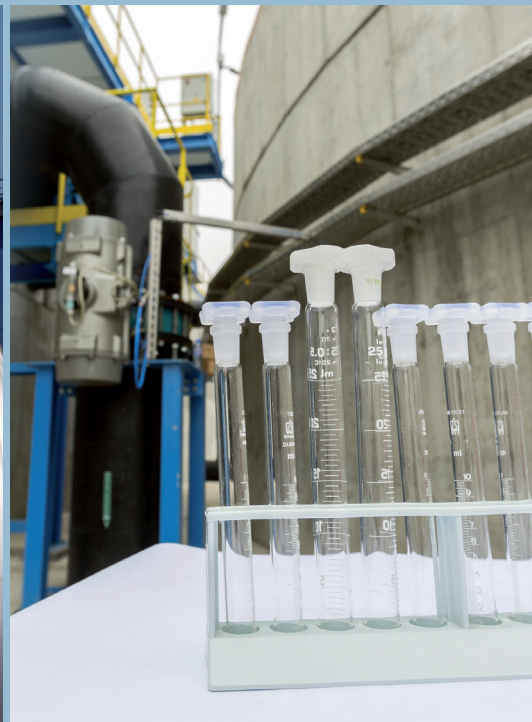


Studie „Vertiefende Untersuchung zu den technischen Möglichkeiten der thermischen Klärschlamm-Verwertung in Mecklenburg-Vorpommern“



**Mecklenburg
Vorpommern**



Ministerium für Wirtschaft,
Bau und Tourismus



Das Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus hat die Pöyry Deutschland GmbH beauftragt, eine Studie „Vertiefende Untersuchung zu den technischen Möglichkeiten der thermischen Klärschlamm-Verwertung in Mecklenburg-Vorpommern“ zu erarbeiten.

Kontakt:

Günter Nebocat

Telefon: (040) 69200-164

Mobil: 0170 8080887

E-Mail: guenter.nebocat@poyry.com

Pöyry Deutschland GmbH

Borsteler Chaussee 51

22453 Hamburg

Telefon: (040) 692 00-0

Fax: (040) 692 00-190

E-Mail: contact.hamburg@poyry.com

www.poyry.com · www.poyry.de

Studie „Vertiefende Untersuchung zu
den technischen Möglichkeiten der
thermischen Klärschlamm-Verwertung
in Mecklenburg-Vorpommern“

INHALT

1	AUFGABENSTELLUNG	7
1.1	Veranlassung	7
1.2	Zielsetzung	7
2	GRUNDLAGEN	9
2.1	Klärschlamm-Mengen zur thermischen Verwertung	9
2.2	Klärschlamm-Zusammensetzung	9
3	VERFAHRENSSTUFEN BEI DER THERMISCHEN VERWERTUNG	10
4	KAPAZITÄT DER THERMISCHEN KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG	11
5	SYSTEME DER THERMISCHEN KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG	12
5.1	Anforderungen an die thermische Klärschlammverwertung	12
5.2	Systeme zur Trocknung von Klärschlamm	13
5.3	HTC-Verfahren	26
5.4	Systeme zur Verbrennung von Klärschlamm	28
5.5	Systeme der Vergasung	34
5.6	System der Pyrolyse	38
5.7	Zusammenfassende Bewertung	42
6	ANLAGENKONZEPT THERMISCHE KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG	43
6.1	Klärschlammannahme und -stapelung	43
6.2	Trocknung des Klärschlammes	45
6.3	Wirbelschichtfeuerung und Dampferzeuger	47
6.4	Abgasreinigung	48
6.5	Energienutzung	50
6.6	Elektrotechnik und Leittechnik	52
6.7	Bautechnik und Anlagenaufstellung	53
7	WIRTSCHAFTLICHKEIT	55
7.1	Investitionen	55
7.2	Betriebskosten	55
8	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	56
9	ANHÄNGE	57
10	LITERATURVERZEICHNIS	57

ABKÜRZUNGEN

17. BImSchV	17. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz [1]
AbfKlärV	Klärschlammverordnung [2]
ARA	Abwasserreinigungsanlage
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CO	Kohlenmonoxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
HOK	Herdofenkoks
Hu	Unterer Heizwert
IFEU	Institut für Energie und Umwelt GmbH
KVA	Klärschlammverbrennungsanlage
Mg	Megagramm, auch als Tonne bezeichnet
MV	Mecklenburg-Vorpommern
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickoxide
oTS	organische Trockensubstanz (das Brennbare)
SEVA	Schlammmentwässerungs- und -verbrennungsanlage
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft [3]
TS	Trockensubstanz
wd	Arbeitstag (von engl. working day)

1

AUFGABENSTELLUNG

1.1 Veranlassung

Das Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus hat die Pöyry Deutschland GmbH beauftragt, eine Studie „Vertiefende Untersuchung zu den technischen Möglichkeiten der thermischen Klärschlamm-Verwertung in Mecklenburg-Vorpommern“ zu erarbeiten. Dabei soll auch die Möglichkeit der Rückgewinnung des Phosphors in den anfallenden Aschen berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen sind für eine zentrale thermische Verwertungsanlage mit einer Kapazität von 30.000 Mg TS/a standortunabhängig, durchzuführen.

Folgende inhaltliche Schwerpunkte der Untersuchung sind zu behandeln:

- Darstellung der marktverfügbaren Anlagentechnik für die Verbrennung von Klärschlamm im Wirbelschichtverfahren und für alternative großtechnisch bewährte Verfahren mit einer Kapazität von 30.000 Mg TS/a;
- Klärschlammzufuhr in die Anlage;
- Zentrale und dezentrale Trocknung;
- Energieauskopplung;
- Abgasreinigung;
- Brüdenaufbereitung.

Die untersuchten Technologien sollen verglichen und bewertet werden.

Auf der Grundlage der vergleichenden Bewertung soll das bevorzugte thermische Verfahren weiter ausgearbeitet werden.

1.2 Zielsetzung

Aus der Novelle der Klärschlammverordnung (Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit der „Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“ des BMUB [4]) ergibt sich für das Land Mecklenburg-Vorpommern Handlungsbedarf bei der Klärschlammmentsorgung. Das in der Novelle postulierte Ziel der Reduzierung des Schadstoffeintrages in den Boden und des Phosphorrecyclings wird dazu führen, dass ab 2025 nur ca. 10 % des in MV produzierten Klärschlammes (bezogen auf die Trockenmasse) landwirtschaftlich verwertet werden können. Das heißt, dass für ca. 90 % des Klärschlammes eine thermische Entsorgungsmöglichkeit mit Phosphorrecycling aus der Asche geschaffen werden muss, sofern das Phosphor nicht durch eine vorgeschaltete Rückgewinnung aus dem Abwasser oder Schlamm abgetrennt wird.

Die nachfolgende Untersuchung beinhaltet eine zusammenfassende Darstellung der verfügbaren Technologien für die thermische Klärschlammverwertung. Dabei wurden die Technologien hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, ihrer Erprobung in der Betriebspraxis und ihrer Verfügbarkeit für eine gesicherte Entsorgung bewertet.

Aus der Bewertung der unterschiedlichen Technologien erfolgte die Auswahl und Festlegung der empfohlenen thermischen Behandlung, die geeignet ist, die Anforderungen an eine zentrale thermische Klärschlammverwertung zu erfüllen.

Dabei ist entsprechend den Besonderheiten der Situation in Mecklenburg-Vorpommern auch die Anlieferung aus den zahlreichen, teilweise weit entfernten Klärwerken zu berücksichtigen. Die in diesen Klärwerken anfallenden Schlämme unterscheiden sich erheblich bezüglich der Mengen und der Art der Vorbehandlung, wie z. B. mechanisch entwässert oder auch bereits getrocknet.

Gegenstand der Untersuchung sind nur solche Verfahren der thermischen Verwertung, die eine optimale Nutzung der Aschen für eine zukünftige Phosphatgewinnung erlauben. Diese Forderung zielt auf ein eigenständiges thermisches Verfahren. Eine Betrachtung von Verfahren der Mitverbrennung z. B. im Kraftwerk etc. ist ausgeschlossen, da in diesen Fällen die Asche als Mischprodukt anfällt und somit das Potential und die Wirtschaftlichkeit für eine zukünftige Phosphatgewinnung deutlich reduziert sind.

Für die ausgewählte Technologie wird in der weiteren Bearbeitung die komplette Verfahrens- und Anlagentechnik dargestellt, im Einzelnen:

- Klärschlammzufuhr (Anlieferung und Stapelung);
- Trocknung mit den Varianten zentral und dezentral;
- Aufbereitung der Brüden;
- Abgasreinigung und Reststoffe;
- Energieauskopplung.

2.1 Klärschlamm-Mengen zur thermischen Verwertung

Die Aufgabenstellung gibt die Klärschlammmenge vor mit 30.000 Mg TS/a

In der Studie „Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern“ aus dem Jahr 2013 sind die einzelnen Klärwerke und die produzierten Klärschlamm-mengen zusammengestellt. Diese Angaben und Daten aus dieser Studie sind indikativ.

Eine abschließende Festlegung, welche Mengen mit welchen Eigenschaften (entwässert vs. getrocknet) angeliefert werden, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich, da Veränderungen in der Schlammbehandlung der Klärwerke zu erwarten sind und noch kein Standort bestimmt ist.

2.2 Klärschlamm-Zusammensetzung

In der nachfolgenden Untersuchung werden Klärschlamm-eigenschaften angenommen, die aus der Erfahrung mit vergleichbaren Aufgabenstellungen sowie in der Literatur (zum Beispiel [5]) bekannt sind, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Zu Grunde gelegte Klärschlamm-eigenschaften

Parameter	Einheit	Werte
Trockensubstanzgehalt entwässerter KS	m%	20 – 25
Heizwert Hu mechanisch entwässerter KS	MJ/kg	1 – 3,5
Aschegehalt	m% bez. TS	45 – 55
Zusammensetzung des Brennbaren (oTS)		
C	m% bez. oTS	55
H	m% bez. oTS	6
O	m% bez. oTS	25
N	m% bez. oTS	7
S	m% bez. oTS	2
P	m% bez. oTS	5

Somit wird auf Analysen von Klärschlämmen aus den vielen Kläranlagen in MV verzichtet. Darüber hinaus sind in der Studie „Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern“ im Kapitel 3.1 bereits Aussagen zu den Mengen und der Qualität der Klärschlämme in MV zu finden.

3

VERFAHRENSSTUFEN BEI DER THERMISCHEN VERWERTUNG

Das verfahrenstechnische Konzept der thermischen Klärschlammverwertung umfasst grundsätzlich die folgenden Verfahrensstufen, die für alle Lösungen der thermischen Behandlung in der einen oder anderen Form erforderlich sind:

- **Anlieferung und Stapelung der Klärschlämme:** Bei der Übernahme von Klärschlämmen aus verschiedenen Klärwerken ist die unterschiedliche Qualität zu beachten. So müssen die mechanisch entwässerten und die getrockneten Klärschlämme separat angenommen und gelagert werden.
- **Trocknung der Klärschlämme:** Für die wirtschaftliche und ökologisch effiziente thermische Klärschlammverwertung ist der Einsatz von Primärbrennstoff so weit wie möglich zu vermeiden. Dies erfordert die Trocknung des Klärschlammes, so dass eine energieautarke Verbrennung erreicht wird.
- **Behandlung der Brüden:** Behandlung der Brüden aus der Trocknung und Ableitung des mit Feststoffen, NH_3 und CSB belasteten Kondensats entsprechend den jeweiligen örtlichen Einleitbedingungen (Klärwerk o.ä.). Diese Stufe steht immer im direkten räumlichen Zusammenhang mit der Trocknung.
- **Thermischer Prozess:** Verfahren der thermischen Behandlung zur Umwandlung der organischen Inhaltsstoffe und Mineralisierung der inerten Rückstände (Asche) entsprechend dem technischen Regelwerk bzw. dem Stand der Technik.
- **Nutzung der Energie:** System der Kühlung der heißen Abgase aus der thermischen Behandlung bzw. der Nutzung der Abwärme z. B. in einem Dampferzeuger oder anderen geeigneten Systemen. Im Fall der Vergasung gilt dies für die Gasverwertung.
- **Abgasreinigung zur Begrenzung der Emissionen:** Dies gilt gleichermaßen für die Abgasströme aus der Verbrennung wie auch für die Behandlung des Entgasungsgases bzw. der resultierenden Abgasströme.

4

KAPAZITÄT DER THERMISCHEN KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG

Auf der Grundlage der zu verwertenden Klärschlammmenge von 30.000 Mg TS/a werden folgende Parameter für die weitere Bearbeitung berücksichtigt:

- Der Betrieb erfolgt an 24 h/Tag und 365 Tagen/a, es ergibt sich eine maximal mögliche Betriebsstundenzahl von 8.760 h/a.
- Eine Reserve für Wartung sowie für geplante und ungeplante Stillstände wird berücksichtigt mit ca. 15 %, d. h. mit rd. 55 Tagen/a;
- Daraus folgen netto rd. 7.500 h/a Betrieb. Dies ist ein erster Planungsansatz, der verfahrensabhängig und entsprechend dem Projektfortschritt überprüft werden sollte.
- Somit resultiert eine Kapazität von rd. 4 Mg TS/h. Mit dem Ziel einer energieautarken Verbrennung ist eine Teiltrocknung auf einen TS-Gehalt von ca. 45 % erforderlich. Dies entspricht einem Mengenstrom von rd. 8,9 Mg/h teiltrockneten Klärschlamms.
- Der Heizwert des auf 45 % TS-Gehalt vorgetrockneten Klärschlamms kann mit rd. 4,5 MJ/kg angenommen werden. Daraus resultiert eine thermische Kapazität von rd. 11 MWth.

Diese erste Abschätzung der Kapazität dient zunächst dazu, die thermischen Behandlungssysteme auf ihre Eignung bezüglich der Leistungsfähigkeit darzustellen und bewerten zu können. Die Anzahl der notwendigen Linien ist auch von dem gewählten Verfahren abhängig und wird später weiter erörtert, siehe Abschnitt 6. Hierbei sind sowohl die Entsorgungssicherheit als auch die Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen.

5

SYSTEME DER THERMISCHEN KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG

5.1 Anforderungen an die thermische Klärschlammverwertung

Die Aufgaben der thermischen Klärschlammverwertung sind:

- die vollständige Oxydation der organischen Klärschlamminhaltsstoffe (Mineralisierung)
- die Zerstörung schädlicher organischer Verbindungen
- die Minimierung von Emissionen
- die Nutzung der Energie aus dem thermischen Prozess

Die thermische Behandlung des Klärschlammes umfasst die folgenden Phasen:

- Trocknung, d. h. Verdampfung des noch im Brennstoff enthaltenen Wassers
- Vergasung / Verschwelung der organischen Bestandteile
- Verbrennung der freigesetzten Schwelgase

In der konventionellen Klärschlammverbrennung laufen die vorgenannten Phasen in einem Reaktionsraum (Brennkammer) überlagert und zeitgleich ab. Mit der Entwicklung der „Alternativen Verfahren“ wie Vergasung bzw. Pyrolyse wird die Vergasung in einer separaten vorgezogenen Verfahrensstufe realisiert. Das Ziel dieser Entwicklung ist, das dabei gewonnene Brenngas in der nachgeschalteten Verfahrensstufe Verbrennung energetisch effizienter nutzen zu können.

Für alle Verfahren ist die Trocknung des Klärschlammes von besonderer Bedeutung. Mit der mechanischen Entwässerung werden TS-Gehalte von 20% bis maximal 35% erreicht bzw. ein Wassergehalt von 65% bis 80%. Der so vorbehandelte Klärschlamm würde bei der nachgeschalteten Verbrennung den Einsatz von Primärbrennstoff erfordern. Stand der Technik ist jedoch die energieautarke Verbrennung. Das heißt, durch eine vorgeschaltete Trocknung wird der Heizwert des Klärschlammes entsprechend den Notwendigkeiten des jeweiligen Prozesses (teilgetrocknet oder vollgetrocknet) erhöht.

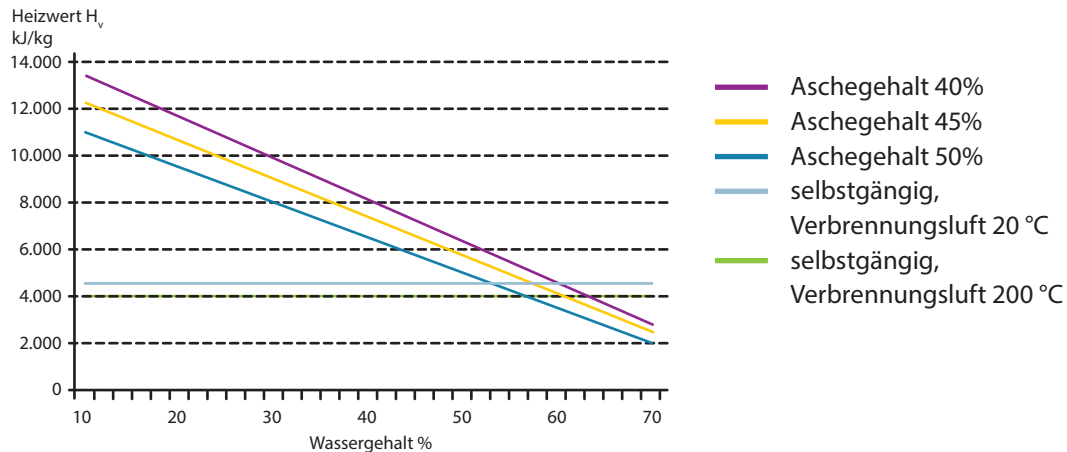


Abbildung 1: Heizwert H_v des Klärschlammes in Abhängigkeit vom Wassergehalt [6]

In der Abbildung 1 sind die Zusammenhänge von Wassergehalt und Heizwert dargestellt. Die energieautarke Verbrennung wird bei einem Heizwert von ca. 4,5 MJ/kg erreicht. In Abhängigkeit von der Schlammqualität (Aschegehalt) wird dieser Heizwert bei einem Wassergehalt von ca. 55 % entsprechend einem TS-Gehalt von 45 % erreicht.

Für die Alternativen Verfahren Vergasung und Pyrolyse ist eine weitergehende Trocknung (Volltrocknung) erforderlich auf TS-Gehalte > 90 % entsprechend einem Wassergehalt < 10 % mit dem Ziel, eine möglichst gute Brenngasqualität zu erreichen.

5.2 Systeme zur Trocknung von Klärschlamm

5.2.1 Übersicht über Trocknungsverfahren

Die Klärschlamm-trocknung dient dem weiteren Wasserentzug nach der mechanischen Entwässerung. Die Abbildung 2 veranschaulicht die Massenreduktion durch die Trocknung. Dabei ist der Effekt der Massenreduzierung durch die Trocknung deutlich geringer als durch die mechanische Entwässerung. Darüber hinaus zielt die Trocknung insbesondere auf die Verbesserung der Brennbarkeit durch eine Erhöhung des Heizwertes.

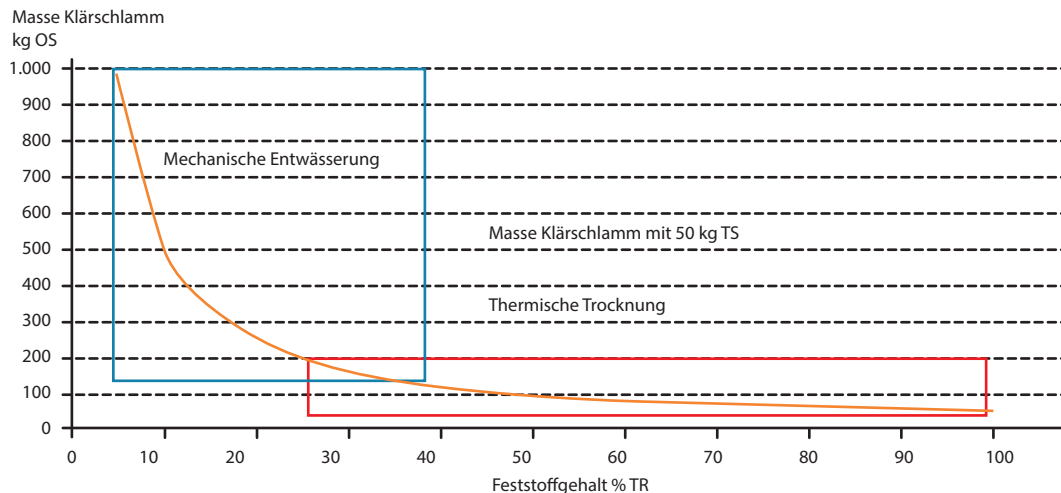


Abbildung 2: Mengenreduzierung durch Trocknung [6]

Im Ergebnis der Trocknung unterscheidet man die Volltrocknung und die Teiltrocknung. Bei der Volltrocknung hat das Trockenprodukt einen TS-Gehalt $> 85\%$ und einen staub- bis granulatförmigen Charakter. Handhabung und Lagerung des vollgetrockneten Klärschlammes erfordert die besondere Beachtung von Brand- und Explosionsschutz-Maßnahmen.

Bei der Teiltrocknung hat das Fertigprodukt einen TS-Gehalt von unter 85% . Die Konsistenz des teilgetrockneten Klärschlammes ist von unterschiedlicher Struktur und reicht von pumpfähig bei 40% TS-Gehalt bis krümelig bei $> 70\%$ TS-Gehalt.

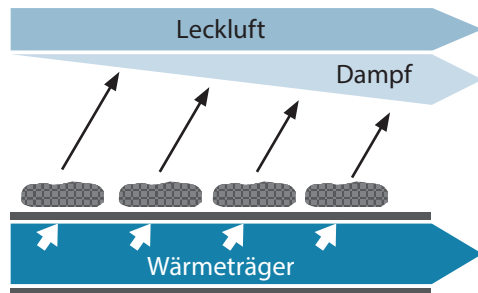
Im Bereich von 40% bis 50% TS-Gehalt durchläuft der Klärschlamm die sogenannte „Leimphase“ und geht dann über in eine klumpige bis krümelige Struktur. Dieser fordert besondere Maßnahmen im Trocknungsprozess und erschwert die weitere Förderung.

Die Trocknung erfolgt durch Verdampfung und Verdunstung des Klärschlammwassers unter Einsatz eines Wärmeträgers. Dabei wird verfahrenstechnisch wie folgt unterschieden in:

- Kontakttrocknung mit indirekter Wärmeübertragung durch eine Kontaktfläche;
- Konvektionstrocknung mit direkter Wärmeübertragung zum Wärmeträgerstrom;
- Strahlungstrocknung als Sonderform der Konvektionstrocknung mit Strahlung als Energiequelle;
- HTC-Verfahren (Hydro Thermal Conversion-Verfahren) als weitergehendes thermisches Verfahren zur Herstellung eines brennbaren Klärschlammprodukts (Bio-Kohle).

Im Folgenden werden diese Verfahren weiter erläutert.

5.2.2 Kontakttrocknung



Bei der Kontakttrocknung erfolgt die Wärmeübertragung indirekt durch eine Kontaktfläche (Indirekttrocknung). Als Wärmequelle werden Dampf, Heißwasser oder Thermoöl verwendet. Der aus dem Trockengut freigesetzte Wasserdampf (Brüden) wird mit der Schleppluft/Leckluft ausgetragen. In der nachfolgenden Abbildung ist das Prinzip skizziert:

Abbildung 3: Kontakttrocknung [7]

Beispiele sind der Scheibentrockner, der Dünnschichttrockner und der Schneckentrockner. Auch der Wirbelschichttrockner kann der Kontakttrocknung zugeordnet werden, da der primäre Wärmeträger die im Kreislauf gefahrenen Dampf/Brüden im Wärmetauscher beheizt. Gleichzeitig ist er auch ein Konvektionstrockner, da der erwärmte Brüden der konvektive Wärmeträger ist.

Scheibentrockner

Der Scheibentrockner besteht im Wesentlichen aus einem horizontal angeordneten Zylinder (Stator) und einem innenliegenden Rotor. Der Rotor besteht aus einer Hohlwelle mit aufgeschweißten hohlen Scheiben. Diese werden vom Heizmedium i. d. R. Sattedampf bis 10 bar oder auch Thermoöl durchströmt und geben die Wärme an den Klärschlamm ab. Mit Hilfe der an den Scheiben angebrachten Paddel wird der Klärschlamm transportiert und dabei gut gemischt. Der Scheibentrockner arbeitet mit einer großen Klärschlammfüllung und erlaubt kein schnelles Abfahren.

Der Scheibentrockner (Abbildung 4) kann sowohl für die Volltrocknung als auch für die Teiltrocknung eingesetzt werden. Für die Volltrocknung muss der entwässerte Klärschlamm mit Trockengut gemischt werden, so dass ein rieselfähiges Gut (ca. 60 % TS-Gehalt) zugeführt werden kann und somit die Leimphase umgangen werden kann. Aus der Abbildung 4 ist zu entnehmen, dass die Anlage für die Volltrocknung mit weiteren Aggregaten ausgerüstet sein muss. Dazu gehört die Siebanlage zur Abtrennung eines staubarmen Granulats als Trockengut, die Rückführung einer Teilmenge mit nachgeschaltetem Mischer sowie ein Feststoffabscheider zur Abtrennung des mit den Brüden ausgetragenen Staubes.

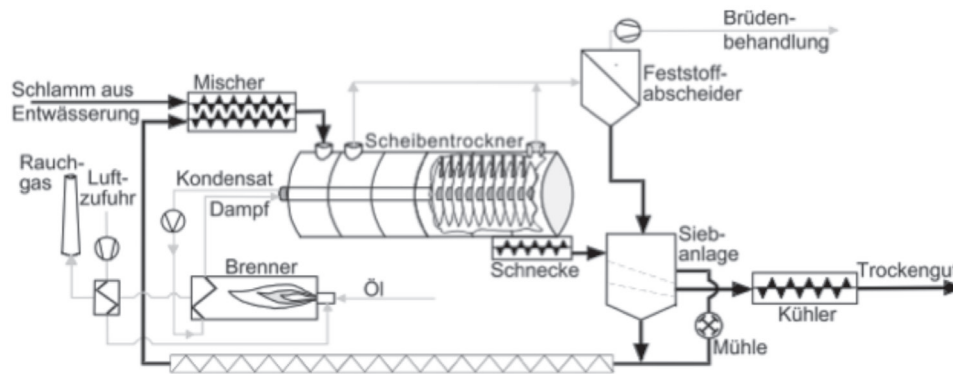


Abbildung 4: Scheibentrockner als Volltrocknung [7]

Der Scheibentrockner wird bevorzugt für die Teiltrocknung eingesetzt mit nachfolgender Verbrennung in der Wirbelschicht. Beim Einsatz für die Teiltrocknung reduziert sich die Ausrüstung auf den Scheibentrockner. Der Abzug der Brüden erfolgt über einen großvolumigen, sogenannten Brüden-dom (der Freiraum oberhalb der rotierenden Scheiben, in der Abbildung 4 nicht gezeigt), so dass bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten der Brüden die Staubfracht gering gehalten werden kann.

Dünnschichttrockner

Der Dünnschichttrockner (Abbildung 5) besteht aus einem doppelwandigen Zylinder (Stator) mit innenliegendem Rotor. Der Doppelmantel wird mit Sattdampf oder Thermoöl beheizt. Der innenliegende Rotor ist mit einstellbaren Paddeln ausgerüstet und gewährleistet den stets erneuerten Aufbau einer dünnen (5 mm – 15 mm) Klärschlammschicht und den Klärschlammtransport durch den Apparat.

Der Dünnschichttrockner kann gleichermaßen für die Teiltrocknung und für die Volltrocknung eingesetzt werden. Das Prinzip der stets erneuerten „Dünnschicht“ erlaubt das Durchfahren der Leimphase, d. h. eine Rückführung von Trockenprodukt ist nicht erforderlich.

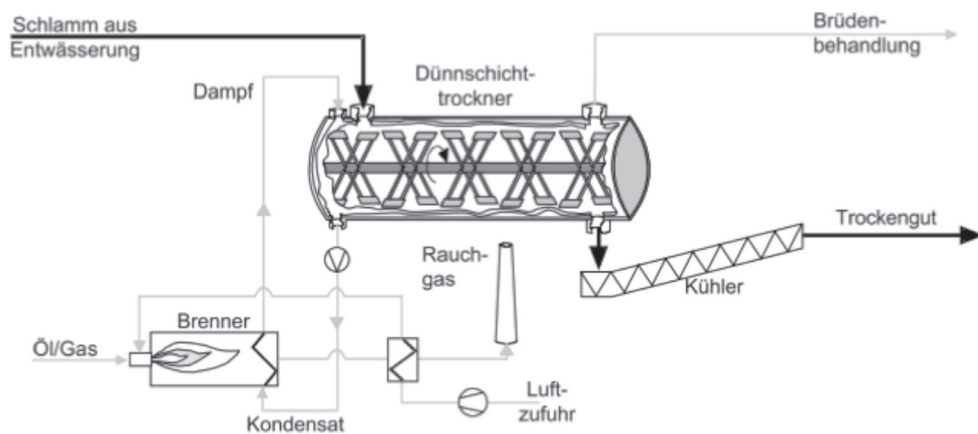
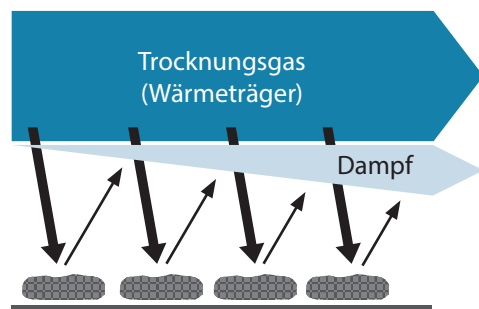


Abbildung 5: Dünnschichttrockner [7]

Entsprechend dem Prinzip des Dünnschichttrockners ist das Füllvolumen gering; dies erlaubt ein zügiges An- und Abfahren. Allerdings sind Dünnschichttrockner dann störanfällig, wenn mit Fremdkörpern im Schlamm (z.B. Eisenteile, Steine) zu rechnen ist.

5.2.3 Konvektionstrocknung



Bei der Konvektionstrocknung kommt der Wärmeträger Luft direkt mit dem Klärschlamm in Berührung (Direktrocknung). Als Wärmequelle dienen vorgewärmte Abluft bzw. Abgas. Die Erwärmung der Wärmeträger erfolgt mit Abdampf oder vergleichbaren Wärmeträgern ähnlich der Kontakttrocknung. Der durch die Trocknung erzeugte Wasserdampf (Brüden) wird mit dem Trocknungsgas ausgetragen.

Abbildung 6: Konvektionstrocknung [7]

Beispiele sind der Bandtrockner, der Trommeltrockner und auch der Wirbelschichttrockner. Die Konvektionstrockner werden ausschließlich für die Volltrocknung eingesetzt.

Bandtrockner

Im Bandtrockner wird die Trocknungsluft über und durch den auf einem Band ausgebreiteten Klärschlamm geführt. Der Klärschlamm wird durch eine Lochmatrize (Pelletierung) auf einen perforierten Bandförderer aufgestreut. Dabei wird durch die formstabilen Pellets und die Durchströmung des Haufwerks eine möglichst große Schlammoberfläche für den Trocknungsvorgang

ermöglicht. Der Trocknungsvorgang erfolgt kontinuierlich entlang der einzelnen Trocknungszo-
nen bis das getrocknete Produkt am Ende des Bandförderers abgeworfen wird. In der konstruk-
tiven Ausführung werden auch mehrere Trocknungskammern und Bandebenen unterschieden.

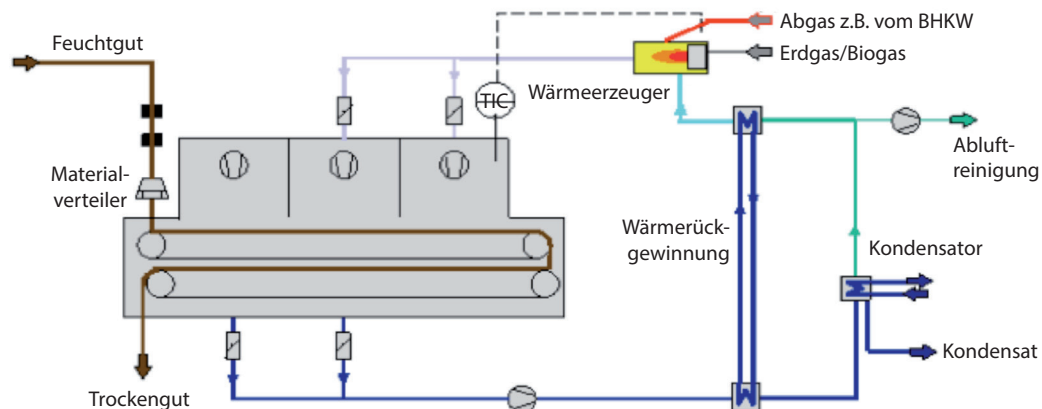


Abbildung 7: Bandtrockner [8]

Das Trocknungsgas wird als Heißluft von oben zugeführt und nach unten abgezogen; auch umgekehrte Anordnungen sind möglich. Es erfolgt anschließend eine Abkühlung mit nachfolgender Kondensation. Das Restgas wird wieder aufgeheizt und dem Trockner erneut zugeführt.

Trommeltrockner

Der Trommeltrockner wird ausschließlich für die Volltrocknung eingesetzt. Der entwässerte Klärschlamm wird mit Trockengut gemischt und als Granulat/Mischgut dem Trockner zugeführt.

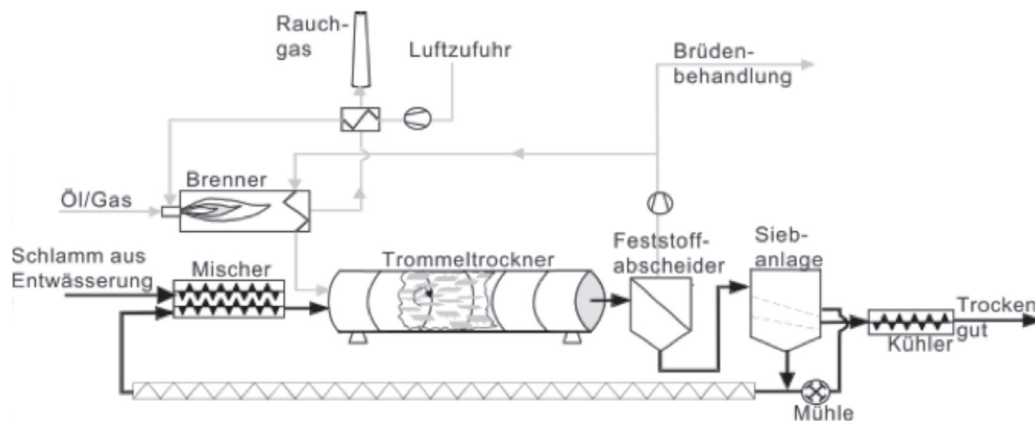


Abbildung 8: Trommeltrockner [7]

Der Trommeltrockner besteht aus einer ein- bis dreizügigen Trommel. Der Transport durch die rotierende Trommel erfolgt mit dem Heißgasstrom, durch Leitbleche in Verbindung mit dem Füllungsgrad und durch die Neigung der Trommel.

Wirbelschichttrockner

Der Wirbelschichttrockner basiert auf dem Prinzip der stationären Wirbelschicht, dabei besteht die Wirbelschicht aus granuliertem Trockengut (Klärschlamm). Das über einen Düsenboden eingetragene Gas dient der Erzeugung bzw. Stabilisierung der Wirbelschicht und der Aufnahme und dem Austrag der freigesetzten Brüden (Konvektionstrocknung). Die Wärmezufuhr erfolgt durch dampfbeheizte Rohrschlangen (Kontaktstrocknung), alternativ kann Thermoöl verwendet werden. Ein Austrag von getrocknetem Klärschlamm mit dem Trägergas wird dadurch verhindert, dass die mitgerissenen Partikel in dem darüber angeordneten Freiraum (Freeboard) in das Wirbelbett zurück fallen. Der mitgeschleppte Staub wird in einem Zyklon abgeschieden und dem entwässerten Klärschlamm zugemischt.

Das Trägergas besteht aus den Brüden, dem freigesetzten Inertgas und der Schleppluft. Der Gasstrom wird gekühlt (Kondensation eines Teils der Dampfphase) und anschließend als Trägergas durch den Düsenboden eingeblasen.

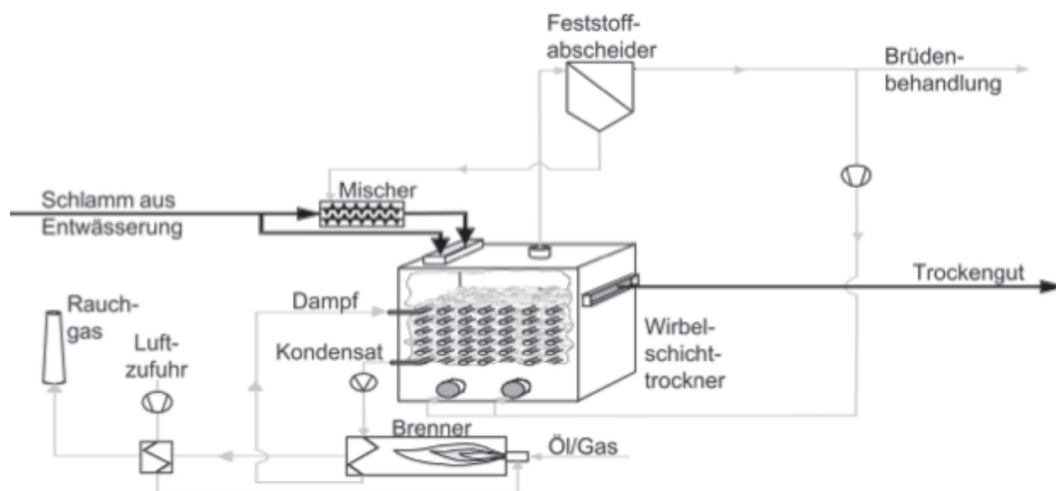


Abbildung 9: Prinzip des Wirbelschichttrockners [7]

Der entwässerte Klärschlamm wird mit dem abgeschiedenen Staub aus dem Feststoffabscheider gemischt, anschließend auf der Wirbelschicht verteilt und von den Partikeln der Wirbelschicht aufgenommen. Das Trockenprodukt wird kontinuierlich im unteren Bereich der Wirbelschicht abgezogen und anschließend gekühlt.

Der Wirbelschichttrockner wird ausschließlich für die Volltrocknung eingesetzt (die Verwirbelung erfordert eine granulartartige Konsistenz und damit einen hohen Trocknungsgrad) und ist besonders geeignet für große Kapazitäten.

5.2.4 Strahlungstrocknung

Das Konzept der Strahlungstrocknung kann als Konvektionstrocknung mit (Sonnen)-Strahlung als Energiequelle eingestuft werden.

Das Prinzip der Solartrocknung ist in der Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Der Klärschlamm wird in einer transparenten Hülle (ähnlich einem Gewächshaus) auf einer glatten Bodenfläche als dünne Schicht ausgebreitet. Ein sogenannter Schlamm-Manager (je nach Ausführung auch als „elektrisches Schwein“ bezeichnet) sorgt für regelmäßiges Wenden und Mischen des Klärschlammes. Die Verdunstung des Wassers erfolgt durch Erwärmung mittels Sonneneinstrahlung und kann durch weitere zusätzliche Wärmequellen verstärkt werden. Die Aufnahme des verdunsteten Wassers erfolgt durch die mechanische Zirkulation der Umgebungsluft.

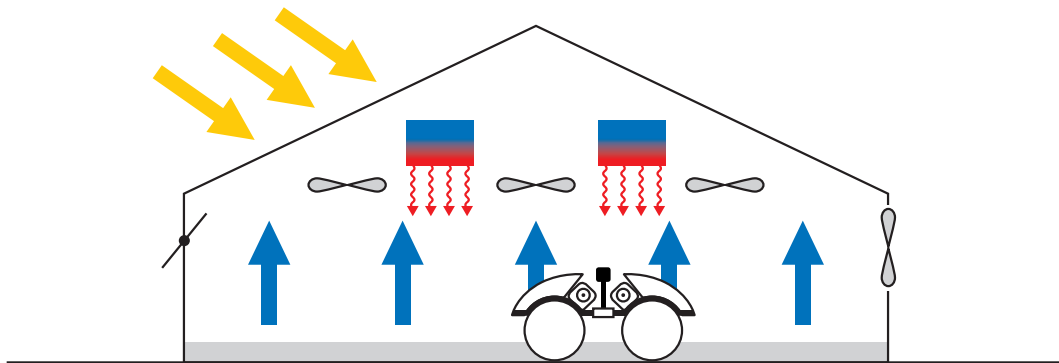


Abbildung 10: Prinzip-Schema Solartrocknung [9]

Die Solartrocknung erfordert große Flächen für die Ausbreitung des Klärschlammes. Das Ausbringen des Klärschlammes erfolgt durch einen Radlader, genauso wie das Einholen des getrockneten Produkts.

Abbildung 11: Transparente Hülle für die Solartrocknung [10]



Die solare Klärschlamm-trocknung erreicht Restwassergehalte von ca. 15 % und damit kaum die Qualität von thermisch vollgetrocknetem Klärschlamm. Die Leistung ist abhängig von der Sonneneinstrahlung und kann durch zusätzliche Heizung z. B. der Bodenfläche erhöht werden.

Unter den besonderen Bedingungen von MV (hohe Anzahl Sonnentage, viele kleine Anlagen) kann die solare Klärschlamm-trocknung an bestimmten Standorten ein betrachtenswertes Konzept darstellen. Zum Beispiel stellt sie für kleine und dezentrale Trocknungsanlagen eine interessante Möglichkeit zur Reduzierung der Transportkosten und –emissionen dar.

Allerdings ist in jedem Einzelfall zu prüfen, welche Maßnahmen erforderlich sind, um Belästigungen durch austretende Gerüche zu vermeiden. Unter Umständen erforderliche Abluftbehandlungseinrichtungen können die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen.

5.2.5 Energiebedarf und Wärmerückgewinnung der Trocknung

Energiebedarf

Die Bereitstellung von Energie bzw. Wärme für die Trocknung erfolgt durch den Einsatz unterschiedlicher Wärmequellen wie Abwärme, durch Einsatz von Primärbrennstoff oder durch Strahlung. Dabei ergibt sich der Wärmebedarf entsprechend der Trocknungssysteme auf unterschiedlichem Temperaturniveau:

- Wärmeträger Dampf bei Temperaturen oberhalb von 140 °C bei der Kontakttrocknung zur Beheizung der Wärmetauscherflächen;
- Wärmeträger Luft bei Temperaturen von Umgebungsluft bis zu Temperaturen über 100 °C.

Der Wärmebedarf für die Trocknung, d. h. Aufheizung des Klärschlammes und Verdampfung des Wassers, kann mit ca. 0,75 MWh abgeschätzt werden; bei Berücksichtigung von diversen Verlusten kann mit einem Brutto-Energiebedarf von rd. 0,85 MWh/Mg Wasserverdampfung gerechnet werden. Bei den Verfahren der Konvektivtrocknung sind teilweise deutlich höhere Verluste zu berücksichtigen.

Brüdenkondensation und Wärmerückgewinnung

Die aus der Trocknung ausgetragenen Brüden müssen insbesondere bei den Verfahren der Kontakttrocknung kondensiert werden. In den Brüden ist ein Großteil der eingesetzten Energie enthalten. Sie lässt sich durch verschiedene Verfahren relativ einfach nutzen, wenn entsprechender Bedarf für Niedertemperatur-Wärme vorhanden ist.

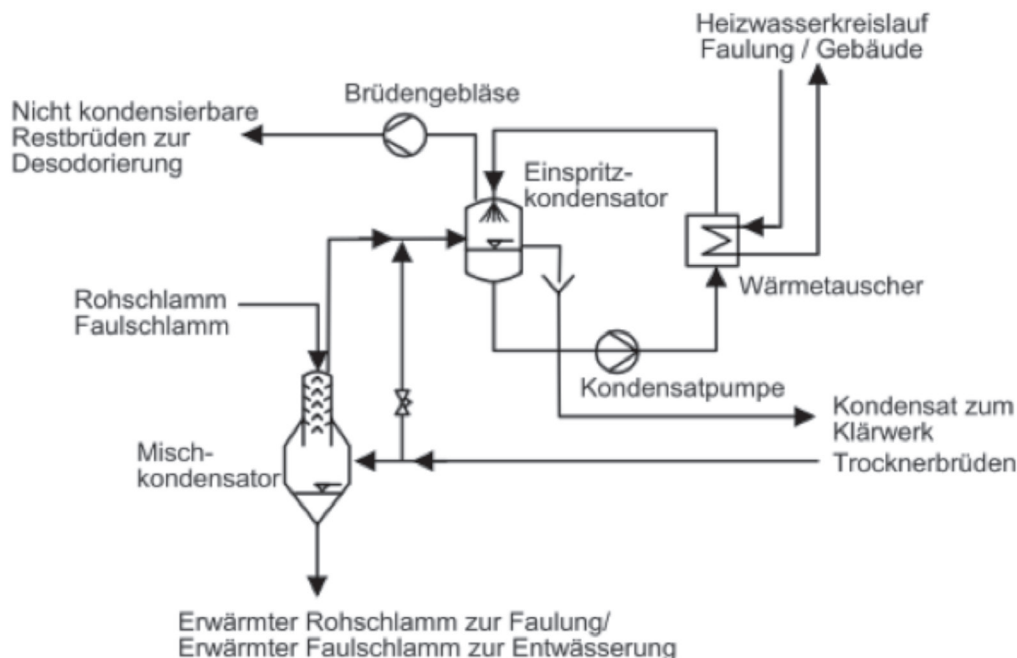


Abbildung 12: Brüdenkondensation mit Energierückgewinnung [7]

In der Abbildung 12 ist eine 2-stufige Brüdenkondensation mit einem nachgeschalteten Wärmetauscher schematisch dargestellt. In der ersten Stufe wird ein Mischkondensator für die Vorwärmung von Dünnschlamm eingesetzt; die Erwärmung des Dünnschlammes auf bis zu 60 °C führt zur Verbesserung der Entwässerbarkeit. In der zweiten Stufe ist der Einspritzkondensator mit einem Wärmetauscher verschaltet; dies ermöglicht die Erzeugung von Heißwasser zur Beheizung des Faulraumes und/oder anderer Wärmeverbraucher.

Die Brüdenkondensation kann grundsätzlich auch einstufig nur mit einem Kühlmedium durchgeführt werden, zum Beispiel dem Kläranlagenablauf. Diese Option kann dann eingesetzt werden, wenn zwischen Trocknung und Entwässerung kein räumlicher Zusammenhang besteht und somit Dünnschlamm als Kondensationsmedium und Wärmesenke nicht verfügbar ist.

5.2.6 Behandlung des Brüdenkondensats

Das Abwasser aus der Brüdenkondensation, das Brüdenkondensat, ist belastet. Dabei hängt die Belastung sowohl von der Qualität der Vorbehandlung (aerobe oder anaerobe Stabilisierung) als auch von der Schlamm-/bzw. Korntemperatur während der Trocknung ab. Mit zunehmender Temperatur erhöht sich auch die Belastung des Brüdenkondensats. Im Merkblatt ATV-DVWK-M 379 [7] werden folgende Werte genannt:

- Ammonium bis zu 2.500 mg/l
- CSB (abhängig von der Staubbelastung) bis zu 7.000 mg/l

Aufgrund dieser Belastung ist eine angemessene Behandlung des Kondensats erforderlich und kann entsprechend den Gegebenheiten am Standort unterschiedlich gelöst werden:

- Ist die Trocknungsanlage in das Klärwerk integriert, so kann das Brüdenkondensat mit dem Zentrat aus der Entwässerung in das Klärwerk eingeleitet werden. Die Menge Brüdenkondensat kann mit einem Mengenanteil < 10 % bezogen auf das Zentrat bezüglich der Rückbelastung als gering eingestuft werden.
- Ist die Trocknungsanlage als zentrale Trocknungsanlage der Verbrennung vorgeschaltet und angebunden an ein Klärwerk, so ist die Rückbelastung in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Klärwerkes zu prüfen. Empfohlen wird in jedem Fall eine separate Zwischenspeicherung mit einer Vorbehandlung und nachfolgender dosierter Ableitung in das Klärwerk.
- Ist die Trocknungsanlage als zentrale Trocknungsanlage der Verbrennung vorgeschaltet unabhängig von einem Klärwerk, so ist die Option einer separaten Aufbereitung und Ableitung zu prüfen. Eine Einleitung in die öffentliche Abwasserentsorgung erfordert eine besondere Behandlung (Feststoffabscheidung, Reduzierung NH_3 und CSB).

Die Ableitung der Brüden und die mögliche vorgeschaltete Aufbereitung des Brüdenkondensats ist ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl des geeigneten Standortes für die zentrale Verbrennungsanlage. Mit Kenntnis der Randbedingungen kann das geeignete Konzept der Kondensatbehandlung einschließlich der damit verbundenen Investitionen und Betriebskosten abgeschätzt werden.

5.2.7 Behandlung der Abluft

Nach der Brüdenkondensation verbleibt eine Teilmenge als nicht kondensierbarer Gasstrom. Dieser besteht aus im Klärschlamm gelösten Gase, Stoffen, die mit der Wärmebehandlung in die Gasphase umgewandelt worden sind und einer verfahrensabhängigen Menge Leck- oder Schleppluft. Dieses Gasgemisch kann sehr stark geruchsbelastet sein. Der Umfang der stofflichen Umsetzung nimmt mit steigender Temperatur des Trocknungsprozesses zu.

Bei Anwendung der Teiltrocknung mit Kontakttrocknern ist die Abluftmenge sehr gering (< 10 % der Kondensatmenge). In der Kombination mit einer nachgeschalteten Verbrennung wird diese Abluft der Verbrennung zugeführt und desodoriert.

Bei Anwendung der Volltrocknung ergeben sich größere Abluftmengen, die ebenfalls einer separaten Behandlung unterzogen werden müssen:

- die Abluft kann der Verbrennung zugeführt werden, wenn ein Dampferzeuger für die Wärmeerzeugung eingesetzt wird;
- die Abluft kann durch den Einsatz von Biofiltern separat desodoriert werden, erforderlichenfalls in Kombination mit vorgeschalteten Bio-Wäschern.

Die Qualität der Abluft aus Anlagen zum Trocknen von Klärschlamm unterliegt den Anforderungen der TA-Luft (Abschnitt 5.4.8.10.2) mit folgenden Anforderungen:

- Staubgehalt max. 10 mg/m³
- Ammoniak-Gehalt max. 20 mg/m³ und 0,10 kg/h
- Cges-Gehalt max. 20 mg/m³ und 0,10 kg/h
- Geruch max 500 GE/m³.

Wenn die Abluft der Verbrennung zugeführt wird, sind die vorgenannten Werte durch die Erfüllung der Anforderungen der 17. BImSchV [1] eingehalten. Mit der Verbrennung ist auch die vollständige Desodorierung gewährleistet.

Bei separater Behandlung werden die Anforderungen durch die Behandlung mit Biofilter oder anderen Verfahren ebenfalls erfüllt.

5.2.8 Anwendung der Trocknungssysteme

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Einsatz der Klärschlamm-trocknungssysteme in Deutschland [6].

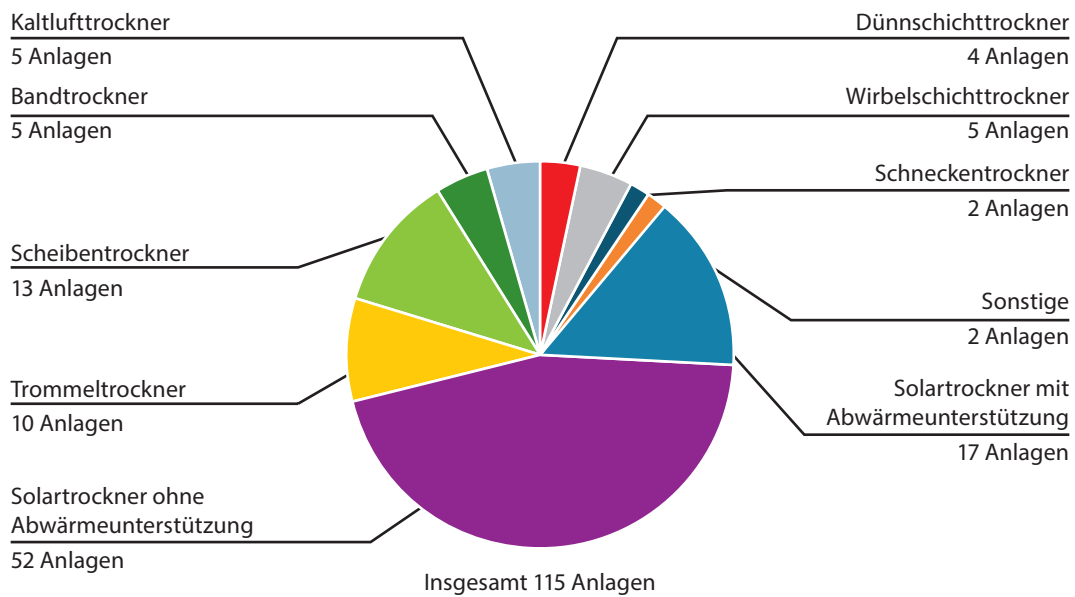


Abbildung 13: Anzahl der Klärschlamm-trocknungsanlagen/Verfahren in Deutschland [6]

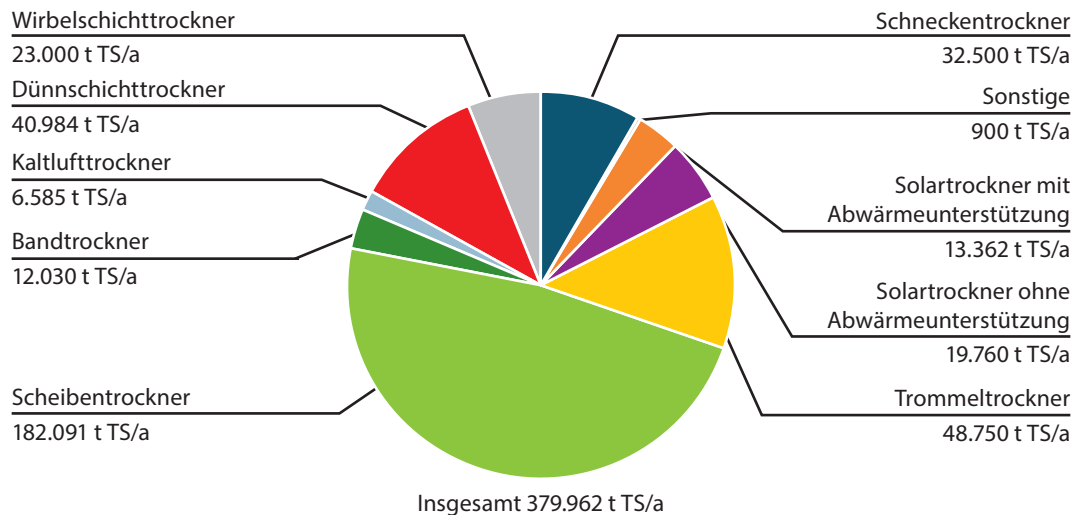


Abbildung 14: Kapazität der Trocknungsanlagen in Deutschland [6]

Im Vergleich der Anzahl der verschiedenen installierten Trocknungsanlagen mit der installierten Kapazität wird deutlich:

- Die Anzahl der Solartrocknungsanlagen ist mit über 50 % dominant, erbringt jedoch insgesamt weniger als 10 % der installierten Trocknungskapazität;
- Die Anzahl der Kontakttrockner mit ca. 15 % an der Anzahl der installierten Trocknungsanlagen erbringt jedoch ca. 59 % der installierten Trocknerkapazität.

5.2.9 Wirtschaftlichkeit der Trocknungsverfahren

Bereits aus der obigen Erläuterung der verschiedenen Trocknungssysteme wird erkennbar, dass für die vorgeschaltete Trocknung einer zentralen thermischen Verwertungsanlage (als Teiltrocknung in Kombination mit der Verbrennungsanlage) am sinnvollsten eine Kontakttrocknung eingesetzt wird.

Bei der Anwendung der Volltrocknung in einzelnen Klärwerken ist die Systemauswahl jeweils fallweise zu prüfen.

In den nachfolgenden Tabellen sind Daten zu den Betriebsdaten wie auch zu den Kosten zusammengestellt. Diese Tabellen (Tabelle 1 und Tabelle 3) wurden von Herrn Dr. Thomalla im Rahmen des Seminars „Klärschlamm-trocknung“ Sept. 2015 in Paderborn vorgestellt [11].

Tabelle 2: Betriebstechnische Daten [11]

	Trommel-trockner	Wirbel-schichttrock-ner	Bandtrock-ner	Schnecken-trockner	Scheiben-trockner	Dünn-schicht-trockner
Wärme-bedarf (WV = 1 t/h)	ca. 900 kW	ca. 900 kW	ca. 825 – 1.500 kW	ca. 850 kW	ca. 850 kW	ca. 850 kW
Abwärme-nutzung	nein	ja, < 280 °C	ja	ja, < 150 °C	ja, < 150 °C	ja, < 150 °C
Elektrischer Energie-bedarf (WV = 1 t/h)	70 kW	70 kW	65 kW	60 kW	60 kW	60 kW
Betriebs-mittel-bedarf	Stickstoff zur Inerti-sierung	Stickstoff zur Inerti-sierung	nicht nötig	nicht nötig	nicht nötig	nicht nötig
Platzbedarf	mittel	mittel	hoch	gering	sehr gering	sehr gering

Tabelle 3: Kosten: Investition, Betriebsmittel, Wartung [11]

	Trommel-trockner	Wirbel-schichttrock-ner	Bandtrock-ner	Schnecken-trockner	Scheiben-trockner	Dünn-schicht-trockner
Investition	ca. 1,2 Mio. €	ca. 1.9 Mio €	ca. 0.9 Mio €	ca. 0.9 Mio €	ca. 0.9 Mio €	ca. 0.9 Mio €
Betriebs-mittel	ca. 10.000 €/a	ca. 10.000 €/a	ca. 2.000 €/a	ca. 2.000 €/a	ca. 2.000 €/a	ca. 2.000 €/a
Wartung	ca. 30.000 €/a	ca. 30.000 €/a	ca. 10.000 €/a	ca. 10.000 €/a	ca. 10.000 €/a	ca. 10.000 €/a
Verschleiß-teile	Mischer-paddel Trommel-dichtungen Staubfilter	Mischer-paddel Wärme-tauscher Staubfilter	geringer Verschleiß	Schnecken	Rotor-schaufeln	Schaber

Die Kontakttrocknung mit den Systemen Scheibentrockner und Dünnschichttrockner ist sowohl bezüglich der betriebstechnischen Daten als auch bezüglich der Kosten gut vergleichbar. Eine Entscheidung zugunsten eines Systems ist daher vor allem vor dem Hintergrund der verfahrenstechnischen Anforderungen zu treffen.

5.3 HTC-Verfahren

Das HTC-Verfahren ist ein thermisches Verfahren zur Reduzierung des Wassergehaltes, gehört jedoch nicht zu den Trocknungsverfahren.

Das Verfahren der Hydro-Thermalen Conversion (HTC) ermöglicht eine thermische Behandlung und zielt auf eine deutlich verbesserte mechanische Entwässerbarkeit. Als Produkt nach der Entwässerung auf Filterpressen wird ein Filterkuchen mit einem TS-Gehalt > 70 % erzeugt, der geeignet für den Einsatz als Brennstoff (Biokohle) ist.

Das Verfahren der hydrothermalen Konversion nutzt die chemisch-physikalische Eigenschaft organischer Abfallstoffe, sich bei hohem Druck und hoher Temperatur (ca. 20 bar und 210 °C) zu zersetzen. Die langkettige organische Substanz zerfällt und kann aus der Flüssigphase extrahiert werden. Durch den höheren Anteil an elementarem Kohlenstoff hat das Produkt eine dunkelbraune bis schwarze Farbe. Die organische Trockensubstanz des Organik-Abfalls wird zu 65 % - 80 % in HTC-Kohle überführt. Ebenso wird die Brennwert-Fracht des Inputs zu rd. 70 % in der erzeugten Kohle wiedergefunden (Ramke et al. 2010 [12]), wobei die Spannbreite sowohl nach Einzelstoffen wie auch Reaktionsbedingungen durchaus 10 – 20 % Punkte betragen kann. Der mechanisch entwässerte und pumpfähige Klärschlamm (TS-Gehalte 20 % bis 25 %) wird einem Reaktor zugeführt und mit Dampf erhitzt und über eine Verweilzeit von ca. 30 Minuten auf Temperatur gehalten, um eine vollständige Wärmebehandlung aller Klärschlammartikel gewährleisten zu können.

Das Anlagenkonzept umfasst 3 Reaktoren mit dem Ziel einen quasi kontinuierlichen Prozess darstellen zu können:

- Reaktor 1 wird gefüllt und erhitzt;
- In Reaktor 2 findet die Umsetzung der Biomasse zu Biokohle statt;
- Reaktor 3 wird entspannt, gekühlt und entleert.

Der Prozess ist exotherm und führt zur Gasbildung. Die Gasphase wird anschließend der Feuerung des Dampferzeugers zugeführt. Trotz des exothermen Prozesses und Nutzung der Abwärme ist der Bedarf an Prozessdampf ein erheblicher Kostenfaktor.

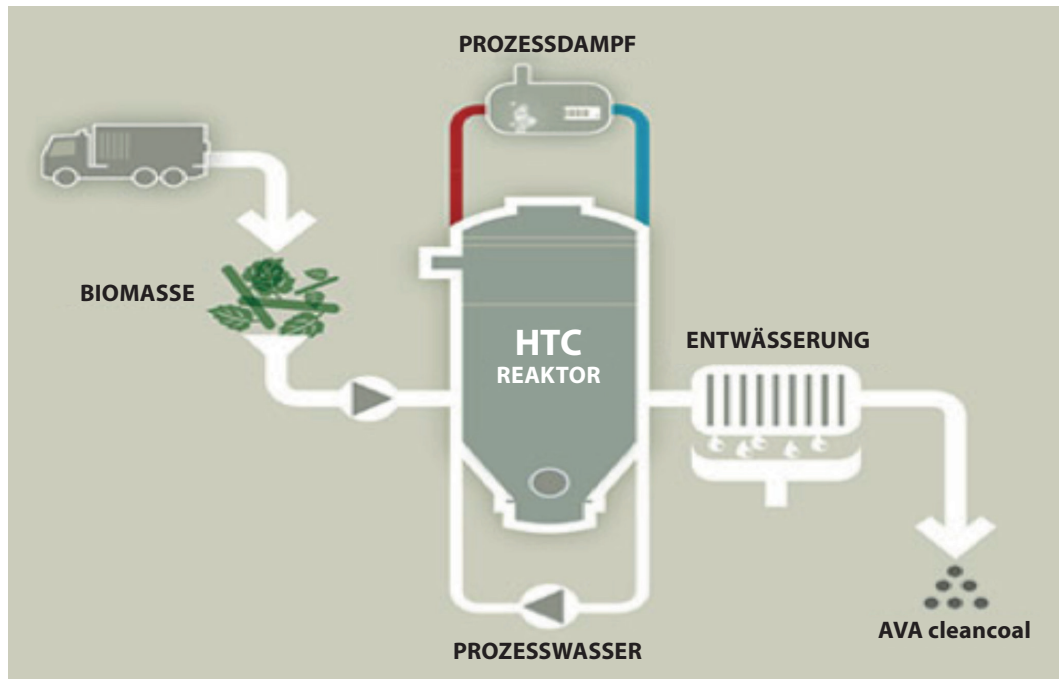


Abbildung 15: HTC-Verfahren – Prinzip-Schema [13]

Das ausgetragene Produkt wird auf Filterpressen entwässert. Zur Produktverbesserung ist die weitere Trocknung vorteilhaft. Der Einsatz der Biokohle ist vermutlich als abfallstämmiges Produkt zu bewerten und wird daher nur gegen einen Kostenbeitrag zu vermarkten sein. Das abgetrennte Wasser ist mit den umgesetzten Stoffen stark belastet und erfordert eine mehrstufige Aufbereitung, ehe es als Abwasser in ein Klärwerk abgeleitet werden kann.

Es ist außerdem zu beachten, dass nur dann die Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung aus dem Entwurf der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung erfüllt werden, sofern aus den nach der Verbrennung der Biokohle anfallenden Aschen das Phosphor gewonnen wird oder die Aschen langfristig gelagert werden, um eine spätere Phosphoraufbereitung vorzunehmen. [4].

Grundsätzlich ist das HTC-Verfahren in der Lage, sowohl den Klärschlamm als auch andere organische Substrate entsprechend zu behandeln. Es wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Dabei werden die Ergebnisse zur Erzielung eines kohleähnlichen Produkts bestätigt.

Das HTC-Verfahren wurde im Rahmen einer umfangreichen Studie von ICU/IFEU untersucht und die verfügbaren Erfahrungen ausgewertet [14]. Das Verfahren wird von mehreren Firmen angeboten und es werden jeweils erste Prototyp-Anlagen betrieben. Andererseits hat sich das Verfahren trotz umfangreicher Untersuchungen bisher noch nicht durchsetzen können. Es gibt nur wenig Betriebserfahrung, so dass über die Wirtschaftlichkeit keine ausreichenden Informationen vorliegen.

Damit sind die Randbedingungen für den Einsatz des HTC-Verfahrens nur unzureichend zu bewerten und es bedarf weiterer Betriebserfahrungen.

Das HTC-Verfahren als Vorbehandlungsstufe vor einer Verbrennung erfüllt derzeit aus unserer Sicht nicht die gestellten Anforderungen an eine zentrale thermische Verwertungsanlage in MV, insbesondere unter dem Kriterium der Bewährtheit. Deshalb können wir es als Konzept für die zentrale Anlage zur thermischen Verwertung des Klärschlammes in Mecklenburg-Vorpommern nicht empfehlen.

5.4 Systeme zur Verbrennung von Klärschlamm

5.4.1 Übersicht über die Verbrennungssysteme ($n > 1$)

Die Verbrennung zielt ab auf die vollständige Oxidation aller organischen Bestandteile im Klärschlamm. Dazu ist ein definierter Verbrauch an Sauerstoff bzw. Luft erforderlich. In der technischen Beschreibung wird diese minimale Luftmenge als stöchiometrischer Luftbedarf bezeichnet. Die Luftüberschusszahl n ist definiert als das Verhältnis von tatsächlichem, systembedingtem zu stöchiometrischem Luftbedarf; mit $n = 1$ wäre die ideale Verbrennung erreicht. Bei der Vergasung und Pyrolyse hingegen wird gezielt mit einem Luftmangel, d. h. $n < 1$ gearbeitet. Die Verbrennung von Klärschlamm erfolgt in Deutschland entweder in Monoverbrennungsanlagen oder durch Mitverbrennung in Kraftwerken, Zementwerken oder zum geringen Teil auch in Abfallverbrennungsanlagen. Da die Mitverbrennung die Phosphorrückgewinnung aus der Asche erheblich erschwert oder unmöglich macht, wird sie im Rahmen dieser Studie ungeachtet der wirtschaftlichen Vorteile nicht weiter betrachtet.

Die nachfolgend aufgeführten Verbrennungssysteme wurden entwickelt für die Verbrennung / thermische Verwertung von Klärschlämmen bzw. anderen Abfälle:

- Stationäre Wirbelschichtfeuerung;
- Etagenofen/Etagenwirbler;
- Rostfeuerung;
- Drehrohrfeuerung;
- Zykloidfeuerung.

Nachfolgend werden die wesentlichen Eigenschaften und ihre Anwendung in der thermischen Klärschlamm Entsorgung kurz beschrieben und die vorteilhaften Merkmale für die Eignung für die thermische Klärschlammverwertung herausgestellt.

5.4.2 Stationäre Wirbelschichtfeuerung

Das System der stationären Wirbelschichtfeuerung umfasst eine meist zylindrische Brennkammer die nach unten durch einen Düsenboden abgeschlossen ist. Unterhalb des Düsenbodens ist eine Luftkammer ausgebildet, so dass die mittels der Düsen eingeblasene Luft die darüber liegende Sandschicht in Bewegung versetzt, d. h. fluidisiert. Die Wirbelschichtfeuerung ist im

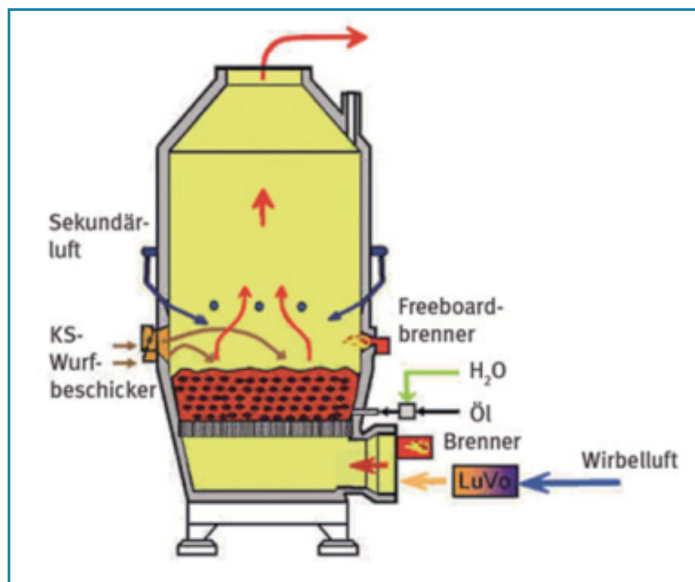
Betrieb besonders robust, da es keine bewegten Teile im Feuerraum gibt und somit keinen temperaturbedingten Verschleiß.

Es gibt auch Wirbelschichtfeuerungssysteme mit einem so genannten „offenen“ Rost, bei denen statt eines Düsenbodens Luftlanzen als Düsenträger eingesetzt werden. Diese Systeme sind nach unten offen und ermöglichen einen Abzug von Bettmaterial, um beispielsweise nichtfluidisierbare Fremdstoffe wie Eisenteile oder Steine auszutragen.

Die Wirbelschichtfeuerung wird mit einem Anfahrbrenner (Primärbrennstoff Heizöl El oder Erdgas) angefahren bis zu einer Feuerraumtemperatur von 850 °C, bevor der Klärschlamm aufgegeben werden darf.

Der Klärschlamm wird vorwiegend seitlich in den Ofen eingebracht. Häufig wird dafür ein Wurfbeschicker oder ähnliches eingesetzt, um den Klärschlamm möglichst gleichmäßig über die Oberfläche der Wirbelschicht zu verteilen. Die feuchten Schlammpartikel fallen in die Wirbelschicht hinab. Aufgrund des hohen Wärmegehaltes der Wirbelschicht erfolgt eine spontane Verdampfung der Feuchtigkeit, die organische Substanz wird vergast und verbrannt. Die dabei freigesetzte Wärme dient zur Aufrechterhaltung der Verbrennungstemperatur sowohl in der Wirbelschicht als auch im darüber angeordneten Freiraum. In der Betriebspraxis ist die Temperatur oberhalb der Wirbelschicht deutlich höher als in der Wirbelschicht. Der Freiraum wird großzügig bemessen, um eine ausreichende Verweilzeit (min. 2 sec) für das heiße Abgas bei min. 850 °C zu gewährleisten, wodurch die Mindestverbrennungsbedingungen nach § 6, Absätze (1) und (3) der 17. BImSchV [1] eingehalten werden.

Abbildung 16: Wirbelschichtfeuerung [5]



Mit dem Abgas wird die feinkörnige Asche ausgetragen und in der nachgeschalteten Abgasreinigung abgeschieden. Wenn der Klärschlamm grobkörnige Bestandteile enthält, werden diese in der Wirbelschicht zerrieben, sofern es sich um brennbare bzw. vergasungsfähige Partikel han-

delt (z. B. Holz). Große inerte Partikel (falls vorhanden) sinken auf den Boden der Wirbelschicht und werden separat abgezogen.

Der Vorzug der Wirbelschichtfeuerung resultiert aus der hohen Turbulenz der Wirbelschicht, die eine gute Verteilung von Verbrennungsluft und Klärschlamm bewirkt. Dadurch kann der Luftüberschuss niedrig gehalten werden, ($n \sim 1,3$) was sich vorteilhaft auf die Energiebilanz und das Emissionsverhalten auswirkt. Moderne Wirbelschichtfeuerungen sind unter bestimmten Umständen in der Lage, die feuerungsbedingten Grenzwerte für CO und NO_x einzuhalten, ohne dass Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Reduzierung erforderlich werden.

Die Wirbelschichtfeuerung ist das weltweit am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Klärschlammverbrennung. Allein in Deutschland sind 22 Wirbelschichtöfen mit einer Verbrennungsleistung von etwa 1 – 12 Mg/h im Einsatz. Mehrere Anlagen sind seit mehreren Jahrzehnten zuverlässig in Betrieb. Auf der Grundlage der umfangreichen Betriebserfahrung könnte die erforderliche Verbrennungskapazität für die Behandlung von 30.000 Mg TS/a durch eine Betriebslinie gewährleistet werden.

Das System Wirbelschichtfeuerung wird von verschiedenen Firmen in Europa aber auch weltweit angeboten; dazu die folgenden Nennungen:

Anbieter	Referenz
■ Andritz (vorm. A+E), AU	VERA Hamburg
■ Envirotherm (Lurgi/Bamag), DE	Stuttgart, London (Thames Water)
■ Outotec GmbH, DE	Zürich
■ Raschka Engineering, CH	Innovatherm Lünen, München.

Die vorgenannten Referenzen sind ausgewählte Beispiele; die genannten Anbieter verfügen über weitere Referenzen. Diese können aber auch das komplette Feuerungssystem mit vorge-schalteter Trocknung, Abhitzeessel und Abgasreinigung anbieten.

Auch die Firmen Degremont und Veolia sind aktiv als Kontraktoren für Wirbelschichtfeuerung. Diese Firmen verfügen über das Engineering, sind aber bevorzugt als Betreiber engagiert. Im internationalen Wettbewerb gibt es weitere Anbieter.

Die ebenfalls im Markt angebotene Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung ist erst ab Feuerungs-wärmeleistungen von mehr als 50 MW wirtschaftlich und deshalb für diese Studie nicht relevant.

5.4.3 Etagenöfen/Etagenwirbler

Etagenöfen

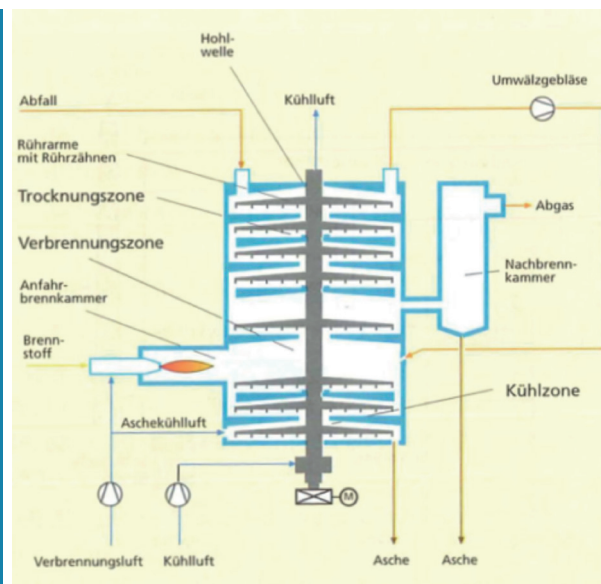
Der Etagenofen ist ein zylindrischer Apparat, dessen Stahlmantel isoliert und innen mit feuerfestem Material ausgekleidet ist. Der Zylinder ist mit mehreren (oftmals 8) Etagen ausgerüstet, ebenfalls ausgekleidet mit feuerfestem Material. In der Achse des Zylinders rotiert eine Hohlwel-

le, an der in jeder Etage Rührarme/Krälarms befestigt sind. Der Brennstoff/Klärschlamm wird mit Hilfe der Rührarme von außen nach innen geführt, fällt dann auf die darunter angeordnete Etage und wird von den entsprechenden Rührarmen wieder nach außen geführt. In dieser Form wandert der Klärschlamm mäanderförmig von oben nach unten. Die oberen 3 Etagen dienen der Trocknung; die 3 nächsten Etagen der Verbrennung. Die Asche wird in den beiden unteren Etagen durch die im Gegenstrom von unten zugeführte Verbrennungsluft gekühlt und abgeleitet.

Die Verbrennungsluft wird von unten nach oben im Gegenstrom geführt. Eine Teilmenge der Verbrennungsluft wird zur Kühlung durch die Hohlwelle geführt. Das Abgas wird in Höhe der heißen Verbrennungszone abgeleitet und in einer Nachbrennkammer unter Zugabe von geeigneten Brennstoffen entsprechend den Mindestverbrennungsbedingungen (Temperatur und Verweilzeit) vollständig inertisiert. Die aus der obersten Etage abgezogenen Brüden tragen Staub und Geruchsstoffe mit sich und müssen deshalb zur Nachverbrennung in den Brennraum zurückgeführt werden.

Die früher in Klärschlammverbrennungsanlagen installierten Etagenöfen wurden mittlerweile weitgehend durch Wirbelschichtfeuerungen ersetzt. Vorteilhaft ist der Einsatz in der Kombination mit anderen Abfallbrennstoffen; z. B. geschieht dies bei Currenta (vormals Bayer AG).

Abbildung 17: Etagenofen [15]



Etagenwirbler

Der sogenannte Etagenwirbler ist eine Kombination aus Etagenofen und Wirbelschichtfeuerung. In der nachfolgenden Abbildung 18 ist zu erkennen, dass der obere Teil als Etagenofen ausgebildet ist und der untere Teil als Wirbelschichtfeuerung.

- 1 Schlammzugabe
- 2 Zusatzbrennstoff
- 3 Verbrennungsluft
- 4 Abgas
- 5 Kühlluft
- 6 Vortrocknungszone
- 7 Ausbrandzone
- 8 Wirbelschicht
- 9 Nachbrennkammer
- 10 Anfahrbrunnkammer
- 11 Umwälzgebläse
- 12 Schauglas
- 13 Luftvorwärmer

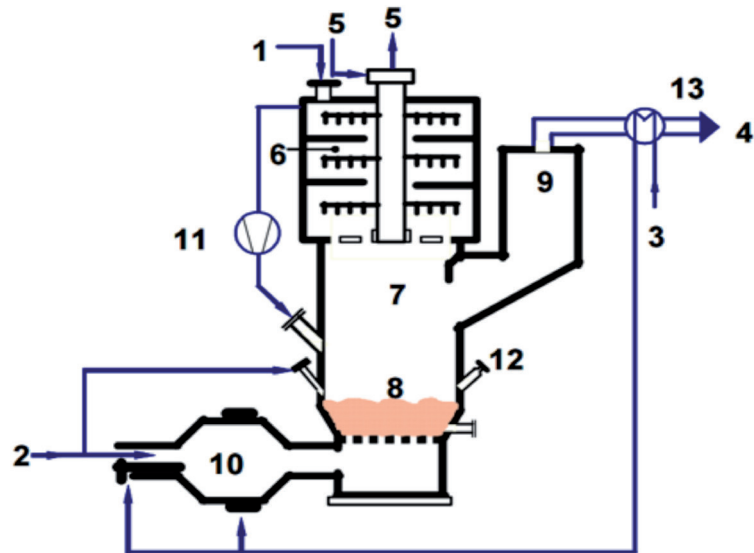


Abbildung 18: Etagenwirlers [16]

Dieses System kombiniert den Effekt der Trocknung in den oberen Etagen, d. h. Bildung von Brüden, die als Gemisch mit den heißen Verbrennungsabgas in einer nachfolgenden Brennkammer einer Nachverbrennung unterzogen werden müssen mit dem Effekt der Aufstreuung von getrockneten Klärschlamm auf die Wirbelschicht mit der Folge, dass die Vergasung des getrockneten Brennstoffs und die nachfolgende Verbrennung teilweise oberhalb der Wirbelschicht erfolgt. Dies hat zur Folge, dass die Wärmeentbindung nur zu einem geringen Teil in der Wirbelschicht erfolgt. In dieser Kombination werden die jeweiligen Vorteile der Systeme Etagenofen und Wirbelschichtfeuerung nicht genutzt. Dies bedingt u. a. einen erhöhten Verbrennungsluftbedarf. Das aus dem Feuerraum abgeleitete Heißgas durchströmt eine Nachbrennkammer, um eine Verweilzeit von mehr als 2 sec bei min. 850 °C zu gewährleisten. Diese Nachbrennkammer ist mit einem Brenner ausgerüstet.

Dieses System wurde zuerst Anfang der 80iger Jahre in der SEVA Frankfurt realisiert, fand jedoch nur sehr begrenzt Anwendung (zum Beispiel in der Schweiz ProReno und ARA Rhein). Weder für den Etagenofen noch für den Etagenwirlers sind in den letzten Jahren Anlagen errichtet worden. Ältere Installationen des Etagenofens wurden zwischenzeitlich oftmals durch eine Wirbelschichtfeuerung ersetzt.

Da es keine kürzlichen Neuinstallationen gegeben hat, sind auch keine aktuellen Hersteller bekannt.

Entsprechend der Darstellung von Technik und Anwendung wird das Verbrennungssystem Etagenofen/Etagenwirlers für die weitere Bearbeitung nicht berücksichtigt. Die Gründe hierfür sind:

- Keine aktuellen Anbieter verfügbar
- Keine aktuellen Referenzen
- Einhaltung der Mindestverbrennungsbedingungen nach 17. BImSchV [1] nur durch separate Nachbrennkammer möglich, dadurch geringere Wirtschaftlichkeit

5.4.4 Rostfeuerung

Die Rostfeuerung wird angewendet für unterschiedliche feste Brennstoffe wie Kohle, Holz, Biomasse und Abfall.

Das Rostsystem besteht aus einem Trägersystem mit Rostelementen. Die beweglichen Rostelemente transportieren den überwiegend grobkörnigen Brennstoff durch den Feuerraum. Dabei werden die Phasen Trocknung, Vergasung und Ausbrand der Gase durchlaufen. Am Ende des Rostes wird die inerte Asche ausgeschleust.

Die Verbrennungsluft wird mittels eines Luftverteilungssystems durch die Spalte der Rostelemente hindurch in den Feuerraum eingeblasen bei gleichzeitiger Kühlung der Rostelemente. Aufgrund unregelmäßigen Verteilung des Brennstoffs auf dem Rost muss die Rostfeuerung mit erhöhtem Luftüberschuss ($n > 1,7$) betrieben werden.

Das System der Rostfeuerung hat eine spezielle technische Entwicklung erfahren für die Anwendung in der Abfallverbrennung. In einzelnen Rostfeuerungen wurde auch die Mitverbrennung von Klärschlamm erfolgreich praktiziert. Dabei wurde der entwässerte Klärschlamm in unterschiedlicher Weise in die Feuerung eingebracht. Sowohl die Einstreuung und Vermischung mit dem Abfall im Bunker als auch die Aufstreuung in den Feuerraum mit einem Wurfbeschicker werden angewendet und ermöglichen die Mitverbrennung.

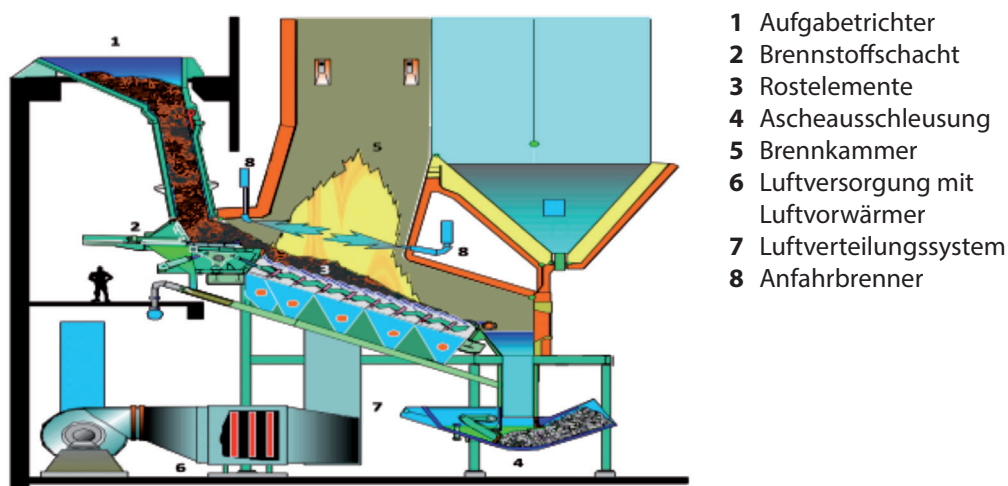


Abbildung 19: Rostfeuerung für kommunale Abfälle [17]

Bei dem Verfahren „sludge 2 energy“, entwickelt unter anderem von der Fa. Huber, wird die Rostfeuerung eingesetzt. Eine erste Anlage, ausgelegt für einen KS-Anfall von 3.000 Mg TS/a wird seit 2012 in Straubing betrieben. Die Fa. Huber bietet das Verfahren inzwischen mit einer Wirbelschichtfeuerung an.

Die Fa. Emter GmbH betreibt in Altenstadt ebenfalls eine Rostfeuerung für die Verbrennung von Klärschlamm aus verschiedenen Kläranlagen (5% TS bis zu 90 % TS) sowie Gärreste aus einer Biogasanlage; die Kapazität wurde durch die Erweiterung der Trocknung auf 55.000 Mg TS/a erhöht.

Auf dem Gebiet der Rostfeuerung für feste Brennstoffe und feste Abfälle sind einschlägig erfahrene Hersteller bekannt.

Speziell für den Einsatz für die Klärschlammverbrennung hat die Fa. Huber eine Pilot-Anlage errichtet; aktuell empfiehlt auch die Fa. Huber den Einsatz der Wirbelschichtfeuerung. Die Erfahrung mit dem Einsatz von Klärschlamm beschränkt sich auf die Pilotanlage. Abschließend kann festgestellt werden, dass mit der Rostfeuerung speziell für die Monoverbrennung von Klärschlamm nur unzureichende Betriebserfahrungen gesammelt worden sind. Die Technologie der Rostfeuerung wird daher für die weitere Untersuchung nicht berücksichtigt. Die Gründe hierfür sind:

- Für die geplante Größenordnung der zentralen Klärschlammverwertung in MV als Monoverbrennungstechnologie nicht hinreichend erprobt
- Bisher vornehmlich als Technologie der Mitverbrennung und der Verbrennung von festen Abfällen / Biomassen im Einsatz

5.4.5 Drehrohrfeuerung

Die Drehrohrfeuerung besteht aus einem sehr langsam rotierenden Rohr mit Isolierung und feuerfester Auskleidung. Die Drehrohrfeuerung wird eingesetzt für die Verbrennung inhomogener Abfallstoffe; dazu gehören großteilige Abfälle und auch Schlämme. Der bevorzugte Einsatz liegt in der Verbrennung von Abfällen aus der chemischen Industrie und Sonderabfällen; so können auch geschlossene Gebinde mit „gefährlichen“ Abfällen (leicht flüchtige Lösungsmittel etc.) aufgegeben werden. Drehrohrfeuerungen sind mit mehreren Zusatzbrennern ausgerüstet, um die Verbrennung bei entsprechend hohen Temperaturen kontrollieren zu können.

Die Verbrennungsluft wird über das Brennstoffbett geführt und durch die Rotation des Drehrohres wird die Durchmischung mit dem Brennstoff verbessert, dennoch bleibt die Durchmischung von Brennstoff und Luft schlecht. Deswegen ist ein hoher Luftüberschuß ($n > 2$) erforderlich, mit entsprechenden Nachteilen durch geringe Wirtschaftlichkeit und erhöhte Emissionen.

Das System Drehrohrfeuerung wurde auch für verschiedene andere Anwendungen in der thermischen Abfallbehandlung eingesetzt (Pyrolyse). Es wurde auch eine Kleinanlage zu Versuchszwecken für die Klärschlammverbrennung aufgestellt und betrieben.

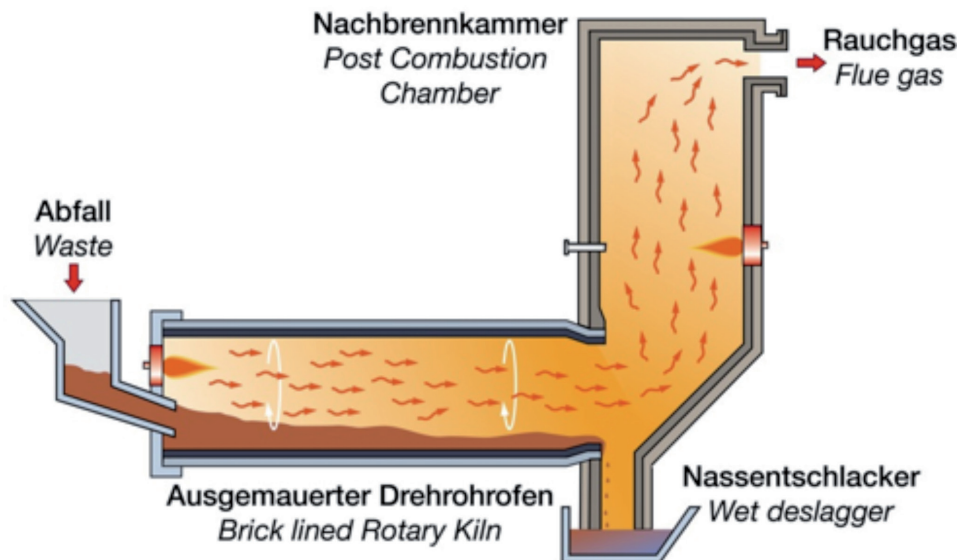


Abbildung 20: Drehrohrfeuerung [18]

Für den Einsatz zur Klärschlammverbrennung im Betriebsmaßstab liegen keine Erfahrungen vor; auch Hersteller für diese spezielle Anwendung sind nicht bekannt.

Das System Drehrohrfeuerung wird daher für die weitere Untersuchung nicht berücksichtigt. Die Gründe hierfür sind:

- Keine Erprobung in der Klärschlammmonoverbrennung im Betriebsmaßstab
- System technologisch für Klärschlamm wenig geeignet (geringe Brennstoffmischung, unzureichender Brennstoff-Luft-Kontakt)
- Nicht wirtschaftlich wegen der durch den hohen Luftüberschuss großen Abgasverluste

5.4.6 Zykloidfeuerung

Das aus der Kraftwerkstechnik bekannte Konzept der Zykloidfeuerung wurde angepasst für die thermische Klärschlammbehandlung. Es wurde eine Prototypanlage kleiner Leistung installiert. Der Klärschlamm wird als vollgetrocknetes Produkt in eine als Zyklon ausgebildete Brennkammer eingeblasen. Das Konzept wurde nicht weiter entwickelt und es wurden keine weiteren Anlagen installiert.

Die Erfahrung mit dem Einsatz von Klärschlamm beschränkt sich nur auf eine erste Anwendung mit einer Anlage kleiner Leistung.

Die Anwendung der Zykloidfeuerung für eine zentrale Klärschlammverbrennung großer Leistung wird nicht empfohlen, da es sich nicht um eine für die geplante Anwendung erprobte

Technologie handelt. Außerdem ist zwingend vollgetrockneter Brennstoff erforderlich, was die Vorschaltung einer Volltrocknung für all die Schlämme notwendig machen würde, die entwässert oder teilgetrocknet angeliefert werden.

5.5 Systeme der Vergasung

Die Vergasung ist ein chemisch-physikalischer Vorgang, in dem organische Produkte unter Hitze und in einer speziellen, sauerstoffarmen Atmosphäre in ein gasförmiges und brennbares Produkt umgewandelt werden.

5.5.1 Vergasung als Teiloxydation ($1 > n > 0$)

Auf der Suche nach alternativen Lösungen für die thermische Abfallverwertung, die keine Verbrennungsverfahren beinhalten, wurden zahlreiche Konzepte verfolgt mit dem Ziel, durch die Vergasung der Abfallstoffe bzw. Klärschlämme eine sowohl umwelttechnisch (reduzierte Emissionen) als auch energetisch effektivere Abfallwirtschaft zu erreichen. Diverse Verfahren wurden von führenden Anlagenbauern entwickelt.

Dabei ist es gelungen, einzelne Systeme zur Vergasung im großtechnischen Maßstab zu realisieren. Diese waren dann relativ erfolgreich, wenn sie als Vorschaltanlage in Verbindung mit nachgeschalteten Großfeuerungsanlagen betrieben wurden und die Verwertung des Gases in einem nachgeschaltet effizienterem System erfolgen konnte. Die gilt für die Vergasung im Drehrohr z. B. Contherm in Verbindung mit einem Kraftwerk sowie die Wirbelschichtvergasung für eine Leichtfraktion in Verbindung mit der Zementproduktion.

Spezielle Entwicklungen für den Einsatz von Klärschlamm werden nachfolgend dargestellt.

5.5.2 Vergasung nach Sülzle-Kopf

Seit 2004 ist im Klärwerk Balingen (BW) eine Anlage zur Vergasung von Klärschlamm in Betrieb, deren Kapazität mit 1.250 Mg TS/a angegeben wird. Diese Anlage wurde 2010 auf eine Jahreskapazität von ca. 2.400 Mg TS/a erweitert.

Eine weitere Entgasungsanlage wurde im Klärwerk Mannheim installiert. Mit 3 parallelen Linien (1 Linie stand-by) soll eine Jahreskapazität von 10.000 Mg TS/a erreicht werden.

Der vollgetrocknete Klärschlamm wird als Granulat einem Dosier- und Vorlagebehälter zugeführt. Danach dient er als erste Reinigungsstufe für das Vergasungsgas (Abscheidung von Staub und Kondensaten). Dabei wird der Klärschlamm vorgewärmt und nachfolgend dem Vergaser zugeführt. Der Wirbelschicht-Vergaser wird mit vorgewärmter Luft beaufschlagt. Diese Luft dient gleichermaßen der Verwirbelung und ist Treibmittel für die Vergasung ($n \ll 1$). Der Vergasungsprozess wird bei Temperaturen von minimal 850 °C betrieben und es erfolgt eine vollständige Mineralisierung der Asche. Somit ist nachfolgend eine Nutzung zur Rückgewinnung von Phosphor möglich.

5.6 System der Pyrolyse

5.6.1 Pyrolyse ($n = 0$)

Unter Pyrolyse versteht man die thermochemische Spaltung organischer Verbindungen; dabei wird bei hohen Temperaturen von 200 °C – 900 °C ein Bindungsbruch innerhalb großer Moleküle in kleinere erzwungen. Je nach Prozesstemperaturen können dann deutlich mehr kondensierbare Öle bzw. nicht kondensierbares Permanentgas erzeugt werden. Dies erfolgt ausschließlich durch Einwirkung hoher Temperaturen ohne Zuführung von Sauerstoff (Luft), d. h. $n = 0$. Dennoch kann es zu Oxydationsreaktionen kommen da Bio-Brennstoffe (Holz, Abfälle, Klärschlamm) in der Regel auch Sauerstoff enthalten.

Die Anwendung der Pyrolyse wurde insbesondere bei der thermischen Verwertung von Abfällen in unterschiedlichen technischen Konzepten untersucht und erprobt mit der Erwartung, dass aus dem sehr heterogenen stofflichen Abfall-Gemisch ein brennbares Gas gewonnen werden könnte mit nachfolgender effektiver Nutzung des Energie-Gehaltes des Abfalls. Auch für die Verwertung von Klärschlamm wurden unterschiedliche Konzepte untersucht wie z. B. die Klärschlamm-Pyrolyse zur Ölproduktion.

Die erzeugten Synthesegase bedürfen grundsätzlich einer weiteren Aufbereitung, bevor sie genutzt werden können.

Außerdem erfüllt eine Pyrolyseanlage nur dann die Anforderung an die Phosphorrückgewinnung entsprechend der Novelle der AbfKlärV (Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit der „Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“ des BMUB), wenn nach der Verbrennung der kohlenstoffreichen Pyrolyserückstände die Asche einem Phosphorrückgewinnungsverfahren unterworfen wird [4].

5.6.2 Pyrobustor

In der ARA Tobl (Südtirol) wurde eine Anlage nach dem System Pyrobustor für eine Kapazität von 3.500 Mg TS/a installiert.

Getrockneter Klärschlamm wird verfahrenstechnisch in einer Kombination aus Pyrolyse und Nachverbrennung mineralisiert. Verfahrenstechnischer Kern ist der Pyrobustor (Abbildung 22); er besteht aus zwei in Reihe geschalteten Drehrohren. In der 1. Stufe erfolgt bei Sauerstoffmangel die Pyrolyse. In der zweiten Stufe erfolgt durch Luftzufuhr die Verbrennung des pyrolysierten Klärschlammes (Mineralisierung) bei Temperaturen von ca. 650 °C.

Beide Gasströme, das Pyrolysegas und das Verbrennungsabgas, werden in der Nachbrennkammer bei Temperaturen von min. 850 °C zusammengeführt. Die Abwärme wird genutzt zur Trocknung des Klärschlammes.

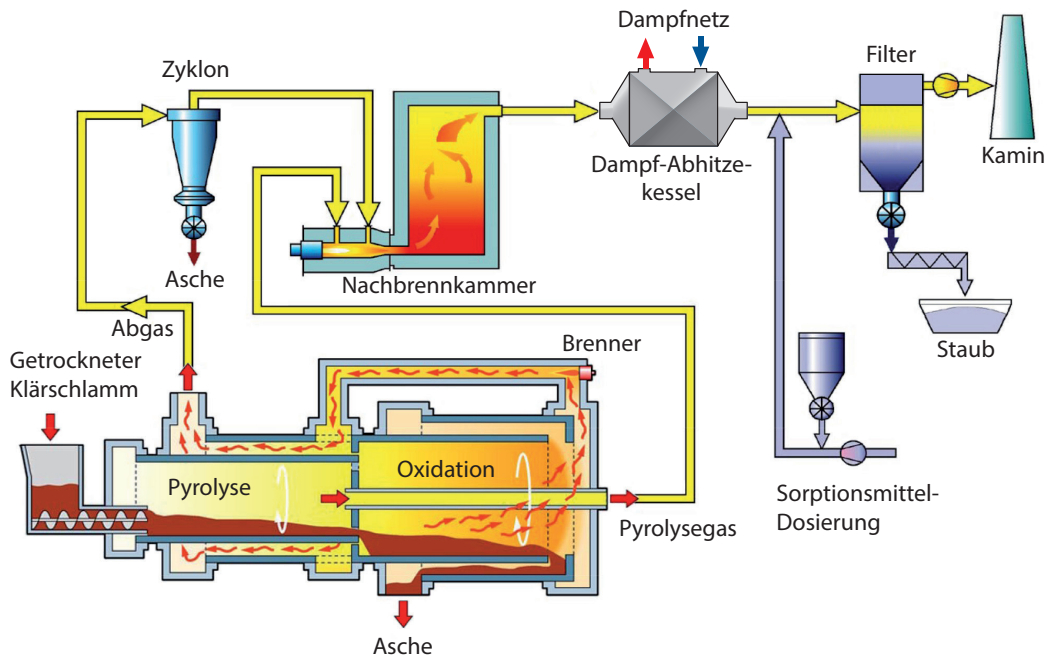


Abbildung 22: Pyrobustor [18]

Eine weitere Anlage nach dem Pyrobustor-Verfahren wurde in Dinkelsbühl (Crailsheimer Modell) installiert und 2008 in Betrieb genommen. Die Anlage war für eine Kapazität von 5.000 Mg TS/a ausgelegt. Die Anlage wurde 2011 stillgelegt; der Grund für die Stilllegung konnte nicht genau ermittelt werden.

Pyrolyse- und Vergasungsverfahren erfahren derzeit eine Renaissance und werden für unterschiedliche Anwendungsbereiche weiter entwickelt. Wie im Fall des Pyrobustor-Verfahrens (4.000 – 7.000 Mg TS/a) zielt die Entwicklung auf kleine Leistungen und somit auf den dezentralen Einsatz in kleineren Klärwerken. Auf Grund der Anlagengrößen, für die sich die Pyrobustor-Technologie in der Entwicklung befindet, wird sie für die weitere Untersuchung nicht berücksichtigt.

5.6.3 Pyrolyseverfahren Pyreg

Das Pyrolyseverfahren Pyreg (Abbildung 23) wurde für den dezentralen Einsatz entwickelt. Eine erste Pilotanlage wird seit 2008 in einem Container im Klärwerk Ingelheim betrieben. Der Pyreg-Reaktor wird mit getrocknetem Klärschlamm beaufschlagt; der Reaktor arbeitet unter weitgehendem Luftabschluss bei Temperaturen von max. 800 °C. Das Pyrolysegas wird in der nachgeschalteten Brennkammer verbrannt und das heiße Abgas wird für die indirekte Beheizung des Reaktors genutzt.

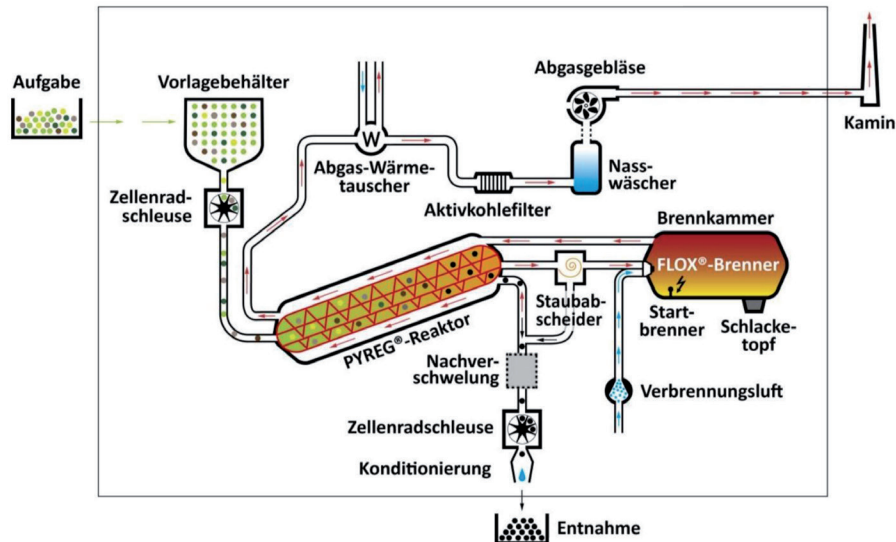


Abbildung 23: Prinzipschema Pyreg-Verfahren [20]



Abbildung 24: Pilotanlage Pyreg-Verfahren Klärwerk Ingelheim [20]

Die Referenzen von Pyrolyseanlagen zur thermischen Behandlung von Klärschlamm beschränken sich derzeit auf wenige Anlagen mit eher geringer Durchsatzleistung. So wird derzeit eine erste Betriebsanlage auf der Kläranlage Linz-Unkel nach dem PYREG-Verfahren errichtet.

Diese vorgenannten Beispiele zeigen, dass für die Pyrolyse-Verfahren derzeit keine Betriebserfahrungen mit Anlagen geeigneter Kapazität vorliegen. Daher betrachten wir die Technologie der Pyrolyse für die Anwendung in einer zentralen Anlage für MV als nicht bewährt und berücksichtigen sie deshalb nicht weiter.

5.7 Zusammenfassende Bewertung

Tabelle 4: Vergleichende Technologiebewertung

Technologie	Anzahl	Kapazität Mg TS/h	Kommentar	Bewertung
Verbrennung				
Wirbelschicht	22	1 - 12	Stand der Technik	bewährt, betriebs-sicher, marktgängig
Etagenofen	1	(4,8)		für kommunalen KS nicht bewährt
Etagenwirbler	4	2	Unikat, in Deutschland nur in Frankfurt noch in Betrieb	veraltet
Rostfeuerung	1	7,5	wird im Hausmüllbereich eingesetzt	für KS-Monoverbrennung nicht bewährt
Drehrohrfeuerung	0		wird im Sonderabfallbereich eingesetzt	für KS-Monoverbrennung nicht bewährt
Zykloidfeuerung	1			für KS-Monoverbrennung nicht bewährt
Vergasung				
Kopf-Sülzle	1 + 4	0,8	Anlage Mannheim noch nicht abgenommen	im Entwicklungsstadium
Sonstige			nicht vorhanden	
Pyrolyse				
Pyrobustor	1	0,5	für Kleinanlagen entwickelt	nicht ausreichend erprobt
Pyreg	2	k.A.	für Kleinanlagen entwickelt	für geplante Größe nicht passend

Als Fazit aus den bisherigen Betrachtungen und der vorstehenden Tabelle 4 lässt sich festhalten, dass die Technologie der stationären Wirbelschichtverbrennung die am besten geeignete und bewährte Lösung für eine zentrale thermische Klärschlamm-Verwertung darstellt. Der besonderen Situation in MV mit der Anlieferung von sehr unterschiedlichen Schlämmen aus vielen weitverstreuten Standorten kann durch diese Technologie in Verbindung mit geeigneten Trocknungsverfahren Rechnung getragen werden. Näheres zum Anlagenkonzept in Abschnitt 6.

6

ANLAGENKONZEPT THERMISCHE KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG

Grundfließbild Zeichnung Nr. MFB010-0-001

Das nachfolgende beschriebene Anlagenkonzept geht von einer einlinigen Verfahrenstechnik aus. Für die Verfahrenstechnik von Verbrennung, Abhitzenutzung und Abgasreinigung sowie für die zugehörigen Nebenanlagen empfehlen wir einen Aufbau in einer Verfahrenslinie. Diese Empfehlung hat folgende Gründe:

- Die erforderliche Anlagenkapazität ist nicht so groß, dass ein Verbrennungsaggregat nicht ausreichend wäre. Es gibt also keine technische Notwendigkeit für zwei oder mehr Linien.
- Der Aufbau in einer Linie ist bei weitem am wirtschaftlichsten, da hier bei gleicher Kapazität deutlich geringere Investitionskosten als bei zwei Linien zu erwarten wären.
- Der Vorteil von zwei Linien wäre, dass bei einem Ausfall einer Linie nicht sofort die Gesamtbehandlungskapazität verloren wäre. Das Gewicht dieses Vorteils lässt sich durch nachfolgende Überlegungen relativieren: Für ungeplante, kurze Unterbrechungen des Betriebs verfügt die Anlage über eigene Pufferkapazitäten in den Stapelsilos (siehe Abschnitt 6.1.2), so dass eine Unterbrechung der Schlammverbrennung nicht unmittelbar zu einer Unterbrechung der Schlammanlieferung führen muss. Für längere ungeplante Stillstände Redundanzen zu errichten wäre sehr teuer, da dann beträchtliche Investitionen nur für Notfall „ungenutzt“ bereitstehen würden. Für alle geplanten Betriebsunterbrechungen, wie zum Beispiel die jährliche Revision, kann im Schlammmanagement der Anlieferer Vorsorge getroffen werden. Einem zukünftigen Betreiber wäre der Abschluss eines Notfall-Anlieferungsvertrages mit einer Anlage in sinnvoller Entfernung zu empfehlen, die geeignet wäre, ersatzweise Schlamm anzunehmen.

6.1 Klärschlammannahme und -stapelung

6.1.1 Allgemeines

Aufgrund ihrer Funktion als zentrale thermische Verwertungsanlage für Klärschlamm in MV wird die zu betrachtende Anlage aus einer Vielzahl von Kläranlagen beliefert. Die angelieferten Schlämme variieren in Qualität und Menge. Insbesondere bei den Schlämmen aus den weiter entfernten Klärwerken ist eine Anlieferung von teil- oder vollgetrocknetem Schlamm in Betracht zu ziehen, da dies zu einer Verringerung des Transportaufwandes und der Transportemissionen führt.

Die Einrichtungen für die Annahme und Stapelung der Klärschlämme müssen in der Lage sein, sowohl den mechanisch entwässerten (pumpfähigen) als auch den getrockneten (körnig und staubend) Klärschlamm anzunehmen. Entsprechend der unterschiedlichen Eigenschaften sind zwei getrennte Systeme zu installieren.

Da die Mengenanteile an mechanisch entwässertem einerseits und getrocknetem Schlamm andererseits zurzeit noch nicht bekannt sind, kann nur mit einer ersten Abschätzung gearbeitet werden:

- entwässerter Klärschlamm mit ca. 2/3 Mengenanteil bezogen auf die Trockensubstanz, d. h. 20.000 Mg TS/a; bei einem TS-Gehalt von ca. 25 % resultiert die Menge zu rd. 80.000 Mg/a;
- getrockneter Klärschlamm mit ca. 1/3 Mengenanteil bezogen auf die Trockensubstanz; d. h. 10.000 Mg TS/a; bei einem TS-Gehalt von ca. 80 % resultiert die Menge zu rd. 12.500 Mg/a.

Diese Aufteilung ist zunächst frei gewählt und muss je nach Einschätzung und weiterer Konkretisierung des Projektes angepasst werden. Veränderungen sind auch während des späteren Betriebes nicht auszuschließen.

6.1.2 Auslegungsdaten

Die Anlieferung erfolgt werktäglich, d. h. an 5 Werktagen (wd) mit Lkw; dabei wird die Zuladung mit 5 Mg/Lkw bis zu 20 Mg/Lkw angenommen. Ausgehend von 52 Wochen im Jahr resultieren folgende Ansätze für die Anlieferung:

entwässerter Klärschlamm mit rd. 300 Mg/wd entsprechend 38 Lkw/wd;

- Annahme für die Entladung von 2 Lkw/h, Silo mit rd. 40 m³;
- Stapelkapazität für ca. 3 Tage, Silo mit rd. 900 m³;
- getrockneter Klärschlamm mit rd. 48 Mg/wd entsprechend 7 Lkw/wd;
- Annahme für die Entladung von 1 Lkw/h, Silo mit rd. 40 m³;
- Stapelkapazität für 3 Tage, Silo mit rd. 150 m³.

Die Stapeldauer wurde mit 3 Tagen zunächst aus wirtschaftlichen Erwägungen bewusst kurz angesetzt. In der weiteren Planung muss diese Festlegung überprüft werden.

6.1.3 Ausrüstung der Klärschlammannahme und –stapelung

Die Annahme der Klärschlämme erfolgt durch Schwerkraftentladung in die Annahmesilos. Diese Silos sind mit einer Abdeckung ausgerüstet, die nur für die Phase der Entladung geöffnet wird. Am Boden des Silos befindet sich je eine mechanische Austrageeinrichtung die den Klärschlamm in die nachfolgende Förderanlage übergibt.

Für die Förderung des entwässerten Klärschlammes in das Stapelsilo wird eine Pumpe eingesetzt. Bewährt haben sich hier hydraulisch angetriebene Kolbenpumpen. Das Stapelsilo ist ebenfalls

mit einer Austrageinrichtung ausgerüstet mit nachfolgender, regelbarer Förderschnecke, die den Klärschlamm kontrolliert dem Trockner zuführt.

Sowohl die Annahme als auch die Schlammstapelung sind über Absaugleitungen an das Verbrennungsluftsystem angeschlossen. Dadurch wird geruchsbelastete Luft abgesaugt und der Verbrennung zugeführt. Die enthaltenen Geruchsstoffe werden so zerstört.

6.2 Trocknung des Klärschlammes

6.2.1 Allgemeines

Die Trocknung dient der Aufbereitung des Klärschlammes zu einer geeigneten Brennstoffqualität. D. h., es soll ein mittlerer Heizwert erreicht werden, der eine selbstgängige Verbrennung ohne Einsatz von Primärbrennstoff gewährleistet. Nur der mechanisch entwässert angelieferte Klärschlamm muss der Trocknung zugeführt werden. Dabei wird der Trocknungsprozess dahingehend geregelt, dass bei nachfolgender Zumischung des separat angelieferten Trockenschlammes eine geeignete Brennstoffqualität erreicht wird.

Das Anlagenkonzept erlaubt die Annahme und Verarbeitung von ausschließlich entwässertem Klärschlamm. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Trocknung der Gesamtmenge entwässerten Klärschlammes energietechnisch möglich sein muss. Wenn der Energieinhalt des angelieferten, entwässerten Schlammes nicht ausreicht, um nach Abzug unabdingbarer Verluste den Energiebedarf des Trocknungsprozesses (Wasserverdampfung) zu decken, kann der Einsatz von Primärbrennstoff unvermeidlich werden. Entscheidend ist die Qualität des insgesamt angelieferten Klärschlammes bezüglich des Wassergehaltes und seines Gehaltes an brennbarer Substanz (oTS-Gehalt). Die in Abschnitt 2.2 beschriebene Klärschlammzusammensetzung und der TS-Gehalt jeweils als mittlerer Wert wären geeignet für eine insgesamt ausgeglichene Energiebilanz. Der gewählte Ansatz für die Teilmengen dient der beispielhaften Darstellung und muss entsprechend dem Projektfortschritt angepasst werden.

Für die hier erforderliche Teiltrocknung wird entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 5.2 das Konzept der Kontaktrocknung gewählt; hier ist wahlweise sowohl der Scheibentrockner als auch der Dünnschichtrockner einsetzbar. Die Wärmeversorgung erfolgt aus der Nutzung der Abwärme, konkret durch den Gegendruckdampf aus der Turbine (siehe Abschnitt 6.5).

Die bei der Trocknung freigesetzten Brüden (Dampf und Inertgas) werden in der nachgeschalteten Stufe kondensiert. Die Kondensation erfolgt in einem Mischkondensator unter Verwendung von Klärwerksablauf als Kühlmedium. Die kondensierte Wassermenge wird mit dem Kühlwasser in das Klärwerk zurückgeleitet oder separat behandelt. Der verbleibende Inertgasstrom wird der Verbrennung im Wirbelschichtofen zugeführt.

Im Fall der Anbindung an ein Klärwerk ist zu prüfen, ob das Brüdenkondensat dem Klärwerkszulauf zugeführt werden kann (zusätzliche Rückbelastung) oder ob eine separate Vorbehandlung erforderlich wird. Indikator für die Zusatzbelastung ist insbesondere der Ammoniakgehalt.

Im Fall einer klärwerksunabhängigen Aufstellung ist eine entsprechende Kühlleistung anderweitig zu organisieren. Dazu muss ein Hilfskühlkreislauf aufgebaut werden, der aus Umwälzpumpen, den entsprechenden Rohrleitungen und Armaturen sowie einem Rückkühler besteht. Zur Rückkühlung kann entweder Umgebungsluft oder ein Gewässer eingesetzt werden, sofern vorhanden und für die Wärmeaufnahme geeignet. In diesem Fall wird das Brüdenkondensat getrennt vom Kühlwasser abgeführt mit nachfolgender, separater Aufbereitung (Feststoffabtrennung, Reduzierung von NH_3 und CSB).

6.2.2 Auslegungsdaten

Entsprechend der Mengenanteile (Abschnitt 6.1.1) sind folgende Mengenströme zu berücksichtigen:

- Entwässerter Klärschlamm (2/3) 2,66 Mg TS/h
 - Input (25 % TS-Gehalt) 10,6 Mg/h
 - Output (37 % TS-Gehalt) 7,2 Mg/h
 - Wasserverdampfung 3,4 Mg/h
 - Output Brüden incl. Inertgas 3,9 Mg/h
- Getrockneter Klärschlamm (1/3) 1,34 Mg TS/h
 - Input (80 % TS-Gehalt) 1,7 Mg/h
- Mischprodukt 4 Mg TS/h
 - Output (45 % TS-Gehalt) 8,9 Mg /h
- Brüdenkondensation
 - Kühlwasserbedarf 104 m³/h
 - Brüden-Kondensat 3,45 Mg/h
 - Inertgas 0,45 Mg/h
- Dampfversorgung
 - Input Sattedampf (10 bar, 170 °C) 5,6 Mg/h

6.2.3 Ausrüstung der Klärschlamm Trocknung

Die Verfahrensstufe Trocknung ist bestimmend für die sichere Versorgung der Verbrennung mit dem aufbereiteten Brennstoff. Um eine hohe Verfügbarkeit für die Gesamtanlage zu erreichen, wird vorgeschlagen, einen Trockner und zusätzlich einen weiteren in Reserve aufzustellen. Dieser Ansatz sollte in der weiteren Planung überprüft werden anhand der tatsächlich zu erwartenden (zugesicherten) Mengen Trockenschlamm.

Die Ausrüstung umfasst die geregelte Zuführung von entwässertem Klärschlamm aus den Silos, sowie die geregelte Zuführung von Trockenprodukt und je einen Mischer für die Zusammenführung der Teilströme und nachfolgend einen Dosierbehälter als Brennstoffvorlage sowie die zugehörige mechanischen Förderausrüstung.

Die Versorgung mit Dampf sowie die Ableitung des Kondensats sind ebenfalls Bestandteil der Ausrüstung. Das Kondensat wird gesammelt und in den Speisewasserbehälter zurückgeführt. Jedem Trockner wird ein Brüdenkondensator zugeordnet, ausgeführt als Mischkondensator, d. h. die kondensierten Brüden werden mit dem Kühlwasser ausgetragen und zum Klärwerk zu-

rückgeleitet. Der Inertgasstrom (nicht kondensierte geruchsbelastete Brüden) wird zum Wirbelschichtofen abgeleitet und durch Verbrennung desodoriert.

Bei der Brüdenkondensation kann mit einem nachgeschalteten Wärmetauscher auch eine Wärmenutzung realisiert werden. Dabei wird das Brüdenkondensat im Kreislauf geführt; dies ermöglicht eine getrennte Ableitung zum Klärwerk. Als Kühlmedium wird Klärwerksablauf eingesetzt. Dazu gehören Pumpen und Rohrleitungen für die Zuführung von Kühlwasser und die Ableitung zum Klärwerk. Bei dieser Schaltung steht dem höheren apparativen Aufwand die Trennung von Wärmestrom und Rückbelastung gegenüber, was unter Umständen eine Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme erleichtern könnte. Außerdem ist die Rückbelastung hydraulisch geringer, wenn auch die Frachten ähnlich bleiben dürften.

6.3 Wirbelschichtfeuerung und Dampferzeuger

6.3.1 Allgemeines

Die Wirbelschichtfeuerung wird als komplette Verfahrensstufe entsprechend den genehmigungsrechtlichen Anforderungen installiert. Dabei sind die konstruktiven Ausführungen der einschlägigen Hersteller unterschiedlich.

Der Wirbelschichtofen wird aus einem Sandsilo mit feinkörnigem Quarzsand befüllt. Die Luftversorgung erfolgt durch ein Unterwindgebläse und wird der Unterwindkammer zur Verteilung unter dem Düsenboden zugeführt. Während des Anfahrvorganges wird die Luft in einer vorgeschalteten Brennkammer erhitzt. Ein weiterer Brenner im Bereich des Freeboards gewährleistet die Aufheizung der Brennkammer auf die erforderliche Temperatur. Damit ist die Voraussetzung für eine Freigabe der Zuführung des Klärschlammes erfüllt.

Der Klärschlamm wird als teilgetrocknetes Produkt kontinuierlich mittels eines Wurfbeschickers in die Wirbelschicht eingebracht. Die Schlammpartikel werden in der heißen Wirbelschicht getrocknet und vergast bis zum vollständigen Ausbrand. Für die Einstellung und Optimierung der Verbrennung und Kontrolle der Verbrennungstemperatur wird ein Teil der Verbrennungsluft als Sekundärluft im oberen Bereich der Wirbelschicht eingedüst. Die Verbrennungsluft wird in einem Wärmetauscher unter Verwendung der Abwärme des Kondensats aus der Trocknungsstufe vorgewärmt. Einige Hersteller setzen auch einen Luftvorwärmer im Rauchgasstrom ein.

Der obere Bereich des Wirbelschichtofens hat die Funktion der Nachbrennkammer, um den vollständigen Ausbrand in der Gasphase zu gewährleisten. Vor dem Austritt des Abgasstromes erfolgt eine Eindüsung von Harnstoff zur Reduzierung der Stickoxide (NO_x). Bei der Verbrennung von Klärschlamm in der Wirbelschichtfeuerung ist die Bildung von NO_x gering; bei optimierten Verbrennungsbedingungen kann die Eindüsung von Harnstoff entsprechend reduziert werden. Die bei der Verbrennung entstehende Asche wird mit dem Abgasstrom ausgetragen. Das heiße Abgas wird dem Abhitzekeessel zugeführt und mit der Dampfproduktion abgekühlt für die nachfolgende Abgasreinigung.

Der Abhitzeessel wird mit aufbereitetem Speisewasser versorgt. Das Speisewasser wird zunächst im Economiser (die Heizflächen am Ende des Kessels) vorgewärmt und der Kesseltrommel zugeführt. Aus der Kesseltrommel werden die Verdampfer- und Überhitzerheizflächen versorgt. Der erzeugte Heißdampf wird über das Hauptabsperrrventil der Energienutzung (siehe Abschnitt 6.5) zugeführt.

6.3.2 Auslegungsdaten

Entsprechend der geplanten Anlagenkapazität wird die Wirbelschichtfeuerung für die folgenden Daten dimensioniert:

- Durchsatzleistung 8,9 Mg/h
- Wärmeleistung 11,1 MW
- Luftvolumenstrom 18.700 m³/h
- Wärmeleistung Luftvorwärmung 0,3 MW
- Wärmeleistung Anfahrbrönnner 5 MW
- Wärmeleistung Freeboardbrönnner 1 MW
- Dampfproduktion (40 bar / 400 °C) 12.400 kg/h

6.3.3 Ausrüstung Wirbelschichtfeuerung und Dampferzeuger

Der Wirbelschichtofen ist als kompletter Apparat auf einer Bodenplatte aufgestellt. Er umfasst die Stahlkonstruktion mit Ausmauerung und Isolierung sowie der weiteren Ausrüstung und Armaturen für den Betrieb, im Einzelnen:

- 1 Sandsilo;
- 1 Unterwindgebläse mit Kanälen und Schalldämpfer;
- 1 Wärmetauscher zur Luftvorwärmung;
- 1 Anfahrbrönnner für Erdgas bzw. Heizöl EL;
- 1 Freeboardbrönnner für Erdgas bzw. Heizöl EL;
- 1 Wurfbeschicker für die Brennstoffaufgabe;
- 1 System zur Eindüsung von Harnstoff mit Bevorratung und –zuführung;
- 1 Sand- und Ascheabzug;
- 1 Abhitzeessel;
- 1 Austragssystem für Flugasche einschließlich Fördereinrichtungen und Stapelsilo.

6.4 Abgasreinigung

6.4.1 Übersicht zu den Verfahren der Abgasreinigung

Die Abgasreinigung zur Erfüllung der Emissionsbegrenzung und entsprechend dem Stand der Technik ist an den verschiedenen Anlagen zur thermischen Klärschlammverwertung erprobt und bewährt. Die nachfolgende Abbildung 25 gibt eine Übersicht über die verschiedenen verfahrenstechnischen Lösungen.

Berlin	Feuerung und Kessel	Aktivkohle-zugabe	E-Filter	SO ₂ -Wäscher, Kalk	Kamin				
Bitterfeld Wolfen	Feuerung und Kessel	E-Filter	HCl-Wäscher	Adsorbens-zugabe	Gewebe-filter	SO ₂ -Wäscher, NaOH	Kamin		
Dordrecht	Feuerung und Kessel	E-Filter	HCl-Wäscher	SO ₂ -Wäscher, NaOH	HOK-Festbettfilter	Gewebe-filter	Kamin		
Hamburg	Feuerung und Kessel	E-Filter	HCl-Wäscher	SO ₂ -Wäscher, Kalk	Adsorbens-zugabe	Gewebe-filter	Kamin		
Kopenhagen	Feuerung und Kessel	E-Filter	Sprüh-trockner	Zugabe von Ca(OH) ₂ +HOK	Gewebe-filter	SO ₂ -Wäscher NaOH	Kamin		
Mainz (geplant)	Feuerung und Kessel	E-Filter	Zugabe von Ca(OH) ₂ +HOK	Gewebe-filter	Kamin				
Moerdijk	Feuerung und Kessel	E-Filter	SO ₂ -Wäscher, NaOH	Adsorbens-zugabe	Gewebe-filter	Kamin			
Stuttgart Linie 3	Feuerung und Kessel	E-Filter	Sprüh-trockner	HOK-Zugabe	E-Filter	HCl-Wäscher	SO ₂ -Wäscher, NaOH	Kamin	
Wuppertal	Feuerung und Kessel	E-Filter	HCl-Wäscher	SO ₂ -Wäscher, NaOH	Adsorbens-zugabe	Gewebe-filter	Kamin		

Abbildung 25: Verfahrensstufen der Abgasreinigung in bestehenden KVAs [21]

In der Abbildung 25 sind Verfahrenskombinationen für die Abgasreinigung in bestehenden Klärschlammverbrennungsanlagen zusammengestellt, die gleichermaßen die Anforderungen der Emissionsbegrenzung erfüllen. Trotz unterschiedlicher Zuordnung sind die einzelnen Verfahrensstufen in den jeweiligen Anlagen der Klärschlammverbrennung durchaus vergleichbar. Alle installierten Verfahrenskombinationen enthalten zunächst eine Stufe zur Ascheabscheidung durch Elektrofilter und eine Stufe der nassen Absorption zur Abscheidung von SO₂. Bei der in Planung befindlichen Anlage für das Klärwerk Mainz ist eine quasi trockene Absorption vorgesehen, wie sie bei der Verbrennung von festen Abfällen und ähnlichen Brennstoffen eingesetzt und bewährt ist. Bei einer Anwendung in der Klärschlammverbrennung ist jedoch eine wesentlich erhöhte Rohgasbeladung mit Schwefeldioxyd (SO₂) zu beachten. Dies erfordert den Einsatz erhöhter Mengen an Kalkhydrat mit der Folge erhöhter Mengen an Reaktionsprodukten, die als Reststoffe zu entsorgen sind.

1. Stufe Ascheabscheidung: Die Abscheidung der Klärschlammasche erfolgt durch den Einsatz eines Elektrofilters. Auch die bereits im Abhitzeessel ausgetragene Klärschlammasche wird dem Aschestrom zugeführt. Damit ist gewährleistet, dass die Klärschlammasche nicht durch andere, in der weitergehenden Abgasreinigung abgeschiedene Schadstoffe belastet wird und für die Phosphorgewinnung unverfälscht verfügbar bleibt. Das Elektrofilter ist aus unserer Sicht die bevorzugte Wahl als Vorentstauber. Es hat einen niedrigen Druckverlust (Betriebskosten) bei gleichzeitig hohem Abscheidegrad und ist damit für diesen Anwendungsfall sowohl Fliehkraftabscheidern (Zyklon) als auch Gewebefiltern überlegen.

2. Stufe Abscheidung von Schwefeloxiden (SO_2/SO_3): Die Abscheidung von Schwefeloxiden erfolgt vorteilhaft durch den Einsatz einer nassen Absorption (Nasswäsche). Dabei ist die Abkühlung des Abgases auf Sättigungstemperatur erforderlich. Um den SO_2 -Wäscher vorteilhaft einzusetzen, wird eine Verfahrensstufe zur Abgassättigung (Abkühlung des Abgases) vorgeschaltet. Diese Sättigungsstufe führt gleichermaßen zur Adsorption von Chlorwasserstoff (HCl); der Gehalt an HCl im Abgas nach der Klärschlammverbrennung ist jedoch sehr gering, verglichen zum Beispiel mit Hausmüllverbrennungsanlagen.

3. Abscheidung von Quecksilber (Hg): die Abscheidung von Quecksilber erfolgt nur mit Einsatz spezieller Adsorbentien. Dabei hat sich der Einsatz von Aktivkoks als effektives Adsorbent bewährt. In der Praxis wird ein Gemisch aus Kalkhydrat und sog. Herdofenkoks (HOK) kontinuierlich in den Abgasstrom dispergiert. Damit werden sowohl das im Abgasstrom enthaltene Quecksilber als auch andere Schadstoffe adsorbiert. Im nachgeschalteten Gewebefilter werden die Feststoffe abgeschieden; diese Verfahrensstufe wird häufig als letzte Stufe im Gesamt-Verfahren der Abgasreinigung eingesetzt; man bezeichnet es auch als „Polzeifilter“. Das Kalkhydrat dient nach den Wäschern weniger als Adsorbent für saure Schadgase (SO_2 und HCl), sondern als Inertisierung für Aktivkohle oder HOK. Dadurch wird die Brand- und Staubexplosionsgefahr verringert.

Im Rahmen dieser Studie wird der Einsatz einer bewährten Abgasreinigung vorgesehen mit den Verfahrensstufen:

- Abscheidung der Asche im Elektrofilter;
- Abgaskühlung im Abgaswärmetauscher gegen gereinigtes Abgas (Wärmeverschiebung);
- Abgaskühlung als Sättigungsstufe mit HCl-Adsorption;
- Abgaswäscher zur SO_2 -Adsorption mit Einsatz von Kalkhydrat;
- Wiederaufheizung nach Wäscher im vorgenannten Abgaswärmetauscher;
- HOK-Eindüsung mit nachgeschaltetem Gewebefilter;
- Ableitung des Abgases.

Eine Optimierung der Verfahrenskette sollte im Rahmen der weitergehenden Planung durchgeführt werden unter Berücksichtigung der Informationen über die angelieferten Klärschlämme mit entsprechenden Analysen sowie die Randbedingungen und Kosten für die Entsorgung/Verwertung der Reaktionsprodukte.

6.4.2 Auslegungsdaten

Die Abgasreinigung muss in der Lage sein, die in der 17. BImSchV [1] festgelegten Emissionsgrenzwerte sicher einzuhalten, siehe Tabelle 5:

Tabelle 5: Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV, §8 (1), (2) sowie §10

Parameter	Einheit	17. BImSchV	
		HMW	TMW
Staub	mg/m ³	20	10
SO ₂	mg/m ³	200	50
NO _x als NO ₂	mg/m ³	400	150
TOC	mg/m ³	20	10
CO	mg/m ³	100	50
HCl	mg/m ³	60	10
HF	mg/m ³	4	1
NH ₃	mg/m ³	15	10
Hg	mg/m ³	0,03	
Cd, Tl	mg/m ³	0,05	
Sb ... Sn	mg/m ³	0,5	
PCDD/F	ngTEQ/m ³	0,1	

Auf der Grundlage der Annahmen zur Klärschlammzusammensetzung und der Verbrennung im Wirbelschichtofen werden folgende Auslegungsdaten ermittelt:

■ Abgasvolumenstrom	28.000 m ³ /h
■ Abgastemperatur	Kesselaustritt 210 °C
■ Wasserverdampfung	0,8 m ³ /h
■ Einsatz Kalkhydrat	69 kg/h
■ Einsatz Adsorbens HOK	5 kg/h
■ Abgasvolumenstrom	29.600 m ³ /h
■ Temperatur Kamineintritt	110 °C
■ Aschemengenstrom	1.700 kg/h
■ Gips	174 kg/h
■ Reaktionsprodukt mit HOK	60 kg/h

6.4.3 Anlagenausrüstung

Die Anlage zur Abgasreinigung umfasst folgende Komponenten:

- 1 Elektrofilter mit 2 elektrostatischen Feldern;
- 2 mechanische Ascheförderer zur Ableitung der Asche aus dem Abhitzeessel und aus dem Elektrofilter;
- 1 pneumatische Förderanlage für den Aschetransport in das Stapelsilo;
- 1 Aschesilo mit Stapelvolumen rd. 400 m³ ausreichend für 7 Tage;
- 1 Wärmetauscher Rohgas gegen Reingas;
- 1 Sättiger zur Abkühlung des Abgases auf Sättigungstemperatur;
- 1 Wäscher zur SO₂-Abscheidung, ausgebildet für den Waschwasserkreislauf mit Ca(OH)₂ einschließlich der Pumpen und Rohrleitungen für den Waschwasserkreislauf, Ableitung und Aufbereitung der Waschsuspension;
- 1 Kalkmilch-Ansetzstation zur Versorgung des Wäschers;
- 1 Silo für Kalkhydrat, Volumen 60 m³ für die Aufnahme der Lieferung per Silo-Lkw;
- 1 Silo für die Stapelung von Gips einschließlich der Förderanlage;
- 1 Gewebefilter zur Abscheidung des eingeblasenen HOK-Adsorbens;
- Silo für Adsorbens, Volumen 35 m³;
- 1 Saugzuggebläse einschließlich aller verbindenden Abgaskanäle und Kompensatoren vom E-Filter bis zum Kamineintritt;
- 1 Kamin zur Abgasableitung
- 1 Emissionsmessstation einschließlich den Messgeräten und Auswerterechner;
- 1 Druckluftanlage zur Erzeugung der notwendigen Arbeits- und Instrumentenluft (auch für die weiteren Anlagenbereiche wie Feuerung oder Wasser-Dampf-Kreislauf).

6.5 Energienutzung

6.5.1 Konzeption der Energienutzung

Die Energienutzung umfasst das gesamte System zur Verwertung der Dampfproduktion bis zur Bereitstellung von Speisewasser für den Abhitzeessel.

Der Frischdampf wird insgesamt der Turbine zugeführt mit dem Ziel einer effizienten Stromerzeugung. Die Turbine wird ausgelegt für den Entnahme-Kondensations-Betrieb, so dass eine Teilmenge des Dampfes für die Klärschlamm-trocknung verwendet werden kann. Die Bedingungen für die Auslegung der Turbine sind festzulegen entsprechend der Anlieferungsbedingungen für den Klärschlamm, im Einzelnen:

- Der beschriebene Auslegungsfall sieht vor, dass eine Teilmenge als getrockneter Klärschlamm angeliefert wird. Dies bedeutet, dass nur eine Teilmenge des Dampfes für die Klärschlamm-trocknung erforderlich ist.

- Alternativ kann auch die gesamte Klärschlammmenge als entwässerter Klärschlamm angeliefert werden. In diesem Fall kann etwa die gesamte Abdampfmenge für die Klärschlamm Trocknung eingesetzt werden und somit würde die Turbine als Gegendruckturbine geplant werden.
- Zwischen diesen vorgenannten Alternativen kann eine genauere Auslegung zur Optimierung der Stromerzeugung vorgenommen werden. Zunächst sollte jedoch die gesicherte Dampfversorgung der Trocknung berücksichtigt werden.

Der aus der Turbine entnommene Dampf kondensiert unter Wärmeabgabe im Trockner. Das Kondensat wird in die Speisewasserversorgung zurückgeführt. Bei der Entspannung auf das Druckniveau der Speisewasserversorgung wird weitere Wärme (Energie) freigesetzt und wird für die Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt.

Im Fall des Entnahme-Kondensations-Betriebes wird eine Teilmenge als Abdampf freigesetzt und wird anschließend kondensiert. Dafür wird häufig ein luftgekühlter Kondensator eingesetzt; alternativ kann je nach Standortbedingungen auch ein wassergekühltes System eingesetzt werden.

Die Kondensate aus den verschiedenen Dampfverbrauchern werden in einem Kondensatbehälter gesammelt und nachfolgend dem Speisewasserbehälter zugeführt. Unter Umständen ist eine Kondensatreinigung zwischenschalten.

6.5.2 Auslegungsdaten

Die Auslegung des Wasser-Dampf-Kreislaufes kann mit folgenden Daten skizziert werden:

■ Dampfmengenstrom (40 bar, 400 °C)	12,4 Mg/h
■ Schluckvermögen der Turbine	12,4 Mg/h
■ Dampfentnahme bei 10 bar	5,5 Mg/h
■ Abdampf bei 0,5 bar	6,9 Mg/h
■ Elektrische Leistung am Generator	1,5 MW

Die Energiebilanz des gesamten Systems „Thermische Klärschlammverwertung“ kann mit folgenden Energieströmen skizziert werden:

■ Brutto- Wärmeleistung der Klärschlammverbrennung	11,1 MW
■ Dampfproduktion (40 bar, 400 °C)	9,1 MW
■ Verluste (Abgasstrom, Asche etc.)	2,4 MW
■ Stromproduktion Turbine	1,5 MW
■ Wärmeabgabe Trocknung	2,9 MW
■ Wärmeabgabe Luftvorwärmung	0,2 MW
■ Kondensation Abdampf	2,1 MW

Die Effizienz der thermischen Klärschlammverwertung kann mit einem Wirkungsgrad von ca. 50% bewertet werden und entspricht den Verlusten durch Abgas, Aschestrom und Wärmeabstrahlung einerseits und der kondensierten Abdampfmenge andererseits.

6.5.3 Anlagenausrüstung

Die Anlagenausrüstung umfasst den gesamten Komplex des Wasser-Dampf-Kreislaufs, im Einzelnen:

- 1 Dampfturbine mit Getriebe und Generator;
- 1 Speisewasserbehälter mit Entgaser;
- 2 Speisewasserpumpen davon 1 Reserve;
- 1 Kondensator;
- 1 Vollentsalzungsanlage zur Herstellung von Kesselspeisewasser;
- Das komplette Rohrleitungssystem für Hochdruckdampf und sonstigen Dampfleitungen, Kondensatleitungen und Speisewasserleitungen.

6.6 Elektrotechnik und Leittechnik

6.6.1 Elektrotechnik

Die Versorgung aller elektrischen Antriebe sowie der elektrischen Gebäudeinstallation erfolgt durch die Installation geeigneter Schaltanlagen einschließlich der Transformatoren zur Anbindung an das elektrische Versorgungsnetz sowie der Ableitung der mit der Turbine erzeugten elektrischen Leistung. Entsprechend den Anforderungen der einzelnen Verbraucher werden unterschiedliche Spannungsebenen vorgesehen, die über die verschiedenen Schaltanlagen und Eigenbedarfstransformatoren versorgt werden.

Zur Elektrotechnik gehört auch die Bereitstellung einer gesicherten Stromversorgung, um die Anlage bei Störungen in einen sicheren Zustand zu versetzen.

Die entsprechende Ausrüstung wird pauschal berücksichtigt.

6.6.2 Leittechnik

Die Ausrüstung der Anlage mit einer übergeordneten Leittechnik, die einen kontrollierten und sicheren Betrieb der Anlage gewährleistet, ist ebenfalls Bestandteil der Ausrüstung.

Weiterhin verfügt sie über die notwendigen Sicherheitssteuerungen zum Beispiel für Brenner und Kessel.

Für die Bedienung und Beobachtung wird eine zentrale Leitwarte vorgesehen, aus der das gesamte Prozessgeschehen überwacht und gesteuert werden kann. Diese Leitwarte ist im Betrieb ständig besetzt.

Die entsprechende Ausrüstung wird pauschal berücksichtigt.

6.7 Bautechnik und Anlagenaufstellung

6.7.1 Anlagenaufstellung

■ Aufstellungsplan Draufsicht	MLH020-0H-001
■ Aufstellungsplan Schnitte A-A, B-B	MLH020-0H-002

In den Plänen ist die Anordnung der einzelnen Verfahrensgruppen und Ausrüstungskomponenten dargestellt. Da die Untersuchung zunächst als standortneutrales Konzept erarbeitet worden ist, wurde eine verfahrenstechnisch optimierte Anordnung gewählt.

Mit dem Zuschnitt eines realen Standortes ergeben sich durch die Anbindung mit äußerer und innerer Erschließung entsprechende Randbedingungen, die eine optimierte Anordnung erlauben. Grundsätzlich ist auch eine weniger langgestreckte Anordnung möglich, wodurch sich unter Umständen Kosten reduzieren lassen.

Nicht dargestellt sind im Moment Betriebs- und Sozialräume, die nicht direkt der Verfahrenstechnik zuzuordnen sind. Dazu gehören unter anderem:

- Umkleideräume
- Sanitärräume inklusive Duschen
- Aufenthaltsräume einschließlich Tee-/Kaffeeküche
- Werkstätten
- Lagerräume
- Büros und Besprechungsräume
- Archivräume

Die Anordnung dieser Räume kann entweder in separaten Bauwerken oder integriert in das Prozessgebäude erfolgen. Dies sollte im Rahmen der weiteren Planung untersucht werden, wenn ein Standort identifiziert wurde. Unter Umständen lassen sich Synergien mit vorhandenen Einrichtungen nutzen, zum Beispiel auf einer größeren Kläranlage.

6.7.2 Bautechnische Ausrüstung

Das Aufstellungskonzept geht davon aus, dass die gesamte Anlage mit einer Hülle eingeschlossen wird. Die Umhüllung dient nicht nur der Verbesserung des optischen Eindrucks, sondern erleichtert auch die Reduzierung der Schallemissionen, dient der Verhinderung diffuser Emissionen (Geruch und Staub) und erleichtert den Frostschutz (wichtig bei nasser Abgasreinigung). Nicht zuletzt dient sie dem Bedienpersonal als Wetterschutz und erleichtert so Betrieb und Instandhaltung. Dargestellt ist eine Stahlkonstruktion nach industriellem Standard. Die komplette Installation kann auf einer Bodenplatte installiert werden.

Für den Bereich der Anlieferung sind die Entladestationen unter Fahrbahnniveau angeordnet. Der Bereich ist insgesamt auch gegenüber der sonstigen Verfahrenskette geschlossen und wird durch die Absaugung der Verbrennungsluft entlüftet.

Für den Bereich der elektro- und leittechnischen Installation sind im mittleren Bereich entsprechende Räume vorgesehen.

Maßnahmen für die innere und äußere Erschließung, für die architektonische Gestaltung, für die Gründung und der Erwerb des Grundstücks sind nicht berücksichtigt, da diese Bereiche in hohem Maße standortabhängig sind.

Weiterhin kann zu jetzigen Zeitpunkt noch keine Angabe zur Kaminhöhe gemacht werden. Diese wird im Zuge der Genehmigungsplanung auf der Grundlage der rechtlichen Vorgaben (TA Luft) und einer Ausbreitungsbetrachtung ermittelt.

Das umbaute Volumen wird mit rd. 50.000 m³ abgeschätzt. Die Gebäudegrundfläche liegt bei ca. 1.700 m², wozu noch die außenliegenden Verkehrsflächen (Zufahrt, Rangierflächen, Feuerwehrlächen, allseitige Umfahrung, Parkplätze etc.) gerechnet werden müssen, so dass ein Gesamtbedarf von 5.000 – 7.000 m² notwendig erscheint. Dieser Wert ist indikativ zu verstehen und muss in der weiteren Planung präzisiert werden.

7

WIRTSCHAFTLICHKEIT

7.1 Investitionen

Die Investitionen wurden anhand von Richtpreisen und Erfahrungen in vergleichbaren Aufgabenstellungen abgeschätzt. Für einzelne Verfahrensgruppen wurden Informationen von erfahrenen Lieferfirmen eingeholt.

Die Investitionen werden wie folgt abgeschätzt:

■ Verfahrens- und maschinentechnische Ausrüstung	29,0 Mio EURO
■ Elektro- und Leittechnik	5,8 Mio EURO
■ Bau- und gebäudetechnische Ausrüstung	10,0 Mio EURO
■ Nebenkosten (Planung, Gutachten, Genehmigung etc.)	5,4 Mio EURO
■ Gesamt- Investitionskosten	50 Mio EURO

Alle Angaben sind als Netto-Angaben zu verstehen.

7.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten wurden wie folgt abgeschätzt:

■ Kapitalkosten (25 Jahre, 5 % Abschreibung)	3,5 Mio EURO/a
■ Durchsatzunabhängige Kosten	1,7 Mio EURO/a
■ Durchsatzabhängige Kosten	1,7 Mio EURO/a
■ Erlöse (Stromerzeugung)	0,6 Mio EURO/a
■ Gesamtkosten	6,3 Mio EURO/a

Durchsatzunabhängige Kosten beinhalten Positionen wie Personal, Instandhaltung, Versicherungen etc. (Fixkosten). Durchsatzabhängige Kosten setzen sich aus den Aufwendungen für Energie, Verbrauchsstoffe (Reagenzien) und Reststoffentsorgung zusammen (variable Kosten). Die vorgenannten Kosten beruhen auf bestimmten Ansätzen für Abschreibungsdauer, Zinssatz, Instandhaltung, Personal, Entsorgungskosten und Preise für Verbrauchsstoffe und Energie. Diese sind im Zuge der weiteren Planung zu verifizieren und der gewählten Verfahrenstechnik anzupassen.

Damit ergeben sich aus der geplanten Jahreskapazität die folgenden spezifischen Behandlungskosten

- | | |
|--|--------------------|
| ■ Spezifische Entsorgungskosten Trockensubstanz | ca. 212 EURO/Mg TS |
| ■ Spezifische Entsorgungskosten entwässerter Klärschlamm | ca. 47 EURO/Mg OS |

In dieser Betrachtung sind keine Erlöse aus der Abgabe von Wärme berücksichtigt, da diese Erlöse nur an bestimmten Standorten generiert werden können. Außerdem hängt die jährliche Wärmeabnahme immer von der Art des Wärmekunden ab. Häusliche Wärmeversorgung unterliegt einem starken Jahresgang, wohingegen industrielle Abnehmer unter Umständen einen eher konstanten Bedarf haben.

1. Die Wirbelschichtfeuerung ist geeignet für die effiziente thermische Verwertung des Klärschlammes. Mit den angenommenen Daten ist eine ausgeglichene Wärmebilanz gegeben. Auch für den Fall, dass die Schlämme insgesamt als mechanisch entwässerte Klärschlämme angeliefert werden, ist die Dampfproduktion ausreichend um eine energieautarke Verbrennung zu erreichen.

Die Energiebilanz könnte sich jedoch verschieben, wenn die Klärschlämme insgesamt gut anaerob stabilisiert sind und der relative Gehalt an organischer TS abnimmt. Diese Tendenz könnte sich verstärken, wenn die Faulung durch eine vorgeschaltete Desintegration intensiviert wird. Auch die Annahme eines mittleren TS-Gehaltes von 25 % nach der Entwässerung mit Zentrifugen wird vermutlich nicht immer erreicht. Ein Absinken auf z.B. 23 % TS-Gehalt würde die Wasser- und die Energiebilanz verändern und erforderte eine größere Dampfmenge.

2. Die Wirbelschichtfeuerung ermöglicht die separate Ableitung der Asche als geeignetes Ausgangsprodukt für eine wirtschaftliche Phosphorrückgewinnung.
3. Für die vorgeschaltete Trocknung ist die Teiltrocknung in einem Kontakt Trockner eine wirtschaftliche Konzeption. Dabei erscheint unter dem Aspekt der sich verändernden Bedingungen der Klärschlammmanlieferung, der Scheibentrockner eine flexiblere Betriebsweise zu erlauben.
4. Die Anlieferung und insbesondere die Verarbeitung von mechanisch entwässertem Klärschlamm und vollgetrocknetem Klärschlamm sind verfahrenstechnisch möglich.
5. Bei der Frage, ob es sinnvoll ist, den Schlamm dezentral zu trocknen, sind die Energiekosten einer dezentralen Trocknung den Einsparungen beim Transport des Schlammes gegenüber zu stellen (gleiches gilt übrigens auch für die Emissionsbetrachtung).
6. 1 Mg Wasserverdampfung erfordert ca. 1 MW Wärmeleistung (40 EURO/MW Erdgas). Rechnet man die Investitionen und die Betriebskosten hinzu, so ist in jedem Einzelfall zu prüfen, ob der Aufwand langfristig wirtschaftlich vorteilhaft sein wird. Die Anlieferung von vollgetrocknetem Klärschlamm verursacht einerseits höheren Aufwand insbesondere unter dem Aspekt der Explosions-Schutz-Anforderungen. Andererseits erlaubt die Zumischung von getrocknetem Klärschlamm eine höhere Ausbeute an Stromproduktion.

9

ANHÄNGE

- 1 Grundfließbild MFB010-0-001,
- 2 Aufstellungsplan Draufsicht MLH020-0H-001
- 3 Aufstellungsplan Schnitte A-A, B-B MLH020-0H-002

10

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen vom 2. Mai 2013 - 17. BImSchV, BGBl. I S. 1021, 1044, 3754.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), die zuletzt durch Artikel 74 der Verordnung vom, BGBl. I S. 1474.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), vom 24. Juli 2002, (GMBL. 2002, Heft 25 – 29, S. 511 – 605).
- [4] BMUB, Begründung zur Novelle der AbfKlärV (Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit der „Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“ des BMUB), 2015.
- [5] „Merkblatt DWA-M 386 Thermische Behandlung von Klärschlämmen - Monoverbrennung,“ DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, 2011.
- [6] Lehmann, „Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung - Trocknung, Verbrennung und Mitverbrennung -,“ in Energie aus Abfall, Bd. 11, Neuruppin, TK-Verlag, 2013.
- [7] „Merkblatt ATV-DVWK-M 379 Klärschlamm-trocknung,“ ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, 2004.
- [8] Haarslev Industries A/S, „Haarslev Industries Bandtrockner,“ Sondersö, 2015.
- [9] H. Zell, „Abfallwirtschaft-Blog.de,“ 28 10 2014. [Online]. Available: <http://abfallwirtschaft-blog.de/?p=2669>. [Zugriff am 03 11 2015].
- [10] Thermo-System Industrie- und Trocknungstechnik GmbH, Solare Klärschlamm-trocknung, Filderstadt, 2015.
- [11] Jacobs/Thomalla, „Überblick über die Trocknungsverfahren, Trocknerbauarten, Betriebserfahrungen mit thermischen Trocknungsanlagen,“ VDI-Wissensforum, Paderborn, 2015.
- [12] H.-G. e. a. Ramke, „Hydrothermal Carbonisierung. Förderprojekt der DBU,“ Hochschule Ost-westfalen-Lippe, Höxter, 2010.
- [13] AVA-CO2, Firmeninformationen, 2015.

- [14] Vogt/Fehrenbach, „Maßnahmenplan zur Umsetzung einer vorbildhaften klimafreundlichen Abfallentsorgung im Land Berlin, Endbericht, Anhang E,“ ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH / ICU Ingenieurconsulting Umwelt und Bau, Berlin, 2012.
- [15] Thomé-Kozminensky, Klärschlammbehandlung, Neuruppin: TK-Verlag, 1998.
- [16] Dräger/Vosteen, „Monoklärschlammverbrennung in Etagenöfen, Wirbelschicht und Etagenwirblern (Vortrag beim VDI Wissenforum),“ VDI-Wissenforum, München, 2004.
- [17] Martin GmbH, Firmeninformationen, download 09/2015.
- [18] Eisenmann GmbH, Firmeninformationen, 2015.
- [19] Sülze-Kopf GmbH, Firmeninformationen, 2015.
- [20] Pyreg GmbH, Firmeninformationen, 2015.
- [21] Gutjahr/Niemann, „Abgasreinigung für Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen,“ in Energie aus Abfall Bd.12, Neuruppin, TK-Verlag, 2015, pp. 693-711.
- [22] N. B. u. R. Bundesministerium für Umwelt, Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das, BGBl. I S. 1474.

IMPRESSUM

Herausgeber:

Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus
Mecklenburg-Vorpommern
Johannes-Stelling-Straße 14
19053 Schwerin

**Mecklenburg
Vorpommern** 

Ministerium für Wirtschaft,
Bau und Tourismus

Telefon: (03 85) 5 88 - 50 65
Telefax: (03 85) 5 88 - 50 67
E-Mail: presse@wm.mv-regierung.de
Web: www.wm.regierung-mv.de

Bearbeitung:

Pöyry Deutschland GmbH
Borsteler Chaussee 51
22453 Hamburg
www.poyry.com · www.poyry.de

 **PÖYRY**
Engineering balanced sustainability™

Gestaltung:

ofedesign - Büro für Gestaltung · www.ofe-design.de

Druck:

Druckerei Weidner GmbH
Carl-Hopp-Straße 15
18069 Rostock
www.druckerei-weidner.de

Titelfoto:

am - Fotolia.com (links)
Ulrike Steinbrenner - Fotolia.com (Mitte)
Cylonphoto - Fotolia.com (rechts)

Redaktionsschluss:

August 2016

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Wirtschaft, Bau und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlkampfveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als eine Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden kann.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist.

**Mecklenburg
Vorpommern**



Ministerium für Wirtschaft,
Bau und Tourismus