Energie für Erhitzen, ergibt sich folgende Energierechnung:

Element	kWh/a
Energiepotential Schlamm	4.931.200
Energiebedarf Vorheizen (Gas)	4.816.200
Anfallende überschüssige Wärmeenergie	9.072.700
Wirkungsgrad Wärmetauscher	85%
Überschüssige Wärmeenergie	**7.711.800**

Tabelle 2: Energiebilanz Aqua Reci® Reaktor

Die überschüssige Wärmeenergie von rund 7.711.000 kWh/Jahr wird sowohl bei der ökologischen Bewertung (Gutschrift Wärme) als auch der ökonomischen Bewertung (Erlös aus dem Verkauf Wärme) berücksichtigt.

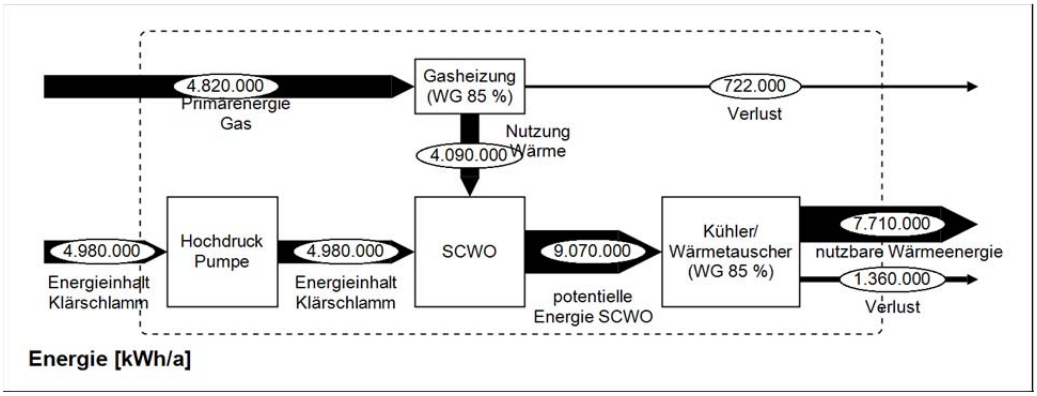


Abbildung 10: Energiebilanz Aqua Reci® bei Implementierung Referenzkläranlage (100.000 EW)

1.2.2 Stoffflussanalyse

Transferkoeffizienten (TK) Aqua Reci® Reaktor und CaP Rückgewinnung

Bei der Fest-Flüssigtrennung gelangt nur ein sehr geringer Anteil des Phosphors von rund 1 % über das Wasser aus dem Prozess während 99 % in die basische Laugung gelangen (+). Mit NaOH kann rund 70 % des gebunden vorliegenden Phosphors rückgelöst werden und liegt damit für die Fällung gelöst vor. Schwermetalle bleiben größtenteils gebunden (++). Im Fällprozess wird 98 % des gelöst vorliegenden Phosphors als schwerlösliches CaP ausgefällt und über eine FFT abgetrennt (++).

TK	Asche AR5.1	Abwasser FFT. AR5.2	UL	Zentrat AR5.5	Filterk. AR5.4	UL	CaP AR6	AR7 Rücklauf AR7	UL
P	99	1	1	70	30	1	98	31	1

Tabelle 3: P-Transferkoeffizienten Aqua Reci®

Für Schwermetalle wird angenommen, dass diese während der superkritischen Phase nahezu vollständig in der SCWO-Asche verbleiben (Shanableh und Shimizu, 2000) und damit in den Laugungsprozess gelangen. Die Löslichkeit der Metalle ist stark pH Wert abhängig, wobei Schwermetalle bei hohen pH Werten, im Vergleich zu niedrigen pH Werten kaum bis gar nicht in Lösung gehen. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der SM-Rücklösung (n=3) im Falle einer Basenzugabe zur Rücklösung von rund 50 - 70 % (+) des Phosphors aus der SCWO-Asche (Stark et al., 2006).

Laugung + FFT	Zentrat	Filterkuchen
As	-	-.
Cd	-	-.
Cr	0,1 ± 3	99,9
Cu	4 ± 3	96
Hg	0,3 ± 0,1	99,7
Ni	0,3 ± 0,1	99,7
Pb	14 ± 11	86
Zn	7 ± 5	93

Tabelle 4: Verhalten Schwermetalle Laugung und Fest-Flüssig Trennung

<u>Organische Verunreinigung</u>

Die Datengrundlage über das Verhalten von organischen Verunreinigungen ist sehr gut. Crain et al. 2000 weisen nach, dass die SCWO geeignet ist, gefährliche Spurenstoffe im Schlamm wie z.B. PCB nahezu vollständig zu zerstören (99,99 %). Außerdem sind z.B. Dioxine oder Furane sowie auch PCB's nicht im Abgas des Aqua Reci® Prozesses nachweisbar. In einer ausführlichen Literaturstudie zeigen Verianshyah und Kim (2007), dass Verbindungen wie PCB, DDT, Dioxine, Chlorphenole und Benzene, PVC, pharmazeutische Abfälle, und Flammhemmende Stoffe wie Tetrabromobisphenol A ohne gefährliche Beiprodukte oxidiert und damit vollständig zerstört werden. Damit ist anzunehmen, dass sämtliche organische Verunreinigungen im Klärschlamm zerstört werden und damit auch nicht im Endprodukt nachweisbar sind (++).

1.2.3 Charakteristik Endprodukt

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

Bei der Fällung mit einem Calcium Fällmittel fällt ein sehr reines Calciumphosphat ($Ca_5(PO_4)_3OH$)) mit einem Phosphorgehalten von rund 16,5 % an (+). Die P und Ca Gehalte liegen im Bereich eines reinen CaP. Zu den Schwermetallgehalten im Endprodukt liegen keine Daten vor. Aufgrund der Prozessführung mit einer basischen Rücklösung des Phosphors gelangen kaum Schwermetalle in den Fällprozess, womit auch die Schwermetallgehalte im Endprodukt sehr gering sind (o). Mittels der Stoffflussanalyse in Kombination der Güterflussanalyse kann gezeigt werden, dass auch im Falle der Annahme, dass alle Schwermetalle die in den Fällprozess gelangen auch in das Endprodukt transferiert werden, die Konzentrationen immer noch sehr gering sind. Untersuchungen zu den organischen Spurenstoffen zeigen, dass diese vollständig während der SCWO zerstört werden (++). Unabhängige Tests des Endproduktes zu den organischen Spurenstoffen liegen jedoch keine vor. Das Endprodukt ist aufgrund der Prozessführung frei von pathogenen Keimen wie E-coli, coliforme Bakterien und Salmonellen (++).

Nährstoffe [g/kg TS]		Schwermetalle [mg/kg TS]		Org. Verunreinigungen [mg/kg TS]	
P	165	As	0,4	AOX	0
N	-	Cd	0,01	PAK	0
Mg	-	Cr	3,7	PCDD/F	0
Ca	400	Cu	13	LAS	0
K	-	Hg	0,1	NPE	0
Metalle [mg/kg TS]		Ni	1,2	Bisphenol	0
Al	-	Pb	7,1	…	0
Fe	-	Zn	82,2		

Tabelle 5: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Aqua Reci® Endprodukt

1.2.3.2 P-Löslichkeit

Unabhängige Laboruntersuchungen zeigen eine schlechte Wasserlöslichkeit des CaP, aber eine sehr gute Zitronenlöslichkeit (+). Weitere explizite Informationen zur Löslichkeit des Aqua Reci® Endproduktes in weiteren standardisierten Extraktionsmitteln liegen nicht vor (Tabelle 6).

Extraktionsmittel	Löslichkeit [%]
Wasser	<5
Zitronensäure	95
Ameisensäure	-
Mineralsäure	-
Ammoncitrat	-

Tabelle 6: Löslichkeit in % bezogen auf P_{ges} (Aqua Reci®)

1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Das Aqua Reci® Endprodukt erfüllt die Anforderungen der Düngemittelverordnung. Aufgrund des Fällprozesses und weiterer fehlender Behandlung liegt das Endprodukt kristallin und pulverförmig vor. Eine Lagerung (z.B. in Big Bags) ist problemlos möglich, während jedoch eine direkte Ausbringung in der Landwirtschaft ohne weitere Aufbereitung z.B. durch Pelletieren nicht möglich ist.

1.2.3.4 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus Aqua Reci® Verfahren

Die bei der SCWO erzeugte Asche ist frei von organischer Substanz und sehr gut entwässerbar. Bereits durch eine einfache Filtration kann ein TS-Gehalt von rund 50 % erreicht werden. Die Asche kann ohne weitere Behandlung auf einer Reststoffdeponie abgelagert werden. Das bedeutet zugleich, dass der Prozess zur Verbrennung von z.B. Klärschlammen nicht mehr erforderlich ist und damit dieser Prozess nicht mehr bei der ganzheitlichen Betrachtung berücksichtigt werden muss. Weitere Abfallstoffe fallen bei dem betrachteten Ansatz mit basischen Aufschluss und CaP-Herstellung keine an.

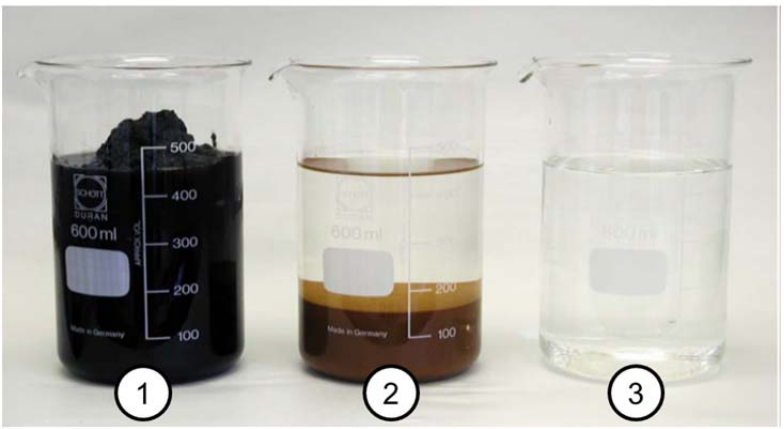


Abbildung 11: Anorganischer Fest-Reststoff aus Aqua Reci® Reaktor (2)

1.2.4 Umsetzung

In einer Pilotanlage in Karlskoga (Schweden) wurden Tests an verschiedenen Schlämmen aus der Kläranlage Bromma und Kläranlage Karlskoga durchgeführt. Die dabei behandelte Klärschlammmenge ist nicht bekannt (+).

Umsetzung	Umsetzung
Kläranlage Karlskoga	Pilotanlage

Tabelle 7: Umsetzungen Aqua Reci® Verfahren

1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage

Der Flächenbedarf der Halle für das Aqua Reci® Verfahren für eine jährliche Fracht von 10.000 t TS wird mit rund 1.000 m² angegeben (o). Für die Referenzanlage wird damit ein Flächenbedarf von rund 500 m² abgeleitet (--).

1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Auf Basis einer Kostenkalkulation für die Klärschlammbehandlung in Stockholm (Stendahl, 2003; Stendahl, 2004) unter der Annahme von 2 x 10.000 t TS/a werden die Kosten für die Implementierung des Aqua Reci® Verfahrens auf der Referenzkläranlage abgeschätzt werden. Die 10.000 t TS entsprechen in etwa einer Belastung von rund 600.000 - 700.000 EW. Folgende, teils stark variierende Investitionskosten werden in Tabelle 8 dargestellt. Sowohl für den SCWO Reaktor (10,3 Mio. €) als auch den Rückgewinnungsprozess (0,63 Mio. €) werden die Mittelwerte der dargestellten Investitionskosten als Berechnungsgrundlage angenommen. Das Gebäude wird bei der Kalkulation nicht berücksichtigt.

Anlagenteile	Investitionskosten [€]
SCWO (Stendahl, 2003)	12.000.000
SCWO (Stendahl, 2004)	8.500.000
Rückgewinnungsprozess (Stendahl, 2003)	660.000
Rückgewinnungsprozess (Stendahl, 2004)	600.000
Gebäude 1.000 m²	1.500.000

Tabelle 8: Investitionskosten Aqua Reci®

Zusätzlich liegt von Svanström (2004) eine Kostenkalkulation für den SCWO-Prozess für einen jährlichen Durchsatz von rund 3.600 t Klärschlamm TS vor. Die Investitionskosten werden mit 2,7 Mio. € angegeben. Die Nutzungsdauer des SCWO-Reaktors, wird so wie die Maschinentechnik, mit maximal 10 - 15 Jahren festgelegt. Grund dafür ist die hohe Werkstoffbeanspruchung durch den SCWO-Prozess.

Schwierig ist in diesem Fall das Downscaling der Investitionskosten auf die Referenzkläranlage. Aufgrund der ähnlichen Kosten des LOPROX Reaktors im Falle einer Implementierung auf einer 500.000 EW Kläranlage werden ähnliche Investitionskosten für die in Tabelle 9 dargestellte Kläranlagengrößen angenommen.

KA Belastung	Investitionskosten SCWO Reaktor [€]	Investitionskosten Rückgewinnungsprozess [€]
100.000 EW	ca. 3.000.000	420.000
200.000 EW	ca. 5.000.000	460.000
500.000 EW	ca. 10.300.000	630.000
1.000.000 EW	ca. 20.000.000	1.000.000

Tabelle 9: Investitionskosten in Abhängigkeit der Kläranlagengröße

Aufgrund des wartungsintensiven Betriebes werden die Wartungskosten mit 2,5 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand wird mit 3 MA/Jahr angenommen werden.

1.3 Ergebnis Aqua Reci® Verfahren

1.3.1 Technologie Bewertung

Das Aqua Reci® Verfahren ist ein Verfahren welches im ausgefaulten und teilentwässerten Klärschlamm ansetzt. Der technische Aufwand der superkritischen Wasseroxidation, Rücklösung des Phosphors aus der Asche, Abtrennung der störenden Feststoffe und Fällung eines Endproduktes ist hoch und damit auch mit einem hohen Wartungsaufwand verbunden. Der technologische Ansatz der SCWO ist ein erprobtes Verfahren und wird in verschiedenen Bereichen der Umwelttechnik eingesetzt. Die Prozesse der Abwasserreinigung müssen nicht verändert werden bzw. sind keine Veränderung der weiterführenden Prozesse notwendig.

Das Rückgewinnungspotential der SCWO mit anschließender Rückgewinnung des Phosphors als CaP liegt bezogen auf den Klärschlamm bei rund 70 %, womit die Rückgewinnungsquote bezogen auf den Zulauf bei rund 60 % liegt.

Aqua Reci® Verfahren	
Entwicklungsstand	Pilotanlagen/Halbtechnisch
Komplexität Technologie	Superkritische Wasseroxidation, Rücklösung P mit Säure oder Lauge, Fest-Flüssig Trennung, Fällung
Implementierung	Anschluss an Entwässerung (15-20 % TS)
Wartungsaufwand	hoch
Veränderung Schlammbehandlung	Nicht reaktiver Fest-Reststoff, keine thermische Behandlung mehr nötig
Effektivität des Verfahrens CaP	~ 70 %
Potential bezogen auf KA-Zulauf CaP	~ 60 %
Qualitativer Ressourcenaufwand FeP	O_2, NaOH, HCl, Energie (elektrisch)
Qualitativer Ressourcenaufwand FeP	O_2, NaOH, $CaCO_3$, Energie (elektrisch)
Abfallstoffe	deponiefähige Asche
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 10: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Aqua Reci®

1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

1.3.2.1 Stoffflussanalyse P – Einfluss auf Abwasserreinigungsprozess

Das Rückgewinnungsverfahren hat insofern Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess als das über das Abwasser aus der MAP Fällung und über die Abwässer der SM-Fällung eine zusätzliche Rückbelastung zum Schlammwasser zu erwarten ist. Mittels des Aqua Reci®-Verfahrens kann rund 40.600 kg P rückgewonnen werden. Unter der Annahme eines P-Gehaltes im MAP von 16,9 % fällt eine CaP Fracht von rund 245.300 kg/a an. Das Abwasser der Fest-Flüssig Trennung mit einer P-Fracht von rund 600 kg P gelang zurück in den Kläranlagenzulauf.

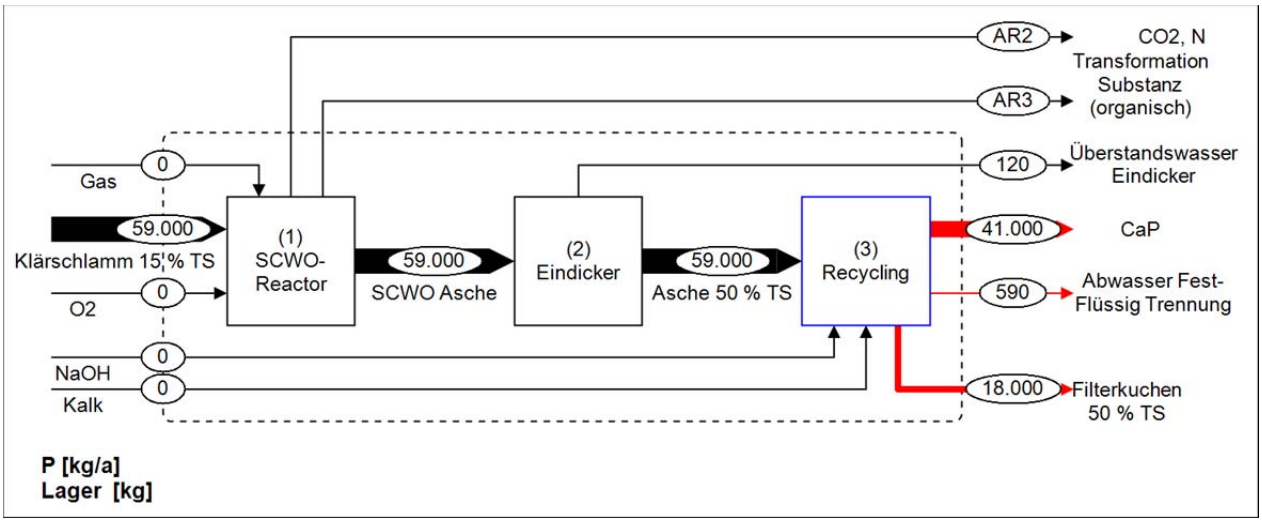


Abbildung 12: P-Stoffflussanalyse Aqua Reci® (2 signifikante Stellen)

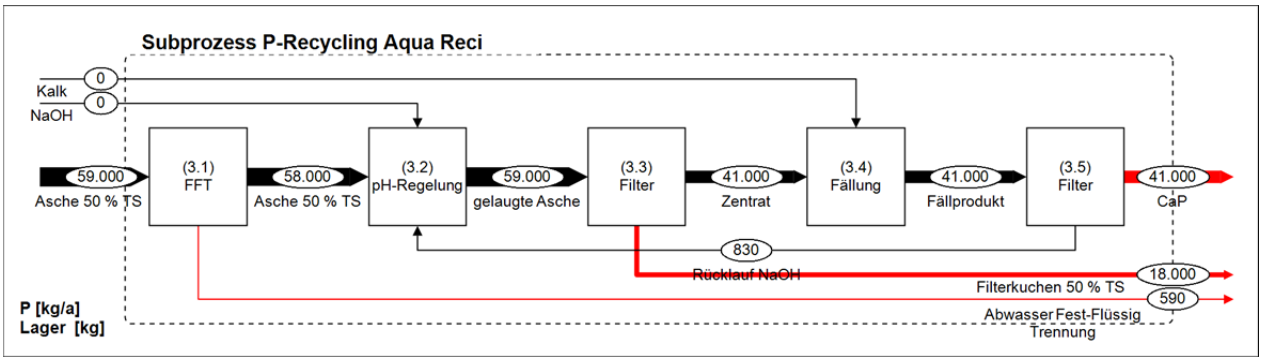


Abbildung 13: P-Stoffflussanalyse Subprozess P-Recycling Aqua Reci® (2 signifikante Stellen)

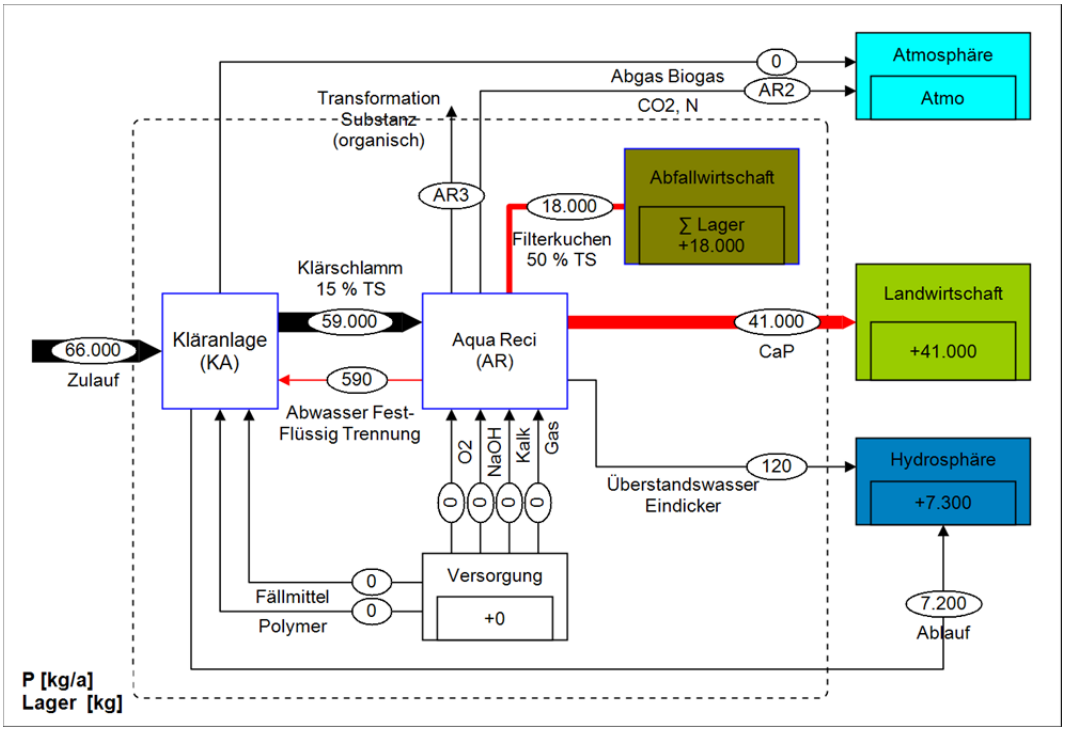


Abbildung 14: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette

1.3.2.2 Stoffflussanalyse SM

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

Auf Basis der Transferkoeffizienten

1.3.2.3 Entfrachtungsleistung

Die Entfrachtungsleistung wird auf Basis des Referenzklärschlammes und der Schwermetallgehalte im Endprodukt ermittelt. Für die organischen Spurenstoffe können aufgrund der guten Datengrundlage fundierte Aussagen hinsichtlich der Entfrachtungsleistung getroffen werden.

Parameter	Klärschlamm [kg/a]	Endprodukt [kg/a]	Rückgewinnung bzw. Entfrachtung [%]
P	**59.100**	**40.600**	**~70**
As	8,0	0,08	99,1
Cd	2,5	0,01	98
Cr	75,0	0,75	98,5
Cu	450	2,6	98,5
Hg	1,2	0,01	99,1
Ni	60	0,24	99,9
Pb	95	1,4	99,1
Zn	1.660	16,5	99,5
AOX	223	0	100
NPE	65,7	0	100
LAS	10.950	0	100
Bisphenol A	2	0	100
Arzneimittelstoffe	unbekannt	0	100
Dioxine/Furane	unbekannt	0	100

Abbildung 15: Entfrachtungsleistung (Endprodukt:Klärschlamm)

1.3.2.4 Ergebnisse Güterflussanalyse

Calcium, als limitierendes Element für die Fällung von CaP wird als $CaCO_3$ im P:Mg Verhältnis von ca. 1:2 – 1:2,5 zu dosiert. Zur Entfernung der jährlich anfallenden P-Fracht von ~41.000 kg/a im Zentrat der Fest-Flüssigtrennung müssen rund 301.000 kg reines $CaCO_3$ eingesetzt werden. Natronlauge wird im Ausmaß von 19.400 kg für die Rücklösung des Phosphors aus der SCWO-Asche zugegeben. Jährlich fallen rund 245.300 kg CaP an.

Fällmittelbedarf [kg/a]	
Input P	41.000
Ca Bedarf bei 1:1	53.600
$CaCO_3$ [100 %]	301.000
Basenbedarf [kg/a]	
NaOH [100 %]	19.400

Molare Masse [u]	
P	30,97
Ca	40,08
C	35,45
O	15,99

Calciumcarbonat (Kalk):
$CaCO_3$
Wasseranteil: 0 %
Molare Masse: 100,1

Tabelle 11: Ressourcenbedarf Fällung Aqua Reci® und molare Masse Fällmittel

	Produktspez. [kg $P_{rückg.}$]	Einwohnerspez. [EW*a]
O_2	32,2	13,1
(Erd-)Gas	11,2	4,6
$CaCO_3$	7,4	3,0
NaOH	0,5	0,2
CaP	6,0	2,5

Tabelle 12: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf Aqua Reci®

Während der nasschemischen Oxidation wird der organische Anteil vollständig oxidiert. Die Asche ist damit vollständig inertisiert. Abbildung 16 zeigt die Güterflussanalyse für den Rückgewinnungsprozess des Aqua Reci® Verfahrens

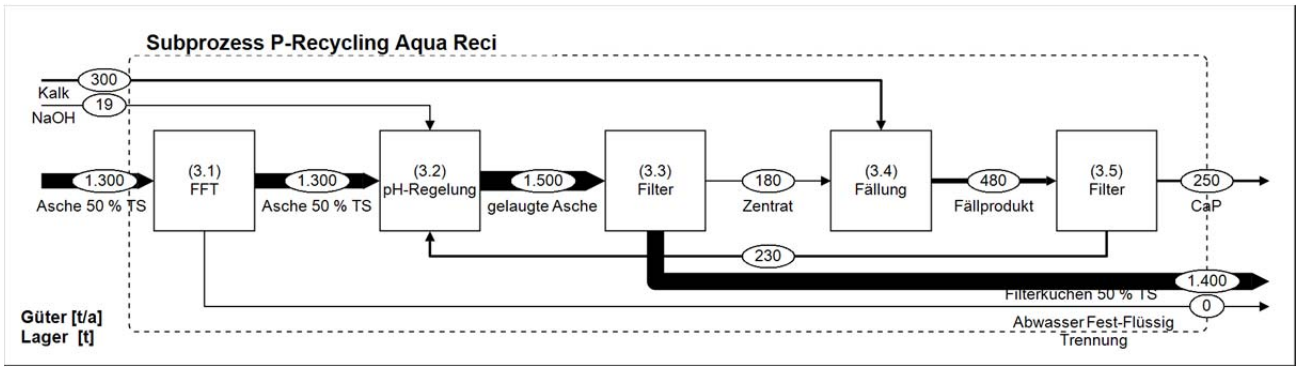


Abbildung 16: Ergebnis Güterflussanalyse Rückgewinnungsprozess Aqua Reci®

1.3.2.5 Ergebnisse Energieflussanalyse

Auf Basis des ermittelten elektrischen Energiebedarfs von Stendahl (2003, 2004) wird der elektrische Energiebedarf mit rund 466.000 kWh/a für den SCWO-Reaktor und den Rückgewinnungsprozess angenommen. (Tabelle 13). Der Gasbedarf kann mit rund 4.816.200 kWh/a errechnet werden.

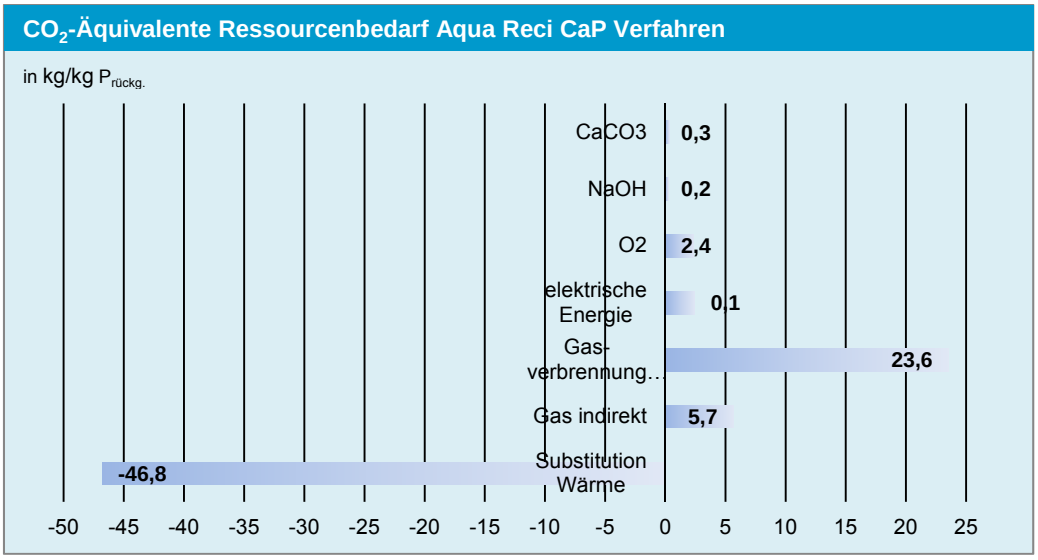
	Produktspez. [kg $P_{rückg.}$]	Einwohnerspez. [EW*a]
Strom kWh	11,5	4,7
Gas kWh	118,7	48,2

Tabelle 13: Spezifischer Energiebedarf Aqua Reci®

1.3.2.6 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Auf Basis der Annahme einer Implementierung des Aqua Reci® Verfahrens auf der definierten Referenzkläranlage, der Ergebnisse der Güterfluss- sowie der Energieflussanalyse und der indirekten Emissionen der notwendigen Ressourcen (GEMIS-Datenbank) wird eine Reduktion an CO_2- bzw. SO_2-Emissionen von -494.000 kg bzw. -3.150 kg ermittelt werden. Dieses Ergebnis wird unter der Annahme einer möglichen vollständigen Nutzung der entstehenden Wärme errechnet. Dies ist allerdings nur der Fall, wenn es auch tatsächlich Abnehmer dieser Wärme gibt. Ansonsten dürfen die Gutschriften nicht berücksichtigt werden.

Aufgrund der Oxidation des Klärschlammes ist mit CO_2-Emissionen von rund 1.492 t zu rechnen. Allerdings werden diese Emissionen als CO_2-neutral betrachtet und deshalb nicht berücksichtigt. Die Emissionen bezogen auf 1 kg $P_{rückg.}$ werden anhand der jährlichen Emissionen und der rückgewonnen P-Fracht von 40.600 kg/a errechnet und sind aus Abbildung 17 zu entnehmen. Die dominierende CO_2-Emissionsquelle sind die direkten CO_2-Emissionen aus der Verbrennung des Erdgases, gefolgt von den indirekten Emissionen des Erdgases infolge dessen Produktion und den Emissionen aus der Herstellung des reinen Sauerstoffs.



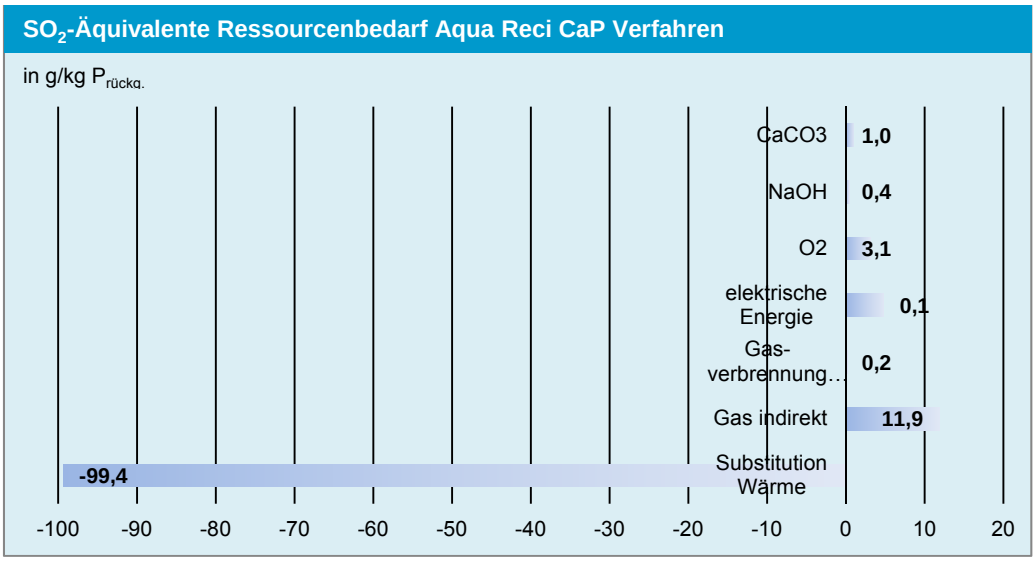


Abbildung 17: CO_2- bzw. SO_2-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] Aqua Reci®

1.3.2.7 Indirekte Schwermetallemissionen Aqua Reci® CaP

Die indirekten Schwermetallemissionen werden analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güterflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt. Die Gutschrift aus der Wärmenutzung wird ebenfalls berücksichtigt.

Indirekte Emissionen	Atmosphäre [g/a]	Atmosphäre (mit Wärme) [g/a]	Hydrosphäre [mg/a]	Atmosphäre (mit Wärme) [g/a]
As	2,14	-3,97	0,0004	-0,35
Cd	0,66	-11,88	0,0010	-0,85
Cr	3,28	-8,49	0,0009	-0,84
Cu	-		-	
Hg	-		0,0005	-0,42
Ni	8,76	-231,63	-	
Pb	18,23	-39,69	0,006	-
Zn	-		-	
AOX	-		61	55,57
PAK	0,0007	-9,87	-	
PCDD/F	0,029	0,03	-	

Tabelle 14: Indirekte SM-Emissionen Aqua Reci®

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. Die Gutschrift wird aus der Wärmeerzeugung berechnet.

KEA	[kWh]	[kWh/EW*a]	[kWh/kg $P_{rückg.}$]
Chemikalien	513.200	5,1	12,6
Elektrische Energie Betrieb Aqua Reci®	894.000	8,9	22,0
Thermische Energie Betrieb Aqua Reci®	5.693.800	56,9	140,3
Gesamt	**7.101.100**	**71,0**	**175,9**
Gutschrift	10.949.000	109,5	269,9

Tabelle 15: Kumulierter Energieaufwand Aqua Reci ®

Abbildung 18 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen. .

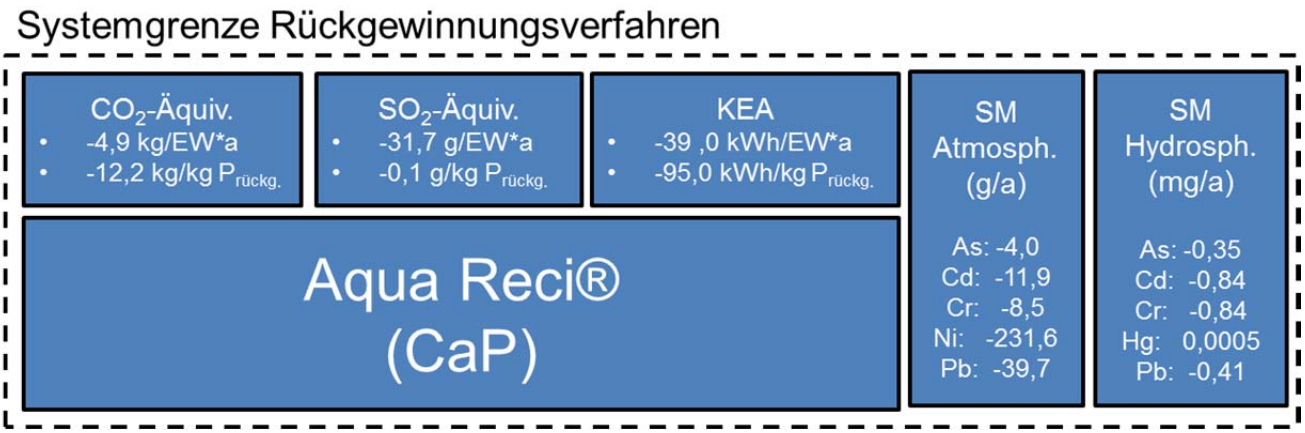


Abbildung 18: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)

1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung Aqua Reci®

Die Implementierung des Aqua Reci® Verfahrens hat keinen direkten Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess, beeinfluss jedoch nachfolgende Prozesse, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

Faktor	Einfluss auf
SCWO Reaktor	Energieausbeute Klärschlamm Wärme, Gutschrift
Thermische Behandlung	Anfallender Reststoff Ablagerungsfähig, keine weitere thermische Behandlung notwendig, Reduktion Transportkosten, Entsorgungskosten, keine Ressourcenaufwand Verbrennung
Ressourcenaufwand Aqua Reci®	Indirekte Emissionen, Kosten
CaP-Produktion	Kosten (Erlöse), Gutschrift P

Tabelle 16: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Aqua Reci®

Berücksichtigung Transport

Aufgrund der vollständigen Oxidation des Klärschlammes fällt eine zu entsorgende Feste-Reststoffmenge mit einem restlichen Wassergehalt von 50 % von rund 1.130 t/a an. Ansonsten fallen keine Reststoffe an die transportiert werden müssen (Tabelle 17).

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€/EW*a]
Fest-Restostoff - Reststoffdeponie	1.130	112.700	0,16
Gesamt Transport		**112.700**	**0,16**

Tabelle 17: Transportwege Aqua Reci®

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation sind deutliche Veränderung hinsichtlich der treibhausrelevanten Gase (-209 %), sowie der Gase mit Versauerungspotential (-381 %) zu beobachten (Tabelle 18). Grund für die deutliche Reduktion der gasförmigen Emissionen sind zum einen die Gutschrift aus der Nutzung des energetischen Wärmepotentials des Klärschlammes und zum anderen die Gutschriften aus dem P-haltigen Endprodukt. Kann die Energie nicht genutzt werden, schneidet das Verfahren schlecht ab mit zusätzlichen CO_2-Emissionen von über 300 % und zusätzlichen SO_2-Emissionen von 60 %

CO_2-Äquivalente	Mit Gutschrift Wärmeenergie		Ohne Gutschrift Wärmeenergie	
	[kg]	[CO_2-Äquiv./EW*a]	[kg]	[CO_2-Äquiv./EW*a]
Aqua Reci®	-400.200	-4,0	1.600.400	16,0
Referenz	368.600	3,7	368.600	3,7
Δ	-209%		+334	
SO_2-Äquivalente	**[kg]**	**[SO_2-Äquiv./EW*a]**	**[kg]**	**[SO_2-Äquiv./EW*a]**
Aqua Reci®	-3.500	0,035	2.020	0,020
Referenz	1.260	0,013	1.260	0,013
Δ	-381 %		+60	

Tabelle 18: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente Prozesskette Aqua Reci®

1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

Selbiges kann für den KEA beobachtet werden. Sehr gut, mit Einsparungen von rund 300 % schneidet das Aqua Reci® Verfahren bei Berücksichtigung der Gutschrift aus der erzeugten Wärmeenergie ab, während bei ausbleibender Nutzung der Wärmeenergie das Verfahren mit +700 % sehr schlecht abschneidet.

KEA	Rohstoffe	Energie	Mit Wärmeenergie [kWh/EW*a]	Ohne Wärmeenergie [kWh/EW*a]
Kläranlage	701.000*	1.006.000	17,1	17,1
Aqua Reci®	513.200	6.887.800	71,0	71,0
Monoverbrennung	-	-	-	
Deponie	18.900		0,2	0,2
Transport	17.800		0,2	0,2
Gesamt	**8.845.500**		88,5	88,5
Substitution Strom	-		-	
Substitution Wärme	-10.949.000		-109,5	**0**
Substitution P Dünger	-210.100		-2,1	-2,1
Gesamt	**-2.313.700**		**-23,1**	
Referenz	1.131.700		11,3	11,3
Δ			-304 %	+700 %

Tabelle 19: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

In Abbildung 19 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 Aqua Reci® Verfahrens deutliche Reduktionen der CO_2 bzw. SO_2-Emissionen zu erwarten sind.

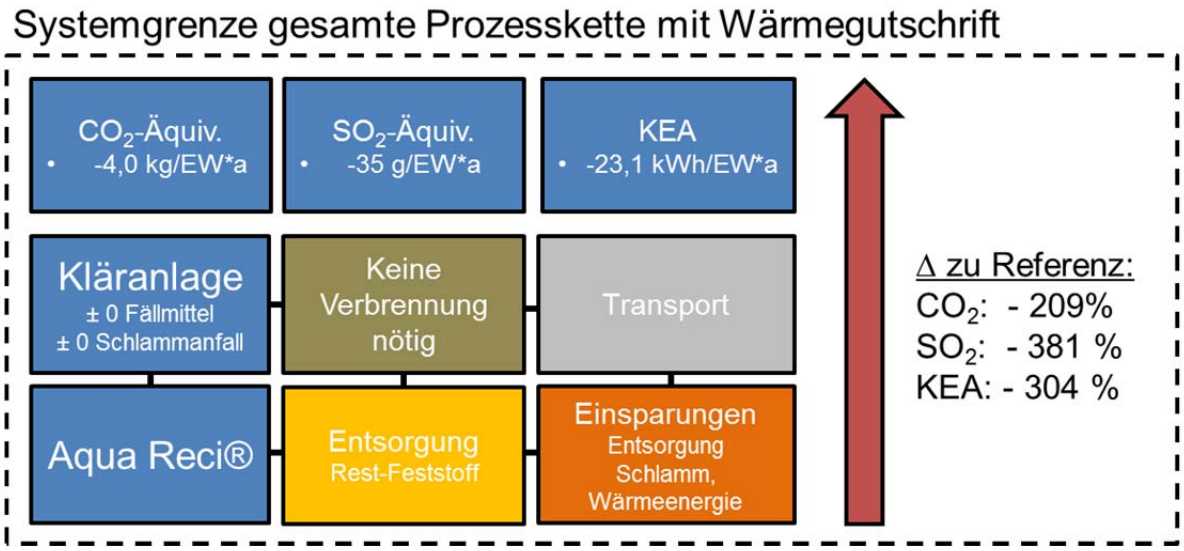


Abbildung 19: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation mit Wärmegutschrift

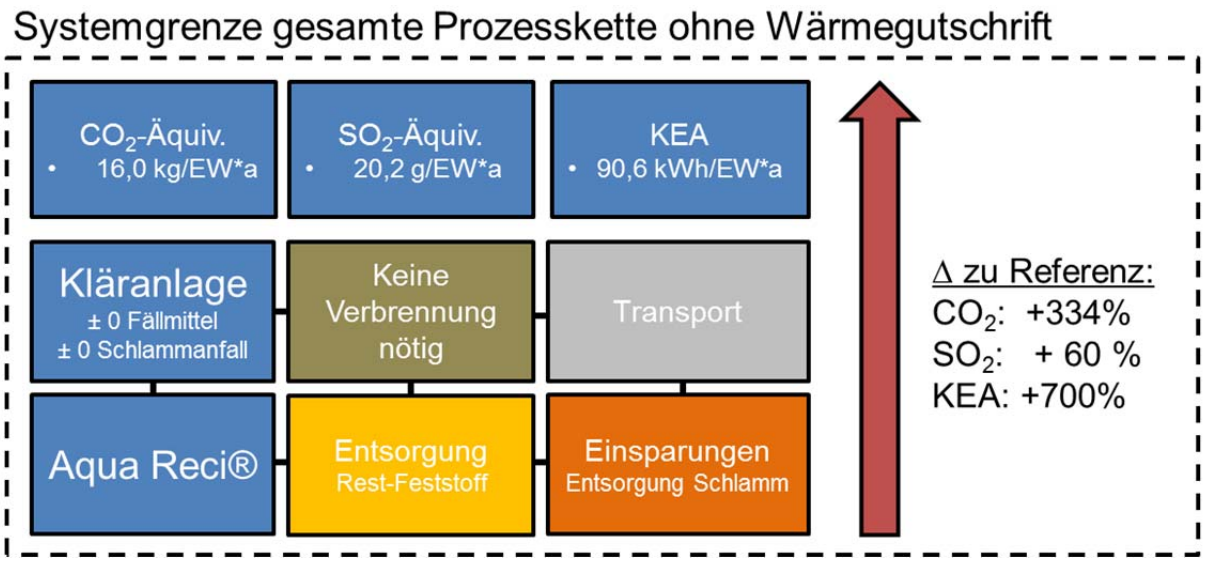


Abbildung 20: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation ohne Wärmegutschrift

1.3.3.3 Ergebnisse Stoffflussanalyse Schwermetalle und organische Verunreinigungen

Auf Basis der Stoffflussanalysen können die Pfade von P und den ausgewählten Schwermetallen zu den Zielprozessen nachvollzogen werden (Abbildung 21). Im Vergleich zur Referenzsituation sind keine erhöhten Schwermetallfrachten in die Hydrosphäre zu erwarten. Infolge des nicht benötigten thermischen Behandlungsschrittes werden die Emissionen in die Atmosphäre um die Fracht aus der Verbrennung reduziert. 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.

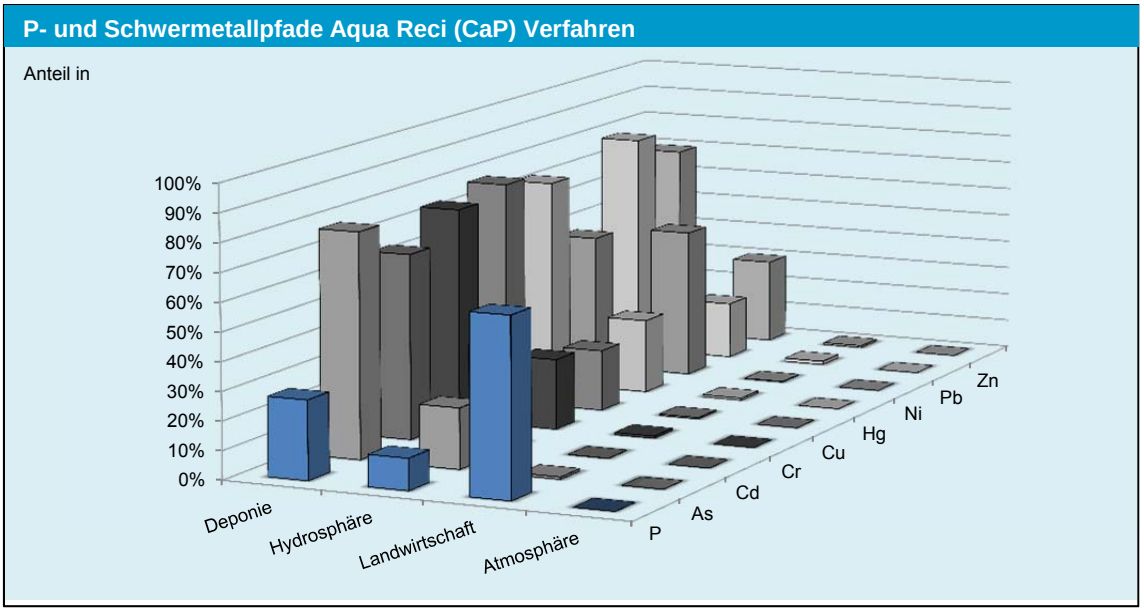


Abbildung 21: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (Aqua Reci®)

1.3.3.4 Ergebnis Schwermetallemissionen

Verglichen mit den direkten SM-Emissionen haben die indirekten SM-Emissionen nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamt-Schwermetallemissionen, weshalb eine Auswertung nicht sinnvoll erscheint. Veränderte direkte SM-Emissionen sind aufgrund der Prozessführung nicht zu erwarten.

1.3.3.5 Ergebnis Endprodukt

Endprodukt ist ein aufgrund der Prozessführung sehr reines CaP mit geringen Schwermetallgehalten, die deutlich unter den Anforderungen der Düngemittelverordnung liegen. Bezogen auf den Hauptnähstoff Phosphor liegen alle Schwermetallkonzentrationen deutlich unter jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP).

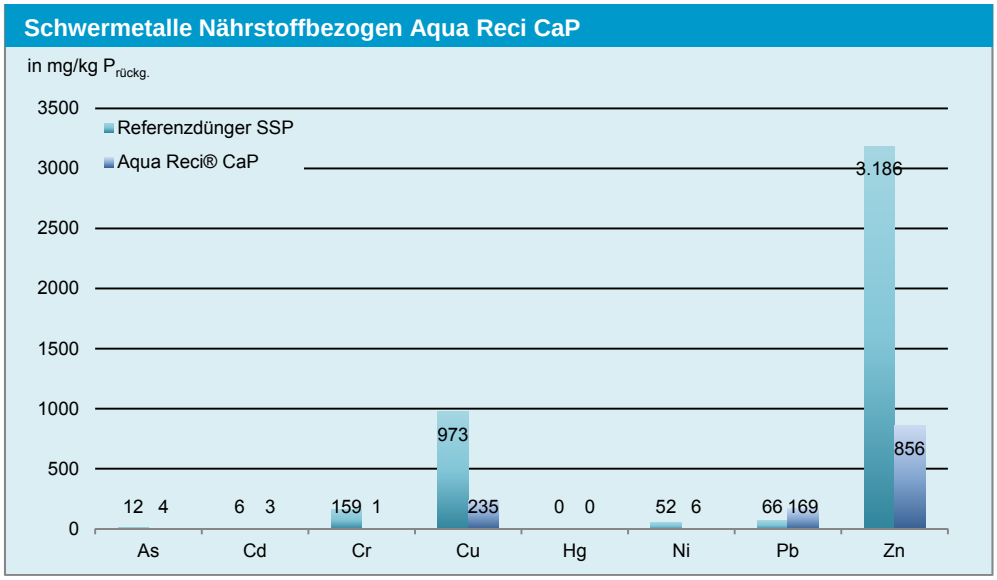


Abbildung 22: Nährstoffbezogene Schwermetallgehalte Aqua Reci® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)

Bewertung Endprodukt	CaP Aqua Reci®	SSP
Löslichkeit	Gut	Sehr Gut
Düngewirksamkeit	Mäßig/Schlecht	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	432	230
Anorganische Verunreinigungen		
SM:P [mg Cd/kg P]	1,5	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,32	1,26
Referenzbodenmethode [*limitierendes Element)	10.900 (Pb*)	1.450 (Cd*)
Tolerierbare Menge bezogen auf Cd	4,8	-
Organische Verunreinigungen		
Keine organische Spurenstoffe	5[2]	5
Keine hygienischen Bedenken	5[2]	5
Handhabung		
Einfache Lagerung möglich	5	5
Direkter Einsatz in LW möglich	3	5

Tabelle 20: Bewertung Aqua Reci®

Das Cd:P Verhältnis ist mit 1,5 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 dieses Endprodukt 10.900 Jahre aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. In diesem Fall ist Blei das limitierende Element. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf Cd, könnte das Aqua Reci® Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 4,8 häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe bzw. hygienische Bedenken sind aufgrund der Prozessführung (Superkritische Wasseroxidation) keine nachweisbar (+[2]) bzw. aufgrund der Prozessführung (Nassoxidation) nicht gegeben (+[2]). Aufgrund der Fällung des gelöst vorliegenden Phosphors fällt ein lagerbares, pulverförmiges Endprodukt an, welches nicht direkt mithilfe moderner Ausbringungsgeräte in der Landwirtschaft ausgebracht werden kann.

1.3.4 Ökonomische Bewertung

1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten Aqua Reci®

Auf Basis der in Kapitel 1.2.6 dargestellten Daten, werden die größenabhängigen Kalkulationen durchgeführt (Tabelle 22).

KA Belastung	Investitionskosten SCWO Reaktor [€]	Investitionskosten Rückgewinnungsprozess [€]
100.000 EW	ca. 3.000.000	420.000
200.000 EW	ca. 5.000.000	460.000
500.000 EW	ca. 10.300.000	630.000
1.000.000 EW	ca. 20.000.000	1.000.000

Tabelle 21: Investitionskosten in Abhängigkeit der Kläranlagengröße

1.3.4.2 Jahreskosten

Die Investitionskosten für das Aqua Reci® Verfahren (SCWO-Reaktor und P-Rückgewinnung) zur Implementierung auf einer Referenzkläranlage liegt bei rund 3,4 Mio. €. 50 % der Kosten entfallen den Reaktor (ND 10 Jahre) und 50 % auf die Maschinentechnik (ND 15 Jahre). Aufgrund des wartungsintensiven Betriebes werden die Wartungskosten mit 2,5 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand ist hoch und wird mit 3 MA/Jahr angenommen werden.

Jahreskosten	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a
Kapitalkosten	**-**	**-**	**364.600**
Wartung + Reparaturen	-	-	85.500
Strom	447.700	0,1 €/kWh	44.800
Gas	4.816.200	0,035 €/kWh	168.600
Sauerstoff	1.306.000	80 €/t	104.500
NaOH	19.000	240 €/t	4.700
Kalk	301.000	120 €/t	36.100
Personal	3	50.000 €/MA	150.000
Sonstiges	-	-	-
Entsorgung	1.127.000-	50 €/t	56.400
Betriebskosten			**575.000**
Gesamt			**939.600**

Tabelle 22: Jahreskosten Aqua Reci® (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Einsparungen/Erlöse	Menge (kg bzw. kWh)	Preis/Einheit	€/a
MAP Erlöse	245.300	431	105.900
Reduktion Entsorgungskosten	-	-	376.300
Fernwärme	**7.711.800**	**0,065**	**501.300**
Gesamt			**983.500**

Tabelle 23: Einsparungen und Erlöse Aqua Reci® (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Spezifische Kosten	€ (ohne Erlöse)	€ (mit Erlöse)
€/kg $P_{rückgewonnen}$	23,2	-1,1
€/EW*a	9,4	-0,4
€/E*a	18,8	-0,8

Tabelle 24: Spezifische Kosten Aqua Reci® (100.000 EW)

1.3.4.3 Variantenrechnung

Die Berechnungen zeigen, dass das Aqua Reci® Verfahren bei alleiniger Betrachtung der Jahreskosten ohne Einsparungen und Erlöse ein sehr teures Verfahren ist. Die Kosten belaufen sich auf über 23 €/kg P bzw. 9,4 €/EW*a. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass eine ablagerungsfähige Asche und Wärme im Überschuss anfällt. Bei Berücksichtigung dieser Faktoren und der Erlöse aus dem Verkauf des anfallenden CaP werden die Jahreskosten übertroffen und das Verfahren kann wirtschaftlich betrieben werden (-

1,1 €/kg P bzw. -0,4 €/EW*a). Ob die anfallende Wärme tatsächlich genutzt und damit verkauft werden kann ist ungewiss. Daher werden bei der Variantenrechnung auch die Szenarien ohne Erlöse aus dem Verkauf der Wärme mitberücksichtigt. Dabei zeigt sich, dass das Aqua Reci® Verfahren für das Szenario ohne Wärmenutzung weit von einem wirtschaftlichen Betrieb entfernt ist.

Anhand der Annahme unterschiedlicher Kläranlagengrößen und möglicher Einsparungen und Erlöse können die spezifischen Kosten des Verfahrens deutlich gesenkt werden. Die Kosten können mit zunehmender Kläranlagengröße deutlich reduziert werden. Grund dafür ist der Einsatz größerer SCWO-Reaktoren, deren Investitionskosten nicht proportional mit der Ausbaugröße steigen. Direkt proportional steigen die Kosten für die Chemikalien an, während die Kosten für Energie, Wartung und Personal nicht proportional ansteigen.

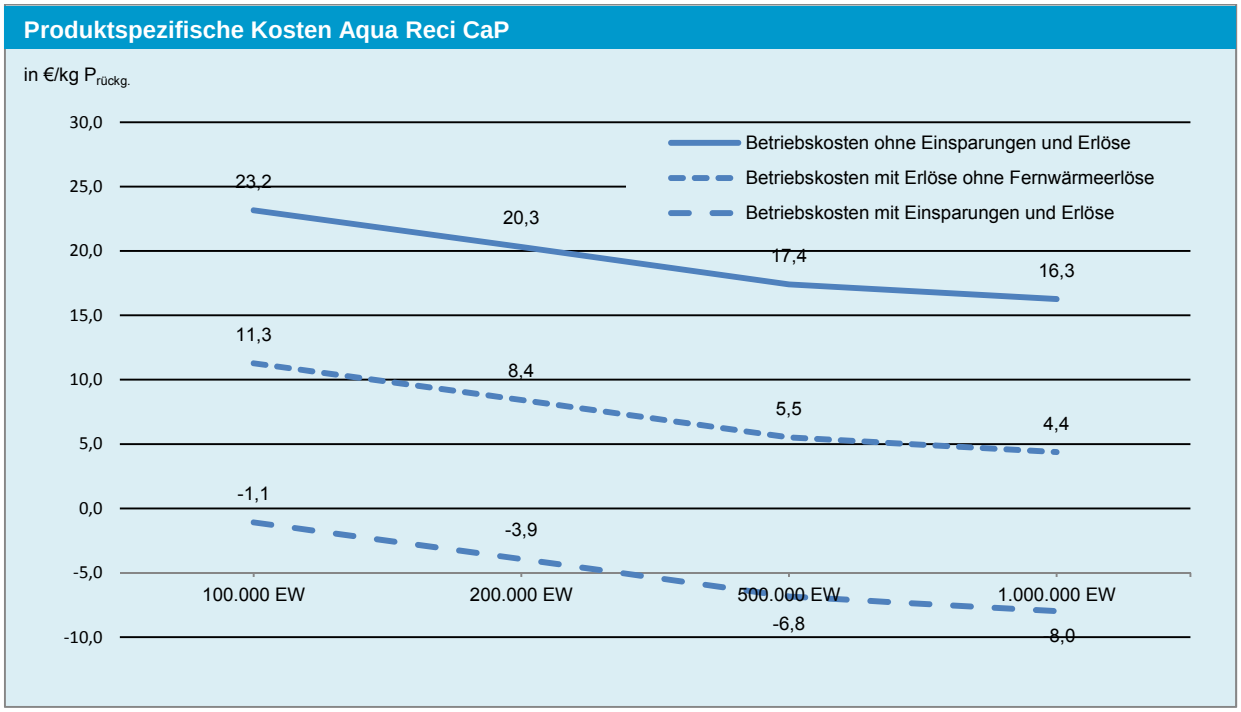


Abbildung 23: Einwohnerspezifische Kosten Aqua Reci® CaP; Variation Anlagengröße inkl. Einsparungen und Erlöse

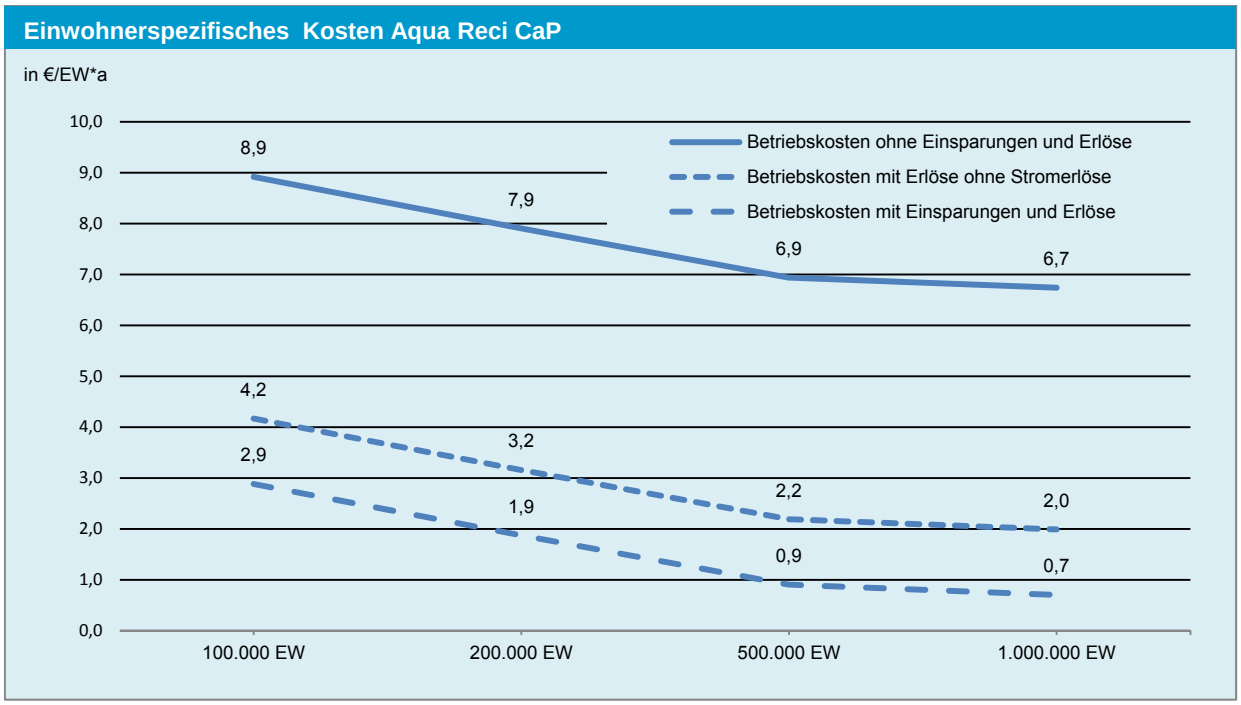


Abbildung 24: Einwohnerspezifische Kosten Aqua Reci® CaP; Variation Anlagengröße inkl. Einsparungen und Erlöse

1.3.4.4 Kostenaufgliederung

Anhand der Kostenaufgliederung wird deutlich, dass trotz der hohen Investitionskosten, die Kosten für Rohstoffe, vor allem Energie, die Gesamtkosten dominieren und damit auch hauptverantwortlich für den unwirtschaftlichen Betrieb in Hinblick auf die P-Rückgewinnung ist. Im Fall des Einsatzes eines größeren Superkritischen Wasseroxidationsreaktors kann der Anteil der Kapitalkosten nur geringfügig von 39 auf 33 % reduziert werden.

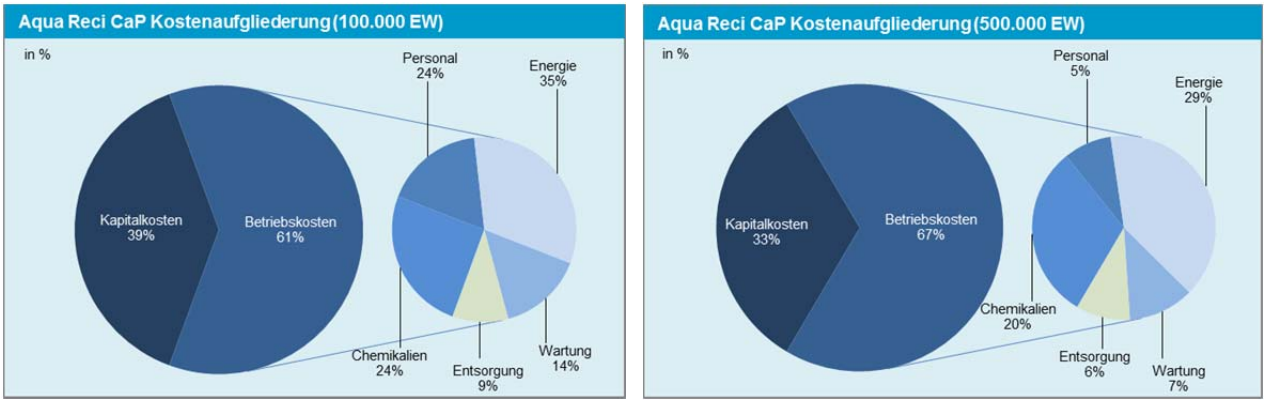


Abbildung 25: Kostenaufgliederung Aqua Reci® 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)

1.3.4.5 Amortisation

Ob eine Amortisation möglich ist, ist von der Nutzung der entstehenden Wärme abhängig. Ist dies der Fall sind Amortisationszeigen nach Tabelle 25 möglich. Ohne eine Nutzung (Verkauf) der Wärme ist eine Amortisation der Anlage unter keinen Umständen möglich

Anlagengröße	Amortisationszeit [a]
100.000 EW	7-8
200.000 EW	5-6
500.000 EW	3-4
1.000.000 EW	3-4

Tabelle 25: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße

1.3.4.6 Kosten gesamte Prozesskette

Die Umsetzung des Aqua Reci® Verfahrens hat in erster Linie positiven Einfluss auf die Schlammbehandlung. Aufgrund der nahezu vollständigen Oxidation der organischen Substanz des Klärschlammes fällt eine Asche die, die ohne weitere Behandlung auf einer Reststoffdeponie abgelagert werden kann. Das bedeutet, dass keine kostenintensive Verbrennung, sowie die Entsorgung der anfallenden Filterkuchen und die höheren Transportkosten aufgrund der größeren Volumenströme z.B. aufgrund des Wassergehaltes im Schlamm nötig sind. Unter der Berücksichtigung der Einsparungen aufgrund der entfallenden Klärschlammverbrennung, dem Verkauf des CaP und dem Erlös aus dem Wärmeenergieverkauf liegen die Kosten bei Betrachtung der gesamten Prozesskette für das Aqua Reci® Verfahren mit 9,5 €/a um 15 % unter den Kosten der Referenzsituation. Ob die Erlöse aus dem Wärmeenergieverkauf tatsächlich miteingerechnet werden, sollte noch diskutiert werden. Diese machen rund 5,0 €/EW*a der Einsparungen aus. Im Fall einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit größerer Belastung, ist aufgrund der proportional geringeren Investitionskosten eine Reduktion der Kosten im Vergleich zur Referenzsituation von bis zu -36 % 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	8,83	7,68	6,50
Thermische Schlammbehandlung	-	-	-
Entsorgung			
Fest-Reststoff Aqua Reci Prozess	0,56	0,56	0,56
Sonstiges Abfälle	-	-	-
Transport			
Fest-Reststoff zu Deponie	0,16	0,16	0,16
Summe Kosten	15,55	14,40	13,22
Einsparungen und Erlöse			
Verkauf CaP	1,06	1,06	1,06
Erlös Fernwärme	5,01	5,01	5,01
Summe Einsparungen und Erlöse	6,07	6,07	6,07
Gesamtkosten	9,48	8,33	7,15
Δ zu Referenz	**-15%**	**-25%**	**-36%**

Tabelle 26: Jahreskosten gesamte Prozesskette Aqua Reci®

Kläranlage	Mit-verbrennung	Aqua Reci®	Entsorgung Asche, SM-Schlamm	Transport	Einsparungen Energie, Reststoffentsorgung, Verkauf MAP
6,0 €	0,0 €	8,8 €	0,6 €	0,2 €	6,1 €
Gesamt: 9,5 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: - 1,6 €/EW*a; Δ %: -15 %					

Abbildung 26: Kosten gesamte Prozesskette Aqua Reci® Verfahren 100.000 EW Anlage

Kläranlage	Mit-verbrennung	Aqua Reci®	Entsorgung Asche, SM-Schlamm	Transport	Einsparungen Energie, Reststoffentsorgung, Verkauf MAP
6,0 €	0,0 €	6,5 €	0,6 €	0,2 €	6,1 €
Gesamt: 7,2 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: - 4,0 €/EW*a; Δ %: - 36 %					

Abbildung 27: Kosten gesamte Prozesskette Aqua Reci® Verfahren 500.000 EW Anlage

1.3.4.7 Amortisation

Eine mögliche Amortisation ist stark von den tatsächlichen möglichen Erlösen abhängig. Das bedeutet, dass z.B. ohne Erlöse aus der Wärmerzeugung keine Amortisation möglich ist. Somit sind die möglichen Szenarien mit solchen Unsicherheiten behaftet, dass keine verlässliche Aussage zu einer möglichen Amortisation getroffen werden kann.

1.3.5 Literatur

Guibelin, E. (2004) Sludge thermal oxidation processes: mineral recycling, energy impact, and greenhouse effect gases release. Water Science and Technology 49 (10), pp. 209-216.

Levlin, E., Löwén, M., Stark, K. (2004) Phosphorus recovery from sludge incineration ash and supercritical water oxidation residues with use of acid and base. Publication of Department of Land and Water Resource Engineering. Royal Institute of Technology, Stockholm.

Levlin, E. (o.J) Phosphorus recovery from sewage sludge - Two-step leaching process with acid and base. Dep. of Land Water Resources Engineering. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Römer, W. (2006) Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. Volume 169, pp.826-832.

Shanableh, A., Shimizu, Y. (2000) Treatment of sewage sludge using hydrothermal oxidation-technology application challenges. Water Science and Technology 41, pp. 85-92.

Stark, K., Plaza, E. Hultman, B. (2006) Phosphorus release from ash, dried sludge and sludge residue from supercritical water oxidation by acid or base. Chemosphere 62, pp. 827-832.

Stendahl, K., Jäfverström, S. (2003) Phosphate recovery from sewage sludge in combination with supercritical water oxidation. Water Science and Technology Vol 48, No1, pp. 185-191.

Stendahl, K., Jaäfverstroöm, S. (2004) Recycling of sludge with the Aqua Reci process. Water Science and Technology 49, pp. 233-240.

Stenmark, L. (2003) Supercritical fluid technologies within Chematur Engineering AB. Presented at the 3rd Disposal Conference, Karlskoga, Sweden, November 10-11, 2003.

Svanström, M., Fröhling, M., Modell, M., Peter, W.A., Tester, J. (2004) Environmental assessment of supercritical water oxidation of sewage sludge. Resource, Conservation and Recycling 41 (4). pp. 321-338.

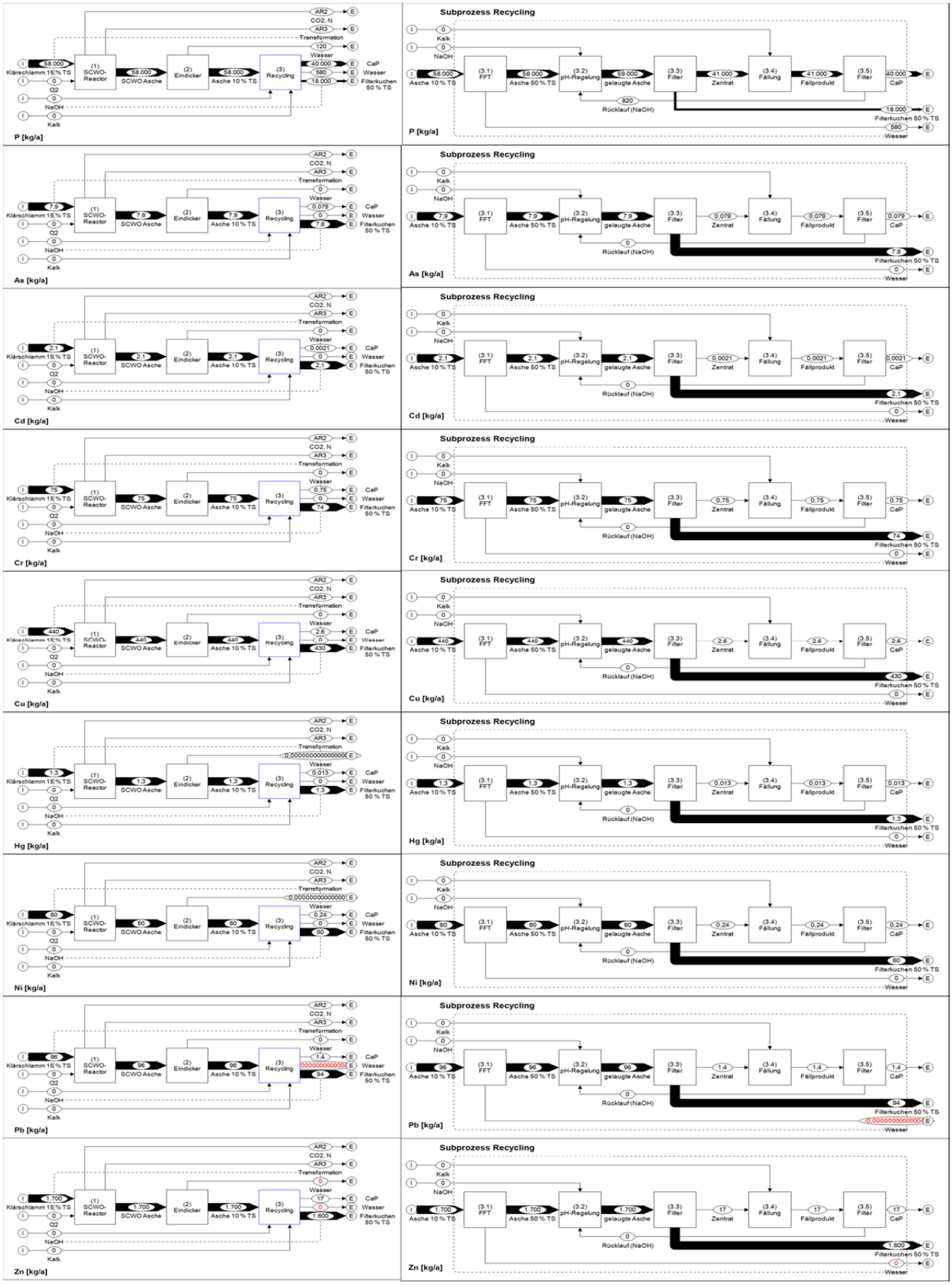
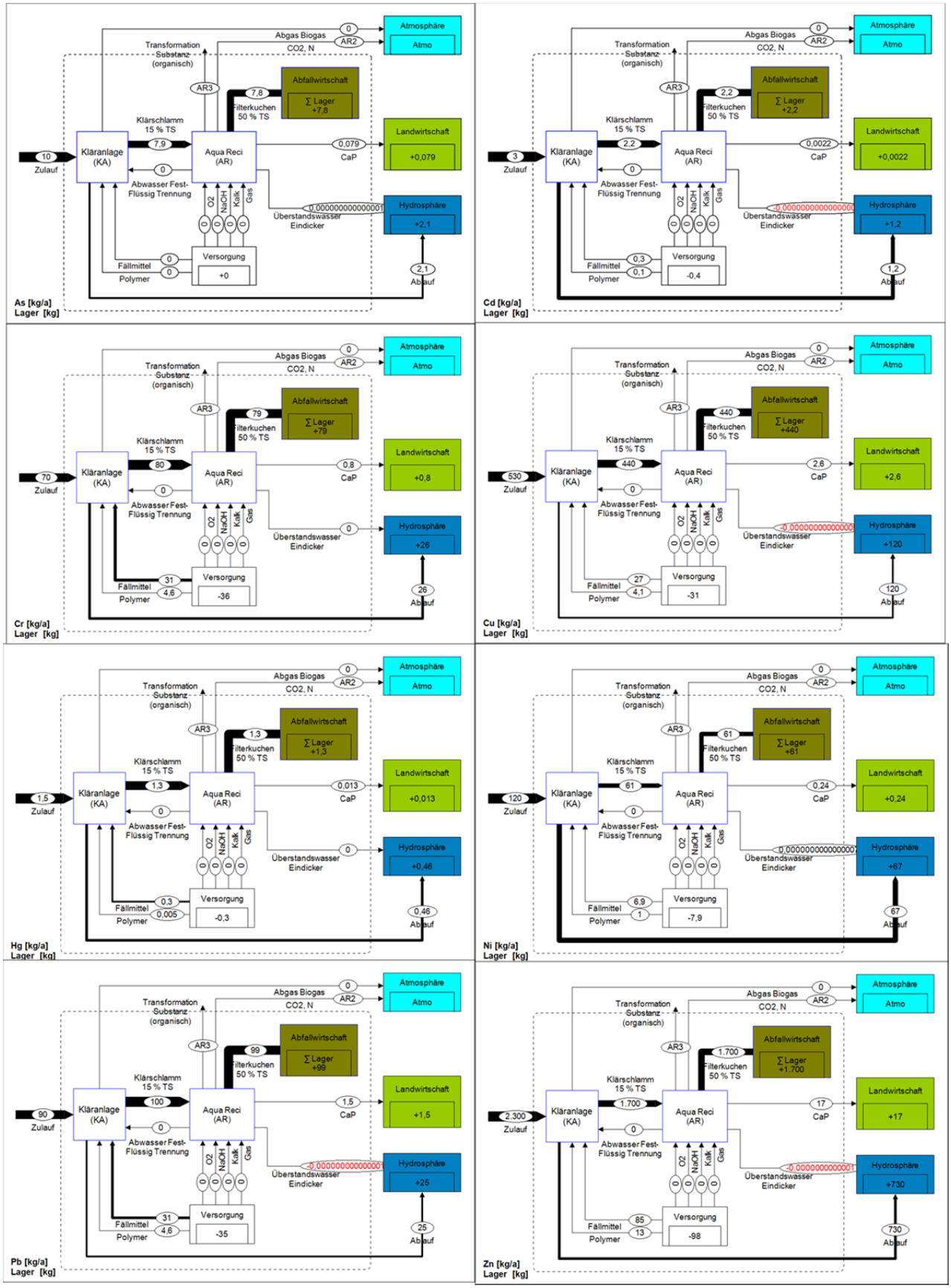
Svanström, M., Fröhling, M., Modell, M., William, A. P., Jefferson, T. (2004) Direct energy recovery from primary and secondary sludges by supercritical water oxidation. Water Science and Technology 49, pp. 201-208.

Veriansyah, B., Kim, J.D. (2007) Supercritical water oxidation for the destruction of toxic organic wastewaters: A review. Journal of Environmental Sciences 19. pp. 513-522.

Zhu, W., Xu, Z.R., Li, L., He., C. (2011) The behavior of phosphorus in sub- and super-critical water gasification of sewage sludge. Chemical Engineering Journal 171, pp. 190-196

1.4 Anhang

1.4.1 Stoffflussanalyse Aqua Reci®



1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess Aqua Reci®