

# Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

## Thermphos®





## Inhaltsverzeichnis

Thermphos®.....	5
1.1 Grundlagen allgemein .....	5
1.1.1 Prozessskizze Thermphos®.....	5
1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell.....	6
1.1.3 Verfahrensbeschreibung .....	7
1.2 Datengrundlage für Bewertung.....	8
1.2.1 Sachbilanz .....	8
1.2.2 Stoffflussanalyse.....	8
1.2.3 Charakteristik Endprodukt .....	10
1.2.4 Umsetzung.....	10
1.2.5 Flächenbedarf.....	10
1.2.6 Ökonomische Grundlagen.....	11
1.3 Ergebnis Thermphos® Verfahren.....	11
1.3.1 Technologie Bewertung .....	11
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren) .....	11
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung Thermphos .....	16
1.3.4 Ökonomische Bewertung .....	19
1.3.5 Literatur.....	20
1.4 Anhang .....	22
1.4.1 Stoffflussanalyse Thermphos®.....	22
1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess Thermphos® .....	24

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessskizze Thermphos® mit Ascheaufbereitung .....	5
Abbildung 2: Prozessskizze Thermphos® Verfahren STAN-Modell .....	6
Abbildung 3: Prozessskizze Thermphos® Verfahren STAN-Modell gesamte Prozesskette .....	6
Abbildung 4: Schema Lichtbogenofen (Adam, 2013).....	7
Abbildung 5: P-Stoffflussanalyse Thermphos® (2 signifikante Stellen) .....	12
Abbildung 6: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette .....	12
Abbildung 7: Entfrachtungsleistung (Endprodukt:Asche).....	12
Abbildung 8: Ergebnis Güterflussanalyse Thermphos® .....	13
Abbildung 9: Vergleich CO <sub>2</sub> - bzw. SO <sub>2</sub> -Äquivalente Thermphos® .....	14
Abbildung 10: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren).....	15
Abbildung 11: Einwohnerspezifischer kumulierter Energieaufwand in kg/EW*a für das Thermphos® Verfahren.....	17
Abbildung 12: Einwohnerspezifischer kumulierter Energieaufwand Thermphos® .....	17
Abbildung 13: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation .....	18
Abbildung 14: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (Thermphos®) .....	18



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chemikalien- und Sauerstoffbedarf unterschiedliche Datengrundlage .....	8
Tabelle 2: Energiebedarf (Strom und Gas) unterschiedliche Datengrundlage .....	8
Tabelle 3: Schmelz und Siedepunkte ausgewählter Schwermetalle.....	9
Tabelle 4: Transferkoeffizienten Thermphos® Trocknen und Sintern .....	9
Tabelle 5: Transferkoeffizienten Thermphos® elektrothermischer Prozess .....	9
Tabelle 6: Transferkoeffizienten Elektrofilter .....	10
Tabelle 7: Transferkoeffizienten Thermphos® Rauchgasreinigung.....	10
Tabelle 8: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Thermphos® .....	11
Tabelle 9: Ressourcenbedarf Thermphos® .....	13
Tabelle 10: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf Thermphos®.....	13
Tabelle 11: Spezifischer Energiebedarf Thermphos® .....	13
Tabelle 12: Indirekte SM-Emissionen Thermphos®.....	15
Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand Thermphos® .....	15
Tabelle 14: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Thermphos .....	16
Tabelle 15: Transportwege Thermphos®.....	16
Tabelle 16: CO <sub>2</sub> bzw. SO <sub>2</sub> -Äquivalente Prozesskette Thermphos.....	16
Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette .....	17
Tabelle 18: Jahreskosten Thermphos® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche) .....	19
Tabelle 19: Einsparungen und Erlöse Thermphos® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche) .....	19
Tabelle 20: Spezifische Kosten Thermphos® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche) .....	19
Tabelle 21: Jahreskosten gesamte Prozesskette Mineraldüngerherstellung.....	20

## 1.1 Grundlagen allgemein

### 1.1.1 Prozessskizze Thermphos®



### 1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell

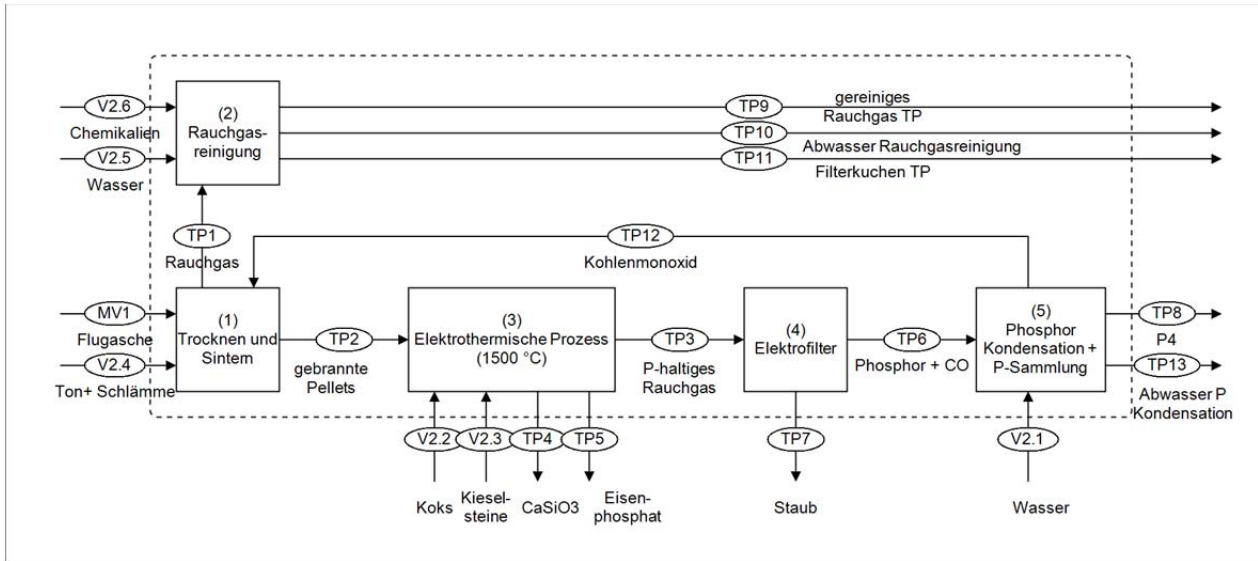


Abbildung 2: Prozessskizze Thermphos® Verfahren STAN-Modell

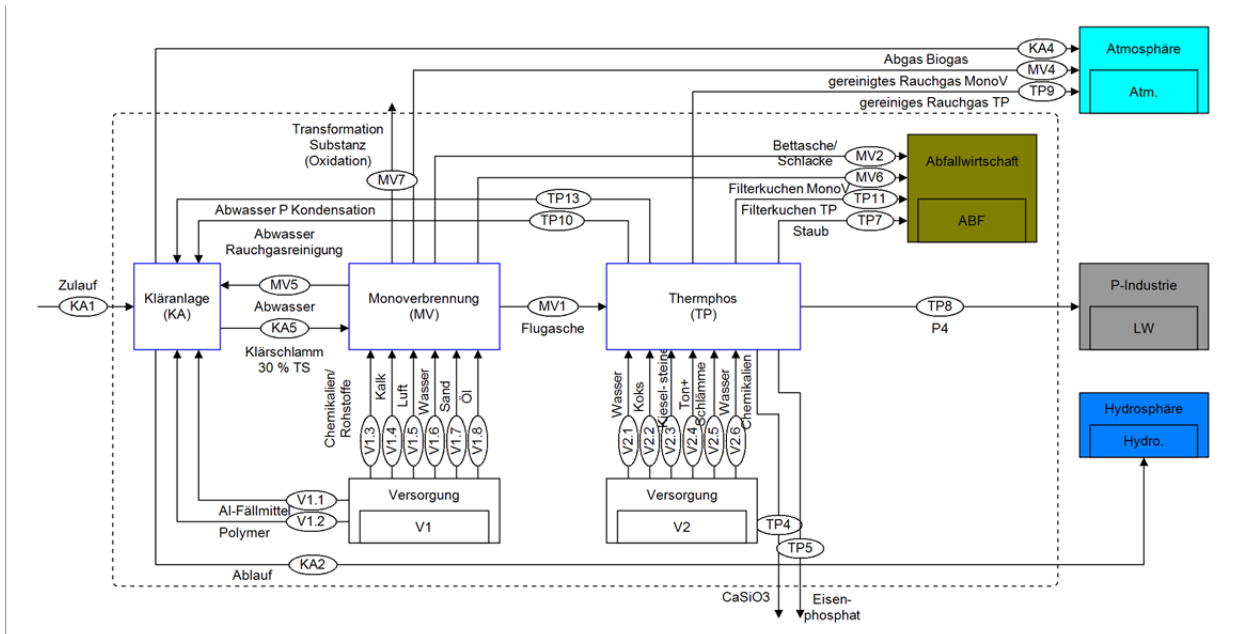


Abbildung 3: Prozessskizze Thermphos® Verfahren STAN-Modell gesamte Prozesskette





### 1.1.3 Verfahrensbeschreibung

#### Trocknen und Sintern (1)

Zusammen mit nassgranuliertem Phosphaterz wird die Klärschlammmasche getrocknet und gesintert. Die Sinterung erfolgt mit CO-Brennern mit dem Ziel der staufreien Weiterverarbeitung der entstehenden Pellets. Vor der eigentlichen Sinterung werden z.B. Tone und Schlämme beigemischt.

#### Rauchgasreinigung (2)

Die entstehenden Rauchgase werden über eine Rauchgasreinigung, bestehend aus einer Gaswäsche bzw. Sprühabsorber, geleitet. Die Reinigung erfolgt über die Zugabe von Kalkhydrat. Als Abfallprodukte fallen Filterkuchen und Abwasser an, die weitere Behandlungsschritte benötigen. Das gereinigte Rauchgas wird als Abluft in die Atmosphäre emittiert.

#### Elektrothermischer Prozess (3)

Die Pellets werden mit Koks (Reduktionsmittel) und Kieselsteinen ( $\text{SiO}_2$ -Quelle für Schlackenbildung) vermischt und dem Lichtbogenofen (Abbildung 4) zugeführt. Der Ofen wird mit einer elektrischen Widerstandsheizung auf  $1.500^\circ\text{C}$  erhitzt. Phosphate werden bei diesen Temperaturen zu reinem  $\text{P}_4$  reduziert. Zusammen mit Kohlenmonoxid und Staub verlässt der Phosphor gasförmig den Ofen. Anfallende Calcium-Silikat Schlacken ( $\text{CaSiO}_3$ ) können bzw. werden im Straßenbau eingesetzt. Phosphaterze enthalten zudem unerwünschtes Eisen, das bei diesen Temperaturen ebenso reduziert wird und als Schlacke in Form von Eisenphosphaten anfällt. Eisenphosphate enthalten 75 % Eisen, 25 % Phosphor und geringe Anteil an anderen Metallen.



Abbildung 4: Schema Lichtbogenofen (Adam, 2013)

Diese Eisenphosphor-Schlacke wird als Zuschlagstoff in der Stahlindustrie eingesetzt. Die Schwermetalle Cd, Pb und Zn sind im Rauchgas nachweisbar, Cu in der Eisenphosphatschlacke (Schipper, 2007; Schipper, 2012). Aufgrund der niedrigen Siedepunkte von As ( $613^\circ\text{C}$ ) und Hg ( $356^\circ\text{C}$ ) sind diese Schwermetalle mit hoher Wahrscheinlichkeit auch im Rauchgas nachweisbar. Cr und Ni mit ähnlich hohen Siedepunkten wie Cu ( $2600 - 2750^\circ\text{C}$ ) werden mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Eisenphosphatschlacke angereichert.

#### Elektrofilter (4)

Das P-haltige Rauchgas wird durch einen Elektrofilter geleitet und der Staub aus dem Rauchgas entfernt. Der überwiegende Anteil der Schwermetalle ist an die Staubpartikel gebunden und wird somit größtenteils entfernt. Die anfallenden Stäube werden im Prozess recyclet. Problematisch ist eine kontinuierliche Anreicherung der flüchtigen Schwermetalle im Prozess, die eine regelmäßige und kostenintensive Säuberungen erfordern (Schipper, 2007).

#### P-Kondensation (5)

Im Anschluss an den Elektrofilter wird der Phosphor kondensiert und als  $\text{P}_4$  in Wasser gelagert.

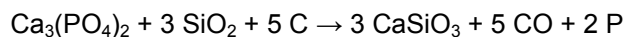
## 1.2 Datengrundlage für Bewertung

### 1.2.1 Sachbilanz

Für die Bewertung des Verfahrens liegen Daten von Schipper (2012) vor, die herangezogen werden können. In keinem Prozess sind Veränderungen hinsichtlich des Ressourcen- und Energiebedarfs durch die Nutzung von Klärschlammasche als Sekundärressource zu erwarten (Schipper, 2012). Der Ressourcenbedarf kann zum einen in den Sinterungsprozess und den Brennprozess mit anschließender P-Aufbereitung untergliedert werden.

Für die Herstellung von 1 kg Sinter wird 0,007 kg Gas benötigt (+) (GEMIS, Aufbereitung\Sinter-DE-2010).

Der Ressourcenaufwand für die elektro-thermisch Behandlung des gesinterten Ausgangsmaterials kann aus der folgenden Reaktionsgleichung abgeleitet werden (+).



Ressource	[kg/kg Asche)
Natürliches Gas	0,0078
Tone	0,10
Koks	0,072
Quarz	0,22
Wasser	0,14

Tabelle 1: Chemikalien- und Sauerstoffbedarf unterschiedliche Datengrundlage

Daraus können für die Herstellung von 1 kg Phosphor folgende Frachten abgeleitet werden:

- ~1 - 1,1 kg Koks (+)
- 2,9 - 3,3 kg Quarzkies (+)

Für die Lagerung eines Kilogramm reinen Phosphors werden 2 L Wasser angenommen.

Der Strombedarf zur Sinterung liegt bei 0,014 kWh/kg Asche, der Gasbedarf bei 0,097 kWh/kg Asche. Für den reduzierenden elektro-thermischen Prozess werden 0,93 kWh/kg Asche angesetzt. Umgerechnet auf 1 kg P kann ein energetischer Bedarf von ~ 13 kWh/kg P (+) errechnet werden (Hirschberg, 1999; Schipper, 2007)

Energie	kWh/kg Asche
Gas	0,097
Strom Sinterung	0,014
Strom elektrothermischer Prozess	0,93

Tabelle 2: Energiebedarf (Strom und Gas) unterschiedliche Datengrundlage

### 1.2.2 Stoffflussanalyse

Auf Basis von Angaben von Schipper (2012) können grobe und teilweise ungenaue Stoffflussanalysen für Phosphor und die ausgewählten Schwermetalle erstellt werden. Während der Pfad des Phosphors auf Basis der vorliegenden Daten gut nachgebildet werden kann, sind die Transferkoeffizienten der Schwermetalle aufgrund fehlender Erhebungen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet (o/-). 4-5 % des Phosphors wird über die entstehende Silikat-Schlacke und rund 1 % über das Eisenphosphat aus dem Prozess ausgeschleust. Der Verlust über das Eisenphosphat hängt mit dem Input an Eisen in der Asche zusammen. Die restlichen Verluste sind vernachlässigbar, womit der Wirkungsgrad bei rund 95 % liegt. Zu einzelnen Schwermetallen liegen von Schipper (2007) folgende Informationen vor:

**Eisen:** Einbindung in die Eisenphosphatschlacke

**Cd:** Wird verflüchtigt und reichert sich im Staub an. Probleme bei der Kreislaufführung der Stäube. Säuberungsaktionen sind notwendig.

**Cu:** Überwiegend im Eisenphosphat zu finden

**Hg:** sowieso kaum in der Asche vorhanden, keine Problematik im Prozess

**Pb:** Wird verflüchtigt und reichert sich im Staub an. Probleme bei der Kreislaufführung der Stäube. Säuberungsaktionen sind notwendig.





**Zn:** Wird verflüchtigt und reichert sich im Staub an. Probleme bei der Kreislaufführung der Stäube. Säuberungsaktionen sind notwendig.

Anhand recherchierter Siedepunkte der Metalle kann eine ungefähre Aussage getroffen werden, ob sie z.B. während des elektrothermischen Prozesses bei 1.500°C in die Gasphase gehen oder über das Eisenphosphat bzw. die Silikat-Schlacke ausgeschieden werden. Grün markierte Schwermetalle werden überwiegend über die entstehende Schlacke ausgeschieden, weil deren Siedepunkt über der Prozesstemperatur von 1.500 °C liegt. Nicht markierte Schwermetalle gelangen mit wahrscheinlich in das Rauchgas und werden über die Elektrofilter abgeschieden.

	Schmelztemperatur [°C]	Siedetemperatur [°C]
As	-	613
Cd	321	767
Cr	1.907	2.671
Cu	1.084	2.627
Hg	-38,8	356,7
Ni	1.455	2.730
Pb	327	1.749
Zn	419	907

Tabelle 3: Schmelz und Siedepunkte ausgewählter Schwermetalle

#### Transferkoeffizienten (TK) Sinterung

	Gebrannte Pellets	Rauchgas	UL
P	99	1	1,5
As	100	0	1,5
Cd	100	0	1,5
Cr	100	0	1,5
Cu	100	0	1,5
Hg	100	0	1,5
Ni	100	0	1,5
Pb	100	0	1,5
Zn	100	0	1,5

Tabelle 4: Transferkoeffizienten Thermphos® Trocknen und Sintern

#### Transferkoeffizienten Elektrothermischer Prozess

	P-haltiges Rauchgas	Silikatschlacke [CaSiO <sub>3</sub> ]	Eisenphosphat [FeP-Schlacke]	UL
P	95	4	1	2
As	98	1	1	2
Cd	98	1	1	2
Cr	5	5	90	2
Cu	5	5	90	2
Hg	90	5	5	2
Ni	5	5	90	2
Pb	98	1	1	2
Zn	98	1	1	1,5

Tabelle 5: Transferkoeffizienten Thermphos® elektrothermischer Prozess

### Transferkoeffizienten Elektrofilter

	Staub	Gereinigtes Rauchgas [Phosphor + CO]	UL
P	1	99	1
As	99	1	2
Cd	99	1	2
Cr	99	1	2
Cu	99	1	2
Hg	99	1	2
Ni	99	1	2
Pb	99	1	2
Zn	99	1	2

Tabelle 6: Transferkoeffizienten Elektrofilter

### Transferkoeffizienten Phosphor Kondensation + P-Sammlung

	P <sub>4</sub>	Abwasser P Kondensation	UL
P	99,9	0,01	1,5
As	0	100	1,5
Cd	0	100	1,5
Cr	0	100	1,5
Cu	0	100	1,5
Hg	0	100	1,5
Ni	0	100	1,5
Pb	0	100	1,5
Zn	0	100	1,5

Tabelle 7: Transferkoeffizienten Thermphos® Rauchgasreinigung

### 1.2.3 Charakteristik Endprodukt

Endprodukt ist Phosphor in seiner elementaren Form (Weißer P<sub>4</sub>) mit einer Reinheit von 99,99 %. Weißer Phosphor ist sehr flüchtig und muss daher unter Wasser gelagert werden. Der reine Phosphor wird zu den gewünschten Produkten weiterverarbeitet. P<sub>4</sub> ist nicht zur Düngung gedacht und wird auch nicht zu Düngemitteln weiterverarbeitet. Das Thermphos Verfahren ist daher kein Recyclingverfahren mit dem Ziel der Verwertung des Endproduktes in der Landwirtschaft.

#### 1.2.3.1 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus Thermphos® Verfahren

Der bei der Rauchgasreinigung anfallenden Filterkuchen muss untertägig abgelagert werden (+). Aufgrund der hohen Schwermetallkonzentration wäre auch eine Verwertung der Filterstäube als Sekundärrohstoff in Kupfer- oder Zinkhütten anzudenken. Bei der Bewertung wird davon ausgegangen, dass die Filterstäube sachgerecht untertägig Deponiert werden. Möglich ist auch anfallendes Abwasser, welches bei der Rauchgasreinigung anfällt. Dieses müsste einer Kläranlage zugeführt werden.

### 1.2.4 Umsetzung

Der elektrothermische Prozess ist ein erprobter und weltweit eingesetzter Prozess zur Reduktion verschiedenster Stoffe. Die Gewinnung von P<sub>4</sub> aus der Klärschlammasche war bei der Firma Thermphos® allerdings einzigartig. Diese Form der P-Nutzung aus der Asche wurde mit der Insolvenz des Unternehmens allerdings eingestellt (+).

### 1.2.5 Flächenbedarf

Nicht bekannt



### 1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Zu den Kosten liegen keine Daten vor, weshalb auch keine ökonomische Bewertung des Thermphos® Prozesses möglich ist. Bekannt ist Preis für den reinen weißen Phosphor ( $P_4$ ), der allerdings stark von den Marktpreisen für Rohphosphate abhängig ist und gegenwärtig (2013) im Bereich von 1,9-2,8 €/kg liegt (o).

## 1.3 Ergebnis Thermphos® Verfahren

### 1.3.1 Technologie Bewertung

Das Thermphos® Verfahren ist eine Technologie die an zentralen Standorten zur Rückgewinnung von P aus der Klärschlammasche und weiterer P-reicher Aschen eingesetzt werden kann. Hinsichtlich der Komplexität, kann der thermochemische Prozess mit nachgeschalteter erforderlicher Rauchgasreinigung als sehr komplex eingestuft werden. Dieser technologische Ansatz wurde bereits als Pilotanlage errichtet und bereits ein handelsfähiger Dünger erzeugt. Eine großtechnische Anlage ist in Planung. Aufgrund des Einsatzes nach der Monoverbrennung, hat diese Technologie keinen Einfluss auf die Prozesse der Abwasserreinigung bzw. ist auch keine Veränderung der weiterführenden Prozesse notwendig. Das Rückgewinnungspotential der Technologie ist sehr hoch (98-100 %) und liegt damit bezogen auf den Kläranlagenzulauf bei rund 85 %.

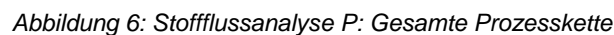
Thermphos® Verfahren	
Entwicklungsstand	Großtechnisch (weltweit mehrfach)
Komplexität Technologie	Thermoelektrisch, P-Kondensation, Rauchgasreinigung
Implementierung	Al-arme Klärschlammasche
Wartungsaufwand	mäßig
Veränderung Schlammbehandlung	keine
Effektivität des Verfahrens	~95 %
Potential bezogen auf KA-Zulauf	83 %
Qualitativer Ressourcenaufwand	Koks, Siliziumquelle (Quarz), Wasser, Energie (elektrisch, Erdgas)
Abfallstoffe	Stäube, Schlacken, Eisenphosphat, Abwasser
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 8: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Thermphos®

### 1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

#### 1.3.2.1 Stoffflussanalyse P

Das Thermphos® Verfahren hat im Vergleich zu Rückgewinnungsverfahren aus dem Schlammwasser oder dem Klärschlamm keinen Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess. Die Wiederfindungsrate des Phosphors aus der Flugasche in der entfrachteten Asche liegt bei > 98 %. Das P-Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf liegt bei 85 % bei damit bei 56.000 kg/a. Hinsichtlich der Masse entspricht die entfrachtete Asche in etwa dem Masseninput aus der Flugasche, womit auch der P-Gehalt bei einer ähnlichen Konzentration wie in der Flugasche liegt (ca. 8,5 %).



Auf Basis der Stoffflussanalyse für die Schwermetalle und der in Kapitel 1.2.2 erhobenen Transferkoeffizienten kann gleichzeitig die Entfrachtungsleistung dieser Technologie in Bezug auf die Klärschlammmasche ermittelt werden. Bereits in der Verbrennung erfolgt eine vollständige Zerstörung der organischen Spurenstoffe.

Abbildung 7: Entfrachtungsleistung (Endprodukt:Asche)



### 1.3.2.3 Ergebnisse Güterflussanalyse

Der Gesamt-Ressourcenbedarf sowie der produkt-bzw. einwohnerspezifische Ressourcenbedarf für den Einsatz des Thermphos® Verfahrens auf Basis der Referenzkläranlage kann aus den folgenden Tabellen entnommen werden.

Thermphos®	Kg/a
Ton	67.200
Koks	53.600
Quarz	164.000
Wasser	165.800
<b>Reststoffe</b>	
CaSiO <sub>3</sub> Schlacke	759.000
Eisenphosphat	2.300
Staub, CO	142.000

Tabelle 9: Ressourcenbedarf Thermphos®

	Produktspez. [kg P <sub>rückg.</sub> ]	Einwohnerspez. [EW*a]
Ton	1,24	0,67
Koks	0,99	0,54
Quarz	3,04	1,64
Wasser	2,97	1,65

Tabelle 10: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf Thermphos®

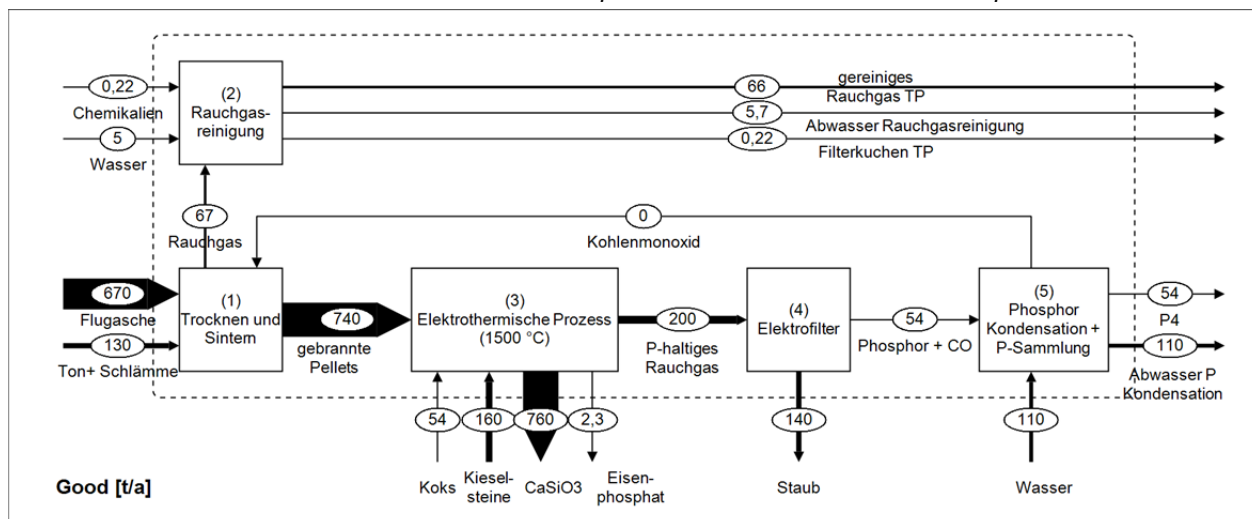


Abbildung 8: Ergebnis Güterflussanalyse Thermphos®

### 1.3.2.4 Ergebnisse Energieflussanalyse

Auf Basis der Herstellerangaben zum Energiebedarf für die anfallende Menge an Referenzklärschlammmasche kann ein elektrischer Energiebedarf im elektrothermischen Prozess von rund 670.000 kWh/a ermittelt werden. Für die Sinterung wird ein Energiebedarf von rund 9.300 kWh/a angesetzt. Der Gasbedarf für die Sinterung wird mit 65.000 kWh/a angenommen (Tabelle 11).

Gas	Produktspez. [kWh P <sub>rückg.</sub> ]	Einwohnerspez. [EW*a]
Sintern	1,22	0,65
<b>Strom</b>		
Sintern	0,17	0,09
Elektrothermischer Prozess	13,00	6,97

Tabelle 11: Spezifischer Energiebedarf Thermphos®

### 1.3.2.5 Ergebnis direkte und indirekte gasförmige Emissionen

Auf Basis der definierten Referenzkläranlage, der Ergebnisse der Güterflussanalyse und der indirekten Emissionen der notwendigen Ressourcen (PROBAS-Datenbank) kann ein jährlicher Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten von 284.000 kg bzw. ein Ausstoß an SO<sub>2</sub>-Äquivalenten von 1.180 kg ermittelt werden. Aus dem Prozess sind direkte gasförmige Emissionen aus der Verbrennung von Erdgas zu berücksichtigen. Die Emissionen bezogen auf 1 kg P<sub>rückg.</sub> werden anhand der jährlichen Emissionen und der rückgewonnenen P-Fracht von 56.200 kg/a errechnet und sind aus Abbildung 9 zu entnehmen.



Abbildung 9: Vergleich CO<sub>2</sub>- bzw. SO<sub>2</sub>-Äquivalente Thermphos®





### 1.3.2.6 Indirekte Schwermetallemissionen Thermphos

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

	Atmosphäre [g/a]	Hydrosphäre [mg/a]
As	0,62	0,003
Cd	0,10	0,007
Cr	0,52	0,007
Cu	-	-
Hg	-	0,004
Ni	1,07	-
Pb	3,3	0,048
Zn	-	-
AOX	-	-
PAK	0,0007	-
PCDD/F	0,000001	-

Tabelle 12: Indirekte SM-Emissionen Thermphos®

### 1.3.2.7 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

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

KEA	[kWh]	[kWh/EW*a]	[kWh/kg P <sub>rückg.</sub> ]
Rohstoffe	1.100.800	11,0	20,5
Energie (Strom und Gas)	1.430.100	14,3	26,7
<b>Gesamt</b>	<b>2.530.900</b>	<b>25,3</b>	<b>47,2</b>

Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand Thermphos®

## Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren

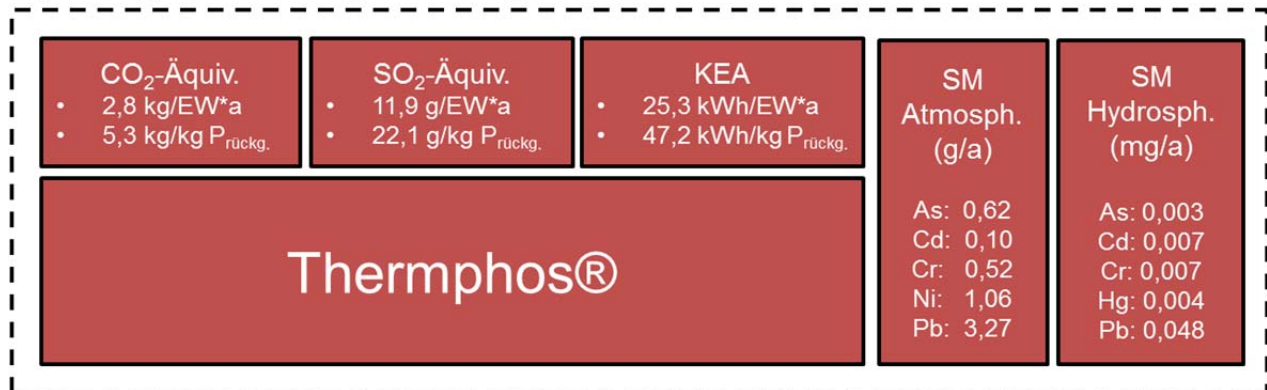


Abbildung 10: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)

### 1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung Thermphos

Da das Thermphos® Verfahren im Anschluss an die Monoverbrennung ansetzt, hat diese Technologie keinen Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess und damit nachfolgende Prozesse die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

Faktor	Einfluss auf
Al-Fällung	Statt Fe-Fällmittel wird Al-Fällmittel eingesetzt. Einfluss auf indirekten Emissionen für die Kläranlage
Ascheannahme	Keine Entsorgung bzw. Deponierung notwendig, Erlöse aus der Ascheannahme
Ressourcenaufwand Thermphos®	Indirekte Emissionen, Kosten
Endprodukt P <sub>4</sub>	Kosten (Erlöse aus dem Verkauf)

Tabelle 14: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Thermphos

#### Berücksichtigung Transport

Die anfallenden Filterstäube aus dem Thermphos Prozess müssen Untertägig abgelagert werden. Ansonsten können die Transportwege auf Basis der Referenzsituation angenommen werden (Tabelle 15).

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€EW*a]
Klärschlamm – MonoV	4.975	696.500	0,97
Flugasche - Rückgewinnung	672	26.900	0,04
Bettasche - Reststoffdeponie	45	4.500	0,01
Filterkuchen MonoV- Untertagedeponie	32	32.000	0,05
Schlacken und Eisenphosphate zu Deponie	762	76.200	0,11
<b>Gesamt Transport</b>		<b>836.100</b>	<b>1,18</b>

Tabelle 15: Transportwege Thermphos®

#### 1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation sind deutliche Steigerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund + 226% zu rechnen. Hauptgrund dafür ist allerdings nicht der Thermphos® Prozess, sondern vielmehr hat der notwendige Umstieg auf ein aluminiumhaltiges Fällmittels Einfluss auf die Emissionen. Könnte das eisenhaltige Fällmittel beibehalten werden, liegen die zusätzlichen CO<sub>2</sub> – Emissionen bei +59 %. Ein ähnliches Bild zeichnet sich bei den SO<sub>2</sub>-Emissionen ab. Die Emissionen liegen durch die Al-Fällung bei +201% im Vergleich zur Referenzsituation. Bei einer Beibehaltung der Eisen-Fällmittel ist mit moderaten Steigerungen von +16 % zu rechnen (Tabelle 16).

CO <sub>2</sub> -Äquivalente [kg/a]	Al-Fällmittel	Fe-Fällmittel
Thermphos	1.347.100	585.100
Referenz	368.600	368.600
Δ	+ 266 %	+ 59 %
SO <sub>2</sub> -Äquivalente [kg/a]		
Thermphos	0,038	0,015
Referenz	0,013	0,013
Δ	+ 201 %	+ 16 %

Tabelle 16: CO<sub>2</sub> bzw. SO<sub>2</sub>-Äquivalente Prozesskette Thermphos

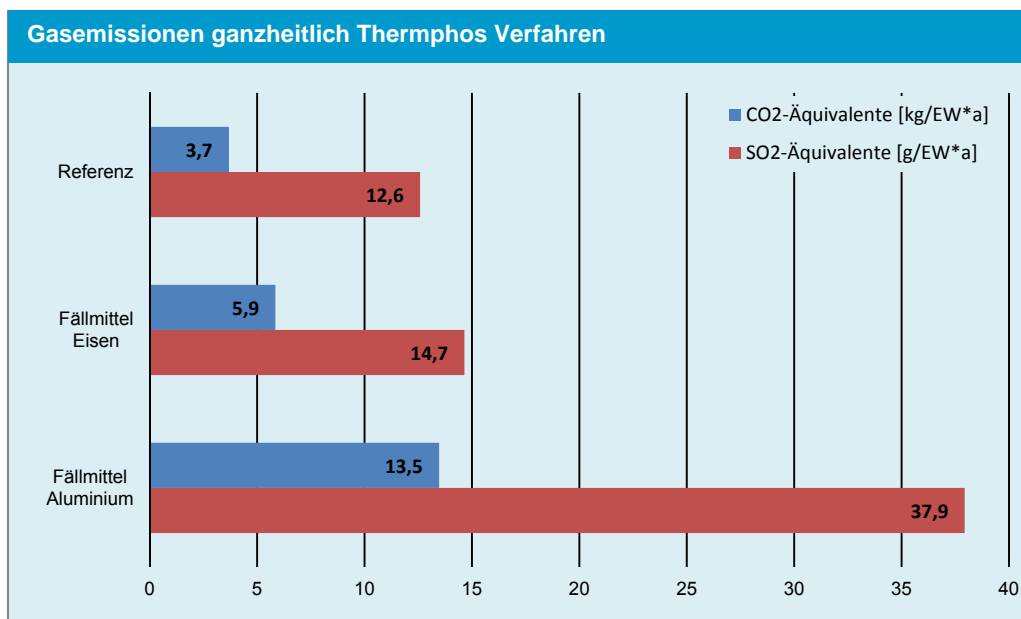


Abbildung 11: Einwohnerspezifischer kumulierter Energieaufwand in kg/EW\*a für das Thermphos® Verfahren

### 1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA [kWh/a]	Al-Fällmittel	Fe-Fällmittel
Thermphos	3.267.600	2.037.100
Referenz	1.131.700	1.131.700
Δ	+ 189 %	+ 80 %

Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

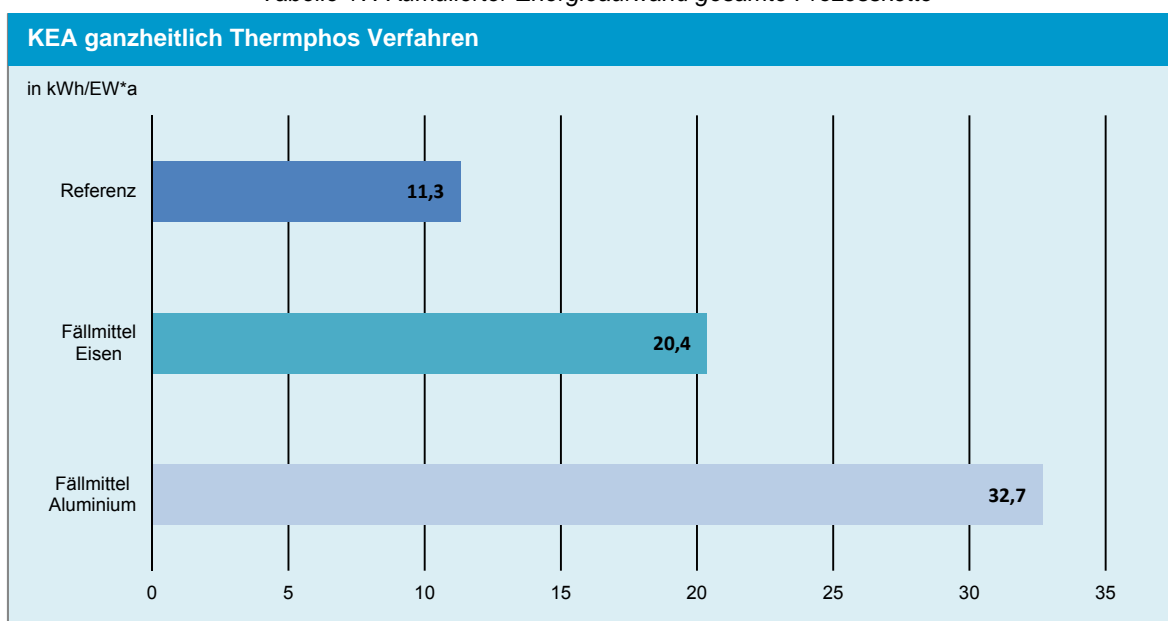


Abbildung 12: Einwohnerspezifischer kumulierter Energieaufwand Thermphos®

In Abbildung 13 werden die ökologisch relevanten Bewertungsparameter CO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen sowie der kumulierte Energieaufwand in Relation zur Referenzsituation zusammenfassend bezogen auf EW\*a dargestellt. Die ökologische Bewertung verdeutlicht, dass infolge der Implementierung des Thermphos® Verfahrens besonders aufgrund der Veränderung der P-Elimination der Kläranlage erhöhte CO<sub>2</sub> bzw. SO<sub>2</sub>-Emissionen zu erwarten sind.

## Systemgrenze gesamte Prozesskette

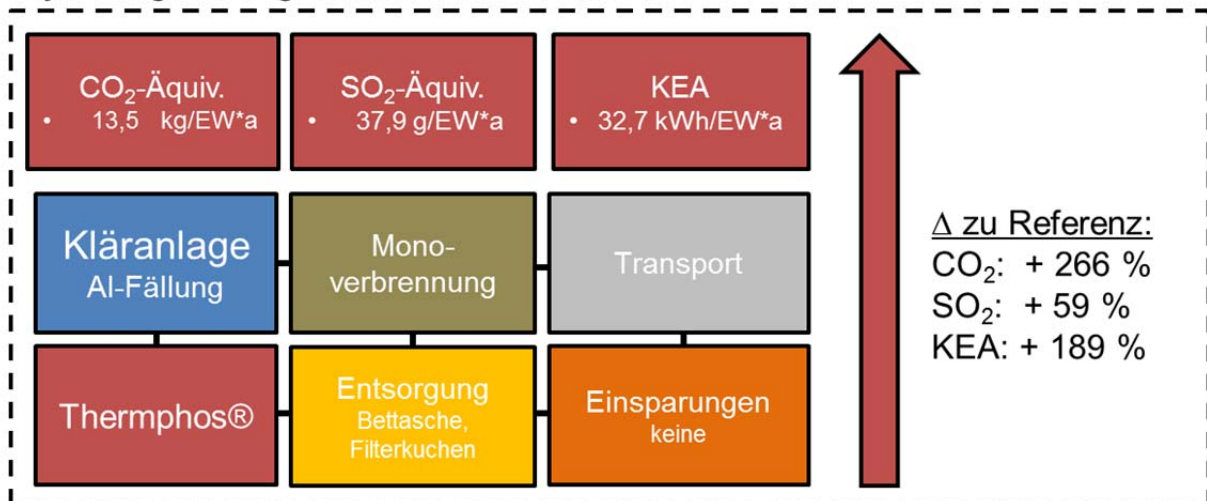


Abbildung 13: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation

## 1.3.3.3 Ergebnisse Stoffflussanalyse Schwermetalle und organische Spurenstoffe

Auf Basis der Stoffflussanalysen können die Pfade von P und den ausgewählten Schwermetallen zu den Zielprozessen nachvollzogen werden (Abbildung 14). Im Vergleich zur Referenzsituation sowohl für die Hydrosphäre, als auch für die Atmosphäre keine erhöhten Schwermetallfrachten zu erwarten. Durch das hochreine Endprodukt (P4: Reinheit 99,99 %) sind vernachlässigbare Frachten im Endprodukt enthalten. Sämtliche Schwermetalle die den Thermphos® Prozess erreichen, werden über den Pfad Abfallwirtschaft in die Deponie. Spurenstoffe sind im Endprodukt nicht nachweisbar, womit auch keine Spurenstoffe über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

## P- und Schwermetallpfade Thermphos Verfahren

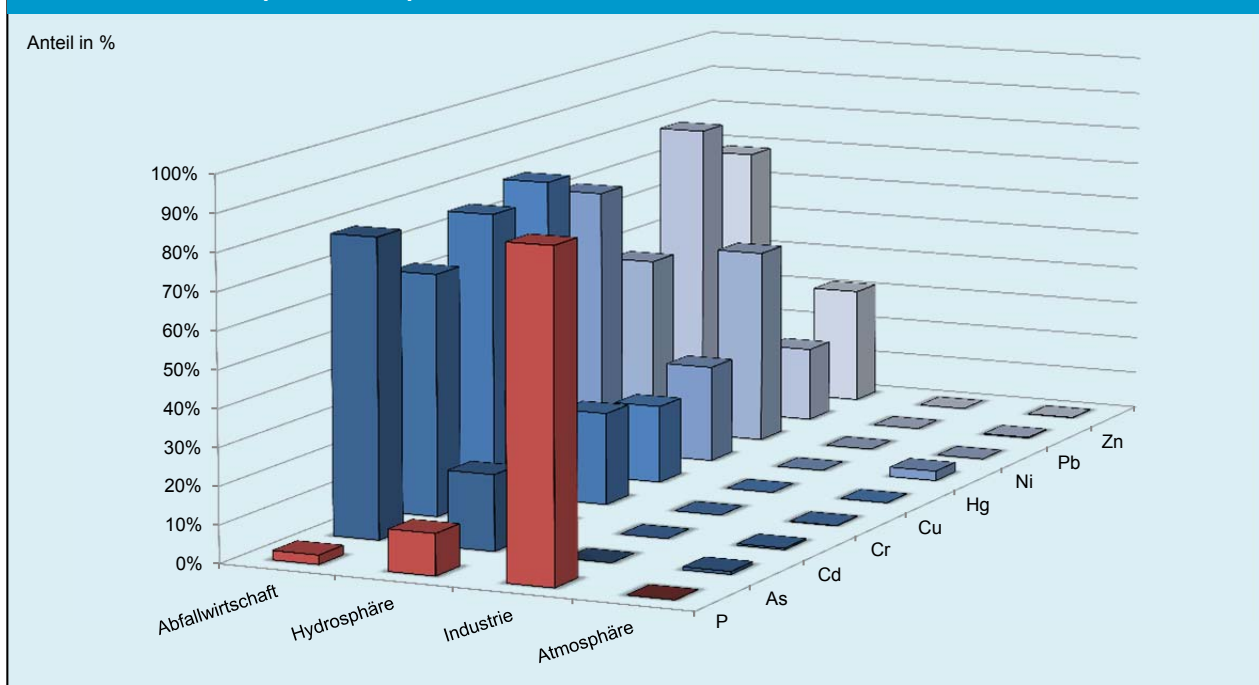


Abbildung 14: P- und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (Thermphos®)

## 1.3.3.4 Ergebnis Endprodukt

Beim Thermphos® Verfahren wird Phosphors in seiner reinsten Form als P<sub>4</sub> hergestellt. Deshalb ist eine Bewertung nach den Kriterien der entwickelten Methodik für dieses Endprodukt nicht möglich.



### 1.3.4 Ökonomische Bewertung

#### 1.3.4.1 Jahreskosten

Für die ökonomische Bewertung werden auf Basis des ermittelten Rohstoffbedarfs die Betriebskosten zur Herstellung eines industriellen Endproduktes ( $P_4$ ) auf Basis der Klärschlammasche berechnet. Da die Klärschlammasche in bestehende industrielle Prozesse eingegliedert wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Kapitalkosten nicht mitberücksichtigt werden müssen. Das bedeutet, dass mit den Betriebskosten gleichzeitig die Jahreskosten berechnet werden. Die Kostenkalkulation wird auf Basis eines jährlichen Durchsatzes von 30.000 t Anlage (= 3.500.000 EW) durchgeführt. Die Kosten für die Betriebsmittel werden auf Basis der Sachbilanz ermittelt. Die Annahme der Erlöse aus dem Verkauf des Endproduktes kann sehr stark schwanken. Grund dafür ist, dass für reines  $P_4$  ein sehr hoher Marktpreis erzielt werden kann (~3.000 €/t) kann. werden auf Basis des P-Gehaltes im Endprodukt unter der Annahme des derzeit marktüblichen P-Preises von 2,5 €/kg P ermittelt. Für die eingesetzte Asche wird ein P-Gehalt von 8,4 % (Referenzklärschlammasche) angenommen. Bei 30.000 t Asche entspricht dies 2.520 t P. Bei Berücksichtigung des Rückgewinnungspotentials von 95 % sind 2.395 t P im Endprodukt wiederzufinden.

Wie bereits erwähnt, können und werden die anfallenden Reststoffe im Straßenbau eingesetzt. Das bedeutet, dass die dafür anfallenden Entsorgungskosten in der aktuellen Kostenkalkulation zwar mitberücksichtigt werden, unter den genannten Umständen jedoch nicht anfallen und damit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens deutlich verbessert.

Jahreskosten	Menge [t bzw. kWh]	Preis/Einheit	€/a
<b>Kapitalkosten</b>			<b>0</b>
Wartung + Reparaturen			0
<b>Sintern</b>			
Strom	416.700	0,1	41.700
Gas	2.916.900	0,035	102.100
<b>Thermoelektrische</b>			
Koks	2.395	360 €/t	862.300
Quarz	7.326	25 €/t	183.100
Wasser	7.190	1,5 €/m³	10.800
Strom	31.138.800	0,1 €/kWh	3.113.900
Personal	5	50.000 €/MA	250.000
Sonstiges	-	-	-
Abwasser	9.200	2 €/m²	18.400
Reststoffe Deponie	35.714	50 €/t	1.785.700
<b>Betriebskosten</b>			<b>6.364.000</b>
<b>Gesamt</b>			<b>6.364.000</b>

Tabelle 18: Jahreskosten Thermphos® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche)

Einsparungen/Erlöse	Menge (t)	Preis/Einheit	€/a
Ascheannahme	30.000	50 €/t	1.500.000
Verkauf $P_4$	2.395	3000 €/t	7.185.900
<b>Gesamt</b>			<b>8.685.900</b>

Tabelle 19: Einsparungen und Erlöse Thermphos® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche)

Spezifische Kosten	Ohne Erlöse	Mit Erlöse Ascheannahme	Mit Produkterlös
€/kg $P_{\text{rückgewonnen}}$	2,7	2,0	-0,3
€/EW*a	1,8	1,4	-0,2
€/E*a	3,6	2,8	-0,4

Tabelle 20: Spezifische Kosten Thermphos® (Referenzkläranlage 30.000 t Asche)

### 1.3.4.2 Kosten gesamte Prozesskette

Die Kostenrechnung zeigt, dass die Gesamtkosten gerundet im Bereich von 13,1 €/EW\*a liegen. Das entspricht zusätzlichen Kosten im Vergleich zur Referenzsituation in rund 2,0 €/EW\*a oder + 18 %. Hauptgrund für die höheren Kosten ist die deutlich teurere aber erforderliche Monoverbrennung anstatt einer Mitverbrennung. Werden z.B. Erlöse aus dem Produktverkauf berücksichtigt schneidet das Szenario Klärschlammasche in Düngemittelindustrie im Hinblick auf die gesamte Prozesskette fast kostenneutral ab (+2 %). Da es sich um ein hochwertiges handelbares Endprodukt handelt, kann davon ausgegangen werden, dass die angenommenen Erlöse auch den tatsächlichen Marktpreisen entsprechen und dieses Szenario als realistisch betrachtet werden kann. Im Falle, dass zusätzlich Erlöse aus der Ascheannahme möglich sind, schneidet diese Variante der Phosphorrückgewinnung sogar besser als die Referenzsituation ab (-1 %).

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	Ohne Erlöse	Mit Erlöse Ascheannahme	Mit Erlöse Produktverkauf
<b>Kläranlage</b>			
Abwasserreinigung	4,50	4,50	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50	1,50	1,50
Kosten Kläranlage	6,00	6,00	6,00
<b>Monoverbrennung</b>	5,22	5,22	5,22
<b>Entsorgung</b>			
Bettasche (MonoV)	0,01	0,01	0,01
Filterkuchen (MonoV)	0,06	0,06	0,06
<b>Thermphos®</b>	1,3	0,83	0,83
<b>Entsorgung</b>			
Reststoffe Deponie	0,51	0,51	0,51
Abwasser	0,004	0,004	0,004
<b>Transport</b>			
Schlamm zu Verbrennung	0,98	0,98	0,98
Asche zu Rückgewinnung	0,04	0,04	0,04
Bettaschasche zu Deponie	0,01	0,01	0,01
Filterkuchen (MonoV) zu Untertagedeponie	0,04	0,04	0,04
<b>Summe Kosten (gerundet)</b>	14,11	14,11	14,11
<b>Einsparungen und Erlöse</b>			
Erlös Endprodukt	-		1,60
Erlöse Ascheannahme	-	0,43	
<b>Gesamtkosten</b>	13,12	11,40	11,12
<b>Δ zu Referenz</b>	<b>+27%</b>	<b>+23%</b>	<b>+12%</b>

Tabelle 21: Jahreskosten gesamte Prozesskette Mineraldüngerherstellung

### 1.3.5 Literatur

- Erkens, W.H.H. (o.J) Elektrothermal phosphorus production, radioactivity in the environment and workplace. Thermphos International BV. Niederlande.
- Hirschberg, H.G. (1999) Handbuch der Verfahrenstechnik und Anlagenbau: Chemie, Technik, Wirtschaftlichkeit. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Lefferts, M. (2012) Referenzanlagen zur P-Rückgewinnung SNB Moerdijk - Niederlande. In: ÖWAV-Klärschlammseminar 2012. Verwertung-Behandlung-Phosphorrückgewinnung. 22.-23.11.12 Wels.
- Schipper, W.J., Klapwijk, A., Potjer, B., Rulkens, W.H., Temmink, B.G., Kiestra, F.D.G, Lijmbach, A.C.M. (2001) Phosphate recycling in the phosphorus industry. Environmental Technology Vol. 22 (11), pp. 1337.
- Schipper, W.J., Klapwijk, A., Potjer, B., Rulkens, W.H., Temmink, B.G., Kiestra, F.D.G, Lijmbach, A.C.M. (2004) Phosphate Recycling in the Phosphorus Industry. Phosphorus Research Bulletin Vol. 15, pp. 47-51.



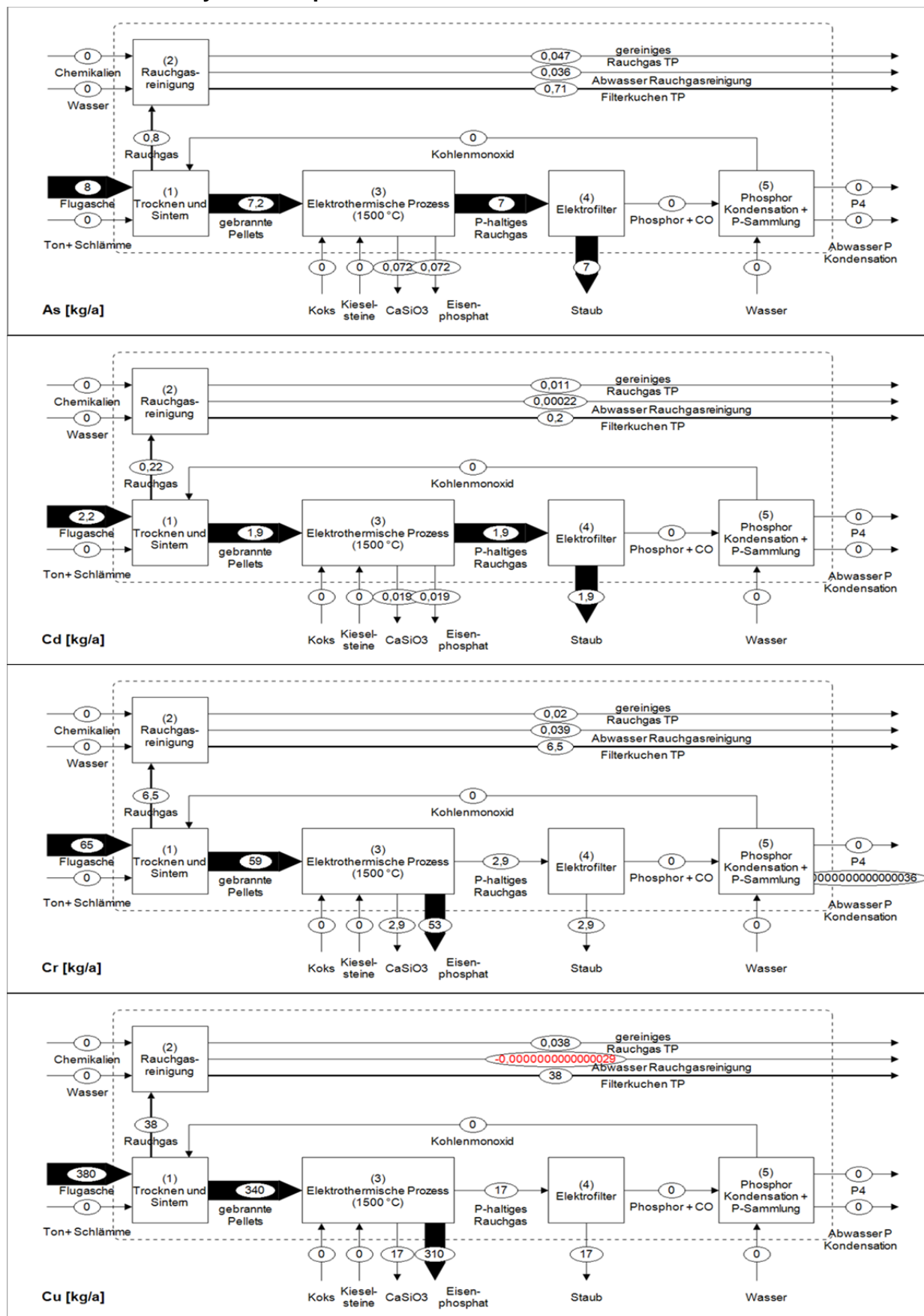


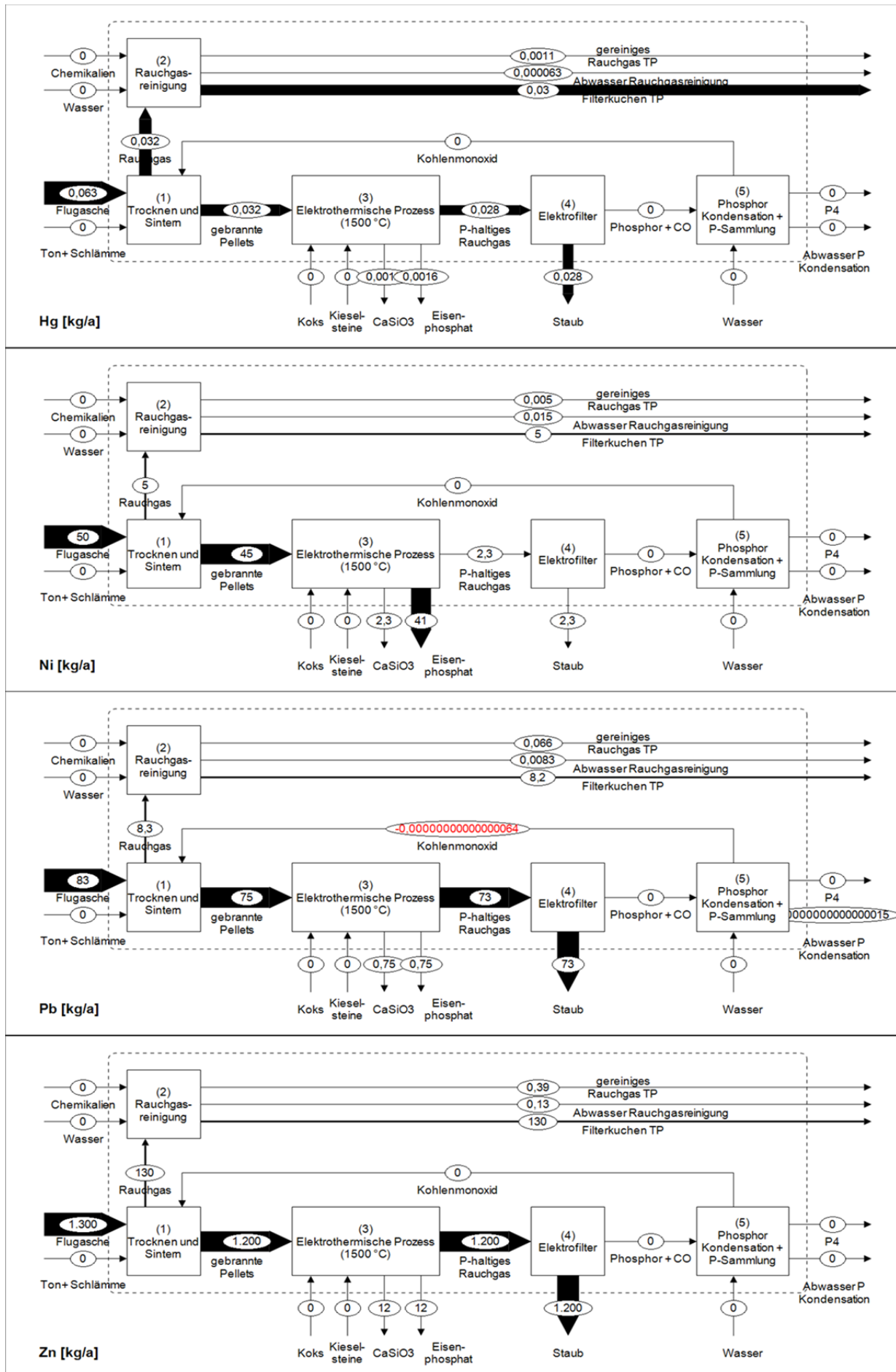
Schipper, W.J. (2012) Phosphatrecycling in den Niederlanden. Präsentation. Green Jobs Round Table am 17.10.12, Phosphor Recycling. Wien, 2012.

Schipper, W.J. (2012) persönliche Mitteilungen E-Mail Verkehr

## 1.4 Anhang

### 1.4.1 Stoffflussanalyse Thermphos®





## 1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess Thermphos®

