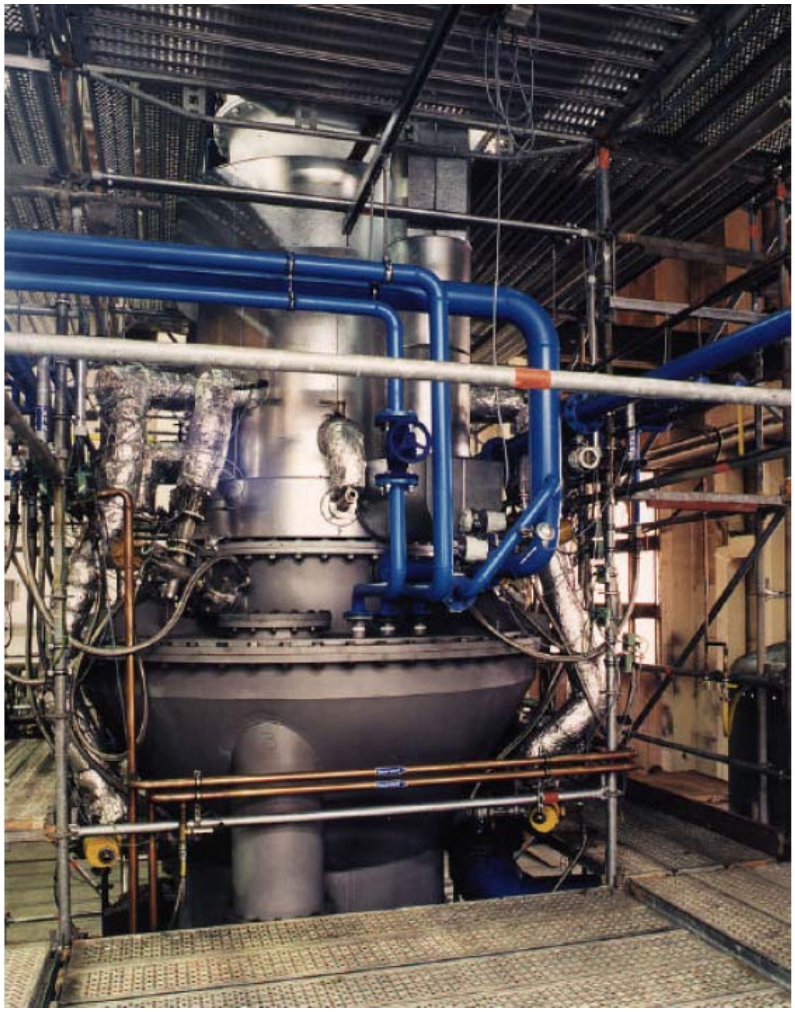
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

lebensministerium.at

Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

MEPHREC®



Inhaltsverzeichnis

1 MEPHREC® 5
1.1 Grundlagen allgemein 5
1.1.1 Prozessskizze MEPHREC® Schmelzofen 5
1.1.2 Prozessskizze MEPHREC als STAN Modell 6
1.1.3 Verfahrensbeschreibung 6
1.1.4 Betriebsparameter MEPHREC® 7
1.2 Datengrundlage für Bewertung 7
1.2.1 Sachbilanz 7
1.2.2 Stoffflussanalyse 8
1.2.3 Charakteristik Endprodukt 9
1.2.4 Umsetzung 10
1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage 10
1.2.6 Ökonomische Grundlagen 10
1.3 Ergebnis MEPHREC® Verfahren 12
1.3.1 Technologie Bewertung 12
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren) 12
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung MEPHREC® 17
1.3.4 Ökonomische Bewertung 21
1.3.5 Literatur 26
1.4 Anhang 27
1.4.1 Stoffflussanalyse MEPHREC® Prozess 27
1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess 30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessskizze MEPHREC® Schmelzofen 5
Abbildung 2: STAN Modell MEPHREC® Reaktor inkl. Formlings Herstellung und Rauchgasreinigung 6
Abbildung 3: STAN Modell MEPHREC® gesamte Prozesskette 6
Abbildung 4:Verhalten von Phosphor und Schwermetallen im MEPHREC® Prozess 8
Abbildung 5: Beispielbild Thomaskali 9
Abbildung 6: Pilotanlage MEPHREC Verfahren (TU Bergakademie Freiberg) 10
Abbildung 7: Kostenaufteilung und mögliche Erlöse und Einsparungen MEPHREC® Variante: Klärschlamm 11
Abbildung 8: Kostenaufteilung und mögliche Erlöse und Einsparungen MEPHREC® Variante: Klärschlammasche 11
Abbildung 9: P-Stoffflussanalyse MEPHREC® (2 signifikante Stellen) 13
Abbildung 10: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette 13
Abbildung 11: Entfrachtungsleistung (Klärschlamm:Endprodukt) 14
Abbildung 12: Ergebnis Güterflussanalyse MEPHREC® 15
Abbildung 13: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] MEPHREC® 16
Abbildung 14: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren) 17

Abbildung 15: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation 19
Abbildung 16: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (MEPHREC®)..... 19
Abbildung 17: Nährstoffbezogene Schwermetallgehalte MEPHREC® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)..... 20
Abbildung 18: Upscaling Faktoren Investitionskosten MEPHREC®..... 21
Abbildung 19: Produktspezifische Kosten in Abhängigkeit der Ausbaugröße (MEPHREC®)..... 23
Abbildung 20: Kostenaufgliederung MEPHREC® 100.000 EW..... 23
Abbildung 21: Kostenaufgliederung MEPHREC® 1.000.000 und 1.800.000 EW 24
Abbildung 22: Kosten gesamte Prozesskette MEPHREC® Verfahren 1.000.000 – 1.800.000 EW Anlage..... 25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter MEPHREC® Verfahren 7
Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe MEPHREC Endprodukt 9
Tabelle 3: Löslichkeit in % bezogen auf Pges (MEPHREC®)..... 9
Tabelle 4: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential MEPHREC®..... 12
Tabelle 5: Ressourcenbedarf MEPHREC® und molare Masse Fällmittel 14
Tabelle 6: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf MEPHREC®..... 14
Tabelle 7: Spezifischer Energiebedarf und Energieoutput durch Nutzung Synthesegas 15
Tabelle 8: Indirekte SM-Emissionen MEPHREC®..... 16
Tabelle 9: Kumulierter Energieaufwand MEPHREC® 17
Tabelle 10: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung MEPHREC®..... 17
Tabelle 11: Transportwege MEPHREC®..... 18
Tabelle 12: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente Prozesskette MEPHREC® 18
Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette 18
Tabelle 14: Bewertung granulierte P-reiche Schlacke 20
Tabelle 15: Investitionskosten MEPHREC® in Relation zum jährlichen Aschedurchsatz (Investitionskostenfaktor Ash Dec® Verfahren) 21
Tabelle 16: Jahreskosten MEPHREC® (Kläranlage 1.800.000 EW)..... 22
Tabelle 17: Einsparungen und Erlöse MEPHREC® (Kläranlage 1.800.000 EW)..... 22
Tabelle 18: Spezifische Kosten MEPHREC® (Kläranlage 1.800.000 EW)..... 22
Tabelle 19: Jahreskosten gesamte Prozesskette MEPHREC®..... 25

1 MEPHREC®

1.1 Grundlagen allgemein

Beim MEPHREC® Verfahren (Ingitec, 2009) handelt es sich um ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes und vom Ingenieurbüro für Gießereitechnik GmbH entwickeltes metallurgisches Verfahren (Schmelzvergasung) zur Rückgewinnung von Phosphor aus phosphorhaltigen Abfällen. Das Prinzip der Schmelzvergasung erlaubt die Verwertung organischer Abfälle wie Klärschlamm oder Tiermehle aber Klärschlammaschen oder Filterstäube. Dieses Verfahren besteht aus den Prozessen Brikettieranlage, Schachtofen/Schmelzvergasung, Kesselanlage mit anschließender Dampfturbine und der Rauchgasreinigung. In Abhängigkeit der eingesetzten phosphorhaltigen Abfälle und der variierenden Zusammensetzung der Formlinge kann mit diesem Verfahren rund 60 – 80 % des Phosphors bezogen auf den Anlageninput rückgewonnen werden. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf kann eine Rückgewinnungsquote von ca. 50 – 70 % erreicht werden.

1.1.1 Prozessskizze MEPHREC® Schmelzofen

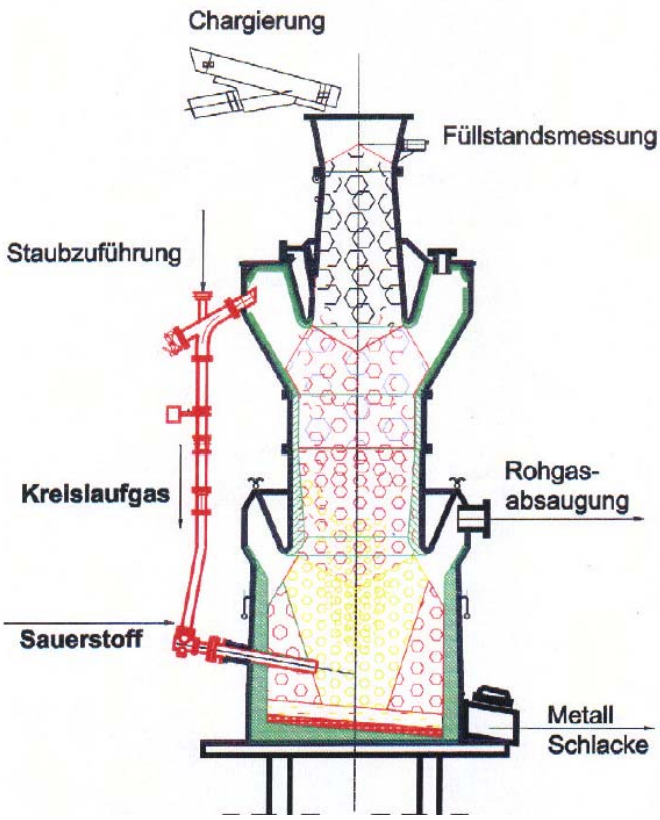


Abbildung 1: Prozessskizze MEPHREC® Schmelzofen

1.1.2 Prozessskizze MEPHREC als STAN Modell

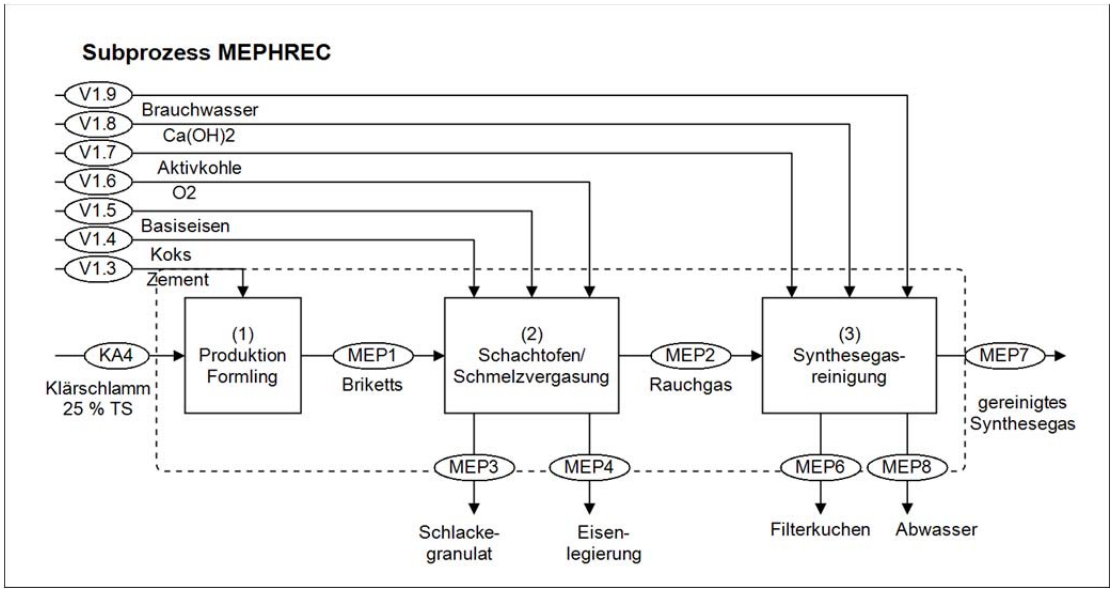


Abbildung 2: STAN Modell MEPHREC® Reaktor inkl. Formlings Herstellung und Rauchgasreinigung

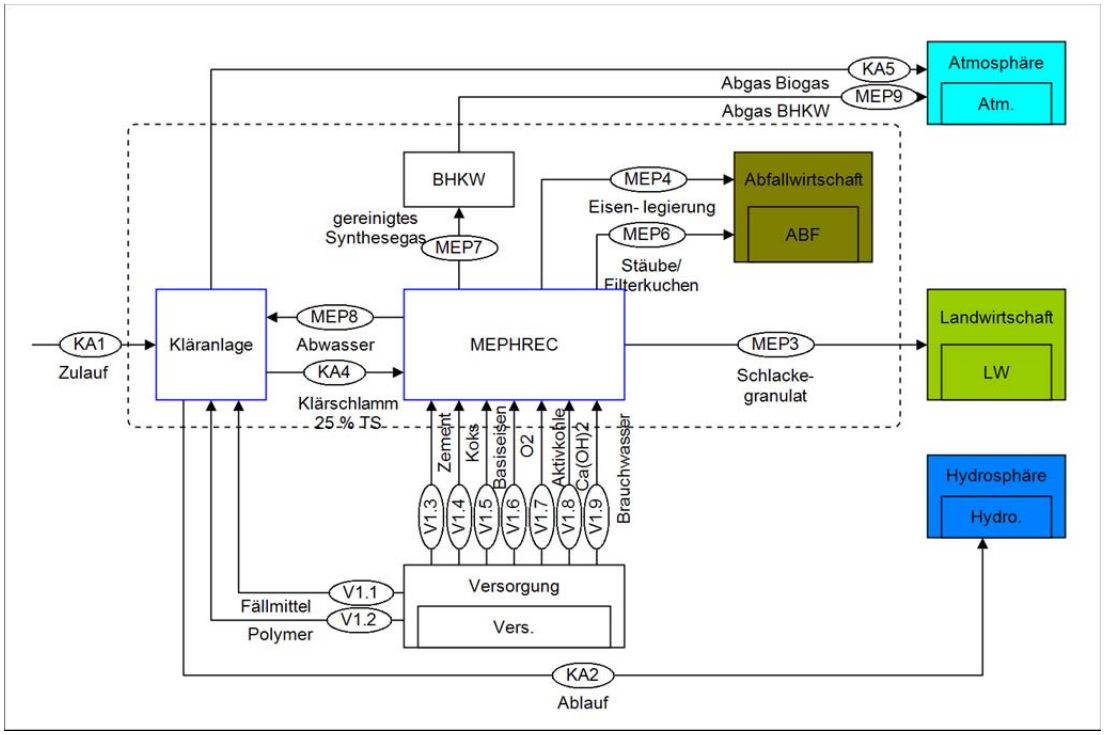


Abbildung 3: STAN Modell MEPHREC® gesamte Prozesskette

1.1.3 Verfahrensbeschreibung

<u>Brikettieranlage – Formlingsherstellung (1)</u>

Zwingende Voraussetzung für die thermische Behandlung der Abfallstoffe im Schachtofen ist stückiges Material. Dazu werden aus den Inputmaterialien Klärschlamm entwässert (Trockensubstanzgehalt ~25 %), Klärschlammasche, Tiermehl und Tiermehlasche unter der Zugabe von Bindemitteln wie z.B. Zement, aber auch Tiermehl sogenannte „Formlinge“ hergestellt. Nach einer vorgegeben Auslagerungszeit besitzen die Formlinge eine ausreichende Thermofestigkeit um im Schachtofen geschmolzen werden zu können. Für die Bewertung des MEPHREC® Verfahrens wird eine Formlingsherstellung aus 100 % Klärschlamm mit einer Beimengung von 15 % Zement bezogen auf die Feuchtsubstanz betrachtet.

Schachtofen (2)

Koks wird am Boden des Schachtofens unter Zufuhr von reinem Sauerstoff zum Glühen gebracht wobei Temperaturen von 1.450 - 2.000 °C erreicht werden. Die Beschickung des Ofens mit den Formlingen erfolgt gemeinsam mit dem Basiseisen. Über das Basiseisen gelangen teilweise beträchtliche Mengen an Schwermetalle in den Prozess, die den Schwermetallfrachten aus dem Klärschlamminput entsprechen können (As, Cr, Cu, Ni). Während des 2 - 3 stündigen Schmelz-Vergasungsvorgangs entstehen Stäube und Rauchgase, die einer Reinigung unterzogen werden müssen, eine Eisenlegierung und eine phosphorreiche Schlacke. Die flüssige P-reiche Schlacke wird mit ca. 1.450°C abgestochen und im anschließenden Wasserbad granuliert. Eine Entfrachtung von Schwermetallen wird durch deren Anreicherung im Rauchgas und/oder der Eisenlegierung erreicht. Metalle mit niedrigem Schmelzpunkt wie z.B. Cd, Hg und Zn werden in der Gasreinigung abgeschieden. Schwermetalle mit hoher Schmelztemperatur wie Cu, Cr, Ni und Fe werden Bestandteil einer getrennt abgestochenen Metalllergierung/Eisenschlacke. Organische Verunreinigungen werden bei diesen hohen Temperaturen vollständig zerstört.

Beim Schmelze der Klärschlammbriketts unter reduzierten Bedingungen wird ein CO- und H_2-haltiges Gas (Synthesegas) erzeugt, dass nach einer Reinigung zur Energieerzeugung z.B. in einem BHKW eingesetzt werden kann.

Rauchgasreinigung (3)

Die entstehenden Rauchgase werden über eine zweistufige Rauchgasreinigung, bestehend aus einer Gaswäsche bzw. Sprühabsorber und einen Gewebefilter, geleitet. Die Reinigung in der ersten Stufe erfolgt über die Zugabe von Kalkhydrat ($Ca(OH)_2$. Vor der zweiten Reinigungsstufe mittels Gewebefilter wird ein Adsorbent (Aktivkohle) zugegeben. Als Abfallprodukte fallen Wäscherstäube und Abwasser an, die weitere Behandlungsschritte benötigen.

Kesselanlage/Energiegewinnung

Das energetische Potential des Klärschlamms und des Koks werden für die Energieerzeugung genutzt. In der Kesselanlage wird Wasser verdampf, welcher anschließend über eine Dampfturbine verstromt wird. Damit wird neben der Rückgewinnung des Phosphors gleichzeitig auch das Energiepotential genutzt.

1.1.4 Betriebsparameter MEPHREC®

Voraussetzung für den metallurgischen Prozess sind Temperaturen über dem Ascheschmelzpunkt von 1.000°C. Diese werden durch das Einbringen von Koks und Einblasen von Sauerstoff erreicht. Das Eisen wird zur Schlackebildung benötigt. Die optimalen Betriebsparameter für eine Phosphorrückgewinnung mit dem MEPHREC® Verfahren sind Tabelle 1 dargestellt

Parameter	von	bis
Temperatur	1.450	2.000
Aufenthaltszeit (h)	2	3

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter MEPHREC® Verfahren

Bis zu 60 % des im Klärschlamm vorliegenden Phosphors wird in Form von Schlacke aus dem Reaktor abgezogen und liegt dann nach einem Wasserbad im Schlackegranulat vor.

Mögliche Betriebsprobleme

- Durch die Prozessführung über dem Ascheschmelzpunkt werden hohe Anforderungen an das Equipment gestellt. Dies ist auch der Grund warum die Nutzungsdauer mit 10 bis maximal 15 Jahre angenommen werden kann.

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Sachbilanz

Der Ressourcenbedarf für die Erzeugung der Schlacke im MEPHREC® Prozess basiert auf Zement, Basiseisen und Koks. Zusätzlich wird reiner Sauerstoff für die optimalen Prozessbedingungen im Ofen benötigt. Der Zementbedarf wird mit 15 % bezogen auf den Klärschlamm mit einem TS Gehalt von 50 % berechnet. Der Eisenbedarf beträgt rund 7 % bezogen auf die Masse eines getrockneten Förmlings. Der

Koksbedarf variiert in Abhängigkeit des Inputmaterials sehr stark und liegt in Bereichen von 10 - 50 % bezogen auf die Masse des getrockneten Briketts.. Der Koksbedarf wird mit 30 % bezogen auf die TS desr eingesetzten Briketts festgelegt. Daraus kann der Ressourcenbedarf für 1 kg Klärschlamm Trockensubstanz ermittelt werden. Aufgrund der recht komplexen Berechnung wird eine höhere Unsicherheit angenommen.

- Zement: 0,3 – 0,5 kg/kg KS TS (+/-)
- Basiseisen: 0,09 – 0,1 kg/kg KS TS (+/-)
- Koks: 0,26 – 0,45 kg/kg KS TS (+/-)

Der Bedarf an elektrischer Energie kann aufgeteilt werden in Energiebdarf Formlingsherstellung und Energie Rauchgasreinigung. Auf Basis der Herstellerangaben wird ein Energiebedarf für die Förmlingsherstellung von 50 kWh/t Förmling ermittelt. Der Energiebedarf zur Reinigung des Rauchgases aus 1.492 t KS TS/a der Referenzkläranlage wird aus den Daten der Pilotanlage mit einem Durchsatz von 27.000 t KS TS/a und einem damit verbundenen Energiebedarf von 1.500.000 kWh ermittelt (o). Der Sauerstoffbedarf kann mit rund 110 kg/t Förmling angenommen werden.

Für die Rauchgasreinigung werden Adsorbens, Kalkhydrat und Brauchwasser benötigt. Pro t Förmling/Brikett kann folgender Bedarf ermittelt werden:

- Adsorbens: 3 kg/t Brikett (+/-)
- Kalkhydrat: 30 kg/t Brikett (+/-)
- Brauchwasser: 100 kg/t Brikett (+/-)

1.2.2 Stoffflussanalyse

Transferkoeffizienten (TK) MEPHREC®

Die Untersuchungen hinsichtlich des Verhaltens von Phosphor und Schwermetallen während des metallurgischen Prozesses zeigen eine breite Streuung. Nach Angaben der Hersteller ist dies zum einen auf die schwierige Mengenerfassung des Schlackegranulats, der anfallenden Stäube und der Eisenlegierung zurückzuführen und zum anderen auf Analyseschwankungen der in der Regel porös erstarrten Eisenproben und Schlackegranulaten. Folglich müssen erhöhte Unsicherheit die Transferkoeffizienten angenommen werden.

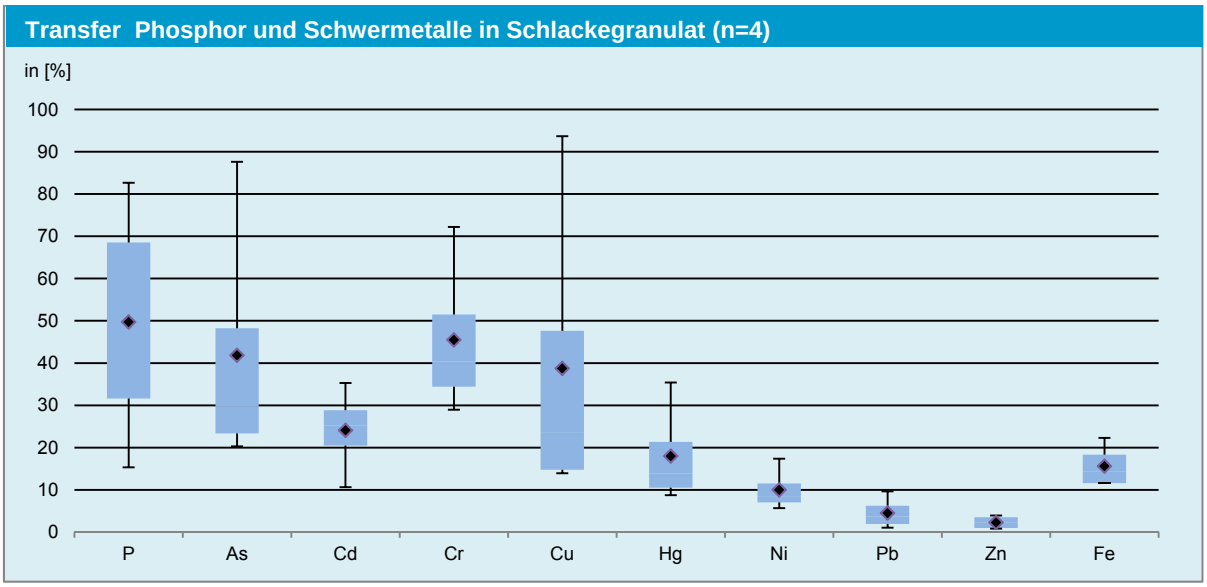


Abbildung 4:Verhalten von Phosphor und Schwermetallen im MEPHREC® Prozess

TK Synthesegasreinigung

Für diesen Prozess liegen keine gesonderten Daten vor. Die Pfade der Schwermetalle werden auf Basis der Reinigungsleistung der Rauchgasreinigung der Referenzverbrennungsanlage abgeleitet.

1.2.3 Charakteristik Endprodukt

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

Bei der Schmelzvergasung fällt eine kalkbasische granulierte Schlacke mit sehr unterschiedlichen, aber im Falle der Herstellung von Klärschlammbriketts, sehr geringen P-Gehalten im Bereich von 2 -3 % an. (+). Das Endprodukt ist mit einem Thomasmehl vergleichbar. Der Schwermetallgehalt im Schlackegranulat kann aufgrund der verschiedenen Inputstoffe in die Formlinge stark variieren. Exemplarisch werden die Schwermetallgehalte der Schlackegranulate aus reinen Klärschlammformlingen dargestellt (Tabelle 2). Aufgrund der Prozessführung (~ 2.000°C) werden sämtliche organischen Spurenstoffe zerstört (++). Gleichzeit ist eine mikrobiologische Belastung des Endproduktes ebenfalls auszuschließen (++).

Nährstoffe [g/kg TS]		Schwermetalle [mg/kg TS]		Org. Verunreinigungen [mg/kg TS]	
P	20-30	As	<5	AOX	0
N	0	Cd	<0,4	PAK	0
Mg	20	Cr	68	PCDD/F	0
Ca	300	Cu	123		
K	-	Hg	<0,1		
Metalle [mg/kg TS]		Ni	13		
Al	-	Pb	<5		
Fe	30	Zn	11		

Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe MEPHREC Endprodukt

1.2.3.2 P-Löslichkeit

Unabhängige Laboruntersuchungen zeigen eine schlechte Wasserlöslichkeit, aber eine sehr gute Zitronenlöslichkeit von rund 95 % (+). Weitere explizite Informationen zur Löslichkeit des Schlackegranulates in weiteren standardisierten Extraktionsmitteln liegen nicht vor (Tabelle 3). Topf bzw. Feldversuche sind keine bekannt.

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

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

1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Die Schlacke ist ein Vorprodukt für die Düngemittelindustrie bzw. direkt nach einer mechanischen Aufbereitung als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Das Endprodukt ist mit dem so genannten Thomasmehl vergleichbar. Thomas-Stahlwerksschlacke ist ein in der Stahlmetallurgie hergestellter P-Dünger, welcher bis in den 1960ern Jahren in der Landwirtschaft eingesetzt wurde.

Abbildung 5: Beispielbild Thomaskali

1.2.3.4 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus MEPHREC® Verfahren

Die anfallenden Rauchgase müssen einer Rauchgasreinigung unterzogen werden. Die dabei anfallenden schwermetallhaltigen Wäscherstäube müssen ordentlich abgelagert werden. Inwieweit eine untertägige Ablagerung erforderlich ist, hängt von den Schwermetallkonzentrationen ab. Derzeit liegen jedoch keine verlässlichen Informationen vor, wie die Entsorgung erfolgt. Die Entsorgung oder Weiterverwendung der Eisenschlacke ebenfalls noch nicht geklärt.

1.2.4 Umsetzung

Eine Anlage im Pilotmaßstab (Kupolofen) wurde an der TU Bergakademie in Freiberg installiert (Abbildung 6). Der stündliche Durchsatz lag bei rund 300 kg Abfallbriketts. Anhand von 2 Machbarkeitsstudien konnte im Auftrag der Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg sowie der „Innovatherm Lünen“ die Wirtschaftlichkeit nachgewiesen werden.

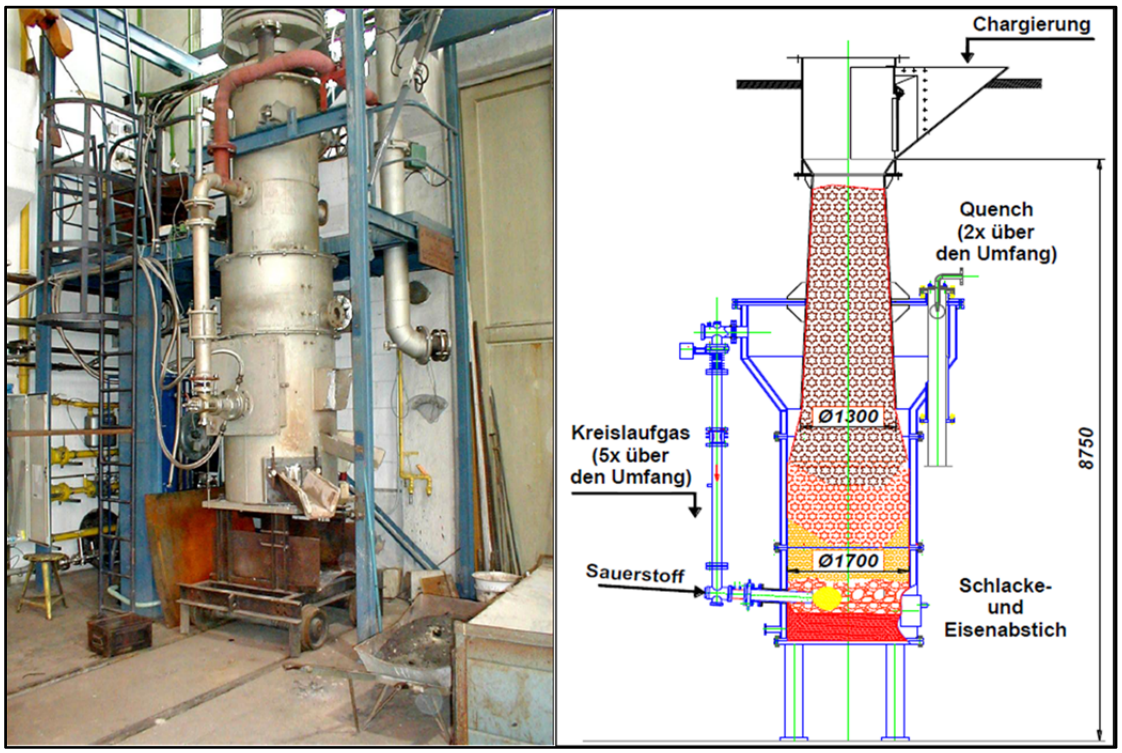


Abbildung 6: Pilotanlage MEPHREC Verfahren (TU Bergakademie Freiberg)

1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage

Nicht bekannt

1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Das MEPHREC® Verfahren kann sowohl für die Rückgewinnung von Phosphor aus dem Klärschlamm als auch der Klärschlammasche eingesetzt werden. Allerdings kann nur beim Einsatz von Klärschlamm ein Synthesegas erzeugt werden, dass einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hat. Es liegen unterschiedliche Daten für die Bewertung des Verfahrens vor. Ein Kostenkalkulation für einen jährlichen Durchsatz von rund 27.000 t KS Trockensubstanz geht von Investitionskosten für die Kompaktierung von rund 2,2 Mio. € und Investitionskosten für den Kupolofen von 8,5 Mio. € aus. Aus verschiedenen Vorträgen liegen relative detaillierte Darstellungen zu Kosten und möglichen Erlösen und Einsparungen.zu den Kosten für die Umsetzung eines MEPHREC® Verfahren mit einem Durchsatz von ~16.000 bzw. 19.000 t KS TS/a vor (Abbildung 7). Auffallend sind die Erlöse, die stark von der Klärschlamm bzw. Klärschlammascheannahme abhängig sind. Rückgerechnet entspricht dies Erlösen durch die Klärschlammannahme von rund 220 €/t KS TS. Das sind Erlöse die z.B. im Vergleich zu den Kosten einer thermischen Behandlung realistisch erscheinen.

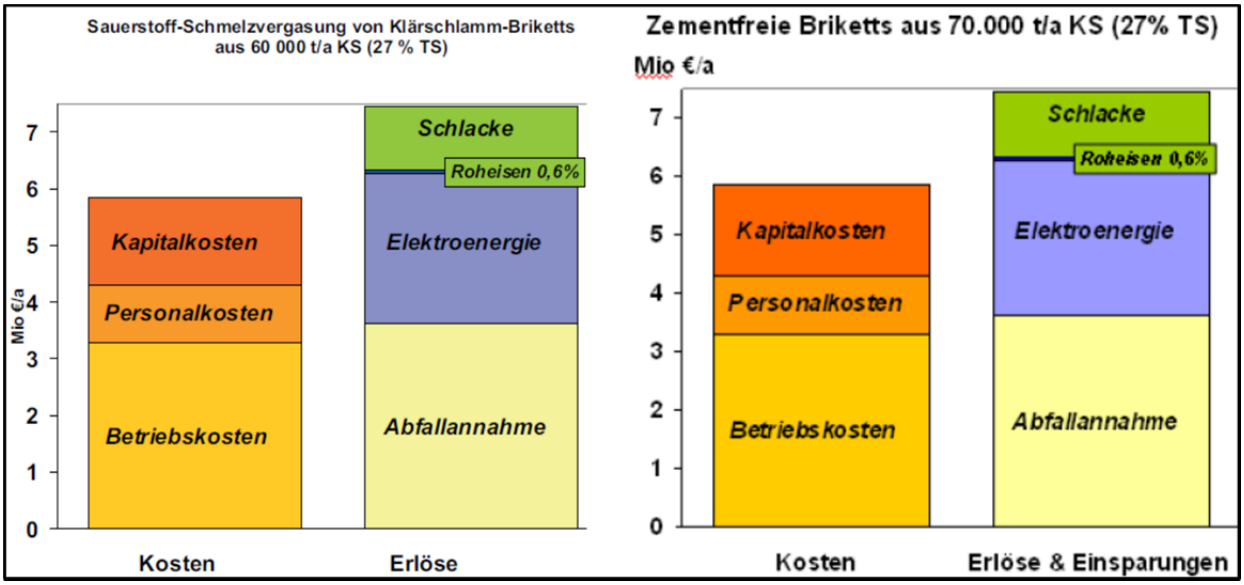


Abbildung 7: Kostenaufteilung und mögliche Erlöse und Einsparungen MEPHREC® Variante: Klärschlamm

Für den Fall, dass nur Klärschlammasche (40.000 t/a) eingesetzt wird, ergibt sich folgende Kostenaufgliederung (Abbildung 8):

Kosten- und Erlös-Strukturen bei der Schmelzvergasung
von Asche-Briketts bei der Monoverbrennung von Innovatherm Lünen [10]

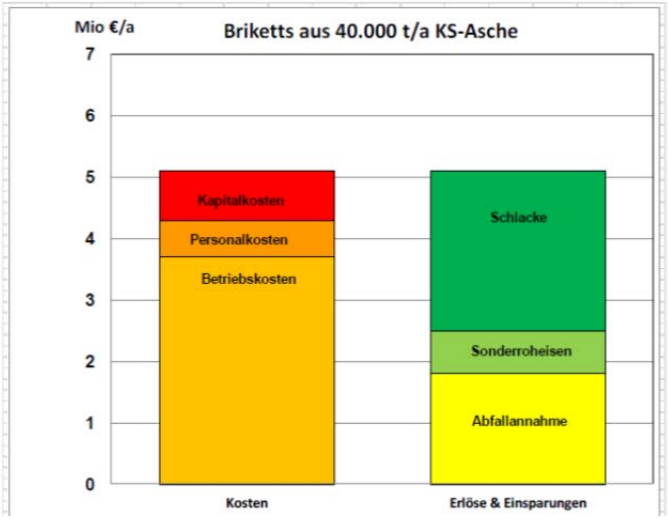


Abbildung 8: Kostenaufteilung und mögliche Erlöse und Einsparungen MEPHREC® Variante: Klärschlammasche

1.3 Ergebnis MEPHREC® Verfahren

1.3.1 Technologie Bewertung

Der metallurgische MEPHREC® Prozess ist ein Verfahren welcher zentral zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem Klärschlamm und/oder der Klärschlammasche eingesetzt werden kann. Hinsichtlich der Komplexität, kann die Technologie mit Schlackebad, Temperaturen von über 2.000 °C und notwendiger Rauchgasreinigung als sehr komplex eingestuft werden. Dieser technologische Ansatz wurde bereits im Pilotmaßstab erprobt. Wichtig ist, dass die Prozesse der Abwasserreinigung nicht verändert werden muss. Vorteile sind, dass neben der Phosphorrückgewinnung der organische Anteil des Klärschlamms vollständig oxidiert und ein Synthesegas erzeugt wird, dass zur Energieerzeugung eingesetzt werden kann. Bei einem Synthesegas handelt es sich um ein wasserstoffhaltiges Gasgemisch. Das Synthesegas kann sich sowohl aus dem Koks als auch aus dem Klärschlamm bilden. Das Rückgewinnungspotential kann abhängig vom Materialinput stark schwanken und liegt für diese Technologie bezogen auf den Input zwischen 60 und 80 %. Auf Basis der vorliegenden Berichte wird eine konservative Rückgewinnungsquote von 60 % angenommen. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf entspricht dies 50 %.

MEPHREC® Verfahren	
Entwicklungsstand	Pilotanlage
Komplexität Technologie	Metallurgisches Verfahren, komplex
Implementierung	Zentral, Klärschlamm und/oder Klärschlammasche
Wartungsaufwand	Mäßig
Veränderung Schlammbehandlung	Vollständige Zerstörung der organischen Substanz, somit gleichzeitig Schlammbehandlung
Effektivität des Verfahrens	60-80%
Potential bezogen auf KA-Zulauf	50-70%
Qualitativer Ressourcenaufwand	Zement, Koks, Basiseisen, Sauerstoff, Adsorbens, Kalkhydrat, Wasser
Abfallstoffe	Wäscherstaub, Eisenschlacke
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 4: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential MEPHREC®

1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

1.3.2.1 Stoffflussanalyse P

Im Klärschlamm steht eine potentielle P-Fracht von 59.000 kg P/a zur Verfügung. Untersuchungen zeigen, dass abhängig vom Materialinput (Klärschlamm, Tiermehlasche, Tiermehl) und den Prozessbedingungen der Pfad des Phosphors als auch der Schwermetalle stark variieren kann. Angenommen wird, dass rund 60 % und damit eine P-Fracht von 36.000 kg P in das Schlackegranulat gelangt. Aufgrund der sehr hohen Temperaturen über dem Ascheschmelzpunkt verdampft Phosphors und gelangt in das Rauchgas. Der Rest kann in der Eisenlegierung detektiert werden. Mit dem MEPHREC® Verfahren kann, bezogen auf die Referenzkläranlage 36.000 kg P/a rückgewonnen werden. Das entspricht bezogen auf den Klärschlamminput rund 60 % und in Relation zum Kläranlagenzulauf rund 50 %.

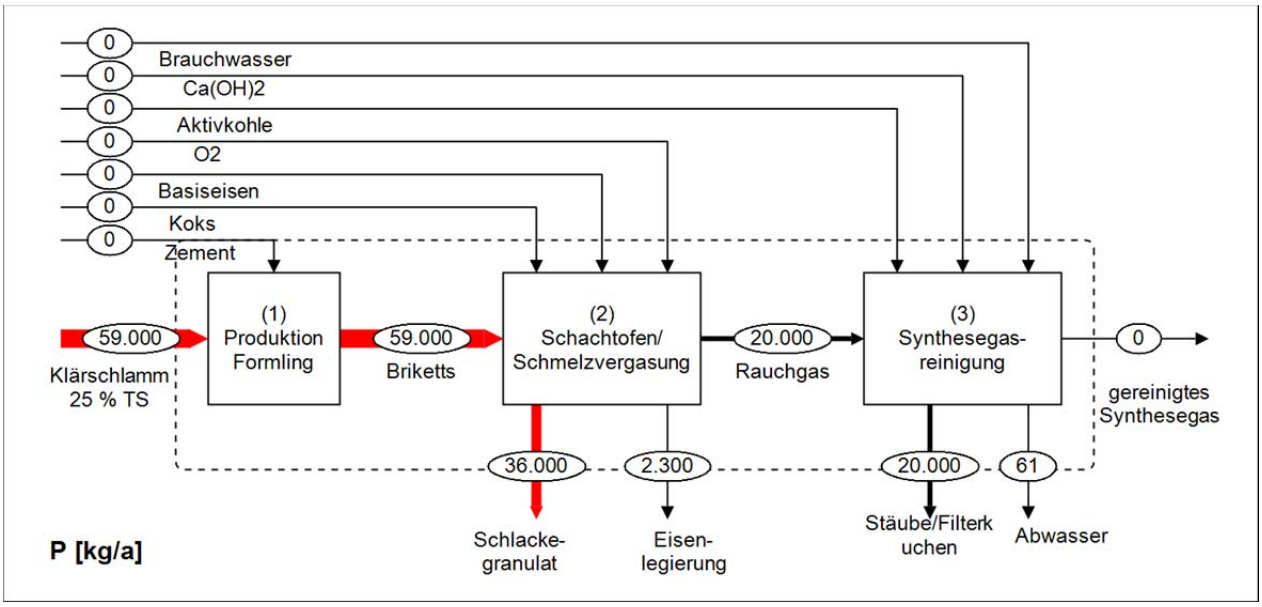


Abbildung 9: P-Stoffflussanalyse MEPHREC® (2 signifikante Stellen)

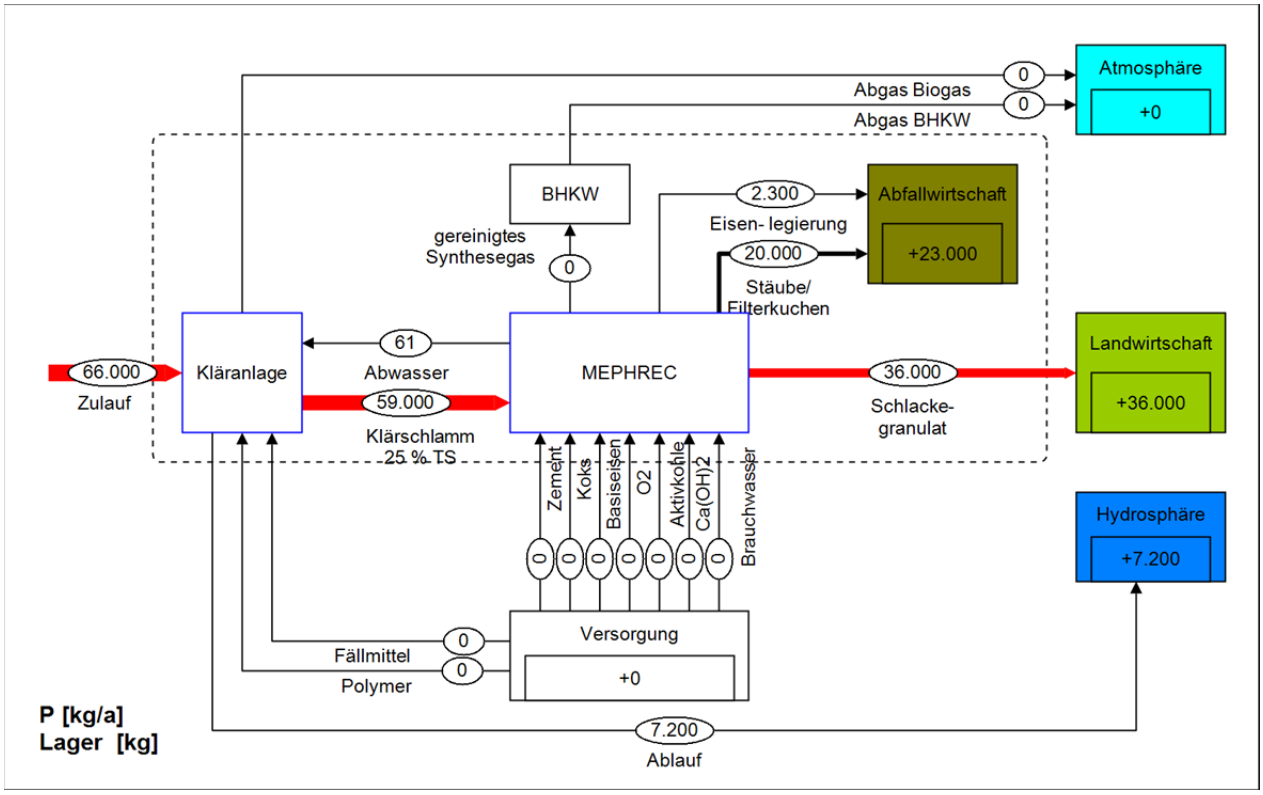


Abbildung 10: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette

1.3.2.2 Stoffflussanalyse SM

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

Die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle werden aus Abbildung 4 übernommen. Wie bereits beim Phosphor müssen aufgrund der Schwankungen große Unsicherheiten in Hinblick auf den Transfer in die das Schlackegranulat angenommen werden. Tendenzielle gelangen Cd, Hg, Ni, Pb, Zn, Fe kaum in das Endprodukt, während in Abhängigkeit der Prozessführung große Mengen an As, Cr und Cu in das Endprodukt gelangen. Schwankungen von 20 bis 90 % sind für die drei letztgenannten Schwermetalle möglich. Organische Spurenstoffe werden diesen Reaktortemperaturen vollständig zerstört.

1.3.2.3 Entfrachtungsleistung

Die Entfrachtungsleistung entspricht direkt den angenommenen Transferkoeffizienten. Interessant ist die Tatsache, dass z.B. As und Cr bezogen auf die Phosphorfracht des Schlammes und des Endproduktes nicht entfrachtet sondern angereichert werden. Grund ist der im Verhältnis zu den Schwermetallen geringere P-Transfer in das Endprodukt. Da im Endprodukt keine organischen Spurenstoffe nachweisebar sind, wird eine 100 % Entfrachtung erreicht.

	Asche [kg/a]	Endprodukt [kg/a]	Rückgewinnung bzw. Entfrachtung [%]	Tatsächliche Entfrachtung [% rel. zu P]
P	**58.600**	**35.700**	**61**	
As	8,8	5,4	39	-1
Cd	2,1	0,6	71	53
Cr	77,1	63,2	18	-34
Cu	482	202,7	58	31
Hg	0,01	0,0	100	100
Ni	64,1	11,5	82	71
Pb	96,8	10,9	89	82
Zn	1690	8,7	91	82

Abbildung 11: Entfrachtungsleistung (Klärschlamm:Endprodukt)

1.3.2.4 Ergebnisse Güterflussanalyse

Hinsichtlich des Säurebedarfs für die Aschelaugung liegen unterschiedliche Mengenangaben vor. Daraus resultieren Unsicherheiten, die bei der Bewertung der Verfahren auf Basis der Güterflussanalyse vorliegen. Die Ergebnisse einer Literaturstudie zeigen folgenden Säurebedarf in Relation zur Asche.

MEPHREC	kg/kg TS	kg/a
Zement	0,4	605.300
Eisen	0,1	148.500
Koks	0,72	416.500
Sauerstoff	-	297.000
Rauchgasreinigung	**kg/t Brikett**	**kg/a**
Adsorbens	3	7.900
Kalkhydrat	30	78.800
Brauchwasser	100	260.600

Tabelle 5: Ressourcenbedarf MEPHREC® und molare Masse Fällmittel

Als Endprodukt fallen rund 1.500 t P-reiche Schlacke an. Abfallprodukte sind die Eisenschlacke mit rund 247 t/a und Wäscherstäube mit rund 141 t/a.

	Produktspez. [kg $P_{rückg.}$]	Einwohnerspez. [EW*a]
Zement	16,9	6,1
Eisen	4,2	1,5
Koks	11,7	4,2
Sauerstoff	8,3	3,0
Adsorbens	0,22	0,1
Kalkhydrat	2,2	0,8
Brauchwasser	7,4	2,6

Tabelle 6: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf MEPHREC®

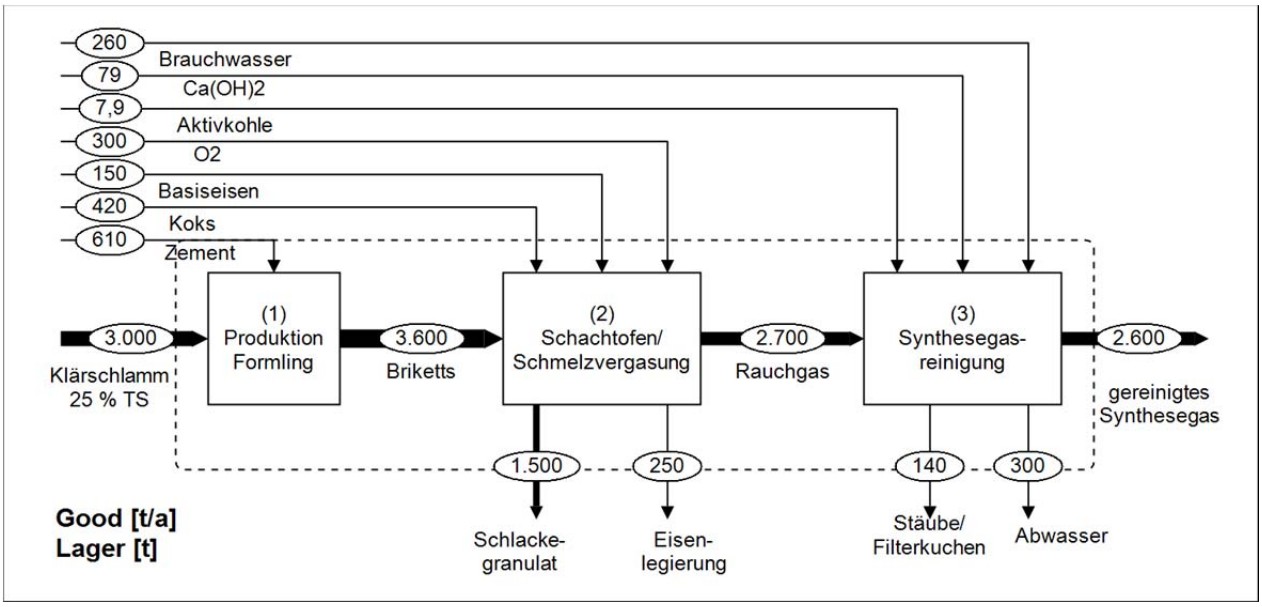


Abbildung 12: Ergebnis Güterflussanalyse MEPHREC®

Behandlung der anfallenden Abfallstoffe

Für die anfallenden festen Eisenschlacken und Wäscherstäube wird in diesem Fall angenommen, dass eine Ablagerung auf einer Reststoffdeponie möglich ist. Allerdings sind die Güterfluss mit einer sehr hohen Unsicherheit behaftet. Einzig die anfallende Eisenlegierungsfracht entspricht etwa dem eingesetzten Basiseisen. Eine genaue Erfassung der anfallenden Stäube und Abwasser ist nicht möglich.

1.3.2.5 Ergebnisse Energieflussanalyse

Der elektrische Energieaufwand für die Herstellung der Förmlinge bzw. Briketts und zum Betrieb der Rauchgasreinigung wird mit rund 370.000 kWh/a berechnet. Der Energiebedarf zum Erreichen der Temperaturen über dem Ascheschmelzpunkt wird durch Koks erreicht. Die in der Referenzanlage notwendigen rund 416 t Koks/a entsprechen einem Energieinhalt von 3.240.000 kWh.

Beim MEPHREC® Verfahren wird aus den Klärschlamm ein Synthesegas erzeugt. Angenommen wird, dass der Energieinhalt des Klärschlammes wie in einer Klärschlammverbrennung mit BHKW genutzt werden kann. Das bedeutet, dass aus dem theoretischen Energiepotential des Schlammes (12 MJ/kg KS TS) von rund. 4,97 Mio. kWh/a mit dem Wirkungsgrad eines BHKW von 38 % rund 1,89 Mio. kWh Strom und 2,34 Mio. kWh Wärme erzeugt werden kann. Der Energieoutput geht als Gutschrift in die Bewertung ein. Die anfallende Wärmeenergie aufgrund der Verbrennung des Koks wird als nicht nutzbar angenommen und damit in der Bewertung nicht berücksichtigt.

	Produktspez. [kg $P_{rückg.}$]	Einwohnerspez. [EW*a]
Strombedarf kWh	10,4	3,7
Stromoutput kWh	52,9	18,9
Wärmeoutput kWh	65,4	2,3

Tabelle 7: Spezifischer Energiebedarf und Energieoutput durch Nutzung Synthesegas

1.3.2.6 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Auf Basis der Annahme einer Implementierung des MEPHREC® Verfahrens im Anschluss an die Referenzkläranlage, der Ergebnisse der Güterflussanalyse und der indirekten Emissionen der notwendigen Ressourcen (GEMIS-Datenbank) kann ein jährlicher Ausstoß an CO_2- bzw. SO_2-Äquivalenten von 2.380.000 kg bzw. 10.200 kg ermittelt werden. Die Emissionen bezogen auf 1 kg $P_{rückg.}$ werden anhand der jährlichen Emissionen und der rückgewonnen P-Fracht von 35.700 kg/a errechnet und sind aus Abbildung 13 zu entnehmen. Aus dem Prozess sind aufgrund des Kokseinsatzes signifikante direkten gasförmigen Emissionen zu berücksichtigten, die vor allem die Emissionen mit Versauerungspotential dominierenden.

Abbildung 13: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente [kg bzw. g/kg $P_{rückg.}$] MEPHREC®

1.3.2.7 Indirekte Schwermetallemissionen MEPHREC®

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	3,7	0,013
Cd	1,3	0,032
Cr	2,9	0,032
Cu	-	-
Hg	-	0,016
Ni	20,5	-
Pb	15,1	0,041
Zn	-	-
AOX	-	
PAK	0,00007	-
PCDD/F	0,000001	-

Tabelle 8: Indirekte SM-Emissionen MEPHREC®

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/Rohstoffe	2.065.600	20,7	57,8
Elektrische Energie Betrieb MEPHREC®	708.800	7,1	19,8
Primärenergie Koks	5.396.700	54,0	151,1
Gesamt	**8.171.200**	**81,7**	**228,7**

Tabelle 9: Kumulierter Energieaufwand MEPHREC®

Abbildung 14 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen.

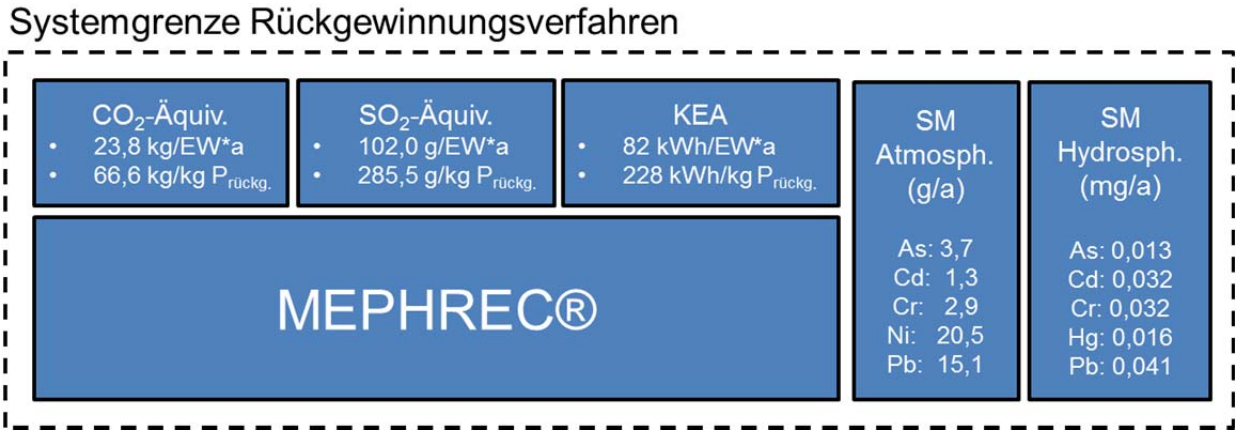


Abbildung 14: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)

1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung MEPHREC®

Das MEPHREC®-Verfahren hat keinen Einfluss auf die Prozesse der Abwasserreinigung. Aufgrund der anfallenden Abfallstoffe werden nachfolgende Prozesse beeinflusst, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

Faktor	Einfluss auf
Eisenschlacke	Ablagerung auf Reststoffdeponie
Wäscherstäube	Ablagerung Untertagedeponie
Vollständige Zerstörung org. Substanz	Im Vergleich zur Mitverbrennung fällt keine zu deponierende Asche an. Anorganische Anteil entweder in der Eisenschlacke, Wäscherstaub oder im Endprodukt
Synthesegas	Berücksichtigung des Energieertrages (Kosten, ökologische Bewertung)
Ressourcenaufwand MEPHREC®	Direkte Emissionen (Koks), Indirekte Emissionen, Kosten
Klärschlamm bzw. Klärschlammaschannahme	Mögliche Erlöse aus der Annahme der Abfallstoffe
Granulierte Schlacke	Kosten (Erlöse), Gutschrift Emissionen (P)

Tabelle 10: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung MEPHREC®

Berücksichtigung Transport

Angenommen wird, dass das MEPHREC® Verfahren zentral errichtet wird und damit ein Transport von entwässertem Klärschlamm zur Anlage erforderlich ist. Die organische Substanz wird vollständig zerstört. Der anorganische Anteil des Klärschlammes findet sich im Endprodukt, der anfallenden Eisenschlacke und den Wäscherstäuben wieder (Tabelle 11).

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€/EW*a]
Klärschlamm – MEPHREC®	4.975	696.493	0,98
Eisenschlacke – Reststoffdeponie	247	24.743	0,03
Stäube - Untertagedeponie	142	141.846	0,20
Gesamt Transport		**863.082**	**1,21**

Tabelle 11: Transportwege MEPHREC®

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation ist eine signifikante Veränderung der treibhausrelevanten Gase (+ 329 %) und der Gase mit Versauerungspotential (+ 568 %) zu beobachten (Tabelle 12). Sowohl der hohe Rohstoffbedarf als auch der Energiebedarf in Form von Koks tragen zu den hohen Emissionen bei. Die hohen Emissionen bei den Gasen mit Versauerungspotential sind in erster Linie auf die Verbrennung des Koks zurückzuführen. Für den kumulierten Energieaufwand kann eine Zunahme von 156 % im Vergleich zur Referenzsituation berechnet werden. Das heißt, dass aus der Erzeugung des Synthesegases der zusätzliche kumulierte Energieaufwand aufgrund der benötigten Ressourcen nicht gedeckt werden kann. .

CO_2-Äquivalente	[kg]	[CO_2-Äquiv./EW*a]
MEPHREC®	1.582.400	18,8
Referenz	368.500	3,7
Δ	+329%	
SO_2-Äquivalente	**[kg]**	**[SO_2-Äquiv./EW*a]**
MEPHREC®	8.400	0,084
Referenz	1.260	0,013
Δ	+568 %	

Tabelle 12: CO_2 bzw. SO_2-Äquivalente Prozesskette MEPHREC®

1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA	[kWh/a]
PASCH	2.895.900
Referenz	1.131.700
Δ	+156 %

Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

In Abbildung 17 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 MEPHREC® Verfahrens signifikante Erhöhung bei den ökologischen Bewertungsparametern zu erwarten sind.

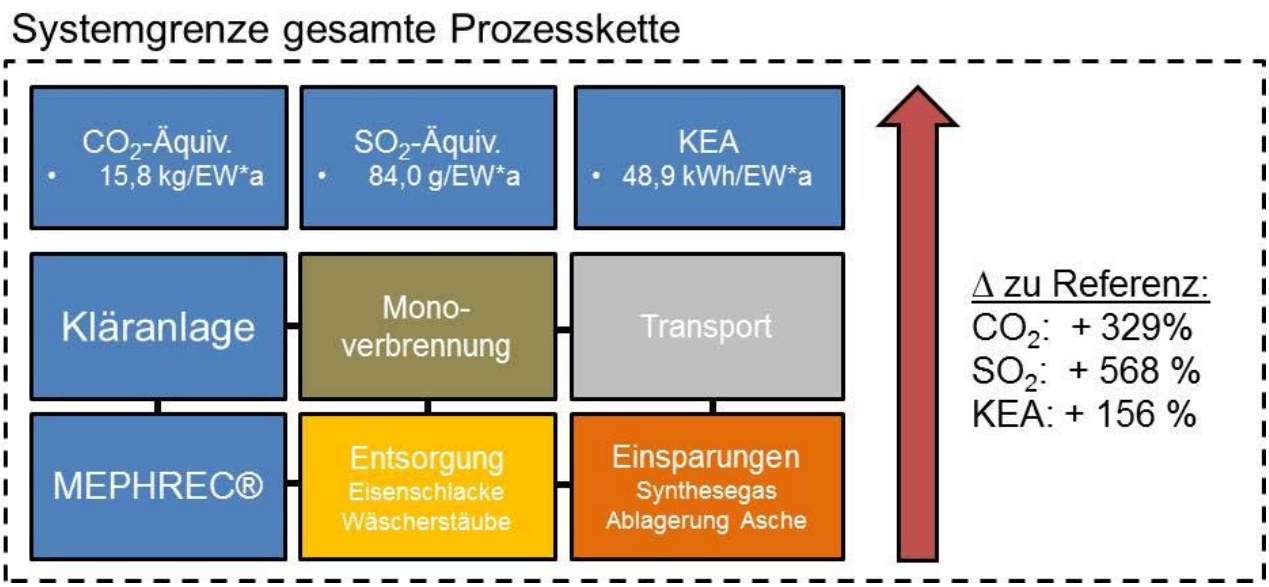


Abbildung 15: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation

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 16). Im Vergleich zur Referenzsituation sind keine erhöhten Schwermetallfrachten in die Hydrosphäre oder Atmosphäre zu erwarten. Im Falle einer Ausbringung des Endproduktes nimmt die P- und Schwermetallfracht in die Landwirtschaft im Ausmaß der rückgewonnen P-Fracht bzw. der SM-Fracht im Endprodukt zu. Organische Spurenstoffe sind im Endprodukt nicht nachweisbar, womit auch keine Spurenstoffe über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

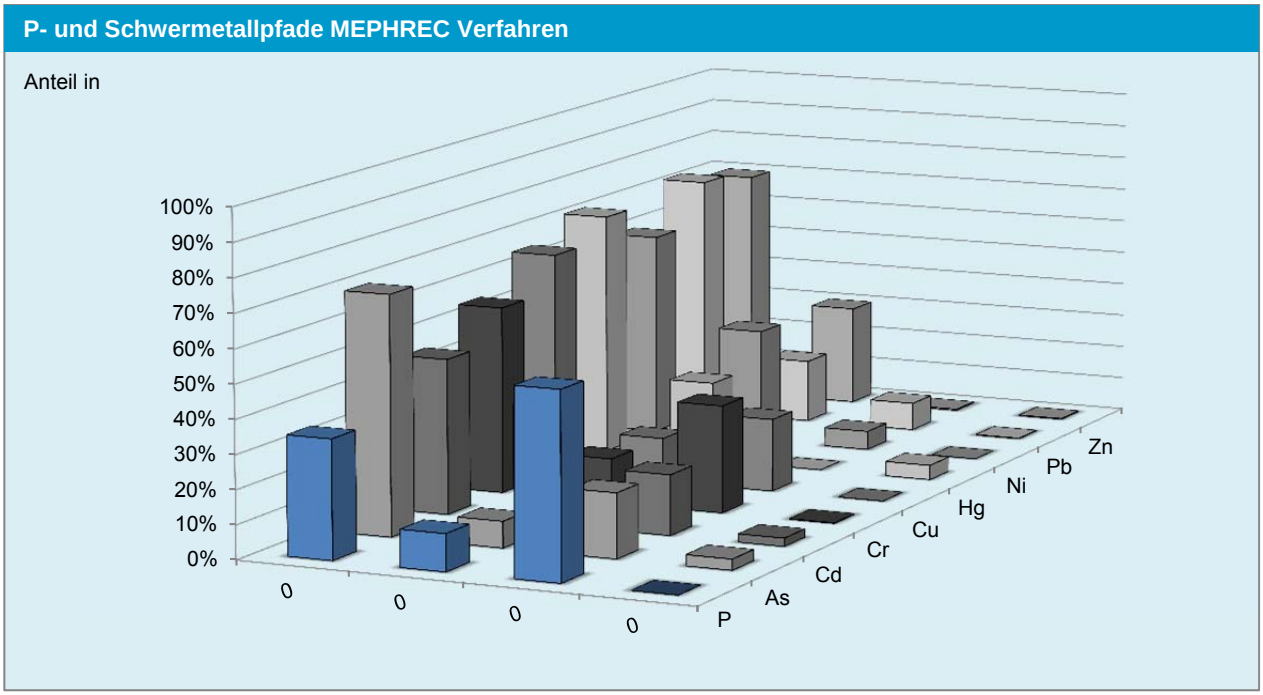


Abbildung 16: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (MEPHREC®)

1.3.3.4 Ergebnis Endprodukt

Endprodukt ist eine P-reiche Schlacke, die ähnliche Eigenschaften wie das früher bekannte Thomasmehl aufweist. Aufgrund der teilweisen schlechten Entfrachtung sind vor allem As, Cr und Cu in hohen Konzentrationen im Endprodukt nachweisbar. Das zeigt sich auch bei der Darstellung der Schwermetallkonzentration bezogen auf den Phosphorgehalt. Für As, Cr, Cu und auch Ni sind höhere Schwermetallgehalte im Vergleich zu einem handelsüblichen Mineraldünger zu erwarten. Allerdings zeigt die

Stoffflussanalyse für die Schwermetalle sehr große Unsicherheiten, wodurch für die genannten Schwermetalle sowohl Schwankungen nach oben als auch nach unten zu erwarten sind. Die Grenzwerte der Düngemittelverordnung werden eingehalten.

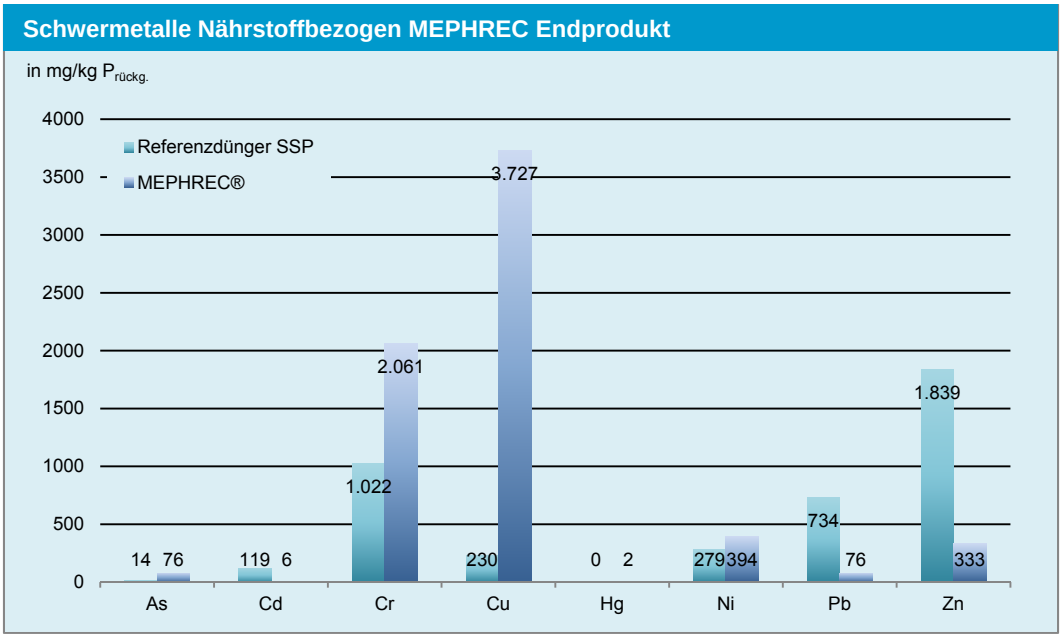


Abbildung 17: Nährstoffbezogene Schwermetallgehalte MEPHREC® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)

Bewertung Endprodukt	Granulierte Schlacke	SSP
Löslichkeit	Gut	Sehr Gut
Düngewirksamkeit	Gut	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	100	230
Anorganische Verunreinigungen		
SM:P [mg Cd/kg P]	6,1	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,105	1,26
Referenzbodenmethode [*limitierendes Element)	1.400 (Cr)	1.450 (Cd*)
Tolerierbare Menge bezogen auf Cd	52	-
Organische Verunreinigungen		
Keine organische Spurenstoffe	5[2]	5
Keine hygienischen Bedenken	5[2]	5
Handhabung		
Einfache Lagerung möglich	5[2]	5
Direkter Einsatz in LW möglich	3	5

Tabelle 14: Bewertung granulierte P-reiche Schlacke

Das Cd:P Verhältnis ist mit 6,1 mg Cd/kg P sehr gering und liegt deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Das Schadeinheitenmodell und die Referenzbodenmethode verdeutlichen, dass die Schwermetallentfrachtung noch nicht ideal ist. Das spiegelt sich in der geringen Ausbringungshäufigkeit wieder, die mit 1.400 Jahren auf dem Niveau des Referenzmineraldüngers liegt. Das limitierende Element ist in diesem Fall Chrom. Allerdings ist eine sehr gute Cd-Entfrachtung möglich, wodurch unter der Berücksichtigung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, das MEPHREC® Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 52 häufiger ausgebracht werden kann. Organische Schadstoffe bzw. hygienische Bedenken sind aufgrund der Prozessführung bei Temperaturen von rund 2.000°C auszuschließen. Ziel ist die Herstellung von granulierter Schlacke, die Größenklassifiziert werden und damit direkt mithilfe moderner Ausbringungsgeräte in der Landwirtschaft ausgebracht werden.

1.3.4 Ökonomische Bewertung

1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten MEPHREC®

Wesentliche Voraussetzung für größenabhängige Kostenkalkulationen ist die Annahme und Festlegung von Up- und Downscalingfaktoren. Auf Basis der vorliegenden Investitionskosten für das MEPHREC® Verfahren wird eine Beziehung zum jährlichen Klärschlammdurchsatz und den entsprechenden Kosten hergestellt. Die Datengrundlage für die Investitionskurve stammt aus dem Endbericht der Untersuchungen an einer Pilotanlage mit Kostenabschätzungen für eine Anlage mit einem Durchsatz von 27.000 t KS TS pro Jahr und den Kosten für eine Anlage mit einem jährlichen Durchsatz von ~16.000 bzw. 19.000 t KS TS pro Jahr. Die Unsicherheit der Daten liegt bei rund +/-10 %. Bereits aus diesen Daten wird deutlich, dass eine Mindestgröße der Anlage von rund 20.000 t KS TS für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlich ist. Die Berechnung der Jahreskosten erfolgt deshalb auf Basis einer Anlage mit einem jährlichen Klärschlammdurchsatz von 27.000 t/a.

Klärschlamm durchsatz [t TS/a]	Einwohnerwerte [EW]	Investitionskosten [Mio. €]	Faktor [aus Ash Dec]
1.492	100.000	4,5	-
4.500	300.000	5,6	0,53
9.000	1.050.000	6,7	0,63
18.000	1.210.000	8,9	0,84
27.000	**1.800.000**	**10,6**	**1,00**
45.000	3.000.000	13,3	1,25

Tabelle 15: Investitionskosten MEPHREC® in Relation zum jährlichen Aschedurchsatz (Investitionskostenfaktor Ash Dec® Verfahren)

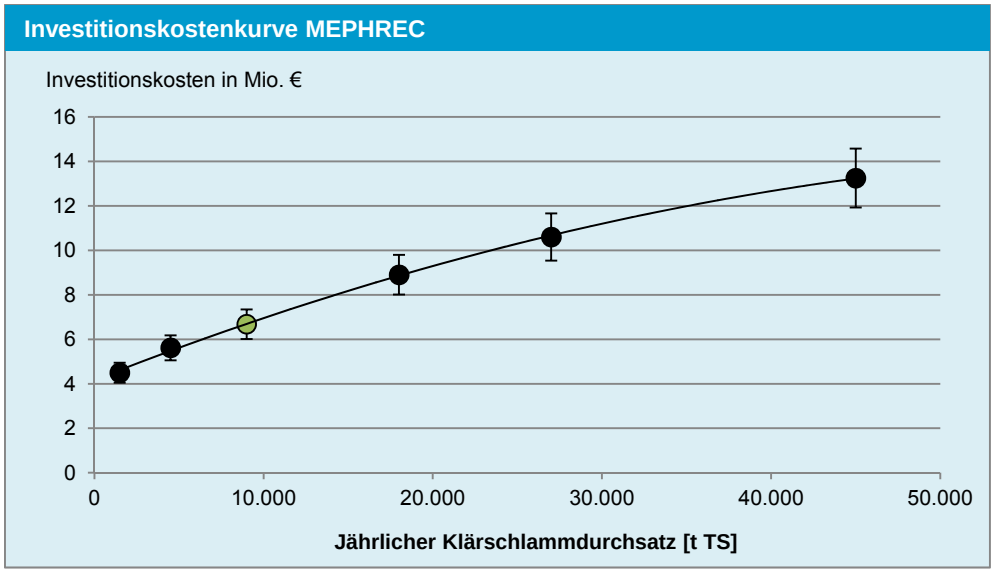


Abbildung 18: Upscaling Faktoren Investitionskosten MEPHREC®

1.3.4.2 Jahreskosten

Die Investitionskosten für das MEPHREC® Verfahren einschließlich der Herstellung von Klärschlamm bzw. Klärschlammasche Briketts belaufen sich für eine Anlage mit einem jährlichen Durchsatz von 27.000 t Klärschlamm Trockensubstanz auf rund 10,6 Mio. Das entspricht zirka dem Klärschlammanfall einer Kläranlage mit rund 1,8 Mio. EW. 60 % der Kosten entfallen auf die Bautechnik (ND 15 Jahre) und 40 % auf die Maschinentechnik (ND 15 Jahre). Aufgrund des erhöhten Wartungsaufwandes wird der Anteil der Wartung an den Investitionskosten mit 3 % festgelegt. Der Personalaufwand ist hoch und wird mit 12 MA/Jahr angenommen werden. In Tabelle 16 werden die Kosten für einen jährlichen Klärschlammdurchsatz von 27.000 t TS (1.800.000 EW) berechnet.

Jahreskosten	Menge [t]	Preis/Einheit	[€/a]
Kapitalkosten			**1.094.000**
Wartung + Reparaturen			318.000
Personal			600.000
Chemikalien			2.292.000
Energie	6.660.300	0,1 €/kWh	666.000
Koks	7.496	360 €/t	1.349.300
Sonstiges	-	-	-
Entsorgung Eisenschlacke	4.454	50	222.700
Entsorgung Stäube	2.553	200	510.600
Betriebskosten			**7.308.000**
Gesamt			**8.402.000**

Tabelle 16: Jahreskosten MEPHREC® (Kläranlage 1.800.000 EW)

Einsparungen/Erlöse	Menge [t]	Preis/Einheit	[€/a]
Erlöse Schlacke	26.600	100	2.670.900
Erlöse Strom	34.028.900	0,1	3.403.000
Erlöse Wärme	42.088.400	0,07	4.559.600
Gesamt			**16.004.600**

Tabelle 17: Einsparungen und Erlöse MEPHREC® (Kläranlage 1.800.000 EW)

Spezifische Kosten	€ (ohne Erlöse)	€ (mit Erlöse)
€/kg $P_{rückgewonnen}$	13,1	-3,5
€/EW*a	4,7	-2,2
€/E*a	9,4	-4,4

Tabelle 18: Spezifische Kosten MEPHREC® (Kläranlage 1.800.000 EW)

1.3.4.3 Variantenrechnung

Bei dieser Berechnung werden alle möglichen maximalen Einsparungen und Erlöse berücksichtigt. Inwieweit alle Einsparungen und Erlöse tatsächlich möglich sind ist unklar. Unsicher sind vor allem die Einnahmen aus der Klärschlammannahme (wird nicht berücksichtigt) und die möglichen Erlöse aus der Synthesegaserzeugung. Werden alle Einsparungen und Erlöse jedoch berücksichtigt, können die Jahreskosten abgedeckt werden bzw. sogar ein Überschuss erwirtschaftet werden Allerdings zeigt sich, dass wie bereits erwähnt eine gewisse Anlagengröße erforderlich ist und damit auch der jährliche Klärschlammdurchsatz hoch sein muss. Kostenrechnung auf Basis der Investitionskostenkurve zeigen, dass eine Umsetzung z.B. für den anfallenden Klärschlamm der Referenzkläranlage (1.490 t KS TS/a) auch unter der Berücksichtigung aller Einsparungen und Erlöse nicht wirtschaftlich sein kann (32,3 €/kg P ohne Einsparungen und Erlöse). Neben der Abfallannahme und den Produkterlösen haben die Erlöse aus dem Verkauf einer möglichen Verstromung des Synthesegases in einem BHKW großen Einfluss auf Betriebskosten. Werden z.B. nur die Abfallannahme und der Endproduktverkauf miteingerechnet, wäre kein wirtschaftlicher Betrieb möglich. Durch den Erlöse aus dem Strom- und Wärmeverkauf wäre bereits ab einem jährlichen Durchsatz von 9,000 t KS TS, das entspricht einer Belastung von rund 300.000 EW ein wirtschaftlicher Betrieb möglich (Abbildung 19).

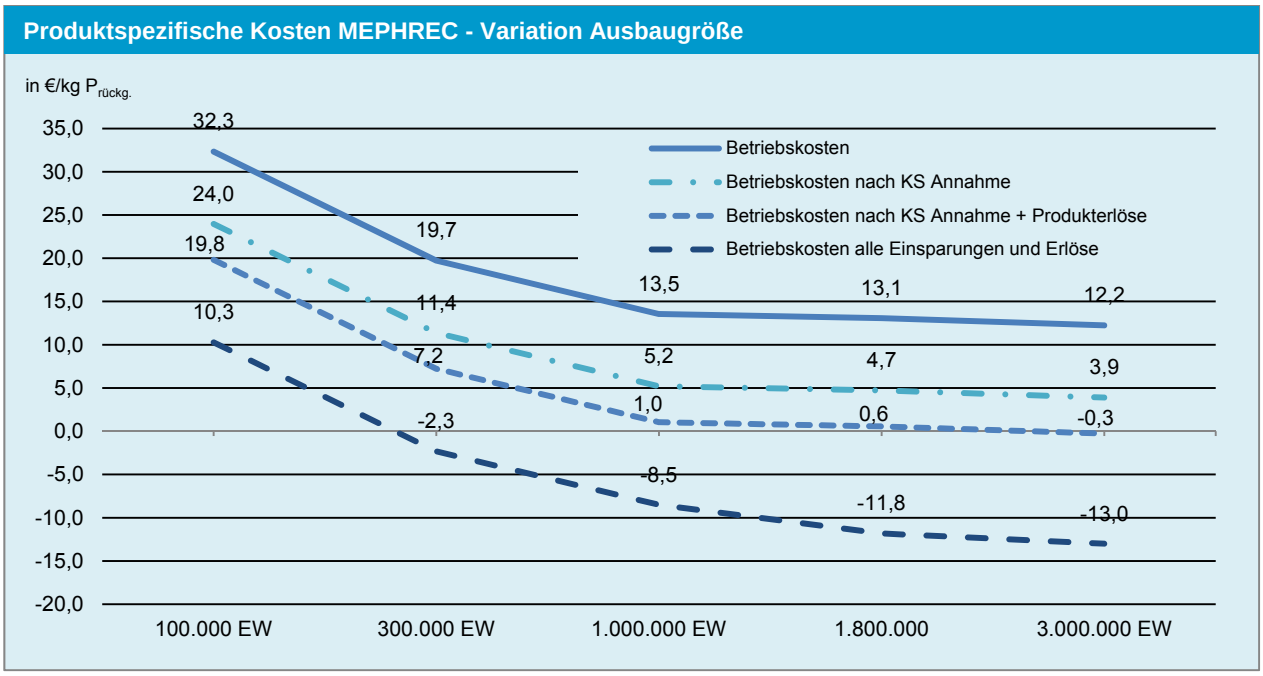


Abbildung 19: Produktspezifische Kosten in Abhängigkeit der Ausbaugröße (MEPHREC®)

1.3.4.4 Kostenaufgliederung

Anhand der Kostenaufgliederung wird deutlich, dass im Falle einer Umsetzung des MEPHREC® Verfahren im Anschluss an die Referenzkläranlage mit einer Belastung von 100.000 EW, rund 40 % der Gesamtkosten auf die Kapitalkosten entfallen. Im Fall des Einsatzes auf Kläranlagen mit deutlich größerer Belastung (1.000.000 bzw. 1.800.000 EW) liegen die Kapitalkosten bei nur 15 bzw. 13 %. Das heißt, die Investitionskosten respektive Kapitalkosten steigen im Vergleich zu den Kosten für Chemikalien und Rohstoffen nicht linear an (siehe Investitionskostenkurve).

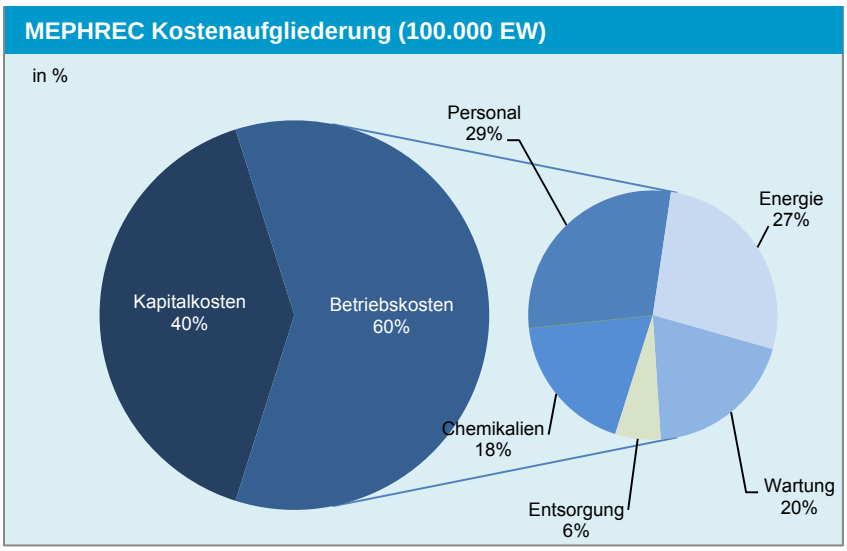


Abbildung 20: Kostenaufgliederung MEPHREC® 100.000 EW

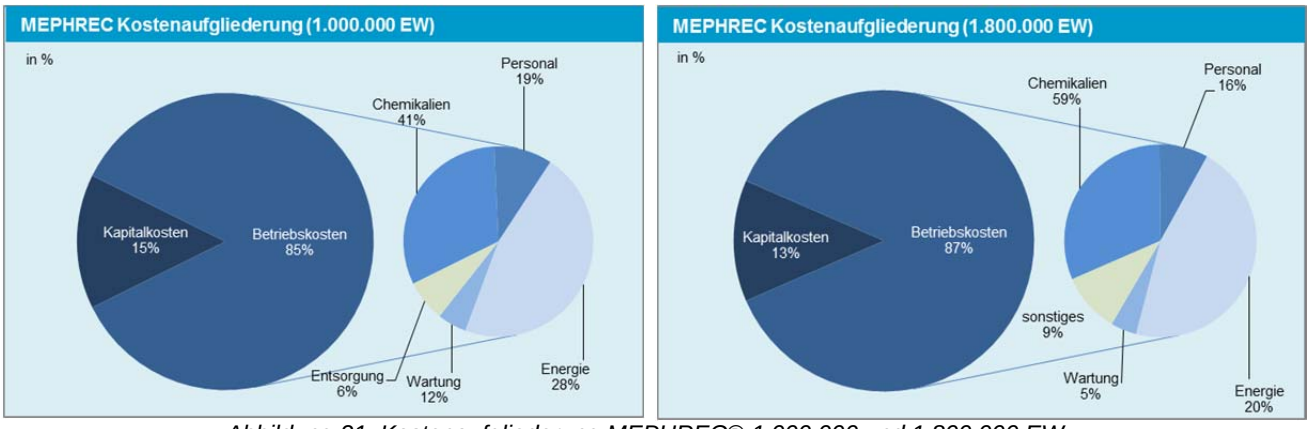


Abbildung 21: Kostenaufgliederung MEPHREC® 1.000.000 und 1.800.000 EW

1.3.4.5 Amortisation

Für Anlagen mit einem Klärschlammdurchsatz < 9.000 t TS ist ein Amortisation der Anlage nicht möglich. Im Falle der größeren Anlagen ist die Amortisation stark von den tatsächlichen möglichen Erlösen abhängig. Das bedeutet, dass z.B. ohne Berücksichtigung der Erlöse aus der Abfallannahme oder auch der Erlöse aus der Stromerzeugung keine Amortisation möglich ist. Somit sind die möglichen Szenarien mit solchen Unsicherheiten behaftet, dass keine verlässliche Aussage zu einer möglichen Amortisation getroffen werden kann.

1.3.4.6 Kosten gesamte Prozesskette

Durch eine Umsetzung des MEPHREC® Verfahrens entfällt eine weitergehende Schlammbehandlung wie etwa die thermische Behandlung, wodurch diese Kosten bei Betrachtung der gesamten Prozesskette eingespart werden können. Im Vergleich zur Referenzsituation ist unter Berücksichtigung aller möglicher Einsparungen mit deutlich geringeren Kosten von 4,7 €/EW*a zu rechnen. Das entspricht einer Einsparung von 6,5 €/EW*a bzw. - 58% im Vergleich zur Referenzsituation.

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	27.000 t KS TS
Kläranlage	
Abwasserreinigung	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50
Kosten Kläranlage	6,00
Thermische Behanldung	0,00
Bettasche	0,00
Filterkuchen	0,00
Rückgewinnungsverfahren	4,84
Entsorgung Stäube	0,41
Entsorgung Eisenschlacke	0,07
Abwasserentsorgung	0,00
Transport	
Schlamm zu Rückgewinnung	0,98
Stäube zu Untertagedeponie	0,20
Eisenschlacke zu Reststoffdeponie	0,03
Summe Kosten	12,52
Einsparungen und Erlöse	
Erlös Endprodukt	1,48
Erlös Strom und Wärme	3,41
Summe Einsparungen und Erlöse	4,89
Gesamtkosten	7,63
Δ zu Referenz	**-31%**

Tabelle 19: Jahreskosten gesamte Prozesskette MEPHREC®

Kläranlage	Thermische Behandlung	MEPHREC®	Entsorgung Eisenschlacke, Wäscherstäube	Transport	Einsparungen Verkauf Schlacke, KS –Annahme, Erlöse Strom/Wärme
6,0 €	0,0 €	4,9 €	0,5 €	1,2 €	7,9 €
Gesamt: 4,7 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: + - 6,5 €/EW*a; Δ %: - 58 %					

Abbildung 22: Kosten gesamte Prozesskette MEPHREC® Verfahren 1.000.000 – 1.800.000 EW Anlage

1.3.4.7 Sensitivitätsanalyse

Da die möglichen Erlöse sehr hohen Unsicherheit aufweisen und damit die finalen Aussagen über die Gesamtkosten mit großen Schwankungen verbunden ist, wird die Sinnhaftigkeit einer Sensitivitätsanalyse auf Basis dieser Daten in Frage gestellt und daher auch nicht durchgeführt.

1.3.5 Literatur

Ignitec (2009) Metallurgisches Phosphor-Recycling (MEPHREC) aus Klärschlämmen und Filterstäuben als Voraussetzung für die wirtschaftliche Erzeugung eines hochwertigen Phosphor-Düngemittels aus Abfällen. Abschlussbericht "Metallurgisches Phosphor-Recycling" AZ: 24557 - 23. Ignitec. Ingenieurbüro für Gießereitechnik GmbH.

Scheidig, K. (2002) Entwicklung der Schmelzvergasung von Abfällen zu einem kostengünstigen Verwertungsverfahren. Umweltmagazin 4/5 2002.

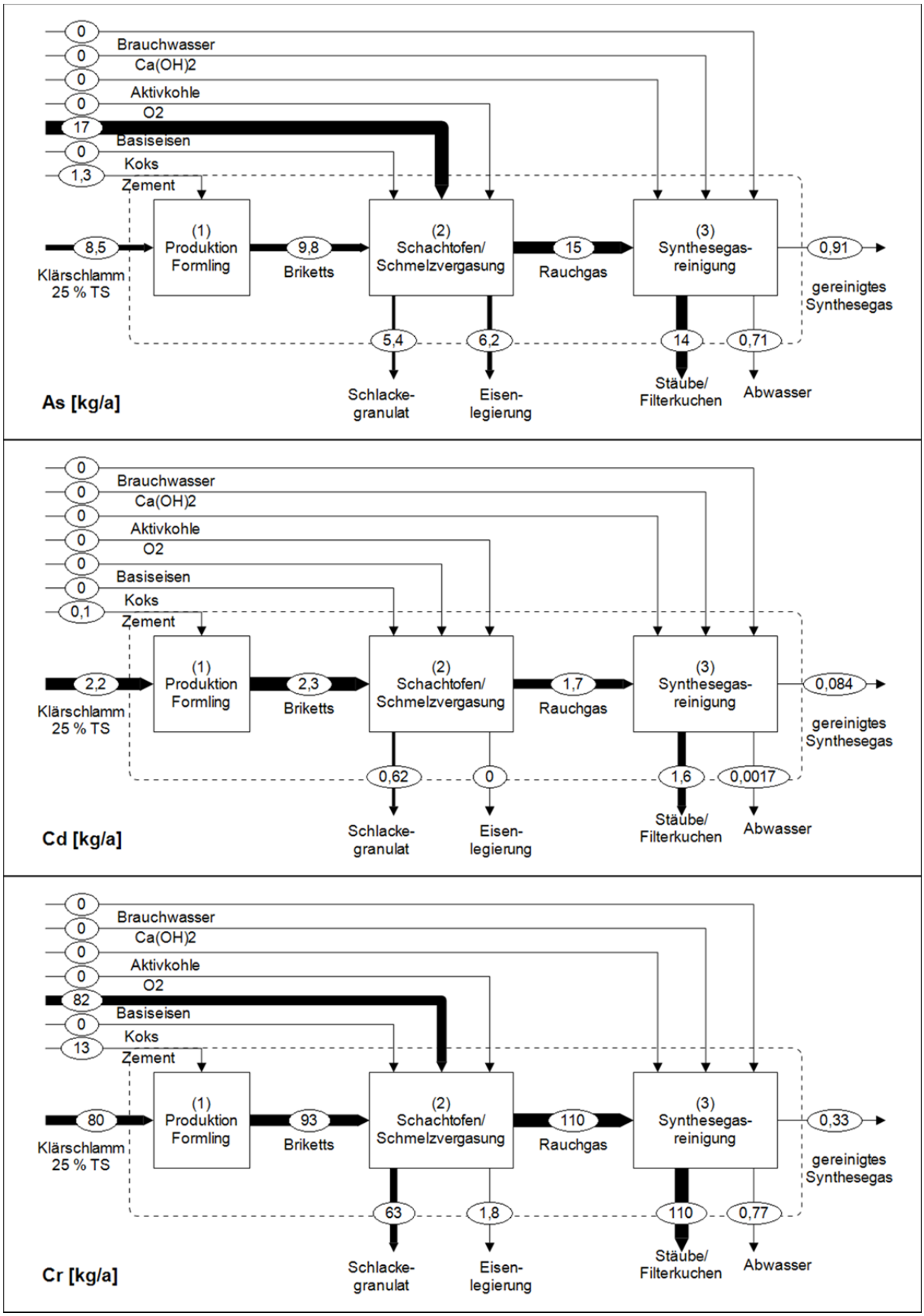
Scheidig, K (2009) 9. Gutachtersitzung zur BMBF/BMU-Förderinitiative P-Recycling. Präsentation und Diskussion des MEPHREC-Verfahrens. Ingitec Ingenieurbüro für Gießereitechnik GmbH Leibzig. 30.9.2009.

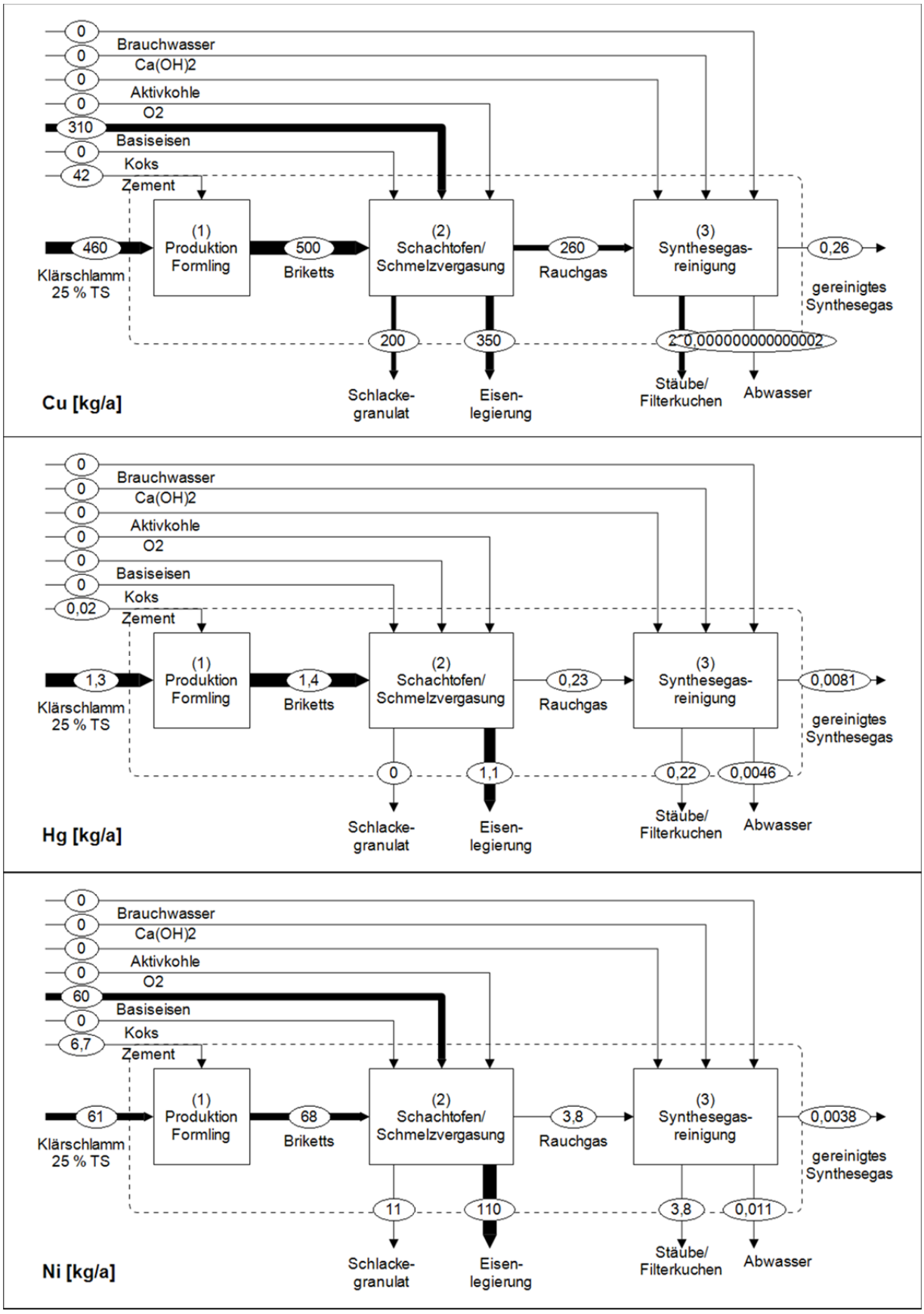
Scheidig, K. (2012) Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim P-Recycling durch Erschließung additiver stofflicher und energetischer Nutzungspotentiale. Round Tabel Phosphor-Recycling, Wien, 17.10.12.

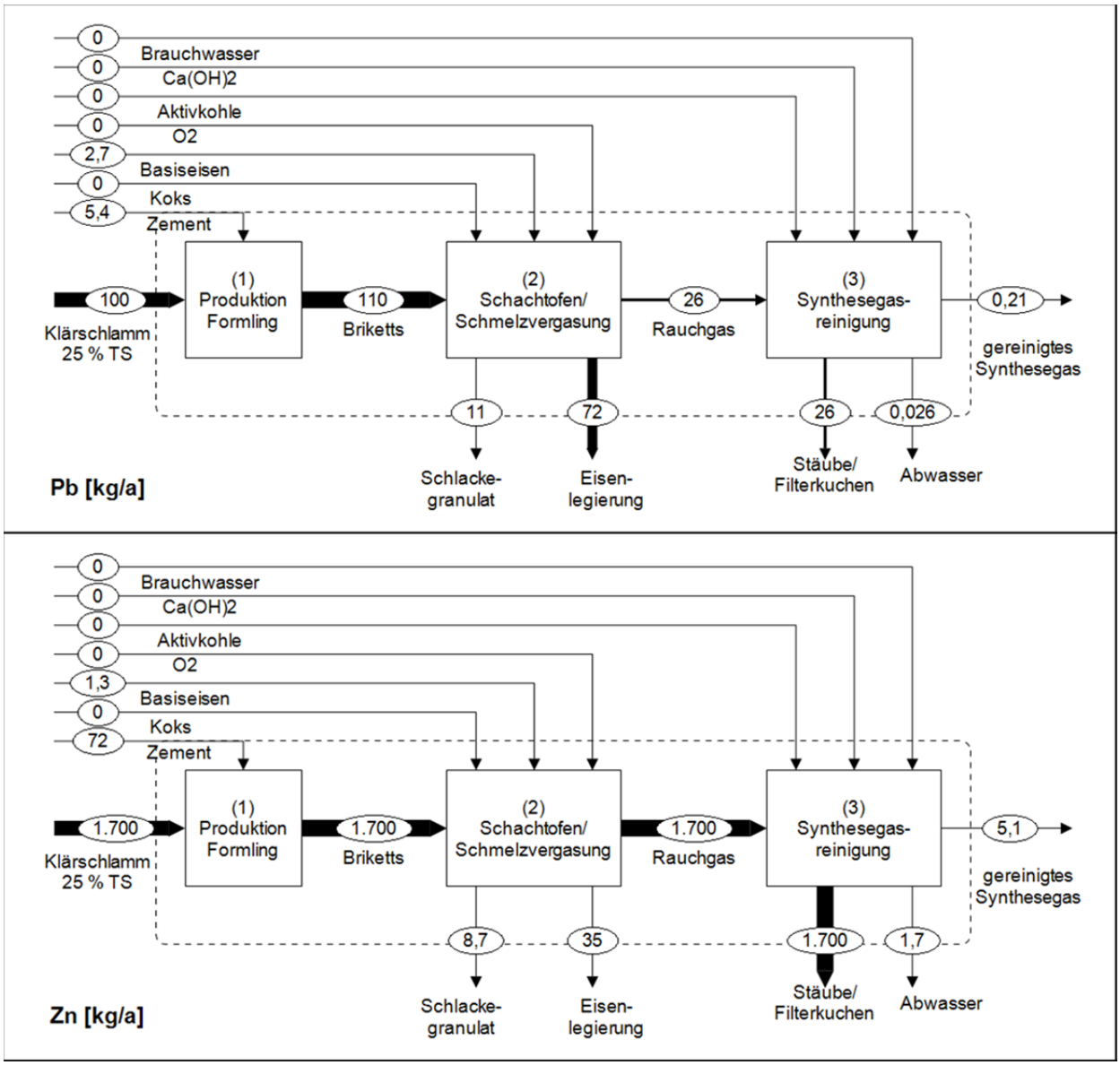
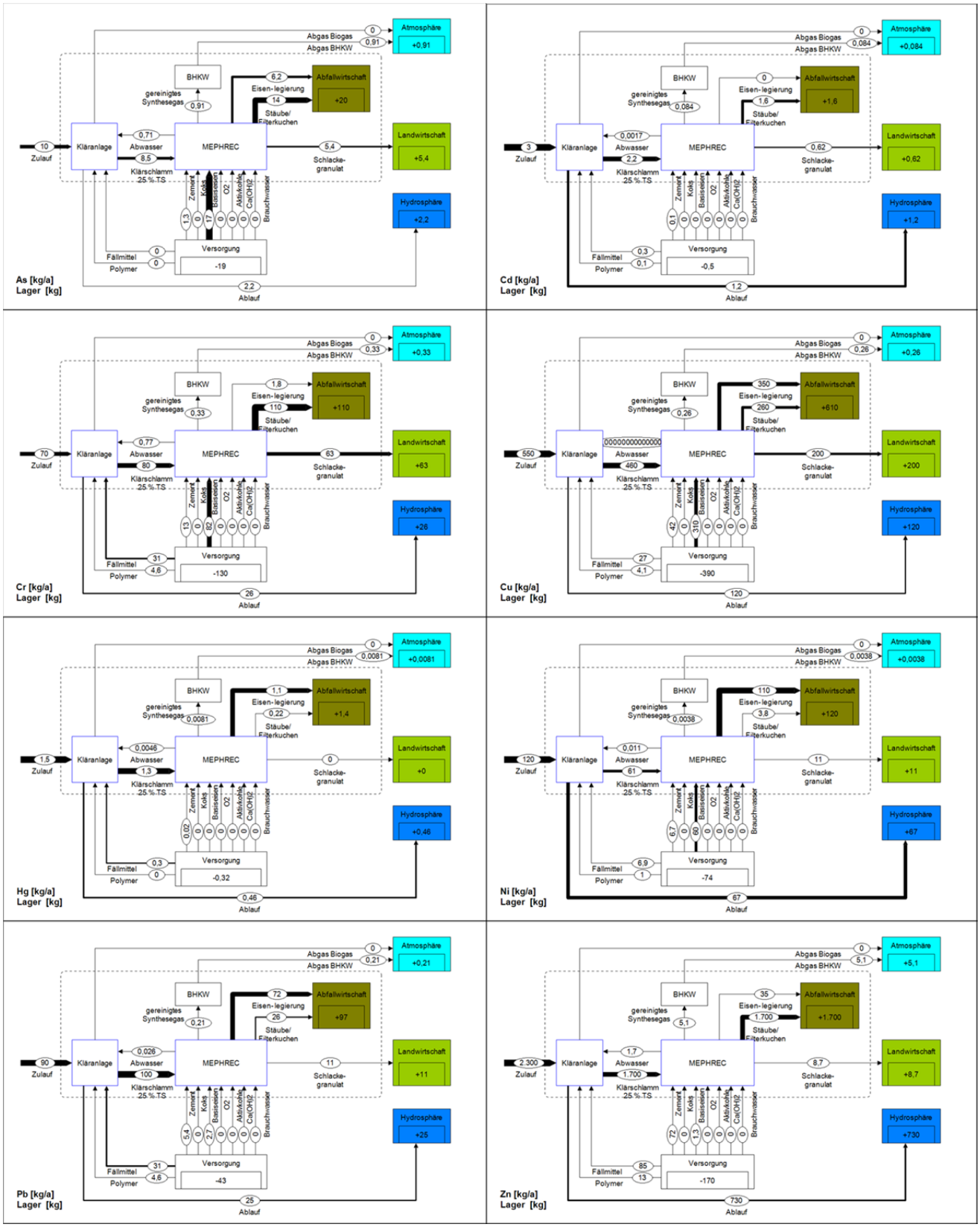
Scheidig, K., Lehrmann, F., Mallon, J., Schaaf, M. (2012) Klärschlamm-Monoverbrennung mit integriertem Phosphorrecycling. Fachbeitrag 3. VDI-Fachkonferenz „Klärschlammbehandlung“ am 26. und 27. September 2012.

1.4 Anhang

1.4.1 Stoffflussanalyse MEPHREC® Prozess




0
Brauchwasser
0
Ca(OH)2
0
Aktivkohle
0
O2
310
Basiseisen
0
Koks
42
Zement
460
Klärschlamm
25 % TS
(1)
Produktion
Formling
500
Briketts
(2)
Schachtofen/
Schmelzvergasung
260
Rauchgas
(3)
Synthesegas-
reinigung
0,26
gereinigtes
Synthesegas
200
350
2*0,000000000000002
Schlacke-
granulat
Eisen-
legierung
Stäube/
Filterkuchen
Abwasser
Cu [kg/a]
0
Brauchwasser
0
Ca(OH)2
0
Aktivkohle
0
O2
0
Basiseisen
0
Koks
0,02
Zement
1,3
Klärschlamm
25 % TS
(1)
Produktion
Formling
1,4
Briketts
(2)
Schachtofen/
Schmelzvergasung
0,23
Rauchgas
(3)
Synthesegas-
reinigung
0,0081
gereinigtes
Synthesegas
0
1,1
0,22
0,0046
Schlacke-
granulat
Eisen-
legierung
Stäube/
Filterkuchen
Abwasser
Hg [kg/a]
0
Brauchwasser
0
Ca(OH)2
0
Aktivkohle
0
O2
60
Basiseisen
0
Koks
6,7
Zement
61
Klärschlamm
25 % TS
(1)
Produktion
Formling
68
Briketts
(2)
Schachtofen/
Schmelzvergasung
3,8
Rauchgas
(3)
Synthesegas-
reinigung
0,0038
gereinigtes
Synthesegas
11
110
3,8
0,011
Schlacke-
granulat
Eisen-
legierung
Stäube/
Filterkuchen
Abwasser
Ni [kg/a]


0
Brauchwasser
0
Ca(OH)2
0
Aktivkohle
0
O2
2,7
Basiseisen
0
Koks
5,4
Zement
100
Klärschlamm
25 % TS
(1)
Produktion
Formling
110
Briketts
(2)
Schachtofen/
Schmelzvergasung
26
Rauchgas
(3)
Synthesegas-
reinigung
0,21
gereinigtes
Synthesegas
11
72
26
0,026
Schlacke-
granulat
Eisen-
legierung
Stäube/
Filterkuchen
Abwasser
Pb [kg/a]
0
Brauchwasser
0
Ca(OH)2
0
Aktivkohle
0
O2
1,3
Basiseisen
0
Koks
72
Zement
1.700
Klärschlamm
25 % TS
(1)
Produktion
Formling
1.700
Briketts
(2)
Schachtofen/
Schmelzvergasung
1.700
Rauchgas
(3)
Synthesegas-
reinigung
5,1
gereinigtes
Synthesegas
8,7
35
1.700
1,7
Schlacke-
granulat
Eisen-
legierung
Stäube/
Filterkuchen
Abwasser
Zn [kg/a]

1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess