



Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Bioprodukttechnologie

Vergleich der Wirbelschichtverbrennung mit der Pyrolyse von Klärschlamm

Bachelorarbeit

Verfasser: Tommy Ender

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Thomas John
Dipl.-Ing. Frank Strobel

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2015-0671-8

Altentreptow, 28. Januar 2016

Abstract

The intention of the Federal Government includes the ending of the agricultural utilisation of sewage sludge. This will have huge consequences for the urban water management. Phosphates now need to be recycled in different ways. Especially in the rural area, which has solid benefits because of the agricultural utilisation, alternatives can be found. There are two possible methods of a peripheral thermal utilisation: The fluidized bed combustion and pyrolysis of sewage sludge. Both methods are different in their technologies. The purpose of this bachelor thesis should be to compare the fluidized bed combustion with the pyrolysis of sewage sludge.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole	5
1 Einleitung	7
2 Stand der Wissenschaft und Technik	9
2.1 Einführung und Begriffserklärung	9
2.2 Klärschlammfall und Klärschlammbehandlung	10
2.3 Thermische Behandlung von Klärschlämmen	11
2.4 Aktueller Stand und aktuelle Entwicklungen	14
3 Rechtsgrundlagen	15
3.1 Allgemeine Aspekte zum Klärschlamm	15
3.2 Klärschlammverordnung und aktuelle Entwicklungen	15
3.3 Genehmigung von Anlagen zur thermischen Verwertung von Klärschlamm	16
4 Vergleich der Wirbelschichtverbrennung mit der Pyrolyse von Klärschlamm ..	17
4.1 Grundlagen	17
4.1.1 Bedeutung der Luftüberschusszahl	17
4.1.2 Verbrennung	17
4.1.3 Vergasung	18
4.1.4 Pyrolyse (Pyrolytische Zersetzung)	18
4.2 Verfahrenstechnik	19
4.2.1 Wirbelschichtfeuerung	19
4.2.1.1 Verfahrenstechnische Beschreibung allgemein	19
4.2.1.2 Dezentrale stationäre Wirbelschichtfeuerung der Firma ES+S GmbH	21
4.2.1.3 Endprodukte	24
4.2.2 Pyrolyse	25
4.2.2.1 Darstellung des Pyrolyseprozesses allgemein	25
4.2.2.2 Kleintechnische Pyrolyseanlagen	26
4.2.2.2.1 Der PYRUBUSTOR®	26
4.2.2.2.2 Die PYREG®-Technologie	29
4.2.2.3 Endprodukte	31
4.2.2.3.1 PYROBUSTOR®	31
4.2.2.3.2 PYREG®-Technologie	32
4.3 Immissionsschutz	33
4.4 Energetische Betrachtung	36
4.4.1 ES+S Wirbelschichtverbrennung	36
4.4.2 PYROBUSTOR®	37
4.4.3 PYREG®-Verfahren	40

4.5	Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung	42
4.6	Ökonomischer Vergleich	46
4.6.1	ES+S Wirbelschichtverbrennung.....	46
4.6.2	PYROBUSTOR®	48
4.6.3	PYREG®-Verfahren	48
5	Zusammenfassung.....	52
6	Literatur – und Quellenverzeichnis.....	55
7	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	59
7.1	Abbildungen.....	59
7.2	Tabellen.....	59
	Erklärung über die Selbstständigkeit der Arbeit	61

Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
Afa	Absetzung auf Abschreibung
ARA	Abwasserreinigungsanlage
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DepV	Deponieverordnung
DüMV	Düngemittelverordnung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
FLOX	Flammenlose Oxidation
Gew-%	Gewichts-Prozent
GK	Größenklassenstufe
GKU	Gesellschaft für kommunale Umweltdienste Ostmecklenburg-Vorpommern mbH
HCl	Chlorwasserstoff bzw. Chlorwasserstoffsäure
Hg	Quecksilber
H _u	Veraltete Angabe für den Heizwert
KA	Kläranlage
kJ	Kilojoule
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
kW	Kilowatt
LU MV	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz MV
MW	Megawatt
NBK	Nachbrennkammer
Ni	Nickel
P	Phosphor
P [kW]	Leistung
P ₂ O ₅	Phosphorpentoxid
Pb	Blei
RG	Rauchgas
RGR	Rauchgasreinigung
ROSOMA	Rostocker Sondermaschinen- und Anlagenbau
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SNCR	Selektive nichtkatalytische Reduktion
SWS	Stationäre Wirbelschicht
SWSF	Stationäre Wirbelschichtfeuerung
TM	Trockenmasse
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VKU	Verband kommunaler Unternehmen

WM MV	Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus MV
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
Zn	Zink
ZWS	Zirkulierende Wirbelschicht
ZWSF	Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung
η	Wirkungsgrad
λ	Luftüberschusszahl, Luftzahl

1 Einleitung

Bei der Abwasseraufbereitung entsteht neben dem gereinigten Wasser Klärschlamm als Sekundärprodukt. Dieser muss behandelt und entsorgt werden. Da Klärschlamm in der Regel viele Nährstoffe, wie z.B. Phosphor enthält, ist eine weitergehende Nutzung dieses Abfallstoffes wichtig. Eine weitverbreitete Methode, um Klärschlämme zu entsorgen, war die bodenbezogene Verwertung in der Landwirtschaft. Damit wurden dem Boden die im Klärschlamm vorhandenen Nährstoffe zugeführt. In ihrem Koalitionsvertrag postulierte die Bundesregierung im Jahr 2013 jedoch das Ende der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. Dafür sollen allerdings Phosphor und andere Nährstoffe aus dem Klärschlamm zurückgewonnen werden [DWA, 2015a]. Weiterhin lief in der Düngemittelverordnung [DüMV, 2012] die festgelegte Übergangsfrist für die Schwermetallgrenzwerte im Klärschlamm aus. Aufgrund der seit dem 01. Januar 2015 geltenden Grenzwerte für Schwermetalle, sowie der Absicht der Bundesregierung, sich langfristig aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung zu verabschieden, wird es zu erheblichen Auswirkungen für die kommunale Wasserwirtschaft kommen. Gerade im ländlichen Raum, welcher von einer bodenbezogenen Klärschlammverwertung profitiert hat, wird die Verwertung von Klärschlämmen zusehends schwieriger [DWA, 2015b], [VKU, 2015]. Nach einer Studie des Ingenieurbüros Friedrich müssen ab 2015 aufgrund dieser neuen qualitativen Vorgaben ca. 12.000 t Klärschlamm (TS/a) in Mecklenburg-Vorpommern thermisch entsorgt werden [WM MV, 2013]; [LU MV, 2013]. Da die landwirtschaftliche Verwertung an Bedeutung verlieren und ein Totalausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung beabsichtigt wird, müssen umgehend Szenarien für die zukünftige Klärschlammverwertung in Mecklenburg-Vorpommern sowie anderen ländlichen Gebieten geschaffen werden [Friedrich, 2014]. Die thermische Verwertung von Klärschlämmen, wie sie in einigen Bundesländern schon lange stattfindet, ist deutlich teurer. Aus den Ergebnissen der öffentlichen Ausschreibungen der thermischen Klärschlammverwertung der letzten Jahre kann für die Planung ein Preis von 80 € je Tonne inklusive Transportkosten angenommen werden. Laut DWA, 2016 soll zudem durch Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und des Phosphornutzungsgebotes eine weitgehende Rückgewinnung des Phosphors bei der Abwasserreinigung erfolgen.

Die Gesellschaft für kommunale Umweltdienste mbH Ostmecklenburg-Vorpommern (GKU) mit Sitz in Altentreptow ist Dienstleister von vier Wasser- und Abwasserzweckverbänden. Die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung ist in diesen Zweckverbänden ländlich

geprägt. Sie zeichnet sich im Abwasserbereich überwiegend durch viele Kläranlagen der Größenstufe I-III aus. Da die Klärschlammverwertung in den Zweckverbänden bisher überwiegend über die Landwirtschaft erfolgte, werden sich die Rahmenbedingungen der Klärschlammverwertung erheblich verändern. Eine mögliche Auswirkung werden mit hoher Wahrscheinlichkeit steigende Abwasserpreise in den Zweckverbänden sein. Auf Grund der Tatsache, dass die bodenbezogene Verwertungsmöglichkeit in Zukunft wegfällt, müssen Alternativen gefunden werden. Es wäre möglich, eine eigene, kleintechnische Anlage zur dezentralen Entsorgung der in den Zweckverbänden der GKU anfallenden Klärschlämme zu errichten. Für eine dezentrale thermische Klärschlammverwertung stehen zwei mögliche Verfahren zur Auswahl: Die konventionelle Wirbelschichtverbrennung und die Pyrolyse bzw. Vergasung von Klärschlamm. Während die Wirbelschichtverbrennung ein bekanntes und etabliertes Verfahren für die thermische Verwertung von Klärschlämmen ist, ist die Pyrolyse weitestgehend unbekannt. Beide Verfahren sind für die Entsorgung von Klärschlämmen geeignet, unterscheiden sich jedoch in ihrer Verfahrenstechnik. Ziel dieser Bachelor-Arbeit soll es daher sein, die konventionelle Wirbelschichtverbrennung von Klärschlämmen mit der Pyrolyse im Kontext einer dezentralen Verwertung zu vergleichen. Weiterhin soll auch auf die Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung eingegangen werden. Zur Rückgewinnung von Phosphor aus der Klärschlammmasche gibt es bereits viele Verfahrensvorschläge [DWA, 2016]. Im Endergebnis wird dann konstatiert, welches der beiden Verfahren geeigneter ist, damit die GKU mbH in einer dieser beiden Verwertungsmöglichkeiten investieren kann, um auch in Zukunft eine Entsorgungssicherheit gewährleisten zu können.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Einführung und Begriffserklärung

Klärschlamm wird in § 2, Absatz 2 der Klärschlammverordnung [AbfKlärV, 2012] wie folgt definiert: „Als Klärschlamm bezeichnet man den bei der Behandlung von Abwasser in Abwasserreinigungsanlagen [...] anfallenden Schlamm, auch entwässert oder getrocknet oder in sonstiger Form behandelt.“

Klärschlamm lässt sich hinsichtlich seines Anfalls in Primär-, Sekundär-, und Tertiärschlamm einordnen [Londong, 2013]. Der Primärschlamm, auch Vorklärschlamm genannt, fällt bei der Abwasserreinigung während der mechanisch –physikalischen Reinigung des Abwassers an. Diese kann beispielsweise durch Sedimentation in Absetzbecken erfolgen. Durch die mechanische Reinigung wird schätzungsweise etwa 1/3 des BSB₅ aus dem Abwasser entfernt. Den Sekundärschlamm teilt man in Rücklaufschlamm und Überschussschlamm ein. Er fällt bei der biologischen Behandlungsstufe in der Nachklärung an. Bei Belebtschlamm anlagen führt man den überwiegenden Teil des Sekundärschlamm als Rücklaufschlamm aus der Nachklärung in das Belebungsbecken zurück. Dies sei nur als Beispiel genannt, da es eine vielfältige Auswahl an biologischen Abwasserbehandlungsmethoden gibt, von denen das Belebtschlammverfahren allerdings die verbreiteste und bedeutendste Verfahrenstechnik darstellt. Da es während der biologischen Abwasserreinigung zu einem stetigen Wachstum der Biomasse kommt, wird ein überschüssiger Teil des Sekundärschlamm als Überschussschlamm abgezogen. Den bei der weitergehenden Abwasserbehandlung anfallenden Schlamm bezeichnet man als Tertiärschlamm. Dieser entsteht beispielsweise bei nachgeschalteten chemischen Reinigungsverfahren, wie Phosphatfällung und Flockung [Felber und Fischer, 2012], [Londong, 2013], [Räbiger, 2015], [Ender, 2015a]. Unter dem Begriff Rohschlamm bezeichnet man den nicht stabilisierten Schlamm [DWA, 2015c].

Als Fäkalschlamm werden Schlämme aus Kleinkläranlagen (z.B. Mehrkammerabsetz- und Mehrkammerausfaulgruben), die sowohl aus Schwimm- und Bodenschlamm, als auch Inhaltsstoffen aus den Haushalten, wie Küchenabfälle und Hygienepapier bestehen, bezeichnet [Londong, 2013], [Ender, 2015a].

2.2 Klärschlammfall und Klärschlammbehandlung

Der Klärschlammfall ist vom jeweiligen verfahrenstechnischen Aufbau der Abwasserbehandlungsanlage abhängig. Entscheidende Faktoren sind unter anderem der Anschlussgrad an das jeweilige Abwassernetz, die demographische Struktur, geologische Strukturen, Ausbaugröße und Auslastung der Abwasserreinigungsanlage. Nach der Klärschlammstudie des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz MV und des Ministeriums für Wirtschaft, Bau und Tourismus MV fällt in Mecklenburg-Vorpommern eine Klärschlammmenge von 41.000 t TM/a an. Die Hälfte dieser Menge wird dabei nur von 12 Kläranlagen erzeugt [WM MV, 2013]; [LU MV, 2013].

Die Klärschlammbehandlung lässt sich in die einzelnen Verfahrensschritte Schlammstabilisierung, Schlammentwässerung und Schlammverwertung aufteilen. Unter Schlammstabilisierung sind Verfahren zu verstehen, die den Klärschlamm so weit behandeln, dass er weitgehend geruchlos ist und von ihm keine biologischen Aktivitäten mehr ausgehen können. Nach seiner Stabilisierung wird der Klärschlamm einer Fest-Flüssig-Trennung unterzogen. Dabei entsteht neben einer festen Komponente, auch eine flüssige Fraktion. Inzwischen gibt es eine Vielzahl von Techniken, die eine Separation des Klärschlammes ermöglichen. Je nach Auswahl des Verfahrens, können Gravitationskraft, Zentrifugalkraft oder Druckkraft angewendet werden [KTBL, 2013]. Die Schlammentwässerung kann mittels Kammerfilterpressen, Schneckenpressen, Druckfilterpressen, Siebbandpressen oder Schneckenzentrifugen erfolgen. Manche Verfahren setzen zusätzlich zur mechanischen Trennung Flockungsmittel ein, um den Klärschlamm zu konditionieren. Bei Siebbandpressen, Schneckenpressen, Kammerfilterpressen und Dekantierzentrifugen werden dem Klärschlamm Polymere zugesetzt, um ihn dann zu entwässern [Ender, 2015a].

Im Versorgungsgebiet der GKA leben 111.482 Einwohner. Das Versorgungsgebiet umfasst insgesamt 3.080 km². An den 76 Kläranlagen im Verbundesgebiet sind ca. 76 % aller Einwohner angeschlossen. Der jährliche Abwasseranfall beträgt 4.210.939 m³. Durch die eher ländliche Struktur sind überwiegend kleinere Kläranlagen der Größenklassenstufe I-III zur Behandlung des anfallenden Abwassers vorhanden. Kleinere Kläranlagen liefern ihren Nassschlamm an größere Kläranlagen, wo dieser mitbehandelt wird. Der jährliche Klärschlammfall ist den Wasser- und Abwasserzweckverbänden unterschiedlich, was vor allem an den Einwohnerzahlen in den Zweckverbänden liegt. Jährlich insgesamt im Mittel

über 2.500 t TS Klärschlamm an. Die übliche Verwertungsmethode war bisher die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung. Daneben wurden aber auch bestimmte Mengen thermisch verwertet, z.B. bei Überschreitungen von Schwermetallgrenzwerten. Die nachfolgende Tabelle 2 stellt die geschätzten jährlichen Mengen an anfallenden Klärschlamm in den Zweckverbänden der GKK mbH dar.

Tabelle 2: Schätzung des jährlichen Klärschlammaufkommens

Klärschlamm	Menge in TM [t/a]	% TS	org. Subst. [%]
maschinell entwässert			
Kläranlage A	750	25	50
Kläranlage B	625	25	70
Klärschlammvererdung			
Kläranlage C	640	25	45
Kläranlage H	130	25	45
Trockenbeete			
Kläranlage D	200	15	50
Kläranlage E	50	15	54
Nassschlamm			
Kläranlage F	45	8	60
Kläranlage G	70	4	64
Teichschlamm	77,5	4	40
Gesamtmenge	2.587,5		
Durchschnittswerte, gewichtet		22,5	54,95

Die Klärschlammbehandlung läuft in den jeweiligen Zweckverbänden unterschiedlich ab.

2.3 Thermische Behandlung von Klärschlämmen

Da die landwirtschaftliche Verwertung in Deutschland immer weiter in den Hintergrund rücken wird, u.a. auch aufgrund von Veränderungen auf politischer und rechtlicher Ebene, sind alternative Möglichkeiten zu suchen. Die thermische Verwertung stellt eine solche Möglichkeit dar. Da Klärschlamm nach dem Verlassen der Abwasserbehandlungsanlage als Abfall rechtlich geregelt wird, gelten die Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG).

Für die thermische Verwertung von Klärschlamm gibt es folgende Varianten:

- Monoverbrennung: Klärschlamm als Hauptbrennstoff
- Mitverbrennung: Klärschlamm wird in Kraftwerken, wie Braunkohle- oder Steinkohlekraftwerken mitverbrannt
- Mitverbrennung in Zementwerken: Klärschlamm wird in Zementwerken energetisch genutzt
- Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen

Ausgefaulter Klärschlamm hat einen Heizwert von 10.800 KJ/kg TM, während nicht ausgefaulter Klärschlamm einen Heizwert von 14.500 KJ/kg TM besitzt [Spiegelberg, 2006]. In Monoverbrennungsanlagen wird Klärschlamm als alleiniger Brennstoff verwertet oder in Mitverbrennungsanlagen zusammen mit Braun- oder Steinkohle, Müll und Ersatzbrennstoffen verbrannt. Nach der Klärschlammstudie des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern wurde im Jahr 2013 bereits die Hälfte des anfallenden Klärschlamm in Deutschland thermisch entsorgt, was in etwa 1 Mio. t TS/a entspricht. Davon wurden bereits 43 % der Klärschlämme in Monoverbrennungsanlagen entsorgt [WM MV, 2013], [LU MV, 2013]. Die nachfolgende Abbildung 2.1 stellt die möglichen thermischen Verwertungswege für Klärschlamm im Jahr 2013 dar:

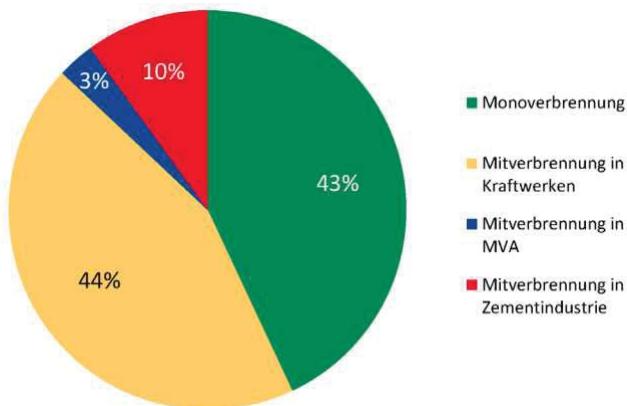


Abbildung 2.1: Thermische Klärschlammensorgung in Deutschland [WM MV, 2013], [LU MV, 2013].

Phosphate können und sollen voraussichtlich ab dem 01.01.2025 aus den Aschen der Monoverbrennungsanlagen rückgewonnen werden. Im Gegensatz dazu können keine Phosphate aus der Mitverbrennung wiedergewonnen werden. Die Mitverbrennung von Klärschlämmen wird auf lang absehbarer Zeit keine Zukunft haben, da diese ausschließlich

Klärschlämme mit Phosphatgehalter von < 20 g /kg TM verwerten dürften. Alle anderen Klärschlämme mit > 20 g/kg TM Phosphor müssen in Monoverbrennungsanlagen verwertet werden, so dass anschließend aus der Klärschlammmasche Phosphor zurück gewonnen werden kann. Die Klärschlammstudie ergab, dass die Klärschlämme in Mecklenburg-Vorpommern im Mittel einen P_2O_5 -Gehalt von 6,7 % aufweisen (siehe Abbildung 2.2). Umgerechnet entsprechen das etwa 2,9 % Phosphor [WM MV, 2013], [LU MV, 2013].

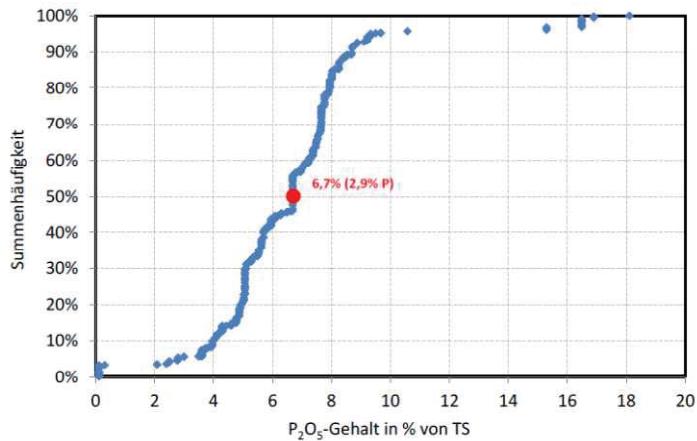


Abbildung 2.2: Summenhäufigkeit für Phosphor in Klärschlamm als P_2O_5 [WM MV, 2013], [LU MV, 2013].

2.4

Aktueller Stand und aktuelle Entwicklungen

Die thermische Verwertung wird in Zukunft aufgrund geplanter Regelungen zur Phosphorrückgewinnung das wichtigste Verfahren zur Verwertung von Klärschlämmen sein. Die DWA, 2013 geht davon aus, dass im Stoffstrom Klärschlammmasche ein Phosphorrückgewinnungspotenzial von ca. 90 % der Zulauffracht besteht. Die Phosphorkonzentration soll dabei zwischen 60-80 g/kg liegen [DWA, 2013]. In diesem Zusammenhang wird vor allem die Monoverbrennung in Zukunft eine größere Rolle spielen. Stand der Technik ist die Klärschlammmonoverbrennung in ihrer Ausführung als Wirbelschichtverbrennung. Voraussetzung für eine effektive Monoverbrennung ist ein Heizwert von ca. 4.500 kJ/kg, sowie ein TS-Gehalt des zu verwerteten Klärschlamms von min. 45 % [WM MV, 2013]; [LU MV, 2013]; [DWA, 2015a]; [DWA, 2010]. Das österreichische Umweltbundesamt hält eine dezentrale Verbrennung von Klärschlämmen für möglich. Diese Verfahren sind vor allem von der anfallenden Klärschlammmenge abhängig [Kügler et al., 2004].

Sowohl die Pyrolyse, als auch die Vergasung von Klärschlamm, sind recht neue und weitestgehend noch unbekannte Verfahren zur thermischen Verwertung von Klärschlamm. Man erhofft sich von diesem Verfahren verschiedene Vorteile gegenüber der Klärschlammmonoverbrennung. Vor allem im süddeutschen Raum sind derartige Verfahren erprobt worden [DWA, 2012]. Die DWA, 2005 geht davon aus, dass sich die Vergasungstechnologie in einem nennenswerten Umfang nicht verbreiten wird. Die KlärschlammPyrolyse wurde im Gegensatz zur Vergasung von vielen Herstellern weiterentwickelt. Im Bereich der KlärschlammPyrolyse gibt es in Deutschland und Österreich vor allem Erfahrungen im klein- bis mittelgroßen technischen Maßstab für dezentrale Anwendungen. Als eigenständiges Verfahren wird die Pyrolyse großtechnisch nicht genutzt. Weiterhin sind die Verfahren im Gegensatz zu Verbrennungsanlagen zu komplex [DWA, 2007]. Die Pyrolyse befindet sich gegenwärtig immer noch in der Forschung und Entwicklung. Innerhalb eines komplexeren Gesamtverfahrens findet die Pyrolyse allerdings durchaus Anwendung, wie beispielsweise im Thermoselect-Verfahren [DWA, 2007], [Werther, 2003], [Kügler et al., 2004], [Maaß, 2015].

3 Rechtsgrundlagen

3.1 Allgemeine Aspekte zum Klärschlamm

Klärschlämme sind unvermeidbare Abfälle. In § 11, Absatz 2 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes von 2012 wird die abfallrechtliche Einordnung, sowie die Kreislaufwirtschaft von Klärschlämmen geregelt. Die für Klärschlamm in diesem Zusammenhang zutreffenden Verordnungen sind zum einen die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) [AbfKlärV, 1992 i. d. F. v. 2012] und zum anderen die Düngemittelverordnung (DüMV) [DüMV, 2012].

3.2 Klärschlammverordnung und aktuelle Entwicklungen

Die Neuordnung der Klärschlammverwertung wird schon seit Jahren diskutiert. Im August dieses Jahres veröffentlichte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit einen internen Referentenentwurf zur Neuordnung der Klärschlammverwertung, welcher allerdings noch nicht innerhalb der Bundesregierung abgestimmt wurde. In dieser Novelle heißt es, dass die Betreiber von Abwasserbehandlungsanlagen verpflichtet sind, das im Klärschlamm enthaltene Phosphor ab 1. Januar 2025 zurückzugewinnen. Da Phosphor ein essentielles Element ist, wurden und werden Verfahren entwickelt, um Phosphate aus den Stoffströmen der Abwasserbehandlung zurückzugewinnen. Dieses soll dann für Düngezwecke genutzt werden. Die bodenbezogene Verwertung soll parallel dazu beendet werden [BMUB, 2015].

In Artikel 5, Teil 1a, § 3b der Novelle der Klärschlammverordnung wird die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammassen rechtlich erläutert. Darin wird auch festgelegt, dass der Betreiber einer Klärschlammverbrennungs- oder Klärschlammmitverbrennungsanlage unabhängig des Phosphatgehaltes des eingesetzten Klärschlams verpflichtet ist, Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung durchzuführen. In der Begründung zum Referentenentwurf ist zudem erläutert, dass eine separate Lagerung der Verbrennungsaschen, insofern diese einer zukünftigen Phosphorrückgewinnung zugeführt wird, zulässig ist [BMUB, 2015]. Die Klärschlammasse ist als Abfall anzusehen und unterliegt dem Abfallrecht [Schwetzel, 2013]. Eine Lagerung der Klärschlammasse ist in einem Langzeitlager zulässig, insofern es zu keiner Vermischung mit anderen Abfällen kommt und eine zukünftige Rückgewinnung gewährleistet werden kann. Rechtlich geregelt

wird diese Lagerung durch die Deponieverordnung (DepV) vom 27. April 2009. Dort ist in § 23 Absatz 6 eine zulässige Frist zur der Rückholung und Aufbereitung der Klärschlammverbrennungsaschen festgelegt, wonach diese bis zum 30. Juni 2023 erfolgen muss. Die Begründung zum Referentenentwurf sieht vor, dass nach Artikel 2 der Novelle die Frist bis zum 31. Dezember 2035 verlängert werden soll [BMUB, 2015].

3.3 Genehmigung von Anlagen zur thermischen Verwertung von Klärschlamm

Für die thermische Verwertung von Klärschlamm gelten auf Bundesebene das Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 17. Mai 2013 (BImSchG), sowie das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vom 24. Februar 2012. Für die Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes auf dem Gebiet der thermischen Verwertung gelten die 4. BImSchV (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen), die 17. BImSchV (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen), sowie die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). In der 17. BImSchV sind unter anderem die Verbrennungsbedingungen für Abfallverbrennungsanlagen (§ 6, 17. BImSchV), die Verbrennungsbedingungen für Abfallmitverbrennungsanlagen (§ 7, 17. BImSchV), sowie die Emissionsgrenzwerte (§ 8f 17. BImSchV) aufgeführt. Eine Anlage zur Beseitigung oder Verwertung fester, flüssiger oder in Behältern gefasster gasförmiger Abfälle, Deponegas oder anderer gasförmiger Stoffe durch thermische Verfahren, insbesondere Entgasung, Plasmaverfahren, Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung oder eine Kombination dieser Verfahren, erfordern bei Anlagen, die 10 Tonnen gefährlicher Abfälle oder mehr je Tag und Anlagen, die weniger als 10 Tonnen gefährlicher Abfälle je Tag behandeln, ein Genehmigungsverfahren gemäß § 10 BImSchG (mit Öffentlichkeitsbeteiligung). Anlagen, die 3 Tonnen nicht gefährlicher Abfälle oder mehr je Stunde behandeln, erfordern ebenfalls ein Genehmigungsverfahren gemäß § 10 BImSchG (mit Öffentlichkeitsbeteiligung), wohingegen Anlagen, die weniger als 3 Tonnen nicht gefährlicher Abfälle je Stunde behandeln, nur ein vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG (ohne Öffentlichkeitsbeteiligung) erfordern [17. BimSchV, 2013].

4 Vergleich der Wirbelschichtverbrennung mit der Pyrolyse von Klärschlamm

4.1 Grundlagen

4.1.1 Bedeutung der Luftüberschusszahl

Für die Beschreibung thermo-chemischer Prozesse, wie Verbrennung und Pyrolyse, ist die Luftüberschusszahl von Bedeutung. Unter der Luftüberschusszahl λ (auch Luftzahl oder Luftüberschuss genannt) versteht man den Grad des Luftüberschusses bei thermo-chemischen Umwandlungsprozessen. Die dimensionslose Kenngröße wird aus dem Verhältnis aus dem einen Oxidationsvorgang insgesamt zugeführten Luftmenge und dem einen vollständigen Oxidationsvorgang stöchiometrisch minimal benötigten Luftmenge berechnet. Die nachfolgende Formel 4.1 stellt dieses Verhältnis mathematisch dar [Kalschmitt et al., 2009]:

$$(4.1) \lambda = \frac{m_{Luft,ges}}{m_{Luft,min}}$$

$m_{Luft, ges}$: Luftmenge, die einem Oxidationsvorgang insgesamt zugeführte Luftmenge

$m_{Luft, min}$: Luftmenge, die einem Oxidationsvorgang mindestens zugeführt werden muss, damit stöchiometrisch eine vollständige Verbrennung stattfinden kann

Damit eine vollständige Oxidation ablaufen kann, muss die Luftüberschusszahl mindestens 1 betragen. In der Praxis ist Luftüberschusszahl meist größer als eins, sodass ein tatsächlicher Luftüberschuss vorliegt [Kalschmitt et al., 2009].

Ist die Luftüberschusszahl $\lambda = 0$, sodass der Reaktion kein Sauerstoff von außen zugeführt wird, spricht man von der pyrolytischen Zersetzung des eingesetzten Brennstoffs.

4.1.2 Verbrennung

Eine Verbrennung ist eine chemische Reaktion, bei dem Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H_2) unter Einwirkung von Sauerstoff (O_2) zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) oxidiert werden. Dabei wird Energie freigesetzt. Für eine vollständige Reaktion muss die Luftüberschusszahl mindestens eins sein. Um eine optimale vollständige Verbrennung zu erzielen, wird dem Prozess Verbrennungsluft im Überschuss zugeführt. Die Luftzahl ist ≥ 1 .

Ist diese kleiner eins aber größer als null, spricht man von einer unvollständigen Oxidation. Bei dieser entstehen Kohlenstoffmonoxid (CO), verschiedenen Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoff in Form von Ruß. Die Verbrennung läuft in verschiedenen Teilschritten ab. Als erstes kommt es zur Erwärmung, dann zur Trocknung des Brennstoffs. Der nächste Teilprozess ist die pyrolytische Zersetzung aufgrund der Wärmeeinwirkung, gefolgt von der Vergasung des Brennstoffs zu Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff und Sauerstoff. Im letzten Schritt werden diese Gase bei hohen Temperaturen von 700 bis 1.500 °C oxidiert, wobei Kohlenstoffdioxid und Wasser entstehen [Kaltschmitt et al., 2009], [Räbiger, 2015], [Thieme RÖMPP Online, 2016].

4.1.3 Vergasung

Bei der Vergasung wird der Brennstoff, wie z.B. Kohlenstoff, nicht zu Kohlenstoffdioxid sondern nur zu Kohlenmonoxid oxidiert und nur unvollständig verbrannt. Die Luftzahl λ ist größer null, aber kleiner eins. Somit ist die Verbrennung unterstöchiometrisch [Kaltschmitt et al., 2009], [Schwister, 2010]. Während der Vergasung entsteht ein Synthesegas, welches beispielsweise für andere technische Prozesse verwendet und räumlich getrennt, weiter oxidiert werden kann [Kaltschmitt et al., 2009].

4.1.4 Pyrolyse (Pyrolytische Zersetzung)

Im Gegensatz zur Verbrennung findet die Pyrolyse ausschließlich unter Wärmeeinwirkung und ohne zusätzliche Sauerstoffzufuhr statt. Die Luftüberschusszahl λ ist null. Da aber beispielsweise Biobrennstoffe wie Klärschlamm Sauerstoff enthalten, können während der Pyrolyse trotzdem Oxidationsreaktionen ablaufen. Im ersten Schritt der pyrolytischen Zersetzung wird der Brennstoff auf Temperaturen von 150 bis 220 °C erwärmt, wodurch erste Makromoleküle irreversibel zerstört werden. Im weiteren Verlauf werden langkettige organische Verbindungen in kürzerkettige Verbindungen aufgespalten. Diese Verbindungen sind meist flüssig und/oder gasförmig. Es entstehen Pyrolysegas und Pyrolyseöl. Zusätzlich fällt bei der Pyrolyse auch ein fester Rückstand an, welcher Koks genannt wird. Die pyrolytische Zersetzung ist bei Temperaturen von 500 °C weitgehend abgeschlossen. Im Bereich von 280 bis 500 °C ist die Pyrolyse exotherm, bei Temperaturen oberhalb von 500 °C endotherm. Je nach Temperaturbereich und Dauer der pyrolytischen Zersetzung, lässt sich die Pyrolyse in verschiedene Technologien einteilen: die Hochtemperatur-, Mitteltemperatur- und

Tieftemperaturpyrolyse. Findet die Pyrolyse bei Temperaturen von bis zu 500 °C statt, so spricht man von der Tieftemperaturpyrolyse. Pyrolyseverfahren, die bei Temperaturen von 500 bis 800 °C stattfinden, werden als Mitteltemperaturpyrolyse bezeichnet. Die Hochtemperaturpyrolyse läuft bei Temperaturen oberhalb von 800 °C statt. Die Zusammensetzung der entstehenden Endprodukte ist wesentlich von den eingesetzten Temperaturen, sowie der Dauer abhängig [Kaltschmitt et al., 2009], [Räbiger, 2015], [Maaß, 2015]. Die verschiedenen Pyrolysetechnologien werden in Kapitel 4.2.2.1 genauer erläutert.

4.2 Verfahrenstechnik

4.2.1 Wirbelschichtfeuerung

4.2.1.1 Verfahrenstechnische Beschreibung allgemein

Für thermische Verwertung von Klärschlämmen hat sich die Wirbelschichtfeuerung in den letzten Jahren etabliert und wurde für diesen Brennstoff Stand der Technik. Es handelt sich dabei um automatisch beschickte Feuerungen. Der Wirbelbettreaktor beruht auf dem Prinzip, dass das Brennstoffpartikel in Folge einer großen Anströmgeschwindigkeit in einem Schwebezustand gehalten wird. Man unterscheidet die Wirbelbettreaktoren in zwei Varianten [Kaltschmitt et al., 2009]:

- Stationäre Wirbelschichtfeuerung (SWSF)
- Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (ZWSF)

Im Nachfolgenden soll die stationäre Wirbelschichtfeuerung (SWSF) beschrieben werden. Das Wirbelbett besteht aus einem inerten Sand-Asche-Gemisch. Der Brennstoff wird oberhalb dieses Wirbelbetts eingetragen, unterhalb des Wirbelbetts sind Düsen angebracht, welche teilweise vorgewärmte Luft in das Bett einblasen. Brennstoff und Wirbelbett werden dadurch in Schweben gehalten. Wirbelschichtreaktoren mit einer stationären Wirbelschicht werden mit Geschwindigkeiten von 1 bis 2 m/s betrieben. Das Verfahren eignet sich für Brennstoffe mit einer Partikelgröße von bis zu 100 mm. Es kommt zu einer annähernd vollständigen Oxidation des Brennstoffs [Kaltschmitt et al., 2009]. Aufgrund der niedrigen Gasgeschwindigkeiten wird ein Austragen der Asche weitgehend vermieden. Ansonsten wird diese in einer dem Wirbelschichtreaktor nachgeschaltetem Entstaubungseinrichtung

abgeschieden. Während des Verbrennungsprozesses können dem Wirbelschichtreaktor noch Additive wie z.B. Kalk oder halbgebrannter Dolomit zugegeben werden, um störende bzw. schädliche Stoffe wie Schwefel in die zurückbleibende Asche einzubinden [Kaltschmitt et al., 2009], [Schwister, 2010].

Die Temperatur in den Reaktoren kann entweder durch Tauchheizflächen, also in dem Wirbelbett integrierte Wärmeüberträger eingestellt werden oder durch eine sogenannte unterstöchiometrische Wärmezufuhr. Die Tauchheizflächen erzielen bei Nennlast eine Temperatur von ca. 850 °C. Die zugeführte Luft ($\lambda > 1$) wird zum Großteil zur „Fluidisierung“ der Brennpartikel verwendet, ein kleiner Teil wird zusätzlich als Sekundärluft dem Reaktor zugeführt. Diese gelangt oberhalb des Wirbelbetts in den sogenannten Freiraum in den Reaktor. Ein Nachteil dieser Betriebsweise ist die Abnutzung der Tauchheizflächen infolge einer ständigen Abnutzung durch Erosion [Kaltschmitt et al., 2009].

Daneben gibt es auch die unterstöchiometrische Betriebsweise, welche zunehmend bei neueren Reaktoren realisiert wird. Die Luftzahl λ beträgt 0,6 bis 0,8. Zur Erzielung einer optimalen Temperatur wird eine ständige Rezirkulation der Abgase benötigt. Das rezirkulierende Gas wird zusammen mit der Primärluft in das Wirbelbett eingeblasen. Dadurch kommt es zu einer Vergasung der Brennstoffe bei 600-800 °C. Anschließend findet eine Nachverbrennung im Freiraum oberhalb der Wirbelschicht statt. Auch hier wird ein Teil des rezirkulierenden Gases mit der Sekundärluft eingeblasen [Kaltschmitt et al., 2009].

Neben dem genannten stationären Wirbelschichtverfahren gibt es noch das zirkulierende Wirbelschichtverfahren. Im Gegensatz zum stationären Verfahren wird die Anströmgeschwindigkeit weiter gesteigert, sodass die Teilchen als Flugstaub aus dem Behälter hinausgetragen werden. Die zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (ZWSF) arbeitet mit Gasgeschwindigkeiten von 5 bis 8 m/s [Schwister, 2010]. Brennstoff und Wirbelbett werden aus dem Reaktor expandiert. In einem nachgeschalteten Zyklon werden diese Teilchen dann wieder abgeschieden und dem Reaktor zurückgeführt. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit der zirkulierenden Wirbelschicht findet ein wesentlich besserer Wärme- und Stoffaustausch statt [Kaltschmitt et al., 2009], [Spiegelberg, 2006], [Thieme RÖMPP Online, 2016]. Die nachfolgende Abbildung 4.1 stellt beide Verfahrensvarianten vereinfacht dar.

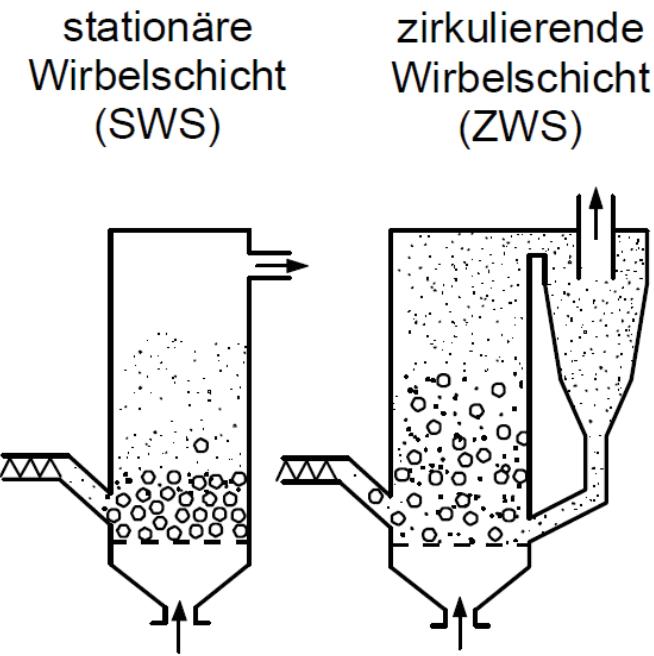


Abbildung 4.1: Wirbelschichtreaktoren [Kaltschmitt et al., 2009].

Während die stationäre Wirbelschichtfeuerung für kleine bis mittlere Analgen mit einem Leistungsbereich von 5 bis 50 MW ausgelegt ist, eignet sich die zirkulierende Wirbelschicht für einen Leistungsbereich von 30-100 MW [Kaltschmitt et al., 2009], [Spiegelberg, 2006].

Obwohl Wirbelschichtverfahren für vielfältige Brennstoffe eingesetzt werden können und höhere thermische Leistungen als einfache Rostfeuerungsanlagen erzielen, sind diese nicht fehlerfrei. Nach Kaltschmitt et al., 2009 soll es häufig zu Problemen durch nicht optimal geregelte Temperaturführungen kommen. Ein Beispiel wäre die Bildung von Schlacke in der unteren Ebene des Reaktors.

4.2.1.2 Dezentrale stationäre Wirbelschichtfeuerung der Firma ES+S GmbH

Die theoretischen Grundlagen der Wirbelschichtverbrennung wurden im Kapitel 4.2.1.1 beschrieben. Im Folgenden wird der verfahrenstechnische Ablauf der Wirbelschichtverbrennung für die dezentrale thermische Verwertung von Klärschlämmen beschrieben.

Die Firma ES+S Energy Systems & Solutions GmbH vertreibt eine Technologie des stationären Wirbelschichtfeuerungsverfahrens, welche speziell für dezentrale Anwendungen geeignet ist. Die Universität Rostock führte dazu in den 1990er Jahren im großen labortechnischen Maßstab langjährige Versuche zur thermischen Behandlung energiereicher Abfälle mit der stationären Wirbelschichtfeuerung (SWSF) durch. Ziel dieser Forschungen

sollte ein wirtschaftlicher Einsatz dieses Verfahrens bei einer nur kleinen Leistung sein. Das entwickelte Verfahren soll besonders für Klärschlämme gut geeignet sein. Der von ES+S konzipierte Wirbelschichtreaktor besteht aus einem unteren Teil, mit der eigentlichen stationären Wirbelschicht und einem oberen Teil, dem Freeboard. Dieser hat einen erweiterten Querschnitt und dient als Raum für Nachreaktionen [Spiegelberg, 2006]. Die nachfolgende Abbildung 4.2 stellt den Aufbau des Wirbelschichtreaktors dar:

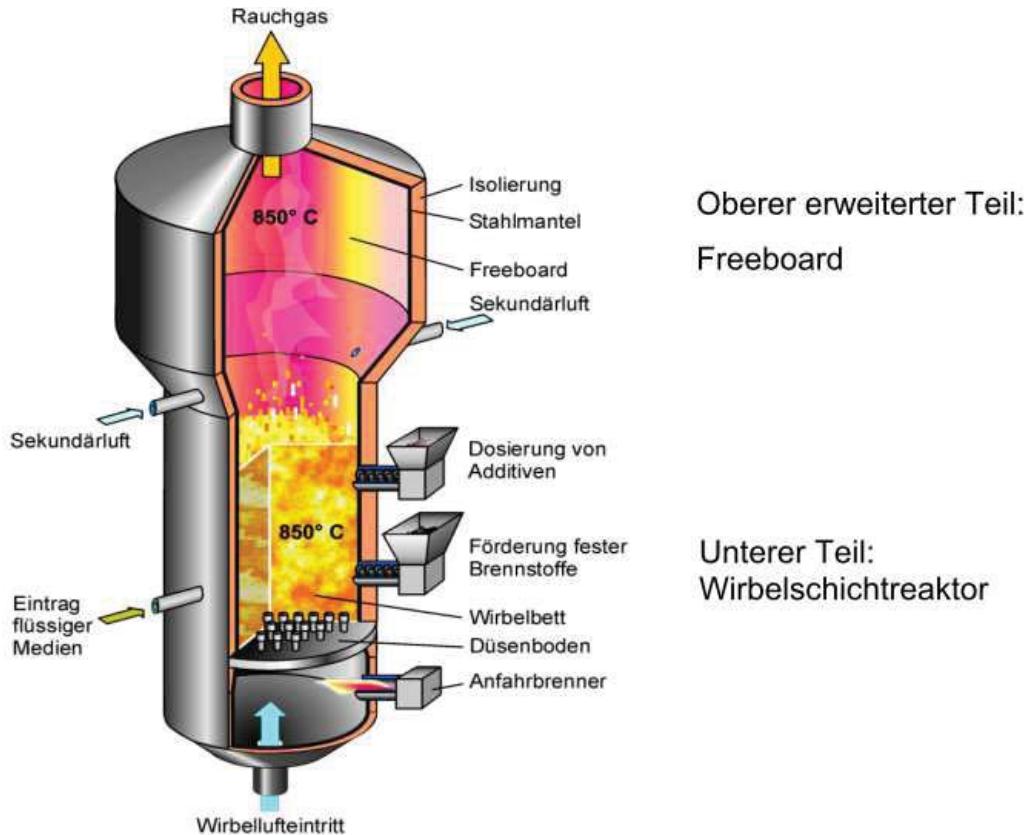


Abbildung 4.2: Prinzipieller Aufbau einer stationären Wirbelschichtfeuerung [WM MV, 2009]

Der Klärschlamm wird oberhalb des Düsenbodens mit der stationären Wirbelschicht eingetragen. Die Verbrennung findet bei einer Temperatur von 850 °C statt. Um eine stabile Verbrennung zu gewährleisten, sollten die Klärschlämme vorher getrocknet werden. Die Firma ES-S GmbH hat ein Anlagekonzept zusammen mit der Rostocker Firma ROSOMA (Rostocker Sondermaschinenbau- und Anlagenbau GmbH) entwickelt, welches eine Vortrocknung des Klärschlammes mit anschließender Wirbelschichtverbrennung beinhaltet [Spiegelberg, 2006]. In der nachfolgenden Abbildung 4.3 wird die Klärschlammverbrennungsanlage mit Trockner dargestellt.

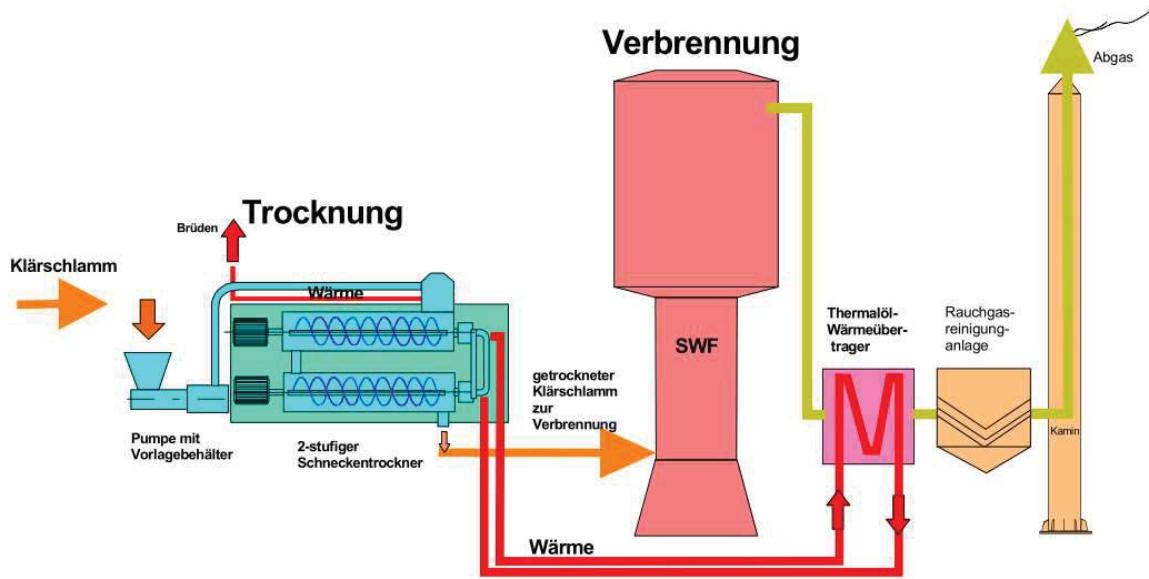


Abbildung 4.3: Verfahrensfließbild Klärschlamm-trocknung- und Verbrennung [Spiegelberg, 2006]

Der entwässerte Klärschlamm (25 % TS) wird in Trockner gepumpt, in dem dieser auf 50-70 % TS getrocknet und anschließend direkt dem eigentlichen Verbrennungsprozess zugeführt wird. Im Wirbelschichtreaktor erfolgt eine vollständige Verbrennung des Klärschlamm. Ein Anfahrbrenner unterhalb des Düsenbodens (siehe Abbildung 4.2) bringt zu Beginn des Prozesses die Wirbelschicht auf ein ausreichend hohes Temperaturniveau. Die Verbrennung des Klärschlamm erfolgt im Reaktor ohne eine Flammenbildung und somit ohne Bildung von Schadstoffen. Zudem können Additive in den Wirbelschichtreaktor gegeben werden, um Schadstoffe, wie Schwefel zu binden. Zudem sollen aufgrund der hohen Ausbrandqualität des Verfahrens geringste CO-Werte entstehen. Aus der Wirbelschicht ausgetragene Partikel können im oberen Freeboard aufgrund der verminderten Strömungsgeschwindigkeiten wieder zurückgebracht werden. Die entstehende Asche wird mit dem Rauchgas in Form von Staubpartikeln ausgetragen. Die Abgase sind ca. 800 °C heiß. Deren Energie wird in einem Thermal-Wärmeübetrager umgewandelt und der Klärschlamm-trocknung zugeführt. In einer anschließenden Rauchgasreinigungsanlage werden die Rauchgase gereinigt [Spiegelberg, 2006]. Das Verbrennungsverfahren erfordert einen kontinuierlichen Betrieb, sodass die Anlieferung des Klärschlamm so zu organisieren ist.

4.2.1.3 Endprodukte

Bei der Wirbelschichtverbrennung von Klärschlamm entsteht Klärschlammäsche. Diese ist mehr oder weniger phosphatreich. Durch das von der Bundesregierung gesetzte Ziel, aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung auszusteigen, sind zwangsläufig andere Methoden nötig, um die im Klärschlamm enthaltenen Phosphate rückzugewinnen. Um an diese Phosphate zu gelangen, ist nach derzeitigem Stand der Technik ein chemischer Aufschluss beispielsweise mit Phosphorsäure (H_3PO_4) notwendig [Appel et al., 2014]. Damit ein solcher Schritt in Zukunft bei verfügbarer Praxistauglichkeit der P-Rückgewinnung angewendet werden kann, ist die anfallende Klärschlammäsche zu lagern. Dafür gelten besondere rechtliche Regelungen, welche in die zukünftigen Neuauflagen der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und der Deponieverordnung (DepV) festgelegt werden. Genauere Details zur Phosphorrückgewinnung sind im Kapitel 4.5 dargestellt.

Neben der phosphorhaltigen Asche entstehen durch verschiedene Maßnahmen zur Abgasreinigung Sekundärprodukte, wie Calciumsulfat, welches bei der Entfernung von Schwefeldioxid (SO_2) aus dem Rauchgas anfällt [Schwister, 2010].

4.2.2 Pyrolyse

4.2.2.1 Darstellung des Pyrolyseprozesses allgemein

Die Pyrolyse wird im verfahrenstechnischen Kontext auch als „Entgasung“ bezeichnet [Funk, 2007]. Klärschlamm kann unter hohen Temperaturen und ohne Anwesenheit von zusätzlich zugeführtem Sauerstoff ($\lambda = 0$) pyrolytisch zersetzt werden. Dabei entstehen je nach Pyrolysetechnologie vornehmlich Pyrolysegas und Pyrolyseöl oder Pyrolysekoks [Kaltschmitt et al., 2009]. Die entstehenden Produkte sind abhängig von der jeweiligen Temperatur, bei denen die Pyrolyse durchgeführt wird, als auch von der Dauer und der Aufheizrate [Funk, 2007]. Im nachfolgenden sollen daher die konventionelle Pyrolyse und die Flash-Pyrolyse erläutert werden.

Für die Bereitstellung fester Sekundärenergieträger muss die Pyrolyse bei Temperaturen von oberhalb 500 °C Verweilzeit der Edukte von mindestens 5 Sekunden ablaufen. Man spricht von der konventionellen, langsamen Pyrolyse. Die Aufheizrate beträgt 0,01 - 2,0 °C/s. Häufig wird auch von der Verkohlung gesprochen, da im Ergebnis Pyrolysekoks bzw. Biomassekohle entsteht. Diese werden anschließend energetisch oder stofflich verwertet. Ein Sonderfall stellt die Torrefizierung dar, die keine Pyrolyse im eigentlichen Sinn ist, sondern nur eine Trocknung der eingesetzten Biomasse mit partieller pyrolytischer Zersetzung. Derartige Reaktoren sind beispielsweise Meilerreaktoren, welche zur Gewinnung von Holzkohle aus Biomasse verwendet werden [Kaltschmitt et al., 2009].

Die Flash-Pyrolyse ist ein modernes Verfahren, an dem seit etwa 30 Jahren geforscht wird. Sie läuft bei Temperaturen von 450 bis 500 °C statt und zählt damit zu den Tieftemperaturpyrolyse-Verfahren. Die eingesetzten Edukte werden sehr schnell (Verweilzeit < 1 s) bei einer Aufheizrate von > 1000 °C/s erhitzt. Im Ergebnis entstehen vorwiegend flüssige Sekundärenergieträger. Diese können thermisch oder energetisch verwertet werden [Kaltschmitt et al., 2009], [Maaß, 2015], [Funk, 2007]. Als Reaktoren eignen sich solche mit einer stationären Wirbelschicht, zirkulierender Wirbelschicht, Doppelschnecke oder welche, die unter Vakuum arbeiten. Die Reaktoren müssen eine gute Wärmeübertragung, sowie einen effektiven Stofftransport ermöglichen [Kaltschmitt et al., 2009]. In der nachfolgenden Abbildung 4.4 wird das Verfahrensfließbild für eine Flash-Pyrolyse in einem Wirbelbettreaktor mit einer stationären Wirbelschicht dargestellt.

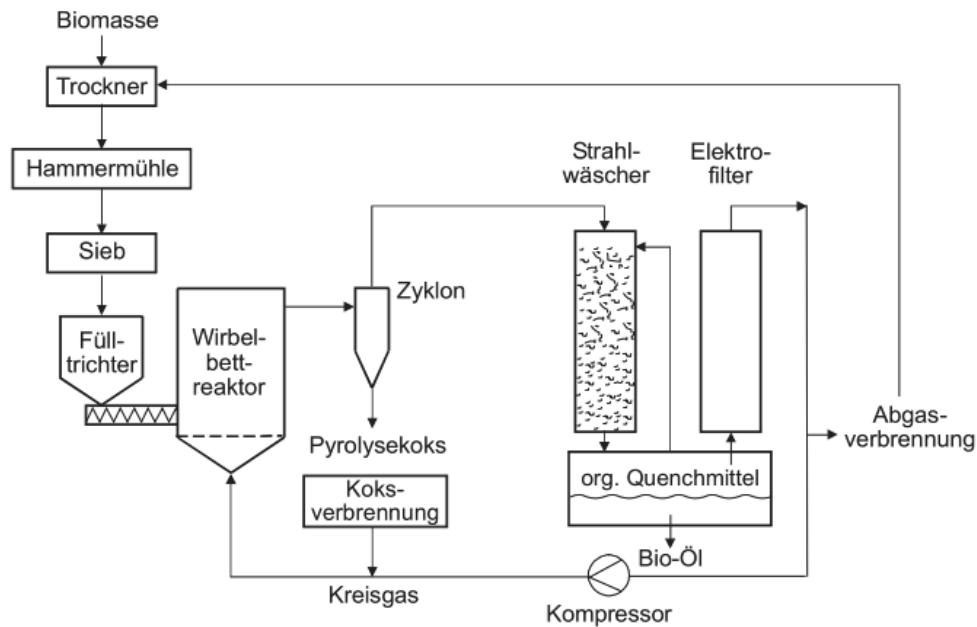


Abbildung 4.4: Verfahrensfließbild einer Flash-Pyrolyse in einem Wirbelbettreaktor mit einer stationären Wirbelschicht [Kaltschmitt et al., 2009]

Bisher ist es nicht gelungen, aus Klärschlamm mittels pyrolytischer Verfahren einen Treibstoff herzustellen, der ökonomisch vertretbar ist. Weiterhin entstehen durch die pyrolytische Zersetzung auch hoch toxische Stoffe, sodass die Pyrolyse als eigenständiges Verfahren großtechnisch heute nicht genutzt wird. Vielmehr wird die Pyrolyse von Klärschlamm als Teilschritt für komplexere Technologien genutzt [Werther, 2003]. Im Folgenden werden daher dezentrale, kleine Pyrolyseanlagen für die Verwertung von Klärschlamm aufgeführt und erläutert, bei denen die Pyrolyse von Klärschlamm keine eigenständiges Verfahren sind (siehe auch Kapitel 2.4).

4.2.2.2 Kleintechnische Pyrolyseanlagen

4.2.2.2.1 Der PYRUBUSTOR®

Von der Firma Eisenmann SE wurde ein Verfahren zur dezentralen thermischen Klärschlammverwertung entwickelt. Der Pyrobustor® ist ein ausmauerungs-freier Zweikammer-Drehrohrofen, in welchem der Klärschlamm in zwei Verfahrensschritten thermisch verwertet wird. Der Pyrobustor besteht aus einer Verbrennungskammer und einer dieser Kammer im Innenraum befindliche, fest angebrachte Pyrolysekammer. Beide Kammern sind als Trommeln angelegt, die schraubenförmig angeordnet und komplett parallel sind. Im ersten Schritt wird der Klärschlamm pyrolysiert (endothermer Prozess, $\lambda = 0$). Dabei

entsteht ein Pyrolysegas, welches zusammen mit dem Rauchgas der nachgeschalteten Verbrennung in einer Nachbrennkammer bei 850 °C und einer Mindestverweilzeit von 2 Sekunden verbrannt wird. Neben dem entstehenden Pyrolysegas bleibt der Pyrolysekoks zurück. Dieser wird in einem, der Pyrolyse nachgeschaltetem Verfahrensschritt verbrannt. Der Koks gelangt über eine Materialschleuse in die Brennkammer und wird dort vollständig zu Asche verbrannt. Der Gewichtsverlust im Vergleich zum getrockneten Klärschlamm, beträgt bei Prozess-Ende mindestens 50 % [Leicht und Neumann, 2011], [Kügler et al., 2004]. Die nachfolgende Abbildung 4.5 stellt das Funktionsprinzip des PYROBUSTOR® dar.

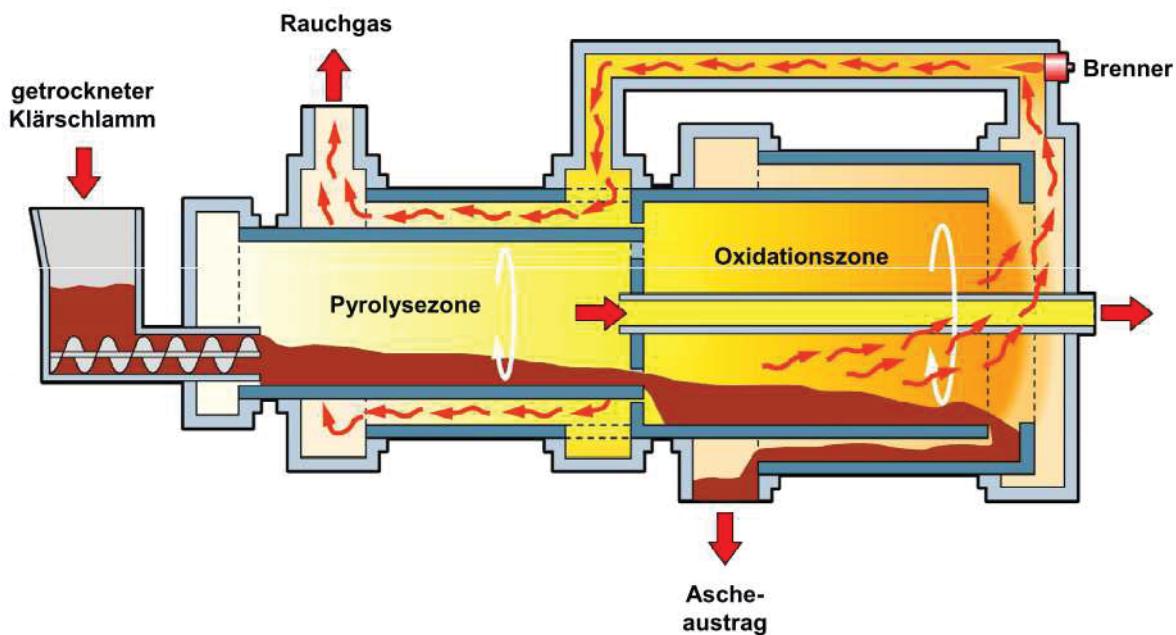


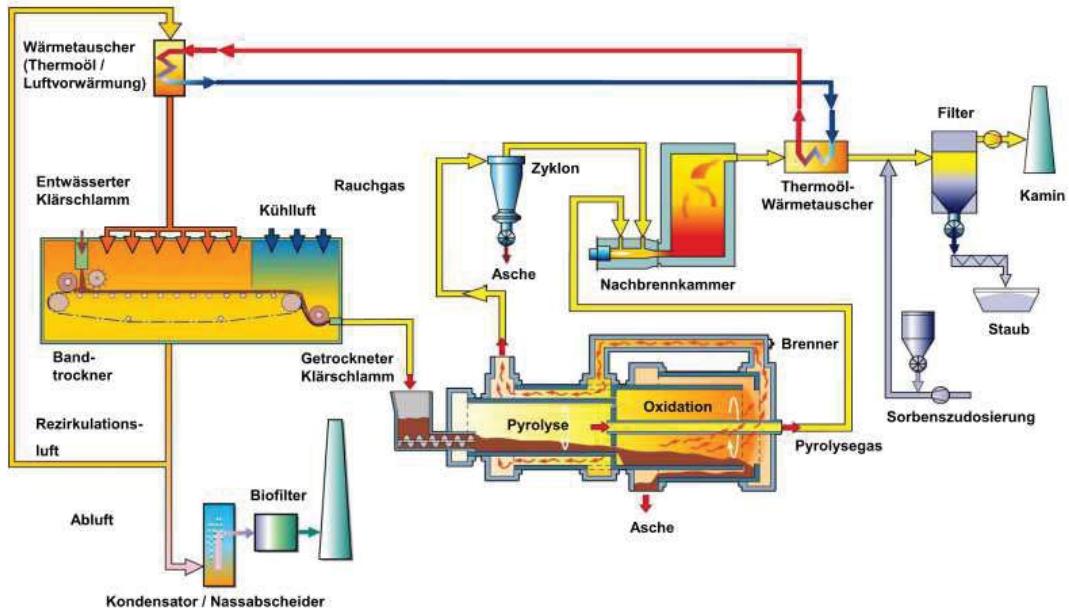
Abbildung 4.5: Funktionsprinzip des PYROBUSTOR® (Zweikammer-Drehrohrofen) [Leicht und Neumann, 2011]

Im PYROBUSTOR können nur Klärschlämme mit einem TS-Gehalt von mindestens 90 % angenommen werden. Eine Vortrocknung ist deshalb notwendig [Kügler et al., 2004].

Das bei der Verbrennung des Pyrolysekokses entstehende Rauchgas (ca. 750 °C) wird durch einen Ringspalt an der Pyrolysekammer vorbeigeführt. Dadurch wird ein Teil der Wärmeenergie abgegeben und der für die Pyrolyse notwendige Wärmebedarf gedeckt [Kügler et al., 2004]. Anschließend wird das Rauchgas zusammen mit dem durch die Pyrolyse entstandenen Pyrolysegas in einer Nachbrennkammer verbrannt. Die dabei entstehende Wärmeenergie kann über Wärmeübertrager für die Vortrocknung des anfallenden entwässerten Klärschlamm genutzt werden (siehe Kapitel 4.4.2) [Leicht und Neumann,

2011]. Ein solches Konzept wird auf der ARA Pustertal in Italien angewendet (siehe Abbildung 4.6).

ARA Pustertal, Italien



© EISENMAN AG

Abbildung 4.6: Praxisbeispiel zur KlärschlammPyrolyse auf der ARA Pustertal, Italien [Leicht und Neumann, 2011].

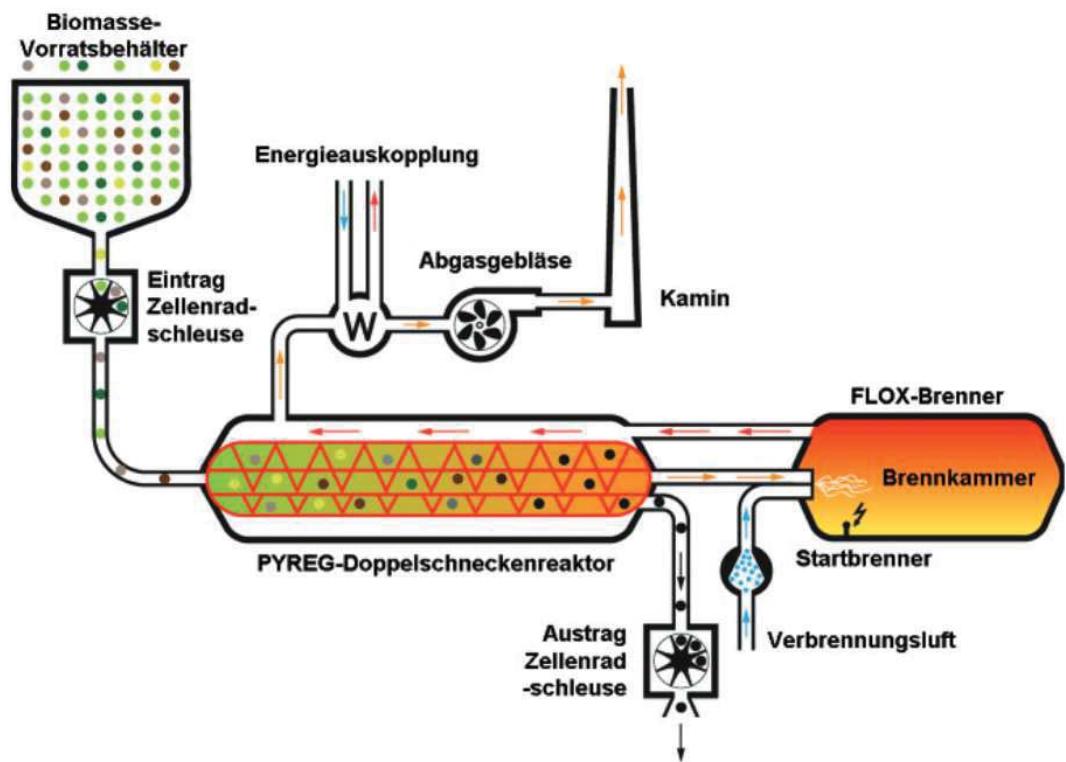
Verschiedene Referenzen, wie die erwähnte Anlage in Südtirol, sowie von einer Anlage der Stadtwerke Crailsheim zeigen, dass die Pyrolyse von Klärschlamm in Kombination mit einer nachgeschalteten Verbrennung sicher, störungsfrei und wirtschaftlich ist [Neumann und Tittezz, 2011].

Genauere Details zu den Endprodukten sind in Kapitel 4.2.2.3.2 sowie in Kapitel 4.5 zur Phosphorrückgewinnung beschrieben.

4.2.2.2.2 Die PYREG®-Technologie

Die Firma PYREG GmbH bietet eine Technologie für die thermische Verwertung von Biomasse und Klärschlamm an. Es handelt sich dabei um eine mehrstufige Verbrennung. Der Klärschlamm wird dabei nicht vollständig verbrannt, sondern im ersten Schritt bei Temperaturen $< 800^{\circ}\text{C}$ „entgast“ [Gerber, 2016]. In einer anschließenden Verschwelung wird der Klärschlamm verascht. Das Verfahren ist weniger als Pyrolyse, denn als gestufte Verbrennung zu verstehen [Rensmann, 2015].

Für eine Verwertung muss der Klärschlamm zunächst ausreichend getrocknet werden. Der eingesetzte Klärschlamm muss mindestens einen Trockensubstanzgehalt (TS) von 70% besitzen und soll einen Mindestheizwert von 10.000 KJ/kg haben. Daneben werden durch die Kombination einer Abluftreinigung bei diesem Verfahren auch Schwermetallbelastungen, wie zum Beispiel Quecksilber eliminiert. Die nachfolgende Abbildung 4.7 stellt das Verfahrensschema der PYREG®-Technologie dar [Gerber, 2016].



4.7: Verfahrensschema der Klärschlammverwertung nach dem PYREG®-Verfahren [Gerber, 2016]

Im ersten Schritt wird der Klärschlamm über eine gasdichte Dosiereinrichtung dem PYREG®-Reaktor zugeführt. Die Primärbrennkammer ist als Doppelschneckenreaktor ausgeführt. Zwei

gekoppelte Förderschnecken, die ineinander kämmend angeordnet sind, um das Anbacken zu vermeiden, transportieren den Klärschlamm kontinuierlich und erwärmen diesen auf 700 °C. Danach erfolgt die „Entgasung“ und Verschwelung des Klärschlamm unter Luftabschluss bei Temperaturen unterhalb der Ascheerweichungstemperatur (< 800° C). Dadurch werden Störungen des Betriebsablaufs durch etwaiges Schmelzen der Aschen vermieden. Entlang des Doppelschneckenreaktors erfolgt die gestufte Verbrennung des Klärschlamm. Durch eine gezielte Luftzugabe wird der Klärschlamm dann verascht. Die Primärluftzugabe erfolgt im Reaktor zur Teilverbrennung und Ausgasung des Klärschlamm. Die Luftzahl λ variiert im Reaktor von 0,3 bis > 0,8 [Rensmann, 2015].

Im Gegensatz zur Pyrolyse oder Vergasung von organischen Brennstoffen, dient das PYREG®-Verfahren nicht zur Erzeugung eines Synthesegases bzw. Syntheseöls. Das im Reaktor entstehende Prozessgas (ca. 15 % CO₂) wird mit der zugeführten Verbrennungsluft in Reaktion gebracht und in der nachgeschalteten Brennkammer vollständig verbrannt. Im Brenner erfolgt eine flammenlose Oxidation (kurz FLOX®) bei einer Temperatur von 1.250 °C und einer Luftzahl von 0,9 bis > 1. Die Brennkammer wird mit interner Rauchgasrückführung betrieben. Dadurch werden Spitzentemperaturen und die Bildung von Stickoxiden (NOx) vermieden. Diese können nur bei Vorhandensein einer Flammengrenze entstehen. Die Rauchgase werden über einen Außenmantel des PYREG®-Reaktors im Gegenstrom zum Klärschlamm vorbeigeführt. Dadurch wird die Wärme zur Trocknung und Vergasung der Klärschlämme genutzt. Die Abluftreinigung erfolgt durch einen Aktivkohlefilter in Kombination mit einem Nasswäscher. Brennkammer und Reaktor sind miteinander gekoppelt und arbeiten als Einheit [Gerber et al., 2010], [Rensmann, 2015]. Die nachfolgende Abbildung 4.8 stellt die Unterschiede zwischen einer Verbrennung mit konventioneller Flamme und einer flammenlosen Oxidation dar.

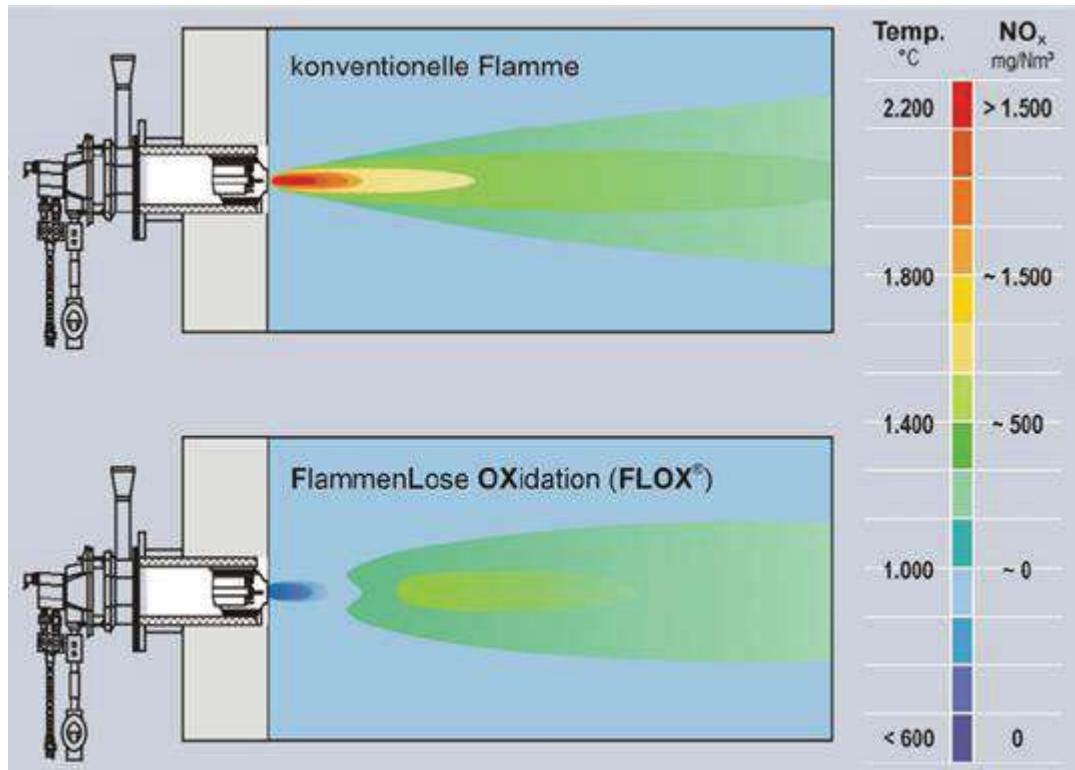


Abbildung 4.8: Unterschied zwischen einer konventionellen Verbrennung und einer flammenlosen Oxidation (FLOX[®]) [Gerber et al., 2010].

Im Endeffekt entsteht eine vollständig hygienisierte, phosphorhaltige Asche, welche direkt als Rohstoff in der Düngemittelproduktion eingesetzt werden kann und eine hohe Pflanzenverfügbarkeit besitzt [Gerber, 2016]. Genauere Details zu den Endprodukten sind in Kapitel 4.2.2.3.2, sowie in Kapitel 4.5 zur Phosphorrückgewinnung beschrieben.

4.2.2.3 Endprodukte

4.2.2.3.1 PYROBUSTOR[®]

Nach der Verbrennung des Pyrolysekokses bleibt ein mineralischer Feststoff in Form von Asche übrig. Diese ist vollständig inert. Zudem sind in dieser Asche die Schwermetalle des Klärschlammes unlöslich gebunden. Die Klärschlammäsche soll auf Deponien der Klasse 1 lagerfähig sein [von Krauland, 2016]. Die Phosphate müssten theoretisch ebenfalls in der übrig bleibenden Asche vorhanden sein. Eine genaue Analyse der Asche auf Phosphate ist im Rahmen dieser Bachelor-Arbeit nicht vorgesehen, da sie nur die theoretischen Aspekte der Verfahren betrachtet. Im Kapitel 4.5 wird auf die Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung weiter eingegangen.

4.2.2.3.2 PYREG®-Technologie

Beim PYREG®-Verfahren entsteht eine vollständig hygienisierte, phosphorhaltige Asche. Diese kann nach Firmenabgaben direkt als Rohstoff in der Düngemittelproduktion eingesetzt werden, da sie eine hohe Pflanzenverfügbarkeit besitzt. Nachgeschaltete Verfahren zum Aufschluss des Phosphats aus der Klärschlammäsche sollen nicht nötig sein. Ebenso kann auf eine Zwischendeponierung der Aschen verzichtet werden. Laut PYREG® sollen durch das Verfahren im Endprodukt Phosphatkonzentrationen von bis zu 18 % erreicht werden [Gerber, 2016]. Allerdings ist dies von den jeweiligen verwerteten Klärschlämmen abhängig.

Die nachfolgende Tabelle 4.1 stellt die Ergebnisse einer Analyse der Klärschlammäsche einer Pilotanlage auf der Kläranlage „Untere Selz“ in Ingelheim dar. Die Asche wurde am 31.07.2008 und 31.03.2009 durch das Labor CLD GmbH, Kaiserslautern, untersucht [Gerber et al., 2010]. Seit dem 01.01.2015 gelten für Klärschlamm die neuen Schwermetallgrenzwerte der Düngemittelverordnung (DüMV), sodass die ursprünglichen Analyseergebnisse von 2008 mit den neuen Grenzwerten verglichen werden müssen. Die alten Grenzwerte der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) sind zum Vergleich weiterhin in der untenstehenden Tabelle dargestellt. Die Grenzwerte in den Klammern beruhen auf § 4 Abs. 12 AbfKlärV. Durch die neuen Grenzwerte könnten die Werte für Cadmium dafür sorgen, dass die entstehende Klärschlammäsche der Kläranlage „Untere Selz“ nicht im Sinne der Düngeverordnung als Dünger gelten kann. Allerdings ist zu beachten, dass die dargestellten Analysewerte von 2008 sind und je nach Beschaffenheit der Klärschlamm unterschiedlich ausfallen kann. Auf der firmeneigenen Webseite verspricht PYREG®, dass die Verwertung der Asche, sofern schadstofffrei, gemäß der geplanter Novelle der Klärschlammverordnung (AbfKlärV), sowie der Düngemittelverordnung (DüMV) und dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), zulässig ist. Allerdings gibt es Einschränkungen. In Kapitel 4.5 wird genauer auf die Eignung der PYREG®-Asche zur Direktvermarktung sowie deren Voraussetzung eingegangen.

Tabelle 4.1: Analyse der Klärschlammäsche von der Pilotanlage auf der Kläranlage „Untere Selz“ in Ingelheim [Gerber et al., 2010]

Parameter	Messwert [mg/kg TS]	Alter Grenzwert nach AbfKlärV [mg/kg TS]	Grenzwert nach DüMV [mg/kg TS]
Blei	64	900	80
Cadmium	1,91	10 (5)	1,5

Parameter	Messwert [mg/kg TS]	Alter Grenzwert nach AbfKlärV [mg/kg TS]	Grenzwert nach DüMV [mg/kg TS]
Chrom	45	900	900
Kupfer	339	800	800
Nickel	44	200	120
Quecksilber	0,26	8	1
Zink	1468	2.500 (2.000)	2.500 (2.000)

4.3 Immissionsschutz

Abfallverbrennungsanlagen, darunter auch Pyrolyse-Anlagen, unterliegen der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BimSchV). Diese gilt für die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von Abfallverbrennungs- und Abfallmitverbrennungsanlagen, welche im Zusammenhang mit der 4. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (4. BimSchV) genehmigungsbedürftig sind. In § 3 (1) heißt es, dass der Betreiber einer Abfallverbrennungs- oder Mitverbrennungsanlage Vorsichtsmaßnahmen hinsichtlich der Anlieferung und Annahme der Abfälle ergreifen muss, damit die Umwelt und die menschliche Gesundheit nicht geschädigt werden. Besonders wichtig ist das Einhalten der in § 8 aufgeführten Tagesmittelwerte von bestimmten Emissionsgrenzwerten, die nicht überschritten werden dürfen. Dies sind vor allem Stoffe, wie Ammoniak, Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid sowie Chloremissionen [4. BimSchV, 2013]. Um die Grenzwerte der 17. BimSchV [17. BimSchV, 2013] sicher einhalten zu können, müssen Sekundärmaßnahmen ergriffen werden, damit die Grenzwerte eingehalten werden können. Ammonium ist sehr flüchtig und gehört zu den bekanntesten Luftschadstoffen, die Ökosysteme belasten. Durch „sauren Regen“ gelangen Abgase, wie Ammoniak, Stickstoffoxide und Schwefeldioxid in teils empfindliche Ökosysteme [Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2013]. Laut SCHWISTER, 2010 sind Verbrennungsprozesse immer mit lokalen und regionalen Luftverschmutzungen verbunden. Emissionen, die bei der Wirbelschichtverbrennung anfallen können sind [Schwister, 2010]:

- Staub
- organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff
- anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff (HCl)
- anorganische Fluorverbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff (HF)
- Schwefeldioxid (SO_2) und Schwefeltrioxid (SO_3)

- Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂)
- Kohlenstoffmonoxid (CO)

Diese anfallenden Emissionen müssen daher aus dem entstehenden Rauchgas entfernt werden.

Dafür eignen sich physikalische und chemische Verfahren wie die

- Entstaubung durch Gewebefilter, Elektrofilter, Venturiwäscher
- HCl-Absorption
- SO₂-Absorption
- Entfernung von Stickoxiden durch SCR, SNCR etc [Schwister, 2010]

Bei Wirbelschichtreaktoren lassen sich Schadstoffe weitgehend durch eine Zugabe von Additiven vermeiden. Eine einfache Möglichkeit um Schwefel aus dem entstehenden Rauchgas zu entfernen, ist die Zugabe von Kalkstein in die Brennkammer. Dadurch wird der Schwefel gebunden und es entsteht Calciumsulfat- Dihydrat (Gips) [Schwister, 2010]. Weiterhin können durch ein gezieltes Steuern des Verbrennungsprozesses (Temperatur, Verweilzeit und Sättigung) die Bildung und Emission von Schadstoffen beeinflusst werden, sodass der Schadstoffausstoß bei der dezentralen Wirbelschichtverbrennung sehr gering ist [Kutschmitt et al., 2009], [Schwister, 2010].

Da Wirbelschichtreaktoren eine höhere Staubbelastung im Rauchgas als andere Feuerungssysteme haben, sind Zykloone oder Elektrofilter zur Abscheidung der Flugasche notwendig. Bei der Verbrennung von Klärschlamm geht ein Teil der Schwermetalle in die Gasphase über. Viele Schwermetalle wie Quecksilber, aber auch Teile von Arsen, Cadmium und Thallium werden über das Rauchgas abgeschieden. Diese leichtflüchtigen Schwermetalle lassen sich aus den Rauchgasen über Venturiwäscher sowie ein- oder mehrstufige Radialstromwäscher entfernen. In der 17. BimSchV sind die Anforderungen an die Rauchgasreinigung geregelt [DWA, 2016], [Kutschmitt et al., 2009], [Schwister, 2010], [WM MV, 2013], [LU MV, 2013].

Die dezentrale Entsorgung von Klärschlamm mittels ES+S Wirbelschichtfeuerung hält die Emissionsbedingungen der 17. BimSchV ein. Konkrete Angaben zur Rauchgasreinigung bei der ES+S Wirbelschichtfeuerung sind nicht vorhanden. Die Dimensionierung der Rauchgasreinigungsanlage ist nach der Zusammensetzung des Klärschlamm auszurichten. Insbesondere die Schwermetallgehalte spielen dabei eine Rolle [Spiegelberg, 2006]. Ein

Großteil der in den Zweckverbänden der GKU mbH anfallenden Klärschlämme überschreitet die Grenzwerte für Schwermetalle der Düngemittelverordnung (DüMV). Dies sind vor allem die Grenzwerte für Quecksilber (Hg) und Cadmium (Cd).

Die nachfolgende Tabelle 4.2 stellt die mittleren Schwermetallkonzentrationen (in mg/kg m_T) des Klärschlammes in MV im Jahr 2011 sowie die neuen Grenzwerte der DüMV im Vergleich zur AbfKlärV dar.

Tabelle 4.2: Mittlere Schwermetallkonzentrationen des Klärschlammes in MV im Jahr 2011, geltende und zukünftige Grenzwerte in mg/kg TS [verändert nach: WM MV, 2013; LU MV, 2013].

	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
Mittelwert 2011 [mg/kg TS]	17	0,65	19	492	15	0,45	601
Varianz in %	72	109	60	56	40	96	44
Alter Grenzwert nach AbfKlärV [mg/kg TS]	900	10,0	900	800	200	8,0	2.500
Neuer Grenzwert laut DüMV [mg/kg TS]	150	1,5	120	900	80	1,0	1.800

Eine Studie der GKU mbH zur Herkunft der Schwermetalle ergab, dass eine ubiquitäre Hintergrundbelastung festgestellt wurde, ohne eine Quelle direkt zuordnen zu können [Ender, 2015a].

Wie auch bei der Wirbelschichtverbrennung, werden beim PYREG®-Verfahren leichtflüchtige Schwermetalle wie Quecksilber über die Rauchgase eliminiert. Diese werden über einen Aktivkohlefilter und einem nachgeschaltetem Nasswäscher gereinigt. In der Klärschlammasse verbleiben vorwiegend die nicht-flüchtigen Schwermetalle wie Blei und Cadmium (siehe auch Tabelle 4.1) [Gerber et al., 2010].

Seitens der Firma Eisenmann wird beim PYROBUSTOR®-Verfahren nur erwähnt, dass die Schwermetalle unlöslich gebunden in der Asche verbleiben sollen und in der Rauchgaswäsche, sofern vorhanden, abgeschieden werden. Die Rauchgasreinigung erfolgt durch einen Gewebefilter zur Staubabscheidung und einer gleichzeitigen Zugabe von Natriumhydrogencarbonat (NaHCO₃) und Aktivkohle, durch welche sowohl saure Bestandteile als auch eventuell vorhandene Schwermetalle eliminiert werden sollen. Konkrete Angaben wurden nicht gemacht, es heißt nur, die Rauchgasreinigung erfülle die gesetzlichen Bestimmungen und Vorschriften [von Krauland, 2016], [Neumann und Tittesz, 2011].

4.4 Energetische Betrachtung

4.4.1 ES+S Wirbelschichtverbrennung

Jährlich fallen in den von der GKU mbH betriebenen vier Zweckverbänden insgesamt ca. 2.500 t TS Klärschlamm an, welcher sich in der Zusammensetzung teils stark unterscheidet. Da die Klärschlämme nicht anaerob stabilisiert werden, ist mit einem Heizwert von 14 500 kJ / kg für nicht-ausgefaultem Klärschlamm zu rechnen.

Für eine theoretische energetische Betrachtung der ES+S Wirbelschichtfeuerung werden folgende Ausgangsdaten angenommen:

- 2.500 t TS Klärschlamm mit $H_u = 10.800 \text{ kJ/kg}$ und 25 % TS

Aus Gründen der Überschaubarkeit wird der schlechtere Heizwert (= 10.800 kJ/kg, entspricht anaerob stabilisiertem Klärschlamm) verwendet. Die Feuerungswärmeleistung der Wirbelschichtanlage beträgt bei einem jährlich anfallenden Klärschlammaufkommen von 2.500 t TS in etwa 434 kW bei einer Trockensubstanz des Klärschlammes von 50 % [Spiegelberg, 2006]. Die nachfolgende Abbildung 4.9 fasst die energetischen Kennzahlen der ES+S Wirbelschichtverbrennung für die erwähnten Ausgangsdaten zusammen:

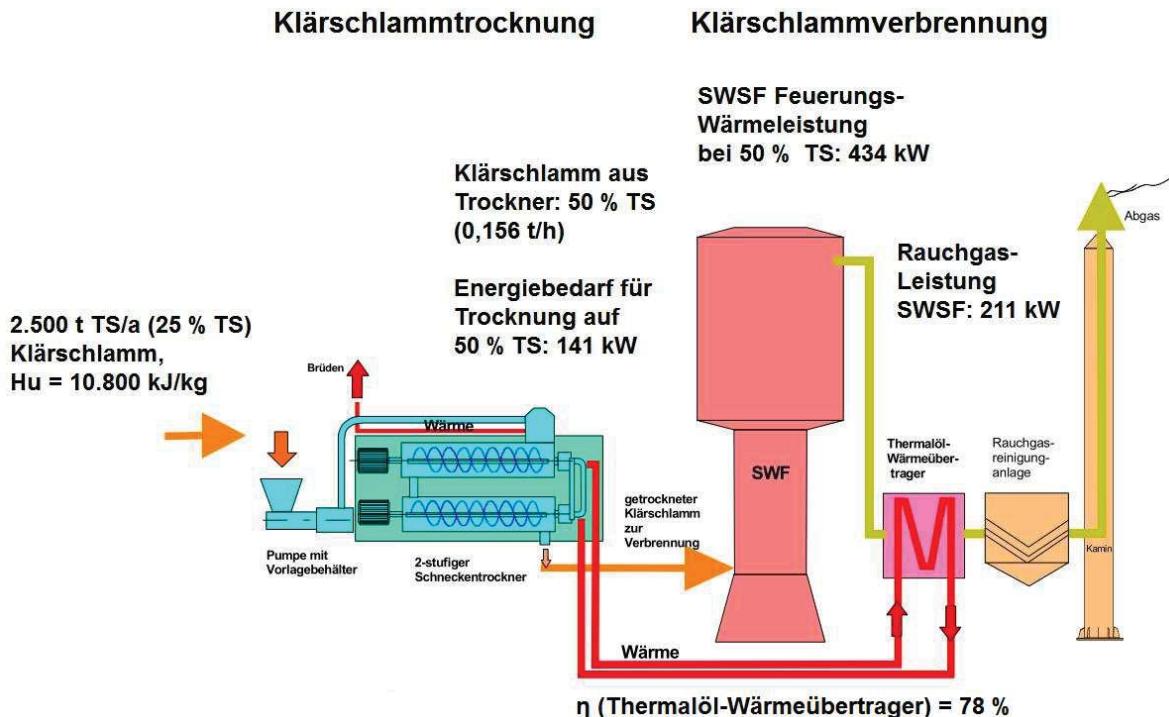


Abbildung 4.9: Energetische Betrachtung der ES+S Wirbelschichtverbrennung [Eigene Darstellung, verändert nach: Spiegelberg, 2006]

Der Energiebedarf der SWSF mit ROSOMA – Trocknungsanlage beträgt für eine Trocknung des Klärschlammes von 25 % TS auf einen TS-Gehalt von 50 % voraussichtlich 141 kW. Das 800 °C heiße Abgas wird nach der Verbrennung in einem nachgeschalteten Thermalöl-Wärmeübertrager in Wärme umgewandelt. Die so erzeugte Wärme wird durch isolierte Wärmeleitungssysteme in die Heizanlage des ROSOMA- Trockners geleitet und durchströmt diesen unter Abgabe der Trocknungswärme. Die Rauchgasenergie (211 kW) ist dafür ausreichend, sodass auf eine zusätzliche Energiezufuhr verzichtet werden kann. Klärschlammtrocknung und Klärschlammverbrennung bilden eine Einheit (siehe auch Abbildung 4.9). Das herunter gekühlte Thermalöl wird über ein Pumpensystem zum Thermalöl-Wärmeübertrager zurückgeführt. Dieser hat einen Wirkungsgrad von $\eta = 78\%$. Ein TS-Gehalt von 50 % ist für selbstständige Verbrennung des Klärschlammes ausreichend. Weiterhin kann die Energie der Brüden aus der Klärschlammtröcknung verwendet werden. Diese können beispielsweise der Verbrennungsluft für die Wirbelschicht zugemischt werden [Spiegelberg, 2006].

Je nachdem wie groß die anfallenden Klärschlammengen sind, kann auch ein Energieüberschuss nach dem Thermoöl-Wärmeübertrager erzielt werden. Dieser Energieüberschuss könnte dann mittels eines kleinen Dampfkraftprozesses verstromt werden. Eine Deckung des Eigenbedarfs an Strom könnte die wirtschaftlichen Bedingungen der Wirbelschichtanlage deutlich verbessern. Allerdings ist dies von der Ausbaugröße, den Einwohnerwerten, den Klärschlammengen und der Klärschlammbeschaffenheit abhängig [Spiegelberg, 2006].

4.4.2 PYROBUSTOR®

Für die nachfolgende energetische Betrachtung des PYROBUSTOR®-Verfahrens wird das Praxisbeispiel der PYRUBUSTOR®-Anlage in Südtirol verwendet [Neumann und Titesz, 2011]. Ausgangsdaten, der seit 2005 in Betrieb befindlichen Anlage, sind Klärschlamm mit einem Massestrom von 720 kg/h, einem Heizwert von 11.700 kJ/kg (= ausgefaulter Klärschlamm), sowie einem Energiegehalt von 2.063 kW. Die nachfolgende Abbildung 4.10 stellt die bekannten Prozessparameter basierend auf der Betriebsdatenerfassung der Anlage dar. Zu erkennen sind die Masse- und Energiebilanzen der Anlage, einschließlich Oberflächenverluste. Die Betriebstemperatur beträgt in der Pyrolysezone 300 – 350 °C, in der Oxidationszone 620 – 650 °C [Neumann und Titesz, 2011].

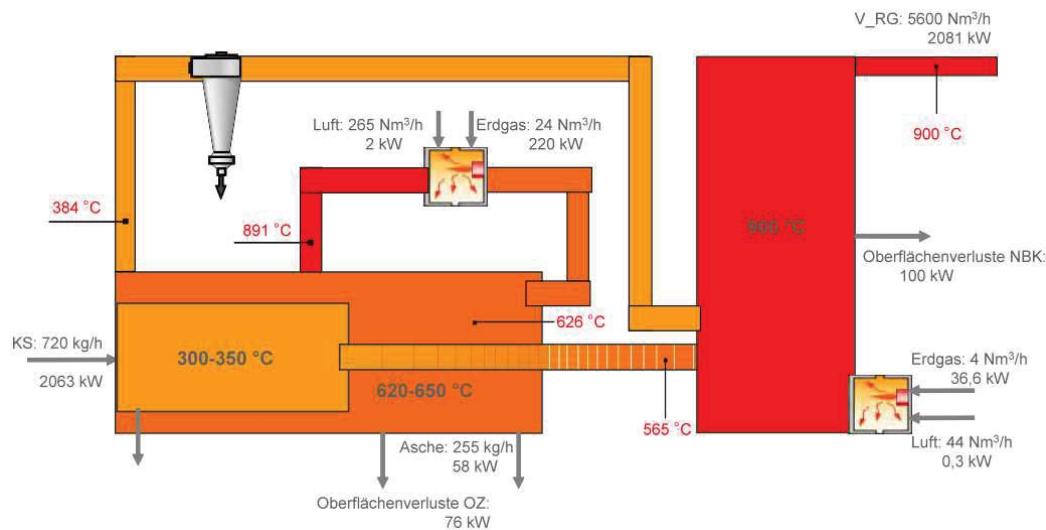


Abbildung 4.10: Zusammenfassung der bekannten Prozessparameter basierend auf der Betriebsdatenerfassung der Anlage in Südtirol [Neumann und Tittesz, 2011].

Die Abbildung 4.11 zeigt die Energiebilanz des eigentlichen Pyrolyseprozesses, bei welchem das Pyrolysegas und der Pyrolysekoks entstehen. Der Koks hat einen Energiegehalt von 361 kW. Das energiereiche Pyrolysegas hat wiederum einen Energiegehalt von 1.679 kW [Neumann und Tittesz, 2011].

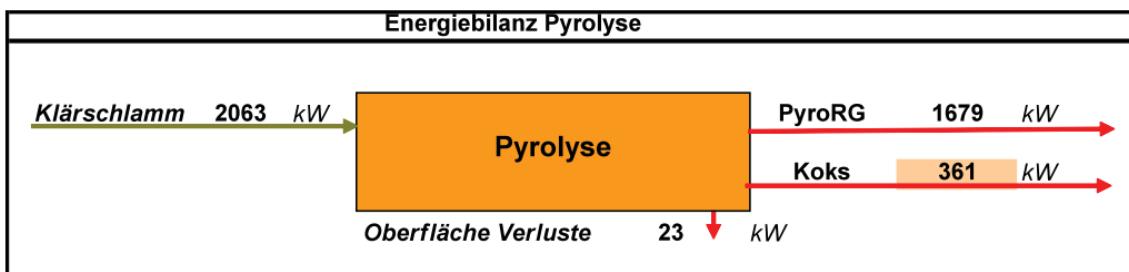


Abbildung 4.11: Energiebilanz Pyrolyse [Neumann und Tittesz, 2011].

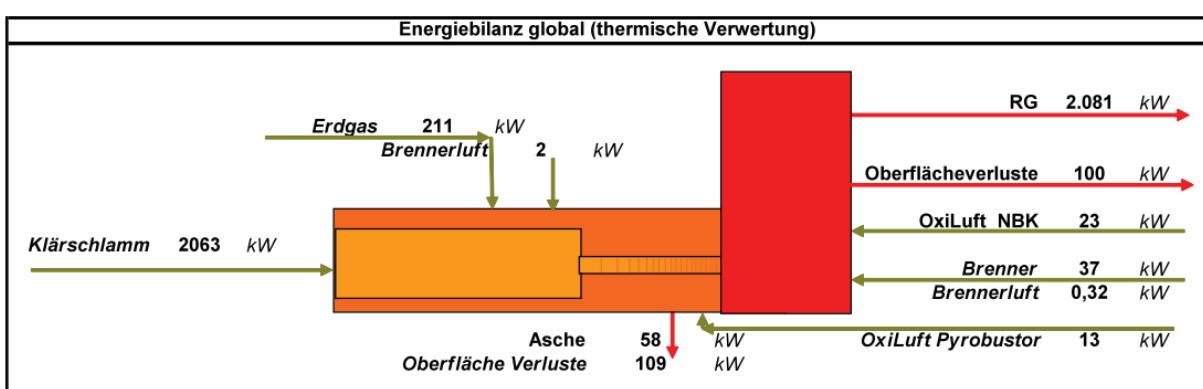


Abbildung 4.12: Energiebilanz global (thermische Verwertung) [Neumann und Tittesz, 2011].

Die Abbildung 4.12 stellt die globale Energiebilanz für die Pyrobustoranlage einschließlich Nachbrennkammer dar. Rot dargestellt ist die Nachbrennkammer, in welcher die Abluft aus der Oxidationszone (Verbrennung des Pyrolysekokses) verbrannt wird. Zusätzlich werden die Pyrolysegase ($P_{PyroRG} = 1.679 \text{ kW}$) der Nachbrennkammer zugeführt, um den erforderlichen Energiebedarf zu decken. Der Energiegehalt der Pyrolysegase ist ausreichend, um den Massestrom der Rauchgase auf $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aufzuheizen. Diese Betriebstemperatur ist erforderlich, damit die Pyrolysegase vollständig verbrennen. Die $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ heißen Rauchgase haben wiederum einen Energiegehalt von 2.081 kW . Ein nachgeschalteter Wärmeübertrager könnte den Wärmebedarf für eine vorgeschaltete Trocknung des Klärschlammes decken. Durch Oberflächenverluste der Nachbrennkammer gehen weitere 100 kW verloren [Neumann und Tittesz, 2011]. Im Gegensatz zur ES+S Wirbelschichtverbrennung ist eine Wärmerückgewinnung zur Trocknung der Klärschlämme verfahrenstechnisch nicht explizit mit eingebunden. So kann die Wärmeauskopplung der Rauchgase auch zur Dampferzeugung oder Heißwasserbereitung dienen [von Krauland, 2016].

Die Pyrubustoranlage der ARA Pustertal wurde in ein Gesamtsystem einschließlich einer Trockneranlage für den anfallenden Klärschlamm integriert. Man wollte die bei der thermischen Verwertung freiwerdende Energie für den vorhandenen Trocknungsprozess nutzen. Über einen Thermoöl-Wärmeübertrager wird der Primärenergiebedarf für den Trocknungsprozess zu 70 % gedeckt. Das Verfahrensfließbild der Anlage einschließlich Nachbrennkammer und Klärschlamm-trocknung ist in Abbildung 4.6 zu sehen [Neumann und Tittesz, 2011]. Ob der Primärenergiebedarf für den Trocknungsprozess grundsätzlich durch den Einsatz von Wärmeübertrager zu 70 % gedeckt werden kann, oder ob mehr oder weniger Fremdenergie zur Deckung des Wärmebedarfs notwendig wäre, wird im Rahmen dieser Bachelor-Thesis nicht erörtert. KÜGLER ET AL., 2004 meint, dass der Primärenergieeinsatz für die Trocknung durch den PYRUBUSTOR® entscheidend reduziert wird, und dadurch niedrigere Betriebskosten erzielt werden. Konkrete Angaben über den Energiebedarf des Trockners in dem erwähnten Praxisbeispiel, sowie Wirkungsgrade der Wärmeübertrager wurden seitens der Firma Eisenmann nicht getroffen.

Für die anfallenden Klärschlämme aus den Zweckverbänden der GKK müsste seitens der Firma Eisenmann eine detaillierte energetische Betrachtung des Prozesses mit Berücksichtigung einer Vortrocknung und Installation von Thermoöl-Wärmeübertrager durchgeführt werden, wie bei der Pyrubustoranlage der ARA Pustertal. Dabei müsste auch der Heizwert von $14\,500 \text{ kJ / kg}$ für nicht-ausgefaultem Klärschlamm berücksichtigt werden.

Dadurch könnten Angaben über den Energiebedarf des Trockners, sowie Wirkungsgrade der Wärmeübertrager getroffen werden. Dies wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht behandelt.

4.4.3 PYREG®-Verfahren

Das PYREG®-Verfahren soll nach Herstelleranhaben ein rekuperatives Verfahren sein, was bedeutet, dass thermische Prozesse mit der Energie des eingebrachten Klärschlammes betrieben werden [Gerber, 2016]. Für die nachfolgende energetische Betrachtung wurde seitens der Firma PYREG keine konkrete Angabe über einen Heizwert getroffen. Es ist nur bekannt, dass für das Verfahren ein Mindestheizwert der eingesetzten Biomasse von 10.000 kJ/kg vorhanden sein muss. Die Abbildung 4.13 stellt vereinfacht die Energiebilanz des PYREG®-Verfahrens dar. Der anfallende Klärschlamm wird im PYREG®-Reaktor stofflich und energetisch umgewandelt. Es findet eine Entgasung des Klärschlammes statt, bei dem ein energiereiches Prozessgas entsteht. Wie in Abbildung 4.13 zu sehen ist, wird der Biomasse-Strom durch den Verwertungsprozess in einen Kohlestrom, gemeint ist der phosphathaltige Biomassekoks und einem Gasstrom aufgeteilt. Der Biomassekoks enthält etwa 66 % der ursprünglich vorhandenen Energie, während 34 % im Prozessgas vorhanden sind [Gerber, 2009]. Das Prozessgas wird flammenlos verbrannt (kurz FLOX®). Die benötigte Wärmeenergie für den Entgasungs- und Verbrennungsprozess ergibt sich aus dem Energiegehalt des Prozessgases (34%), sowie der Prozessgas- und Abgaswärme (38%). Es erfolgt eine ständige Rezirkulation der Abgaswärme. Im Endeffekt bewirkt diese eine ständige Neubildung des Prozessgases. Die Abgaswärme wird über einen Außenmantel an dem PYREG®-Reaktor vorbeigeführt, sodass diese für die Entgasung des nachrückenden Klärschlammes genutzt werden kann. Über Abgas-Wärmeübertrager (Wirkungsgrad ist unbekannt) kann eine weitere energetische Nutzung erfolgen, um beispielsweise die Klärschlämme vor zu trocknen. Das PYREG®-Verfahren läuft ununterbrochen und wird über den laufenden Biomasseeintrag mit der nötigen Energie versorgt. Zum Ende verbleibt eine Nutzwärme von 34 %, welche abzüglich von 4 % Abgasverlusten einer endgültige Wärmenergie von 30 % entspricht [Gerber, 2009]. Diese kann wiederum für die Vortrocknung der anfallenden Klärschlämme auf einen erforderlichen TS-Gehalt von 70 % verwendet werden. Laut Firmenangaben soll diese Wärmeenergie eine thermische Leistung von maximal 150 kW_{th} besitzen. Die Leistung ist von der jeweiligen verfahrenstechnischen Ausstattung, sowie dem Wärmepotential abhängig [Gerber, 2016].

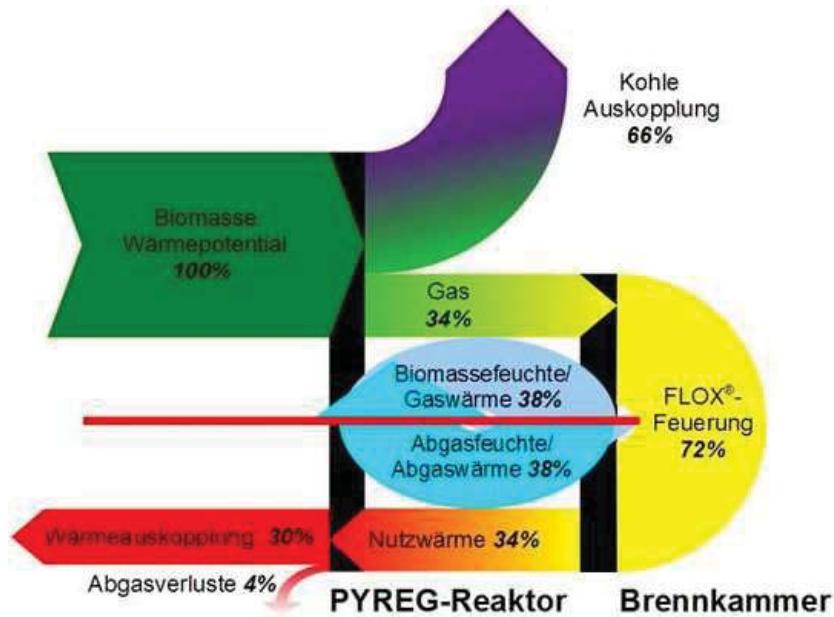


Abbildung 4.13: Energiebilanz beim PYREG®-Verfahren [Gerber, 2009].

Da die Klärschlämme aus den vier Zweckverbänden der GKU ausschließlich aerob stabilisiert werden, können diese ab einem TS-Gehalt von ca. 70-75 % TS thermisch verwertet werden. Allerdings ist dies auch nachteilig, da bei der rein aeroben Stabilisierung der Klärschlämme keine Wärme durch eine energetische Verwertung von Faulgas entsteht. Dadurch wird für die Vortrocknung der Klärschlämme auf ca. 70-75 % TS weitere Wärme benötigt. Die Abwärme aus der PYREG®-Anlage reicht nicht aus [Rensmann, 2016]. Konkrete Angaben über den Energiebedarf des Trockners sind nicht vorhanden. Bei der Referenzanlage in Linz-Unkel wird der Wärmebedarf des Trockners durch die PYREG®-Anlage, kombiniert mit einer bereits auf der Kläranlage vorhandene Mikrogasturbine gedeckt [Gerber, 2016]. Derartige Möglichkeiten sind an den Standorten der Kläranlagen aus den Zweckverbänden der GKU nicht vorhanden. Da für eine thermische Behandlung aller aus den Zweckverbänden anfallenden Klärschlämme mehrere PYREG®-Anlagen errichtet werden müssten (siehe Kapitel 4.6), wären auch für diese Module vorgeschaltete Trocknungsanlagen notwendig, welche Fremdenergie zur Deckung des Wärmebedarfs benötigen würden.

4.5 Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung

Die Möglichkeiten der Phosphorrückgewinnung sollen im Rahmen dieser Thesis nur kurz erläutert werden. Es gibt derzeit verschiedene Konzepte, um Phosphate aus den Abwässern oder Klärschlämmen rückzugewinnen.

Phosphor ist ein für alle Lebewesen wichtiger, nicht substituierbarer Nährstoff. Pflanzen müssen ausreichend mit Phosphor versorgt werden, damit diese wachsen können. In ungedüngten Böden ist Phosphat häufig der den Ertrag limitierende Faktor. Insbesondere die Landwirtschaft ist auf eine ausreichende Zufuhr von Phosphatdünger angewiesen [DWA, 2013]. Dieser Fakt unterstreicht die immense Bedeutung dieses Elements. Bisher wurde Phosphor in den Nährstoffkreislauf über die landwirtschaftliche Verwertung dem Boden zugeführt. Die veränderten Rahmenbedingungen lassen diese Verwertungsmethode nicht mehr zu, sodass Phosphor auf andere Weise zurückgewonnen werden muss. Es gibt bei der Abwasserreinigung verschiedene Stoffströme, die Phosphor enthalten. Die nachfolgende Tabelle 4.3 stellt die vier bei der Abwasserreinigung anfallenden Stoffströme dar und zeigt auf, wie hoch die Phosphorkonzentration, sowie das Rückgewinnungspotenzial des jeweiligen Stoffstroms ist [DWA, 2013], [Ender, 2015a].

Tabelle 4.3: Charakterisierung der Stoffströme zur Phosphorrückgewinnung in kommunalen Kläranlagen [DWA, 2013].

Einsatzstelle	Volumen-/Massenstrom	Phosphor-konzentration	Bindungsform	Rückgewinnungspotenzial (bezogen auf Zulauffracht der Kläranlage)
Kläranlagen-ablauf	200 l /($E \cdot d$)	< 5 mg/l	gelöst	max. 55 %
Schlammwasser	1-10 l /($E \cdot d$)	20-100 mg/l	gelöst	max. 50 %
Faulschlamm	0,2-0,8 l /($E \cdot d$)	30-40 g P/kg TR	gelöst sowie chemisch/ biologisch gebunden	max. 90 %
Klärschlamm- asche (Mono- verbrennung)	0,03 kg /($E \cdot d$)	60-80 g/kg	chemisch gebunden	max. 90 %

Die Tabelle zeigt, dass Phosphor in hohen Konzentrationen im Faulschlamm und in der Klärschlamm- asche verbleibt. Das Rückgewinnungspotenzial liegt jeweils bei maximal 90 % bezogen auf die Zulauffracht der Kläranlage. Allerdings ist anzumerken, dass eine P-Rückgewinnung aus Klärschlamm- asche nur in Monoverbrennungsanlagen sinnvoll ist.

Klärschlammäsche ist hygienisch unbedenklich. Außerdem sind durch die Verbrennung viele organische Schadstoffe zerstört worden. In der Klärschlammäsche verbleiben neben den Nährstoffen wie Phosphor, Calcium, Magnesium und Schwefel, nicht-flüchtige Schwermetalle wie Blei, Chrom und Nickel. Cadmium wird teilweise mit dem Rauchgasstrom ausgetragen [DWA, 2016].

Nachteilig ist der hohe technische Aufwand der Phosphor-Rückgewinnung. Hier ist zunächst abzuwarten, in wie weit sich die von der Bundesregierung postulierten Maßnahmen in die Realität umsetzen lassen. Laut dem RÖMPP LEXIKON CHEMIE, 1997 beträgt der Ascheanfall bei der Klärschlammmonoverbrennung ca. 20-30 % der ursprünglichen Trockensubstanz des Klärschlammes. Bei den Klärschlämmen der GKU würde der mineralische Anteil zwischen 30 und 40 % liegen.

Für den Fall, dass die Phosphorrückgewinnung ab dem 01.01.2025 zur Pflicht wird, muss Phosphor aus den anfallenden Klärschlämmen der jeweiligen Zweckverbände mit einem Phosphatgehalt von ≥ 20 g/kg TM zurückgewonnen werden. Analysen ergaben, dass viele Klärschlämme einen deutlich höheren Gehalt als 20 g/kg haben (siehe Tabelle 4.4). Eine andere Möglichkeit wäre die direkte Rückgewinnung des Phosphors aus dem Abwasserstrom bzw. Schlammwasser/Prozesswasser (z.B. durch Fällung von Magnesiumammoniumphosphat, MAP).

Die nachfolgende Tabelle 4.4 stellt daher den Phosphor-Gehalt in g/kg TM für die größten Kläranlagen der GKU dar.

Man rechnet den Phosphorgehalt mit der Formel $P_2O_4 \times 0,4364 = P$ aus.

Tabelle 4.4: Phosphor-Gehälter in g/kg TM für die größten Kläranlagen der GKU [Ender, 2015a]

Kläranlage	TS in %	Schlammfall in t TM/a	Menge an P_2O_5 in t/a	Menge an P in t/a	P in g/kg
Kläranlage A	29,10	750,00	37,43	16,33	21,78
Kläranlage B	26,30	625,00	37,31	16,28	21,71
Kläranlage D	12,30	200,00	14,08	6,14	8,19
Kläranlage E	5,69	50,00	3,36	1,47	1,96
Kläranlage F	4,93	45,00	2,92	1,27	1,70
Kläranlage G	3,61	70,00	5,70	2,49	3,32

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass die anfallenden Klärschlämme aus den allesamt einen Phosphatgehalt von > 20 g/kg TM haben, sodass die Phosphate in Zukunft bei einer Phosphor-Rückgewinnungspflicht zurückgewonnen verwertet werden müssen [Bergs, 2014], [WM MV, 2013], [LU MV, 2013]. Für eine dezentrale Verbrennung aller anfallenden Klärschlämme aus den Kläranlagen der jeweiligen Zweckverbände muss eine ausreichende Mischung der Schlämme vor der Verwertung gewährleistet werden, um einen homogenen Ausgangsstoff zu erzielen. Die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammassen befindet sich allerdings wie erwähnt noch im Entwicklungsstadium, sodass derzeit keine aussagekräftigen Resultate dieses Verfahrens erzielt werden können [Friedrich, 2014]. Da die Phosphate, wie in Tabelle 4.4 dargestellt chemisch gebunden sind, müssen aufwändige Rückgewinnungsmethoden angewendet werden.

Konkrete Verfahren sind beispielsweise der chemische Aufschluss von Klärschlammassen mit Phosphorsäure (H_3PO_4) (Recophos) oder der thermochemische Aufschluss mit Natriumcarbonat (Na_2CO_3) und einer Temperatur von > 1100 °C (Outotec) [Appel et al., 2014]. Weiterhin gibt es Verfahren, bei welchen die Aschen mit Calcium- oder Magnesiumsalzen behandelt werden. Im Ergebnis entstehen so beispielsweise Calcium- oder Magnesiumphosphat als Recyclat [DWA, 2013]. Die gewonnenen P-Recyclingprodukte müssen nach ihrer chemischen oder thermochemischen Aufbereitung noch getrocknet und pelletiert werden [DWA, 2013]. Bisher konnte sich aus Kostengründen allerdings kein Verfahren durchsetzen [DWA, 2016]. Im Jahr 2013 wurden in Deutschland laut einer Studie der DWA, 2013 nur ca. 23 % der Klärschlämme in Monoverbrennungsanlagen behandelt. Nur aus diesen Anlagen konnten Phosphate zurückgewonnen werden. Deshalb wurden von der Bundesregierung im Rahmen der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) Konzentrations-Grenzwerte für Phosphor im Klärschlamm festgelegt (siehe auch Tabelle 4,5 und [Ender, 2015a]).

Bei der Klärschlammverwertung im PYROBUSTOR® der Firma Eisenmann entsteht ebenfalls eine Klärschlammasse, die phosphathaltig sein müsste. Genaue Angaben über die Möglichkeit einer anschließenden Phosphatrückgewinnung aus den Aschen wurden seitens der Firma nicht gemacht. Es ist aber davon auszugehen, dass diese Aschen ebenfalls phosphatreich sind. Eine genaue Analyse der Aschen auf deren Phosphatgehalt, sowie das Rückgewinnungspotenzial, ist kein Inhalt dieser Bachelorarbeit. Sie betrachtet nur die theoretischen Aspekte der Verfahren.

Im Gegensatz zur Wirbelschichtverbrennung und zum PYROBUSTOR®-Verfahren fallen bei der PYREG®- Technologie keine Klärschlammassen an, die gelagert werden müssen. Das

entstandene Endprodukt ist nach Untersuchungen der FH Bingen ohne zusätzliche Aufbereitungen als Phosphatdünger einsetzbar und soll als solches auch die künftigen Normen des Düngemittelrechts einhalten. Es werden hohe Phosphatkonzentrationen von bis zu 18 % erreicht. Das so wiedergewonnene Phosphat zeichnet sich überdies durch eine sehr hohe Phosphorverfügbarkeit (bis zu 90 %) aus. Die nachfolgende Abbildung 4.14 zeigt die Löslichkeit von PYREG®-Phosphatdünger mit Ammoniumcitrat ($C_6H_{17}N_3O_7$), Citronensäure ($C_6H_8O_7$) und Ameisensäure (CH_2O_2). Der entstehende Dünger hat in Ammoniumcitrat mit 93 % die höchste Löslichkeit [Gerber, 2016].

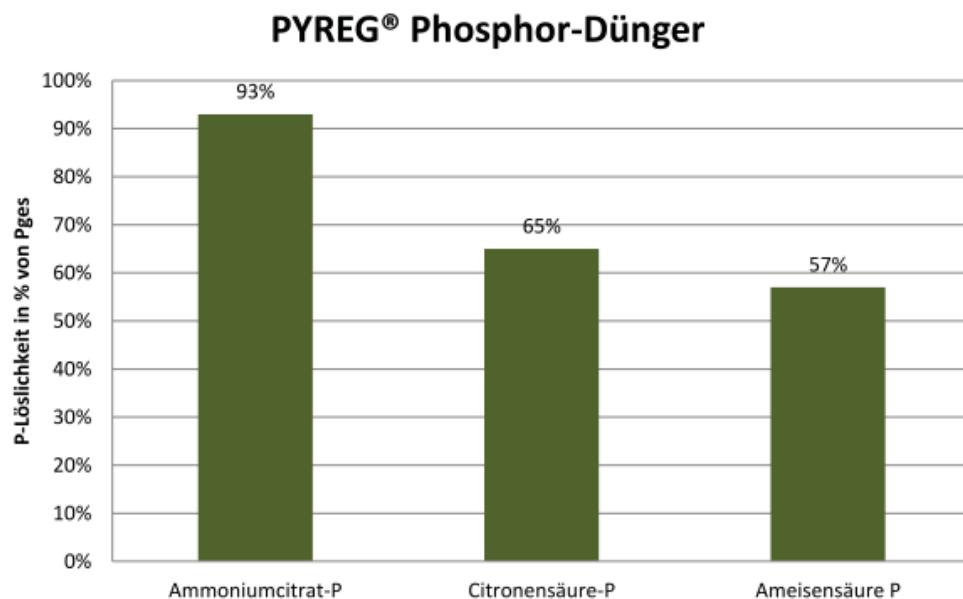


Abbildung 4.14: Löslichkeit von PYREG®-Phosphatdünger [Gerber, 2016]

Die Vermarktung von Klärschlammmasche aus der Klärschlammverbrennung unterliegt rechtlich der Düngemittelverordnung (DüMV). Eine Voraussetzung für die Nutzung von Aschen als Düngemittel ist laut DWA, 2016, dass die Klärschlämme die Grenzwerte der Schadstoffe einhalten. Das bedeutet konkret, dass die Vermarktung der Klärschlammassen nur dann erfolgen kann, wenn die behandelten Klärschlämme von Anfang an auch für eine landwirtschaftliche Verwertung geeignet waren [DWA, 2016]. In anderen Fällen ist die Direktvermarktung der Klärschlammmasche nicht möglich. Die Klärschlämme aus den Zweckverbänden der GKU waren nicht ab initio landwirtschaftlich verwertbar, sodass die Möglichkeit der Direktvermarktung ausgeschlossen ist. Die Klärschlammassen müssen also ggf. kostenpflichtig an einen Dritten abgegeben werden, der in der Lage ist, die Phosphate technisch zurück zu gewinnen.

4.6 Ökonomischer Vergleich

4.6.1 ES+S Wirbelschichtverbrennung

Die GKU mbH hat für die betreuten Zweckverbände ein grobes Konzept für eine Klärschlammverbrennungsanlage auf Basis einer Wirbelschichtfeuerungsanlage der Firma ES+S GmbH mit stationärer Wirbelschicht (SWS) erstellt. Dieses Konzept setzt eine vorgeschaltete Trocknung auf etwa 70 % TS voraus, da die Klärschlämme mit unterschiedlicher Beschaffenheit aus verschiedenen Kläranlagen anfallen. Das Verbrennungsverfahren erfordert einen kontinuierlichen Betrieb, sodass die Anlieferung des Klärschlammes so zu organisieren ist, dass ein ausreichender Vorrat vorhanden sein muss.

Für die Klärschlammverbrennungsanlage werden folgende Baugruppen angenommen

- Wirbelschichtfeuerung
- Leitstand für Gesamtanlage
- Wirbelluftgebläse
- Zyklon für Entstaubung
- Wärmeübertrager
- Klärschlammkondensator
- Brüdenkondensation
- Rauchgasreinigung
- Kamin

Die für die GKU mbH errechneten Investitionskosten der Klärschlammverbrennungsanlage würden 3.150.000,00 € betragen. Diese setzen sich aus den in Tabelle 4.5 aufgelisteten Baugruppen zusammen:

Tabelle 4.5: Investitionen für die Wirbelschichtverbrennung

Investitionskosten	
Baugruppe	Kosten [€]
Wirbelschichtfeuerungsanlage	1.250.000,00 €
Zyklon	200.000,00 €
Wärmeübertrager	180.000,00 €
Trockner, Brüdenkondensation	850.000,00 €
Entstaubung	170.000,00 €
Rauchgasreinigung	200.000,00 €

Bugruppe	Kosten [€]
Bau, Genehmigung, sostiges	300.000,00 €
Summe	3.150.000,00 €

Nachfolgend sollen in der Tabelle 4.6 die erreichten Leistungen der Anlage aufgezeigt werden. Da es sich hierbei nur um ein Grobkonzept handelt, sind keine Transportkosten beinhaltet.

Tabelle 4.6: Betriebskosten für die Wirbelschichtverbrennungsanlage

Betriebskosten	
Leistungen/Kosten	Kosten [€]
Mitarbeiter: 2 (siehe Anmerkung)	75.000,00 €
Ersatzteile/Wartung/Pflege	50.000,00 €
Fernüberwachung und Service	35.000,00 €
Betriebskosten RGR, Additive, Thermalöl	25.000,00 €
Stromverbrauch 40kW x 7500h x 0,16 €/kWh	48.000,00 €
Ascheentsorgung (nur Transport) (1000t x 12€/t)	20.000,00 €
Sonstiges	20.000,00 €
Summe	273.000,00 €

Um eine Stabilität und Kontinuität der Verbrennungsanlage im ersten Betriebsjahr zu gewährleisten, sind möglicherweise 3 - 4 Mitarbeiter im Schichtbetrieb, auch mit Nachschichten, erforderlich. Die Betriebskosten für die thermische Verwertung von einer Tonne Klärschlamm würden bei 45 € liegen. Die Modellanlage wird 15 Jahre lang linear mit einem jährlichen Betrag von 210.000,00 € zur Tilgung abgeschrieben. In der Tabelle 4.7 wird die lineare Abschreibung für die Modellanlage dargestellt.

Tabelle 4.7: Abschreibung auf Abnutzung (Afa)

Jahr	Abschreibung	Restbuchwert
0	0,00 €	3.150.000,00 €
1	210.000,00 €	2.940.000,00 €
2	210.000,00 €	2.730.000,00 €
3	210.000,00 €	2.520.000,00 €
4	210.000,00 €	2.310.000,00 €
5	210.000,00 €	2.100.000,00 €
6	210.000,00 €	1.890.000,00 €
7	210.000,00 €	1.680.000,00 €
8	210.000,00 €	1.470.000,00 €
9	210.000,00 €	1.260.000,00 €
10	210.000,00 €	1.050.000,00 €
11	210.000,00 €	840.000,00 €

Jahr	Abschreibung	Restbuchwert
12	210.000,00 €	630.000,00 €
13	210.000,00 €	420.000,00 €
14	210.000,00 €	210.000,00 €
15	210.000,00 €	0,00 €
kumuliert	3.150.000,00 €	

In der Tabelle 4.8 sind die Gesamtkosten für die Modellanlage aufgeführt.

Tabelle 4.8: Gesamtkosten für die Modellanlage

Gesamtkosten jährlich und spezifisch	
Afa-Zeit:	15 Jahre
jährliche Afa = Tilgung	210.000,00 €
jährliche Finanzierungskosten	25.000,00 €
Betriebskosten pro Jahr	273.000,00 €
Summe	508.000,00 €

Die Summe ergibt sich aus den in Tabelle 4.6 aufgeführten Betriebskosten, sowie der jährlichen Abschreibung auf Abnutzung (Afa) (siehe Tabelle 4.7) und den jährlichen Finanzierungskosten für die Verbrennungsanlage. Es würden somit jährlich Kosten im Wert von **508.000,00 €** anfallen.

4.6.2 PYROBUSTOR®

Genaue Angaben zu den Investitions- und Betriebskosten liegen leider nicht vor. Aus einem mündlichen Vortrag der Fa. Eisenmann geht hervor, dass mit Verwertungskosten von ca. 70 €/t TS Klärschlamm zu rechnen ist. Es ist aber davon auszugehen, dass die Investitionskosten für den PYROBUSTOR® in etwa den Kosten einer vergleichsweise dimensionierten PYREG®-Anlage entsprechen.

4.6.3 PYREG®-Verfahren

Konkrete Zahlen für die Investition in das PYREG®-Verfahren liegen nicht vor. Es ist aber mit Investitionskosten von ca. 300.000,00 € für eine Anlage mit einer Leistung von 500 kW zu rechnen [Gerber, 2009]. Um dem jährlichen Klärschlammaufkommen der GKK (ca. 2.500 t TS/a) gerecht zu werden, müssten mindestens drei PYREG®-Anlagen errichtet werden. So könnten an einem zentralen Standort zwei Module mit gemeinsamen Trockner errichtet

werden und an einem weiteren Standort ein weiteres Modul mit vorgeschaltetem Trockner. Das wäre also eine semi-zentrale Lösung. Diese Variante könnte mehr Vorteile bieten, als eine zentrale Lösung an einem Standort.

Die jährlichen Betriebskosten liegen bei schätzungsweise bei 130.700,00 € pro PYREG®-Modul und sind der Tabelle 4.9 zu entnehmen [Siekmann und Jakob, 2013]. Transportkosten wurden nicht mit einbezogen.

Tabelle 4.9: Jährliche Betriebskosten [Siekmann und Jakob, 2013]

Betriebskosten	
Leistungen/Kosten	Jährliche Kosten [€]
Personalkosten	15.600,00 €
Energiekosten	38.400,00 €
Flockmittel	35.000,00 €
Wartungskosten	15.700,00 €
Entsorgungskosten Klärschlammäsche	11.000,00 €
Sonstige Betriebskosten	15.000,00 €
Summe für jährliche Betriebskosten	130.700,00 €

Wie auch bei der Wirbelschichtfeuerungsanlage müssen bei der PYREG®-Anlage 2 Mitarbeiter beschäftigt werden, um den Verwertungsvorgang zu betreuen. Da für die GKU mbH aufgrund des hohen Klärschlammaufkommens mehrere Module errichtet werden müssten, ist demzufolge auch mit höheren Betriebskosten, als den in Tabelle 4.9 dargestellten Kosten zu rechnen.

Eine vergleichbare PYREG®-Anlage zur Grüngutentsorgung wurde laut einem Vortrag von PYREG® 15 Jahre lang mit einem jährlichen Betrag von 28.080,00 € mit einem Zinssatz von 5 % zur Tilgung abgeschrieben [Gerber, 2009].

Auf der KA Linz-Unkel (Ausbaugröße: 30.000 EW, Klärschlammfall von 700 t TS/a) wurde 2015 das PYREG®-Verfahren großtechnisch realisiert [Gerber, 2016]. Deren ursprünglich geplanten Investitionskosten liegen vor [Siekmann und Jakob, 2013] und sollen an dieser Stelle in der nachfolgenden Tabelle 4.10 als Beispiel dargestellt werden.

Tabelle 4.10: Berechnung der Gesamtkosten für die Errichtung der PYREG®-Anlage auf der Kläranlage Linz-Unkel [Siekmann und Jakob, 2013]

Baulicher Teil	240.000,00 €
Anlagentechnik	
Entwässerungsanlage	165.000,00 €
Trocknungsanlage und Fördertechnik	485.000,00 €
PYREG-Anlage	255.000,00 €
Baulicher Teil	240.000,00 €
EMSR-Technik	175.000,00 €
Stromzuführung	5.000,00 €
Einbindung in das Prozessleitsystem	7.500,00 €
Zwischensumme Anlagentechnik	1.092.500,00 €
Für Sonstiges und Unvorherzusehendes (5 %)	54.625,00 €
Investitionskosten Anlagentechnik, brutto	1.147.125,00 €
Baunebenkosten (10 %)	114.712,50 €
Gesamtsumme Anlagentechnik, brutto	1.261.837,50 €
Gesamtkosten	1.501.837,50 €

Die Gesamtkosten für die Errichtung einer PYREG®-Anlage für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 30.000 EW und einem jährlichen Klärschlammfall von 700 t TS würden demnach ca. 1.500.000,00 € betragen [Siekmann und Jakob, 2013], [Gerber, 2016]. Zu beachten ist, dass es sich dabei nur um ein Modul handelt, welches die auf der KA Linz-Unkel anfallenden Klärschlämme thermisch verwertet. Für die GKU mbH müssten, wie bereits oben angeführt, mehrere Module errichtet werden. Demzufolge sind die Gesamtkosten auch höher. Hinzu kommen die jährlichen Betriebskosten für Reparaturen und Wartung der Anlage. Für die GKU mbH würden zusätzlich Kosten für den Transport der Klärschlämme zum jeweiligen Verwertungsort anfallen.

Sollten beispielsweise drei PYREG®-Module errichtet werden, ist eine Investitionssumme von ca. 4.500.000 € realistisch. Der Vergleich zeigt, dass die Errichtung einer Wirbelschichtfeuerungsanlage im Vergleich zur gestuften Verbrennung nach der PYREG®-Technologie günstiger ist. Die Wirbelschichtfeuerungsanlage kostet 3.150.000,00 €, während drei erforderliche PYREG®-Module insgesamt ca. 4.500.000,00 € kosten würden. Die Betriebskosten würden ungefähr im gleichen Bereich liegen.

Ein Vorteil des PYREG®-Verfahrens ist das Wegfallen der Lagerungskosten für die Klärschlammassen, da im Endeffekt ein vermarktbarer Dünger entsteht. Die Klärschlämme, wie in Kapitel 4.5 beschrieben, müssen von Anfang an für eine landwirtschaftliche

Verwertung geeignet sein, damit die Aschen vermarktet werden können [DWA, 2016]. Das ist mit den Klärschlammassen der GKU mbH nicht möglich (siehe Kapitel 4.5). Daher werden auch keine Gewinne aus der Vermarktung der Aschen erzielt. Diese Aspekte werden nicht im Rahmen dieser Bachelor-Thesis erörtert.

5 Zusammenfassung

Die Bachelor-Thesis zeigt, dass es verschiedene Konzepte für eine dezentrale thermische Klärschlammverwertung gibt, die eine zukünftige Verwertung anfallender Klärschlämme im ländlichen Raum ermöglichen. Sowohl die Pyrolyse als auch die Wirbelschichtverbrennung sind dafür geeignete Verfahren. Eine reine Pyrolyse zur Klärschlammverwertung wird jedoch nicht angewendet, da sie zu komplex ist. Die Pyrolyse befindet sich gegenwärtig immer noch in der Forschung und Entwicklung [DWA, 2007], [Maaß, 2015]. Als Teil eines Gesamtverfahrens findet die Pyrolyse durchaus Verwendung [Werther, 2003], [Kügler et al., 2004]. Die Verbrennung und Pyrolyse unterscheiden sich hauptsächlich darin, dass die Pyrolyse unter Sauerstoffabschluss ($\lambda = 0$) stattfindet, während die Wirbelschichtverbrennung mit Sauerstoff abläuft. Die Luftzahl λ beträgt mindestens 1. In der Praxis ist diese meist größer als eins, sodass ein Luftüberschuss vorliegt [Kaltschmitt et al., 2009]. Das PYRUBUSTOR®-Verfahren der Firma Eisenmann kombiniert die Pyrolyse des Klärschlammes mit der anschließenden Verbrennung des anfallenden Pyrolysekokses [Neumann und Tittesz, 2011]. Im Gegensatz dazu findet beim PYREG®-Verfahren der gleichnamigen Firma eine gestufte, unterstöchiometrische Verbrennung statt [Rensmann, 2015]. Die Wirbelschichtverbrennung ist das verbreiteste Verfahren zur thermischen Klärschlammverwertung, da es auch bei geringeren Klärschlammengen effizient arbeitet [Spiegelberg, 2006]. Das Verfahren der Firma ES+S GmbH zeichnet sich dabei durch die energetische Nutzung der Abgaswärme zur Trocknung der Klärschlämme aus. Klärschlamm-trocknung und -verbrennung bilden eine verfahrenstechnische Einheit. Die Rauchgasenergie der SWSF reicht für eine Trocknung der Klärschlämme auf 50 % TS aus. Eine selbständige Verbrennung wird gewährleistet. Das Verfahren verzichtet dabei vollständig auf eine Fremdenergiezugabe [Spiegelberg, 2006].

Im Gegensatz zur stationären Wirbelschichtverbrennung reicht ein TS-Gehalt von 50 % für die Pyrolyseverfahren nicht aus. Die Verwertung erfordert im PYROBUSTOR® einen Restfeuchtegehalt von ca. 10 %. Daher ist eine weitergehende Trocknung der Klärschlämme erforderlich. Über Wärmeübertrager lässt sich, wie bei der Wirbelschichtverbrennung, die Rauchgaswärme für die Trocknung der Klärschlämme nutzen. Der Energiegehalt der Pyrolysegase ist ausreichend, um den Massestrom der Rauchgase auf 900 °C aufzuheizen [Neumann und Tittesz, 2011].

Das PYREG®-Verfahren erfordert einen TS-Gehalt von mindestens 70-75 % TS bei einer ausschließlichen aeroben Schlammstabilisation. Die Abwärme aus den Reaktoren ist

allerdings für eine ausreichende Trocknung der Klärschlämme nicht genügend, sodass zur Trocknung weitere Wärme benötigt wird [Rensmann, 2016].

Das geeignetste Verfahren für eine dezentrale thermische Klärschlammverwertung bietet aufgrund ihrer verfahrenstechnischen Einheit, mit der dazugehörigen ROSOMA-Trocknungsanlage die stationäre Wirbelschichtfeuerung (SWSF) der Firma ES+S GmbH. Das vollständige Verzichten auf Fremdenergie, sowie ein ausreichender TS-Gehalt von 50 % nach der Trocknung sind Vorteile, die die anderen beiden Verwertungsmethoden nicht bieten. Der ökonomische Vergleich zeigte zudem, dass die ES+S Wirbelschichtverbrennung mit 3.150.000,00 € günstiger ist, als drei notwendige PYREG®-Module, die zusammen ca. 4.500.000,00 € kosten würden. Eine ökonomische Betrachtung des PYROBUSTOR's® der Firma Eisenmann war leider nicht möglich. Daneben wurde die Möglichkeit der Phosphor-Rückgewinnung der vorgestellten Verfahren begutachtet. Da ein Totalausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung in Deutschland angestrebt wird, sind zukünftig Verfahren zur Phosphorrückgewinnung anzuwenden. Das Rückgewinnungspotential beträgt bei Klärschlammassen aus der Monoverbrennung bis zu 90 % [DWA, 2013]. Allerdings konnte sich bisher kein Rückgewinnungsverfahren durchsetzen [DWA, 2016]. Die bei der Wirbelschichtverbrennung und dem PYROBUSTOR®-Verfahren anfallenden Klärschlammassen müssten an einem Dritten abgegeben werden, der diese dann aufbereitet. Solange müssten die Klärschlammassen gelagert werden. Die Aschen aus dem PYREG®-Verfahren sollen sich dagegen für eine direkte Vermarktung eignen. Dadurch würde eine Lagerung der Klärschlammassen, als auch aufwändige nasschemische Maßnahmen zur Aufbereitung der Aschen, wegfallen. Durch die Vermarktung der Aschen könnten Gewinne erzielt werden [Gerber, 2016]. Allerdings unterliegt diese Strategie einer düngemittelrechtlichen Vorschrift. Die Düngemittelverordnung sieht vor, dass nur Klärschlammassen vermarktet werden dürfen, wenn die behandelten Klärschlämme die Grenzwerte einhalten und von Anfang an landwirtschaftlich verwertbar waren. Diese nicht unbedeutende Beschränkung würde bedeuten, dass eine Direktvermarktung der Klärschlammassen für die GKU mbH nicht in Frage käme. Die Aschen müssten dann trotzdem gelagert und anschließend an einem Dritthersteller abgegeben werden, damit dieser aus den Aschen die Phosphate zurückgewinnt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es eine Vielzahl an Technologien gibt, um Klärschlamm dezentral zu verwerten. Das PYREG®-Verfahren stützt sich vorrangig auf die Vermarktung der Klärschlammasse und den daraus resultierenden Erlösen. Die Vermarktung ist aber aufgrund der Schwermetallbelastung der Klärschlämme nicht möglich, sodass diese

Technologie nicht angewendet werden kann. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Wirbelschichtverbrennung sowohl ökonomisch, als auch energetisch betrachtet das effizienteste Verfahren ist.

6 Literatur – und Quellenverzeichnis

- Appel, T. et al: Landbauliche Verwertung von karbonisiertem Klärschlamm mit dem Ziel des P-Recyclings. Vortrag. Mainz-Lerchenberg, 2014
- Bayerisches Landesamt für Umwelt: Ammoniak und Ammonium. August 2013. http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_6_ammoniak_ammonium.pdf 10.01.2015.
- Bergs, C.: Novelle der Klärschlammverordnung vor dem Hintergrund des Koalitionsvertrages. Bundesministerium für Umwelt, Bau, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
http://www.vqsd.de/uploads/tx_news/Bergs_Novelle_AbfKlaerV_vor_KoaV.pdf. 12.06.2014
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 20. November 2014 (BGBl. I S. 1740) geändert worden ist
- Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): DWA Positionen – Positionen zur Klärschlammensorgung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2015A.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): 9. Klärschlammstage. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2015C
- Düngemittelverordnung (DüMV) vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482)
- Ender, T.: Systemstudie zur kostengünstigen und umweltschonenden Entsorgung von Biogas-Reststoffen aus Schweinegülle. 2. Studienarbeit, WS 2014/15. Hochschule Neubrandenburg, 2015
- Ender, T.: Systemstudie zur Kostengünstigen und umweltschonenden Entsorgung von Klärschlamm. Projektarbeit zum Industriepraktikum, SoSe 2015. Hochschule Neubrandenburg, 2015
- Felber H. und Fischer, M.: Klärwärter Taschenbuch. F. Hirthammer Verlag, 16. Auflage. München/Oberhaching, 2010.
- Friedrich, M.: Zukunft der Klärschlammensorgung in Mecklenburg-Vorpommern. 16. Dialog Abfallwirtschaft MV – Rostock 03.04.2014. <http://www.auf-aw.uni->

rostock.de/uploads/media/3.1_Zukunft_der_Klaerschlammverwertung_in_Mecklenburg-Vorpommern.pdf. 03.04.2014

- Funk, G.: Thermische Behandlung und Verwertung von Abfällen und Biomassen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 3 Nr. 882. VDI Verlag, Düsseldorf, 2007
- Georg Thieme Verlag KG: Thieme RÖMPP Online. <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/Welcome.do>. 25.01.2016
- Gerber, H. et al.: Neues Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung für kleinere Kläranlagen. Bingen, 2010.
- Gerber, H.: Dezentrale CO₂-negative energetische Verwertung von land- und forstwirtschaftlichen Produktionsreststoffen. Vortrag. Dessau, 2009
- Gerber, H.: Pyreg - Innovative Klärschlammverwertung. <http://www.pyreg.de/home.html>. 22.01.2016
- Kalschmitt, M. et al., 2009: Energie aus Biomasse. Springer-Verlag, 2. Auflage. Berlin / Heidelberg, 2009
- Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 12 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.
- Korrespondenz Abwasser, Abfall: Auswirkungen der sich verändernden Rahmenbedingungen auf die Entsorgungssicherheit für Klärschlamm. Ausgabe Nr. 3/2015. S. 249. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2015B
- Korrespondenz Abwasser, Abfall: Direktverwertung von Aschen aus der Klärschlammverbrennung als Phosphatdünger – das Praxisbeispiel Ulm. Ausgabe Nr. 1/2016. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2016
- Korrespondenz Abwasser, Abfall: Klärschlammfaulung und -verbrennung: das Behandlungskonzept der Zukunft? Ausgabe Nr. 3/2010. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2010
- Korrespondenz Abwasser, Abfall: Perspektiven der thermischen Klärschlammverwertung. Ausgabe Nr. 10/2005. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2005
- Korrespondenz Abwasser, Abfall: Sind Kapazitätsengpässe bei der Mitverbrennung durch gesetzliche Änderungen zu erwarten? Ausgabe Nr. 10/2012. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2012

- Korrespondenz Abwasser, Abfall: Stand und Entwicklung der thermischen Klärschlammverarbeitung in Deutschland. Ausgabe Nr. 10/2007. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2007
- Korrespondenz Abwasser, Abfall: Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. Ausgabe Nr. 11/2013. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef, 2013
- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 8. April 2013 (BGBl. I S. 734) geändert worden ist
- Ktbl: Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Ktbl). Darmstadt, 2013
- Kügler, I. et al. Dezentrale Klärschlammverbrennung. Umweltbundesamt GmbH Wien/Österreich. Wien, 2004
- Leicht, R. und Neumann, U.: Pyrolysetechnik zur Pyrolysetechnik zur Klärschlammbehandlung. Vortrag. Berlin, 2011
- Londong, J.: Siedlungswasserwirtschaft im ländlichen Raum – Abwasserentsorgung. Universitätsverlag Weimar. 3. Auflage. Weimar, 2013.
- Maaß, F.: Pyrolyse - Aktuelle Entwicklungen, Bachelorarbeit. Hochschule Neubrandenburg, 2015.
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz (LU) MV und Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus (WM) MV: Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin, 2013.
- Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus (WM) MV: Dezentrale Verwertung von Ersatzbrennstoffen und heizwertreichen Sortierresten in Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin, 2009.
- Neumann, U. und Tittesz, R.: Der Pyrobustor – zwei Praxisbeispiele zur Klärschlammverarbeitung. TK Verlag - Fachverlag für Kreislaufwirtschaft, 2011
- Räbiger, N: Wasser-Wissen, ein Projekt des Instituts für Umweltverfahrenstechnik (IUV) der Universität Bremen. www.wasser-wissen.de Universität Bremen - Institut für Umweltverfahrenstechnik, 2015
- Rensmann, M.: E-Mail Auskunft zu: AW: Abgrenzung PYREG-Verfahren. 07.01.2016

- Rensmann, M.: E-Mail Auskunft zu: AW: WG: Informationen zur PYREG-Technologie für Bachelor-Thesis. 21.12.2015
- RÖMPP Lexikon Chemie: Band 3: H – L. S. 2165. 10. Auflage. Georg Thieme Verlag. Stuttgart, 1997.
- Schwetzel, W.: Klärschlammmonoverbrennungsaschen als Abfall? https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/zum_abfallende_von_klaerschlammmonoverbrennungsaschen.pdf. 26.01.2015
- Schwister, K. (Hrsg.): Taschenbuch der Umwelttechnik. Carl Hanser Verlag. München, 2010
- Siekmann, K. und Jakob, J.: Weitergehende thermische Klärschlammbehandlung auf Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe. Vortrag. Kaiserslautern, 2013.
- Spiegelberg, V.: Wirtschaftlichkeit von ES+S – Wirbelschichtverbrennungsanlagen kleiner Leistung zur Klärschlammensorgung. Rostock, 2006
- Verband Kommunaler Unternehmen e.V. (VKU): Novelle der Klärschlammverordnung - Übergangsfristen erforderlich. <http://www.vku.de/wasser/umwelt/klaerschlamm/vku-grafik-novelle-der-klaerschlammverordnung-uebergangsfristen-erforderlich.html>. 18.05.2015
- Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV) vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 1021, 1044, 3754)
- von Krauland, M.: EISENMANN SE – PYRUBUSTOR®. <http://www.eisenmann.com/de.html>. 22.01.16
- Werther, J.: Aktuelle Entwicklungen bei der thermischen Behandlung von Klärschlamm (KA 6/2003). Hamburg, 2003

7 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

7.1 Abbildungen

Abbildung	Seite	Bezeichnung
Abbildung 2.1	12	Thermische Klärschlammensorgung in Deutschland
Abbildung 2.2	13	Summenhäufigkeit für Phosphor in Klärschlamm als P_2O_5
Abbildung 4.1	21	Wirbelschichtreaktoren
Abbildung 4.2	22	Prinzipieller Aufbau einer Stationären Wirbelschichtfeuerung
Abbildung 4.3	23	Verfahrensfließbild Klärschlamm-trocknung- und Verbrennung
Abbildung 4.4	26	Verfahrensfließbild einer Flash-Pyrolyse in einem Wirbelbettreaktor mit einer stationären Wirbelschicht
Abbildung 4.5	27	Funktionsprinzip des PYROBUSTOR®
Abbildung 4.6	28	Praxisbeispiel zur Klärschlamm-pyrolyse auf der ARA Pustertal, Italien
Abbildung 4.7	29	Verfahrensschema der Klärschlammverwertung nach dem PYREG®-Verfahren
Abbildung 4.8	31	Unterschied zwischen einer konventionellen Verbrennung und einer flammenlosen Oxidation (FLOX®)
Abbildung 4.9	36	Energetische Betrachtung der ES+S Wirbelschichtverbrennung
Abbildung 4.10	38	Zusammenfassung der bekannten Prozessparameter basierend auf der Betriebsdatenerfassung der Anlage in Südtirol
Abbildung 4.11	38	Energiebilanz Pyrolyse
Abbildung 4.12	38	Energiebilanz global (thermische Verwertung)
Abbildung 4.13	41	Energiebilanz beim PYREG®-Verfahren
Abbildung 4.14	45	Löslichkeit von PYREG®-Phosphatdünger

7.2 Tabellen

Tabelle	Seite	Bezeichnung
Tabelle 2	11	Schätzung des jährlichen Klärschlammaufkommens
Tabelle 4.1	32	Analyse der Klärschlammmasche von der Pilotanlage auf der Kläranlage „Untere Selz“ in Ingelheim

Tabelle	Seite	Bezeichnung
Tabelle 4.2	35	Mittlere Schwermetallkonzentrationen des Klärschlammes in MV im Jahr 2011, geltende und zukünftige Grenzwerte in mg/kg TS
Tabelle 4.3	42	Charakterisierung der Stoffströme zur Phosphorrückgewinnung in kommunalen Kläranlagen
Tabelle 4.4	43	Phosphor-Gehälter in g/kg TM für die größten Kläranlagen der GKU
Tabelle 4.5	46	Investitionen für die Wirbelschichtverbrennung
Tabelle 4.6	47	Betriebskosten für die Wirbelschichtverbrennungsanlage
Tabelle 4.7	47	Abschreibung auf Abnutzung (Afa)
Tabelle 4.8	48	Gesamtkosten für die Modellanlage
Tabelle 4.9	49	Jährliche Betriebskosten
Tabelle 4.10	50	Berechnung der Gesamtkosten für die Errichtung der PYREG®-Anlage auf der Kläranlage Linz-Unkel

Erklärung über die Selbstständigkeit der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe und keine als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich erkläre weiterhin, dass die abgegebene elektronische Fassung mit der eingereichten Arbeit identisch ist.

Altentreptow, den 28. Januar 2016

Tommy Ender