

1. Projektvorstellung

1.1 Zielsetzung und Problemstellung

Thema dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung und die Grundlagenschaffung für die Entwicklung einer transportablen Klärschlammverbrennungsanlage in Containerbauweise. Es wird geprüft, ob die technische Umsetzung für eine mobile Anlage einen dauerhaften wirtschaftlichen Betrieb bei der jetzigen Klärschlammmentsorgungssituation gewährleistet.

Die Klärschlammmentsorgung wird für die Betreiber von Kläranlagen (KA) bzw. Abwasserbehandlungsanlagen zunehmend zum Problem und zum schwer zu kalkulierenden Kostenfaktor. Durch das Außerkrafttreten der Ausnahmeregelungen der Technischen Anleitung Siedlungsabfall am 01.06.2005 ist die Entsorgung von Abfällen, deren Gehalt an organischer Substanz 3 % bzw. 5 % übersteigt, auf kommunalen Deponien nicht mehr erlaubt.

Auch die Kompostierung mit Klärschlamm (KS) und die Begrünung von Halden und Tagebauen von vormaligen Bergbaugebieten¹, welche besonders in den neuen Bundesländern verbreitet sind, wird heruntergefahren. Da diese Arbeiten vom Bund mittels staatlicher Subventionen gestützt werden, hat sich hier ein Preisniveau eingestellt, das bundesweit einmalig niedrig ist. Diese Fördermittel fallen allerdings zum Ende des Jahres 2012 weg. Die Entsorgungspreise sind dann mittelfristig nicht mehr zu halten und die Entsorgungsunternehmen, welche Kompostierbetriebe unterhalten, müssen sich nach Entsorgungsalternativen umsehen oder den Betrieb einstellen.

Durch die Abnahme der Akzeptanz von den Bundesländern, der Nahrungsmittelindustrie und nicht zuletzt der Landwirte den Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzten Flächen aufzutragen ist auch hier ein Entsorgungsrückgang eingetreten. Viel zu groß scheint die Ungewissheit über die Art und Wirkung der unerwünschten Schadstoffeintragung in die Schutzgüter Boden und

¹ Mitteldeutscher Restbergbau, LMBV Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, <http://www.lmbv.de>, 2007

Wasser. Der Anstieg der Entsorgungspreise wird auch den Landwirten nicht verborgen bleiben und bei dieser Entsorgungsart ebenfalls zu Preiserhöhungen führen.

Als letzter Ausweg scheint allein die Verbrennung des KS eine dauerhafte und rechtssichere Lösung zu sein. Die Schadstoffe werden sicher aus dem Stoffkreislauf entzogen und die Asche kann auf Deponien abgelagert werden oder findet teilweise Anwendung in der Baustoffindustrie. Die von der Industrie bisher angebotenen Möglichkeiten sind in der Form der Mitverbrennung in Kraftwerken und in wenigen stationären Monoverbrennungsanlagen gegeben. Sie eignen sich grundlegend nur für Großklärwerke ab 200.000 EW [HER04].

Die Betreiber von Kläranlagen sind bei der Entsorgung sowohl kurz- als auch langfristig den Preisen der wenigen Anbieter sowie einer erheblichen Transportkostensteigerung ausgesetzt. Gerade im ländlichen Raum sind weite Strecken zu den stationären Anlagen zurückzulegen. Mit dem Bedürfnis von höheren hygienischen Anforderungen an die KS-Entsorgung ist es in Zukunft unabsehbar, wie sich die Entsorgungspreise entwickeln werden und damit Verbunden die Gebühren der angeschlossenen Einwohner.

Die angestrebte technische Lösung einer transportablen dezentralen Klärschlammverbrennungsanlage (DKVA) in Containerbauweise stellt dazu eine preiswerte kompakte Alternative dar. Zurzeit existiert kein Anbieter auf dem europäischen Markt, welcher das genannte System zum Verkauf anbietet. Das Verfahrenskonzept und die dafür benötigten Maschinen in ihrer Zusammenstellung werden erstmalig vorgestellt. Die zu versorgende Zielgruppe sind Kläranlagenbetreiber, welche zuständig sind für bis zu 50.000 EW sowie auch private Unternehmen. Die Innovation besteht zum einen in der Beweglichkeit der DKVA, d. h. nicht der KS mit einem Wassergehalt von 95 bis 80 % wird zur Verbrennung transportiert, sondern die Verbrennung zum KS.

1.2 Aufbau der Diplomarbeit

Die Arbeit ist in 3 Themenkomplexe aufgegliedert. Der erste Teil befasst sich mit der Herkunft des Klärschlammes und mit dessen Eigenschaften. Im Anschluss erfolgen eine kurze Analyse über den jährlichen Mengenanfall sowie ein Überblick über den Klärschlammverbleib. Im zweiten Teil liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung der hauptsächlichlichen Anlagenkomponenten und deren Funktion im verfahrenstechnischen Prozess. Zudem ist beschrieben, wie für die Grundkomponenten die Auslegungsvorgaben ermittelt und bestimmt wurden sind. Der dritte und letzte Teil dieser Diplomarbeit befasst sich mit dem Wirtschaftlichen Aspekt. Es ist aufgezeigt, wie sich die Investitions- und Betriebskosten und damit Verbunden der resultierende Schlammentsorgungspreis zusammensetzt. Abhängig davon wird für die Investitionsbeurteilung die Amortisationszeit ermittelt. Die Diplomarbeit schließt mit der Bewertung der Ergebnisse sowie einen Ausblick ab.

1.3 Begriffsbestimmungen

Zum besseren Verständnis dieser Diplomarbeit folgt eine Erläuterung von wichtigen Begriffen aus dem Arbeitsgebiet der Entsorgungstechnik.

- BSB₅ (biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen):

Benötigte Sauerstoffmenge um die in 1 Liter Abwasser enthaltenen biochemisch oxidierbaren Inhaltsstoffe innerhalb von fünf Tagen unter der Stoffwechselfähigkeit entsprechender Mikroorganismen zu verbrauchen. Bei hohen Werten verbrauchen die Bakterien viel Sauerstoff und das Abwasser ist noch nicht ausreichend geklärt worden. Der obere Grenzwert² nach der Abwasserbehandlungsanlage liegt in Deutschland bei 40 mg/l.

- Glühverlust (GV):

Sind die auf die Trockenmasse in Prozent bezogenen Anteile, die verglühbar bzw. verbrennbar sind (organische Substanz). Der GV ist bestimmt die Größe des Heizwertes.

² [IMH99], Tabelle „Mindestanforderungen an gereinigtes Kommunalabwasser“, S.90

- Glührückstand (GR):
Bezeichnet die auf die Trockenmasse in Prozent bezogenen Anteile, die nach dem Verglühen der organischen Substanzen als Rückstand (Asche) verbleiben (also $GR = 100 - GV$). Der Glührückstand ist der mineralische Anteil der Trockenmasse (überwiegend Sand).

- Klärschlamm (KS):
Enthält die durch die Behandlungsverfahren aus dem Abwasser abgetrennten, wasserhaltigen Stoffe (ausgenommen Rechen-, Sieb- und Sandfanggut).

- Klärschlamm Trockenmasse (m_T):
Ist der aus festen Stoffen bestehende Anteil im Klärschlamm, d. h. die nach einem Trocknungsverfahren verbliebene, entwässerte Klärschlammmasse. Sie wird auch als Trockensubstanz bezeichnet.

- Primär-, Sekundär-, Tertiärschlamm:
Je nach Reinigungsstufe (RS) sind anfallende, unbehandelte Rohschlämme unterschieden in Primär-KS (mechanische RS), Sekundär-KS (biologische RS) und Tertiär-KS (weitergehende RS).

- Schadstoffe:
Sind organische (Kohlenwasserstoffverbindungen) und anorganische (z. B. Schwermetalle) Stoffe in gesundheits- oder umweltgefährdender Konzentration.

- Trockenrückstand (TR):
Auch bezeichnet als Trockenmasseanteil gibt es bezogen auf die KS-Gesamtmasse den prozentualen Anteil der Klärschlamm-trockenmasse (m_T) an. Den Rest macht der Wassergehalt (WG) aus.

- Wassergehalt (WG):
Prozentualer Anteil des Schlammwassers an der KS-Gesamtmasse. Der Rest entspricht dem Trockenrückstand (TR).

1.4 Rechtliche Grundlage und patentrechtliche Situation

Für die thermische Behandlung in einer Verbrennungsanlage und die Entsorgung von Klärschlamm sind folgende Rechtsvorschriften bindend:

- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG):

Das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge stellt für den Betrieb einer Klärschlammverbrennungsanlage die oberste Gesetzgebung dar. Es dient dem Schutz der Menschen, Tiere und Pflanzen sowie dem Schutzgütern Boden, Wasser und Luft.

- Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV:

Die siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes ist speziell bei der thermischen Behandlung von Klärschlamm zu beachten und gilt für die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen. Sie regelt unter anderem die Feuerungsbedingungen für ein optimalen Ausbrand des KS und die erforderlichen Bestimmungen zur Messung und Überwachung der Verbrennung sowie die maximal zulässigen Emissionsgrenzwerte im Rauchgas.

Eine generelle Genehmigungsbedürftigkeit für den Betrieb der DKVA ist nach 17. BImSchV nicht allgemeingültig. Da es sich um ein Mobiles System handelt, ist unbedingt Rücksprache mit den hiesigen Behörden notwendig.

- Technische Anleitung Siedlungsabfall:

Diese Technische Anleitung enthält Anforderungen und Regelungen an die Verwertung, Behandlung und sonstige Entsorgung von Siedlungsabfällen (Abfälle wie Haus- und Sperrmüll, Gartenabfälle sowie Klärschlamm und dessen Asche usw.). Ziel ist es die Ablagerung auf Deponien so vorzunehmen, dass die Entsorgungsprobleme von heute nicht auf künftige Generationen verlagert werden. Sie beschreibt zu dem die Klärschlammbeschaffenheit (z. B. geringer Schadstoffgehalt, geringer Glühverlust) damit die Ablagerung vollzogen werden kann (vgl. Abschnitt 2.5).

Bei Betrachtung der patentrechtlichen Situation ist festzustellen, dass die recherchierten Patente im Bereich der Klärschlammverbrennung bis auf wenige Ausnahmen älter als 20 Jahre und somit rechtlich nicht mehr relevant sind. Die eingesetzten Maschinen und Apparate sind einzeln betrachtet alle länger als 20 Jahre in Betrieb. Eine Patentierung der DKVA ist deshalb als schwierig einzustufen.

2. Entstehung und Definition des Klärschlamm

2.1 Klärschlamm als Produkt der Abwasserreinigung

Im Allgemeinen definiert man den Begriff Abwasser als Wasser, welches durch Gebrauch in seiner Qualität bzw. Beschaffenheit verändert ist. Das ist jedes in die Entwässerungsanlage fließende Wasser (z. B. aus privaten Haushalten, Industrie und Gewerbe sowie auch Regenwasser, wenn es in die Entwässerungsanlage abgeleitet wird). Dies bedeutet, dass aus technischer Sicht Abwasser „flüssiger Abfall“ ist. Wasser dient dabei als Träger, sozusagen als Transportmittel für den Abfall zu dessen Ableitung in die Abwasserbehandlungsanlage, welche umgangssprachlich als Klärwerk bzw. Kläranlage bezeichnet wird.

Die dort stattfindende Reinigung des Abwassers ist eine stoffliche Trennung von Wasser und umweltbelastenden Fremdstoffen, die bei Einleitung in ein Gewässer unzulässige Schäden hervorrufen könnten. Es fallen neben Rechen-, Sieb- und Sandfanggut auch Fette und Öle an und vor allem unbehandelte Klärschlämme (Rohschlämme) mit ihren Wasser belastenden Inhaltsstoffen. Dazu zählen beispielsweise:

- organische, durch Mikroorganismen zersetzungsfähige (faulfähige) Substanz (Nährboden), welche mögliche Emissionen in Form von intensiven Geruchsstoffen hervorrufen kann,
- seuchenhygienisch bedenkliche Organismen, wie Bakterien oder Parasiten,
- Schadstoffe, wie z. B. Schwermetalle, welche Einfluss auf die Qualität von Böden bzw. im Weiteren Sinne auf die Nahrungskette haben können,
- ein großer Wassergehalt, evtl. negative Folgen für die spätere Deponierbarkeit.

Die Abbildung 2.1 zeigt die Übersicht über die Abwasserbehandlungen in einer kommunalen Kläranlage und der daraus resultierenden Schlämmen. Es ist zu erkennen, dass es drei grundlegende Abwasserreinigungsstufen gibt. Die genauen Verfahrensweisen sind in dieser Diplomarbeit nicht von Belangen und werden daher nicht behandelt. Lediglich von Bedeutung ist die Beschaffenheit der Anfallenden KS nach einer Reinigungsstufe (Vgl. Abschnitt 2.2). Zu den drei Reinigungsstufen zählen

die mechanische (physikalische) Reinigung, die biologische Reinigung und die weitergehende Reinigung.

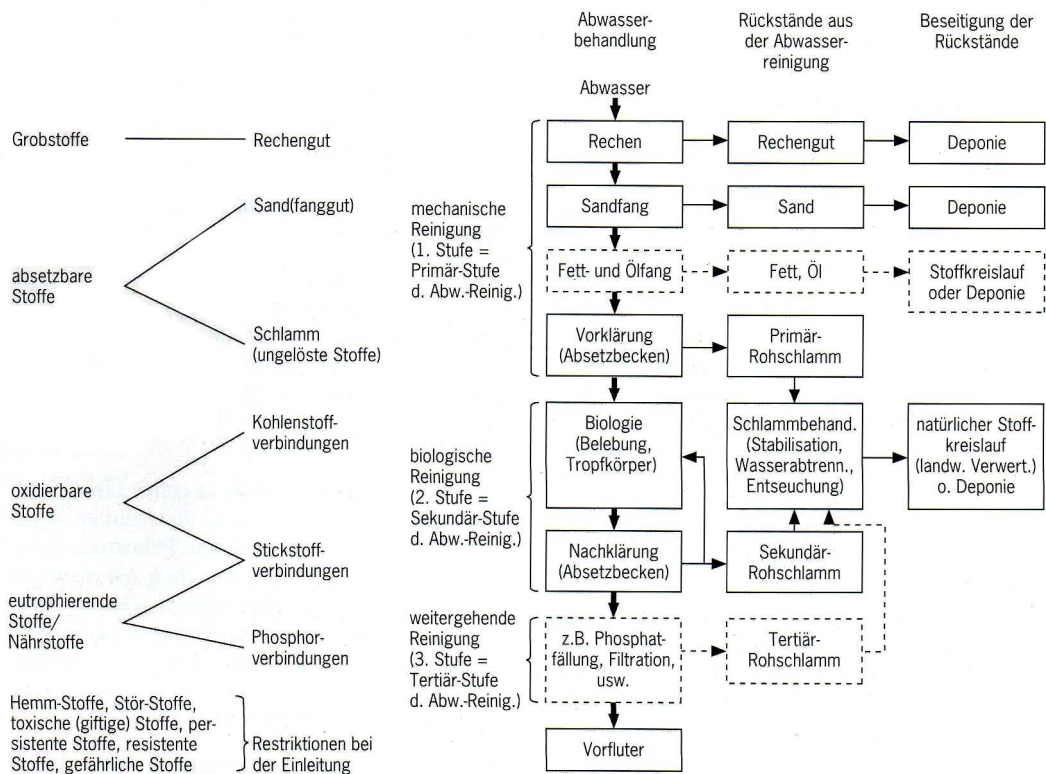


Abbildung 2.1: Abwasserbehandlung und Rückstände / Reststoffe aus der Abwasserreinigung und deren Entsorgung in einer kommunalen Kläranlage³

2.2 Unterteilung der Klärschlamme

Als größter Mengenanteil fällt der Klärschlamm als Reststoff neben Rechen- und Sandfanggut in Abwasserbehandlungsanlagen als Produkt der Abwasserreinigung an. KS sind Suspensionen, das bedeutet sie bestehen aus einem flüssigen und einem festen Anteil. Die Qualität ist von vielen Faktoren abhängig und beginnt schon bei der Trink- bzw. Brauchwassernutzung, durch welche das Wasser zu Abwasser wird und von der Sammlung dessen bis hin zum Abtransport in die Kläranlage. Das heißt, durch diese Abwasserbelastung und die sich daraus ergebende Abwasserreinigung ist die Beschaffenheit der Klärschlämme bestimmt. Somit lassen

³ [LES96], Bild 1.1-1, S.2

sich nicht pauschal exakte Werte definieren und Klärschlamm kann nicht als Einheitsprodukt beschrieben werden. So wie jedes Abwasser von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet unterschiedlich ist, so trifft das auch für den KS zu.

Aufgrund von verschiedenen eingesetzten Verfahren und Prozessen mit ihren Abstufungen und Kombinationen sind die jeweiligen Abwasserreinigungsziele umzusetzen. Wie in Abbildung 2.1 aufgezeigt können nach jeder Reinigungsstufe prozess- und stofftypische Klärschlämme anfallen. Diese sind:

- Primär-Schlämme als Ergebnis der Entfernung von Abwasserinhaltsstoffen in der mechanischen Behandlungsstufe unter Einwirkung der Schwerkraft (nach Rechen und Sandfang),
- Sekundär-Schlämme (auch Überschussschlamm) als Ergebnis der Beseitigung von Abwasserinhaltsstoffen bei der biologischen Abwasserbehandlung durch Stoffwechselprozesse von Mikroorganismen, wobei organische Stoffe aus dem Abwasser in gelöster oder kolloidaler Form aufgenommen, veratmet und in feste ungelöste Substanz umgewandelt werden. Die dabei neu gebildeten ungelösten Stoffe werden durch Absetzen aus dem Abwasser beseitigt,
- Tertiär-Schlämme als Ergebnis der Elimination von Abwasserinhaltsstoffen durch andere Methoden der Abwasserbehandlung, vor allem durch chemische Fällung und Flockung.

Des Weiteren werden diese unbehandelt entnommenen Schlämme auch als Rohschlämme bezeichnet.

2.3 Heizwert

Der Heizwert (H_i) der Schlamm-trockenmasse steht eng in Verbindung mit dem Glühverlust (GV) als Maß der organischen Substanz (brennbare Bestandteile). D. h. Klärschlämme haben aufgrund des GV-Gehaltes einen mehr oder weniger hohen Heizwert. Die nichtbrennbaren Bestandteile bilden den Glührückstand (GR), d. h. die Asche. Entsprechend kann man feststellen, dass bei einem geringeren GR sich ein höherer Heizwert einstellt. In Tabelle 2.1 ist je nach Schlammart und Glühverlust der

Heizwert aufgezeigt. Somit zeigt sich, dass je vorangeschrittener die Faulung desto niedriger ist der Heizwert. Das bedeutet, dass die Mikroorganismen die organischen Bestandteile (Glühverlust) teilweise schon abgebaut haben und eine Schlammfäulung kontraproduktiv zur Verbrennung ist.

Tabelle 2.1: Heizwert und Glühverlust entsprechend der Klärschlammart⁴

Klärschlammart	Glühverlust (%) ^{a)}	Trockenrückstand (%)	Heizwert (MJ/kg m _T)
Primärschlamm aus mechanischen Anlagen	60 – 75	5 – 10	16 – 20
Sekundärschlamm biologischer Natur (Tropfkörper oder belebter Schlamm)	55 – 88	4 – 8 bzw. 0,5 – 3,0	15 – 21
Faulschlamm, schlecht ausgefault	55 – 70	4 – 12	15 – 18
Faulschlamm, mäßig ausgefault	50 – 60	4 – 12	12,5 – 16
Faulschlamm, gut ausgefault	45 – 55	4 – 12	10,5 – 15
Faulschlamm, sehr gut ausgefault	30 – 45	4 – 12	6,3 – 10,5

^{a)} % bez. auf m_T (Trockenmasse)

Der brennbare (organische) Anteil in der Schlamm-trockenmasse ist nicht immer und überall gleich. Von großer Bedeutung sind die Anteile, welche in etwa je ein Viertel an brennbarer Substanz ausmachen, der Inhaltsstoffe Fette ($H_i = 39,5 \text{ MJ / kg}$), Kohlenhydrate ($H_i = 17 \text{ MJ / kg}$) und Proteine ($H_i = 23,5 \text{ MJ / kg}$). Sie haben alle einen unterschiedlichen Heizwert. Verändern sich demzufolge diese Anteile an der KS-Gesamtmasse, so ändert sich auch der Heizwert des KS.

Für weitergehende Berechnungen ist für 1 kg Glühverlust ein Heizwert⁵ von 4,72 kWh (17 MJ) angesetzt.

⁴ [LES96], Auszug aus Tabelle 2.3-1, „Größenordnungsmäßige Angaben über die Zusammensetzung und Kenndaten von Klärschlämmen“, S.90

⁵ Heizwert nach Ingenieurbüro für Abwassertechnik Payer GmbH, Erfurt, 2008

2.4 Übersicht Klärschlammanfall und dessen Entsorgung in Deutschland

Im Jahr 2004 fielen nach den Erhebungen des Statistischen Bundesamtes etwa 2,26 Mio. Tonnen Klärschlamm Trockenmasse (m_T) an. Von dieser Gesamtmenge wurden ca. 230.700 t m_T (10,2 %) an andere Kläranlagen zur Weiterbehandlung abgegeben, bzw. ca. 64.200 t m_T (2,8 %) zur späteren Verwertung (Beseitigung) zwischengelagert. Unterdessen sind etwa 711.200 t m_T (31,5 %) bei einer thermischen Behandlung und ca. 79.100 t m_T (3,5 %) auf Deponien beseitigt wurden. Der stofflichen Verwertung (landwirtschaftliche Nutzung, Kompostierung) kam der größte Teil von etwa 1,18 Mio. t Klärschlamm Trockenmasse (52,0 %) zu.

Tabelle 2.2: Klärschlammverbleib im Jahr 2004⁶

Bundesland	Klärschlammverbleib in 1.000 Tonnen Klärschlamm Trockenmasse					
	Beseitigte Menge insgesamt	Deponie	stoffliche Verwertung	thermische Entsorgung	Zwischenlagerung	Abgabe an andere Klärwerke
Deutschland	2.260,8	79,1	1.175,7	711,2	64,2	230,7
Baden-Württemberg	291,1	13,9	124,9	134,8	2,5	15,2
Bayern	288,4	5,4	157,4	113,5	6,3	6,0
Berlin	40,3	-	-	40,3	-	-
Brandenburg	99,1	3,8	62,8	23,9	4,0	4,7
Bremen	21,4	4,4	10,2	5,8	-	1,0
Hamburg	44,1	-	-	44,1	-	-
Hessen	166,7	1,7	97,8	60,2	0,5	6,6
Mecklenburg-Vorp.	47,7	0,1	40,2	0,3	3,1	4,1
Niedersachsen	211,1	8,0	168,1	10,7	11,9	12,4
Nordrhein-Westf.	564,9	11,9	163,1	226,6	14,3	149,1
Rheinland-Pfalz	109,0	0,7	76,9	18,6	9,2	3,6
Saarland	23,5	0,7	4,8	14,6	-	3,4
Sachsen	115,0	1,7	101,9	3,9	2,1	5,4
Sachsen-Anhalt	59,8	4,6	47,1	6,0	0,7	1,5
Schleswig-Holstein	127,1	20,0	75,7	7,9	8,2	15,4
Thüringen	51,7	2,6	45,0	-	1,5	2,5

⁶ Statistisches Bundesamt Deutschland, Fachserie 19, Reihe 2.1, 2004, „12. Klärschlammverbleib aus der biologischen Abwasserbehandlung“, siehe Anhang 2

Der Klärschlammanfall in den einzelnen Bundesländern ist in Tabelle 2.2 aufgeführt. Es bestehen regionale Unterschiede in dem Sinne, dass die zwei Stadtstaaten Hamburg und Berlin komplett ihre Klärschlämme auf thermischem Wege behandeln. Dagegen ist im mitteldeutschen Raum (Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt) festzustellen, dass die Verbrennung als Entsorgungsweg (noch) nicht weitgehend genutzt wird. Die dezentrale Klärschlammverbrennungsanlage stellt in dieser Region ein Marktpotential da.

Im Vergleich zu 1998 (es fielen 2,46 Mio. Tonnen Trockenmasse in Deutschland an) ist ein Rückgang des KS-Anfalles um etwa 7,0 % zu dem Jahr 2004 festzustellen. Des Weiteren ist bei genauerer Betrachtung der einzelnen Entsorgungswege zu erkennen, dass sich eine stetige Abnahme der KS-Deponierung, der stofflichen Verwertung und der Zwischenlagerung entwickelt hat. Mit Ausnahme der thermischen Beseitigung, welche als Tendenz eine starke Zunahme aufweist (siehe Abbildung 2.2).

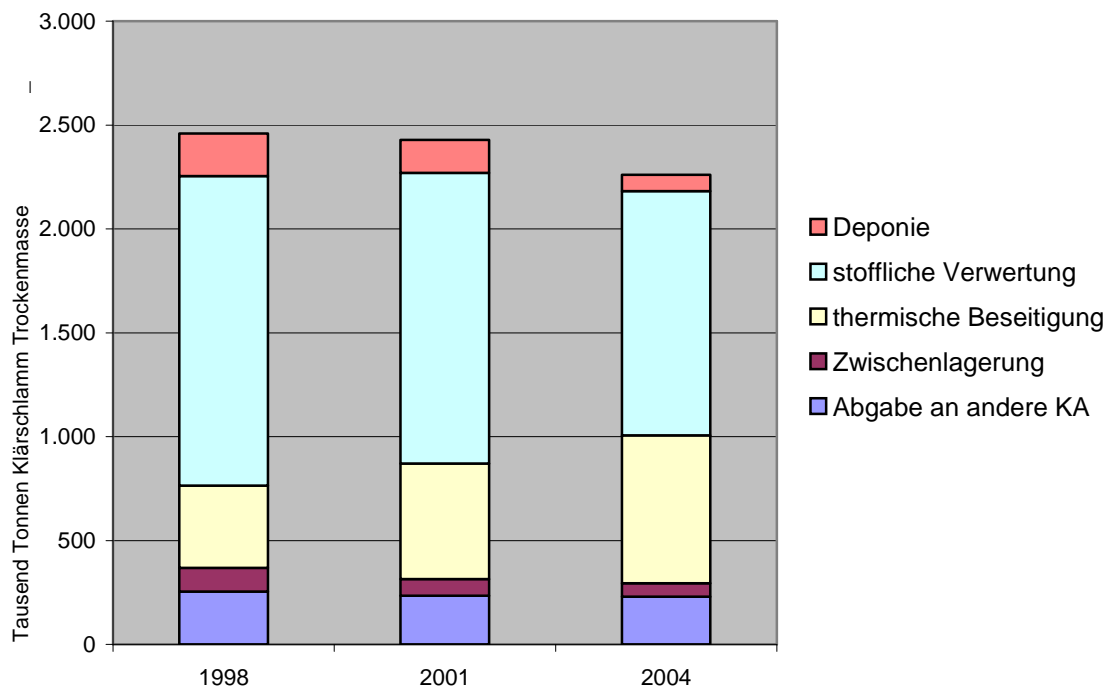


Abbildung 2.2: Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung⁷

⁷ eigene Darstellung, Grundlage: Statistisches Bundesamt Deutschland, Fachserie 19, Reihe 2.1, 2004, „12. Klärschlammverbleib aus der biologischen Abwasserbehandlung“, siehe Anhang 2

2.5 Ablagerung auf Deponien

Eine Maßnahme den Klärschlamm sowie die Klärschlammasche aus dem Stoffkreislauf endgültig auszuschleusen ist seine Ablagerung auf Deponien. Aus dem Grundsatz heraus, dass eine langfristige Umweltbeeinflussung durch Deponien aus dem Abfall selber kommt ist die Technische Anleitung Siedlungsabfall im Jahr 1993 erlassen wurden. Ziel der TA Siedlungsabfall ist es, den Schadstoffgehalt der Abfälle so gering wie möglich zu halten und eine umweltverträgliche Behandlung und Ablagerung der nichtverwertbaren Abfälle sicherzustellen.

Die Anforderungen an Deponien sind infolgedessen so zu planen, zu errichten und zu betreiben, dass durch geologisch und hydrologisch geeignete Standorte, durch geeignete Deponieabdichtungssysteme, durch geeignete Einbautechnik für die Abfälle und durch Einhaltung der Zuordnungswerte⁸ mehrere voneinander unabhängige Barrieren geschaffen werden, um die Ausbreitung von Schadstoffen zu vermeiden. Die Einhaltung der Zuordnungswerte dient z. B. zur Vermeidung der Bildung von Deponiegas, Verringerung der organischen Sickerwasserbelastung und geringfügigen Setzungen (aufgrund biologischen Abbaus vom organischen Bestandteilen).

Bei genauerer Betrachtung der Zuordnungswerte ist festzustellen, dass es eine Begrenzung der organischen Bestandteile von Klärschlämmen gibt. D. h. beträgt der Glühverlust nicht weniger als 5 Masse-% oder der TOC (organischer Gesamtkohlenstoffgehalt) nicht weniger als 3 Masse-%, so darf kein KS abgelagert werden. Eine thermische Vorbehandlung (Verbrennung) zur Senkung des GV ist aus diesem Grunde Bedingung. Die Einhaltung der Zuordnungswerte ist ab dem 01.06.2005 gültig. Vor diesem Begrenzungsdatum konnten auf Grundlage von Übergangsvorschriften dennoch KS unter bestimmten Auflagen abgelagert werden, z. B. auf Altdeponien und in gesonderten Deponieabschnitten.

Die spezifischen Kosten für die langfristige Klärschlammunterbringung auf Deponien werden demnach steigen, da eine vorherige Verbrennung notwendig geworden ist.

⁸ TA Siedlungsabfall, „Zuordnungskriterien für Deponien“, siehe Anhang 3

3. Technisches Konzept und Komponentenbeschreibung

3.1 Grundgedanke zur Schlammverbrennung

Die Alternative zur stofflichen Verwertung in der Landwirtschaft stellt die thermische Entsorgung, d. h. die Verbrennung von Klärschlamm dar. Sie schließt jede Kreislaufführung von Schadstoffen aus. Allerdings ist die Klärschlammverbrennung grundsätzlich nicht als eine Entsorgungsmöglichkeit anzusehen, sondern als Behandlungsverfahren (stoffliche Veränderung des Schlammes).

Die Schlammasche (Abbildung 3.1), als Endprodukt der Verbrennung, weist die geringste noch zu beseitigende Restmenge aller KS-Behandlungsverfahren auf (benötigt den geringsten Deponieraum). Des Weiteren ist sie geruchlos und inert. Bedingt durch die Anforderungen der TA Siedlungsabfall (vgl. Abschnitt 2.5), für die Ablagerung der Klärschlämme in Form von Asche auf Deponien, erlangt die Verbrennung an zunehmender Bedeutung. Die rauchgasseitigen maximalen Emissionen sind in der 17. BImSchV⁹ für Brennstoffe, die keine Regelbrennstoffe darstellen, über Grenzkonzentrationen unterschiedlicher Schadstoffe geregelt.



Abbildung 3.1: Klärschlamm nach Verbrennung¹⁰

⁹ 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung - Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen

¹⁰ eigene Fotografie, Mai 2008

Durch die Verbrennung von Klärschlamm ergeben sich nachfolgende Vorteile:

- größtmögliche Volumenreduzierung und Umwandlung der Abfälle in hygienisch unbedenkliche Reststoffe,
- Verminderung des Landschaftsverbrauches für Deponieflächen,
- Verwertung der Schlacken und Aschen in der Bauindustrie (Straßen-, Wegebau),
- Senkung der Transportkosten durch geringere Anzahl an Abfahren und
- Nutzbarmachung der im Klärschlamm enthaltenen Energie für die Wärme- und Stromerzeugung (für die selbstgängige Verbrennung innerhalb der DKVA).

Ist beispielsweise der Heizwert¹¹ eines Sekundärschlammes mit 17 MJ je kg Glühverlust festgelegt, ist bei Berücksichtigung des Glühverlustanteils von 80 % mit einem Heizwert von $H_i = 17 \text{ MJ/kg} \cdot 0,8 = 13,6 \text{ kJ/kg}$ zu rechnen. Wird dann aufgrund der genaueren Betrachtung zusätzlich der Trockenrückstand von 6 % (als Nassschlamm) beachtet, ist demnach von einem Heizwert von $H_i = 13,6 \text{ MJ/kg} \cdot 0,06 = 0,82 \text{ MJ/kg}$ (bezogen auf KS mit Wasseranteil) auszugehen. Das reicht aber allerdings nicht aus, um das im KS befindliche Wasser zu erwärmen und zu verdampfen.

Um 1 kg Wasser mit einer Temperatur von 15 °C in den dampfförmigen Zustand zu überführen ist bei Luftdruck von 1 bar zunächst die Erwärmung auf die Siedetemperatur von 100 °C erforderlich. Dabei ist eine spezifische Wärmemenge $q = c_w \cdot (t_2 - t_1) = 4,19 \text{ kJ/kgK} \cdot (100 - 15) \text{ K} = 356 \text{ kJ/kg}$ notwendig. Anschließend erfolgt die Verdampfung. Die dazu benötigte spezifische Verdampfungswärme (Differenz der beiden Enthalpien¹² des Sattdampfes h'' und der gesättigten Flüssigkeit h') beträgt $r = h'' - h' = (2.676 - 417) \text{ kJ/kg} = 2.259 \text{ kJ/kg}$. Schlussfolgernd wird eine Gesamtwärmemenge von 2.615 kJ pro kg Wasser (entspricht ca. 0,73 kWh / kg) benötigt um es zu verdampfen.

¹¹ Mittelwert nach Ingenieurbüro für Abwassertechnik Payer GmbH, Erfurt, 2008

¹² [WAL88], Tabelle „Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf bei Sättigung nach Wukalowitsch“, S.198, siehe Anhang 4

Für die selbstgängige Verbrennung des KS muss sein Wassergehalt vermindert und der Heizwert¹³ im Verhältnis erhöht werden. Beispielsweise stellt sich bei einer Teiltrocknung auf einem TR von 50 % (und GV bleibt gleich 80 %) ein Heizwert von $H_i = 17 \text{ MJ/kg} \cdot 0,8 \cdot 0,5 = 6,8 \text{ MJ/kg}$ Originalsubstanz ein. Ableitend ist festzustellen, dass KS mittels vorgeschalteter mechanischer Entwässerung und/oder mit thermischer Trocknung behandelt werden muss.

3.2 Beschreibung des Schlammbehandlungsablaufes

Das verfahrenstechnische Ziel ist es, einen aus der Abwasserbehandlung stammenden (aerob stabilisierten) Überschussschlamm so in seiner stofflichen Eigenschaft zu verändern, dass er unbedenklich als Schlammasche auf Deponien abgelagert werden kann.

Alle die für die thermische Behandlung des Klärschlammes benötigten Komponenten sind in zwei 40 ft ISO Normcontainer untergebracht. Zu den vier Hauptbestandteilen zählen die Schlammmentwässerungsmaschine, die Schlamm Trocknungsanlage, der Verbrennungskessel mit Wärmerückgewinnung und die Rauchgasreinigungsanlage mit anschließendem Kamin. Des Weiteren ist ein abgetrennter Raum in einem der Container für die Messung und Erfassung der Rauchgasseitigen Emissionen gemäß 17. BImSchV vorgesehen. Der grundlegende Aufbau ist in dem Verfahrensfließbild in Abbildung 3.2 dargestellt.

Bevor der Klärschlamm selbständig verbrennen kann muss sein Wassergehalt vermindert werden (s. Abschnitt 3.1). Dazu durchläuft der KS zuerst die Schlammmentwässerungsmaschine. Der Nassschlamm wird über ein Pumpenaggregat aus dem bei der Kläranlage vorhandenen Schlammsilo mit einem Wassergehalt von 96 % (entspricht TR 4 %) angesaugt und in der Dekantierzentrifuge (s. Abschnitt 3.4) auf einen WG von 76 % (TR 24 %) entwässert. Das Presswasser fließt zurück in den Kläranlagenzulauf und der entwässerte Schlamm wird mittels Spiralfördersystem in einen Trichter zum Zwischensilo

¹³ [DRÄ04], „Mindestheizwert für selbstgängige Verbrennung 4,5 bis 5,5 MJ/kg Originalsubstanz“

abgeworfen. Anschließend folgt der Austrag am unteren Ende des Silos und der KS gelangt über ein weiteres Spiralfördersystem zur thermischen Trocknung.

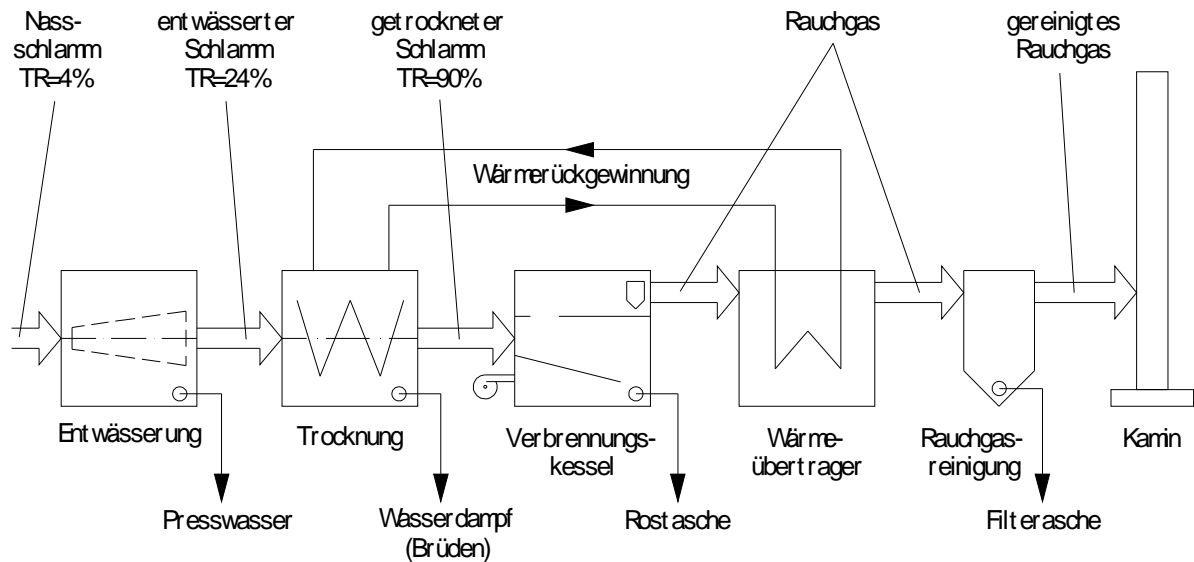


Abbildung 3.2: Prinzip Verfahrensfliessbild¹⁴

Die Trocknungsanlage (s. Abschnitt 3.5) basiert auf der Verfahrensweise eines Spiraltrockners bzw. Schneckentrockners. Der entwässerte Schlamm wird in einer beheizten Wanne mittels einer innen beheizten Hohlschnecke langsam bewegt und dabei getrocknet auf einen Wassergehalt von 10 % (TR 90 %). Die entstehende wasserdampfhaltige Luft (Brüden) wird in das Belebungsbecken der Kläranlage abgeleitet. Dort findet seine Kondensation bzw. Desodorierung (Beseitigung von Geruchsemissionen) statt. Die benötigte Trocknungswärme wird mittels eines Wärmerückgewinnungssystems (Wärmeträgermedium Thermoöl) vom Verbrennungskessel zum Trockner transportiert. Durch eine Förderschnecke erfolgt die kontinuierliche Weiterleitung des getrockneten Schlammes, als Granulat, zu dem anschließenden Einwurftrichter des Verbrennungskessels.

Im Verbrennungskessel (s. Abschnitt 3.6) befindet sich eine Vorschubrostfeuerung. Durch Vor- und Rückwärtsbewegungen der einzelnen Rostelemente durchwandert das allmählich verbrennende Schlammgranulat langsam den Brennraum

¹⁴ eigene Darstellung

indem gemäß 17. BImSchV¹⁵ eine Mindesttemperatur von 850 °C einzuhalten ist. Sollte durch einen zu hohen Anteil an anorganischem Material die Verbrennungstemperatur unter den Mindestwert sinken, schaltet automatisch der Stützbrenner (Ölbrenner) zu, um die Temperatur im Arbeitsbereich (ca. 1000 °C) zu halten. Die auf dem Rost entstehende, zur Schlackenbildung neigende, Rostasche wird über einen Schlackenbrecher aufgenommen und so zerkleinert, dass sie über Förderschnecken gehoben und in Container abgeworfen werden kann.

Nach dem Verlassen des Verbrennungsraumes werden die heißen Rauchgase über einen Rohrbündelwärmeübertrager (s. Abschnitt 4.2.5) geleitet. Dort geben sie ihre Wärme ab und kühlen herab bis auf 300 °C. Die übertragene Wärme dient zum Aufheizen des Thermoöls und der Verbrennungsluft. Anschließend folgt die Rauchgasreinigung (s. Abschnitt 3.7) im Wirbelschichtreaktor. Durch die Zugabe von Sorbalit (Kalkhydrat und Aktivkohle) bildet sich im heißen Zustand eine basische Atmosphäre heraus, welche die Schadstoffe (besonders Schwefeloxide, Fluor- und Chlorwasserstoffverbindungen) bindet. Im danach geschalteten Keramikfeinstaubfilter werden die in der Flugasche und die im Sorbalit gebundenen Schadstoffe abgeschieden und entsorgt. Das gereinigte Rauchgas kann dann über einen Schornstein an die Atmosphäre abgegeben werden.

Unter Betriebsbedingungen läuft die Anlage vollautomatisch und bedarf keiner ständigen Überwachung. Die Antriebe der Schlammwässerung, des thermischen Trockners und des Kesselrostes sowie die Antriebe der Belüfter sind über Frequenzumformer stufenlos regelbar, um eine eventuelle Anpassung an wechselnde Schlammqualitäten zu erreichen.

Zum Starten der Anlage wird zunächst der Ölbrenner auf 850 °C angeheizt. Dabei beginnt auch die Schlammwässerungsmaschine mit der Arbeit. Der entwässerte Schlamm gelangt erst in die Trocknung, wenn der Wärmeübertrager mittels Thermoöl die entsprechende Trocknungstemperatur erreicht. Dies geschieht bei ca. 1000 °C im Kessel. Nachdem der KS die Trocknung durchlaufen hat wird er in den Verbrennungskessel gegeben. Durch die dort vorhandene Temperatur beginnt er

¹⁵ § 4 Abs. 2, 17. BImSchV

sofort zu verbrennen. Der Ölbrenner fährt in seiner Leistung herunter und dient schließlich als Unterstützfeuer. Beim Abfahren der Anlage muss zur Aufrechterhaltung der Verbrennungsbedingungen der Brenner so lange betrieben werden, bis sich kein KS mehr im Feuerraum befindet.

3.3 Normcontainer

Sämtliche notwendige Komponenten zur thermischen Behandlung des Klärschlammes sind in den zwei Normcontainern installiert. Im ersten Container befinden sich die Schlammwässerungsmaschine (inkl. einer kontinuierlichen Polymeraufbereitungsanlage) und der thermische Trockner. Zusätzlich sind noch verschiedene Schlammförderungseinrichtungen und die notwendige Peripherie zur Regelung und Überwachung der Anlagen vorhanden. Der Verbrennungskessel mit Anfahr- und Stützbrenner, Verbrennungsluftgebläse, Heizöllagertank, Rauchgaswärmeübertragung und der Rauchgasreinigung sind im zweiten Normcontainer angeordnet. Des Weiteren ist im selbigen Container an der Stirnseite, in einem abgetrennten Raum, die Mess- und Überwachungseinrichtungen gemäß 17. BImSchV sowie die Leitzentrale des gesamten Systems untergebracht.

Neben den Vorteilen der Mobilität, d. h. in kürzester Zeit bundesweit agieren zu können, stellt sich mit der Nutzung eines Containers auch eine Flexibilität ein, die bei stationären Anlagen nicht der Fall ist. Innerhalb des Containers sind zwar die Raumzwänge als nachteilig zu bewerten, jedoch können durch das Einbringen von Wand- und Deckenöffnungen an allen Seiten z. B. Reparatur- und Ersatzteilaustauscharbeiten vollzogen werden. Durch die standardisierten Abmessungen ist ein problemloser Transport im Straßenverkehr (keine Sondergenehmigungen für Schwerlasttransport notwendig) möglich. Des Weiteren ist kein separater Witterungsschutz am Einsatzort für die Komponenten nötig.

Zum Einsatz kommt der ISO Normcontainer vom Typ 40 ft High Cube mit folgenden Abmaßen bzw. Daten nach Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Abmaße ISO Normcontainer

Länge	[mm]	12.192 (Außenmaß) ^{a)}	12.069 (Innenmaß) ^{b)}
Breite	[mm]	2.438 (Außenmaß) ^{a)}	2.300 (Innenmaß) ^{b)}
Höhe	[mm]	2.890 (Außenmaß) ^{a)}	2.709 (Innenmaß) ^{b)}
Eigengewicht	[kg]	4.300	
Rauminhalt	[m ³]	76	
Türöffnungsmaß	[mm]	2.300 x 2.550 (Breite x Höhe)	

^{a)} Außenmaß nach DIN ISO 668 „ISO-Container der Reihe 1 – Klassifikation, Maße, Gesamtgewichte“

^{b)} Innenmaß nach BCS Containersystem e.K., Daxweiler, <http://www.containersystem.de>, 2008

Nach Herstellerangaben¹⁶ ist eine Zuladung von max. 28 Tonnen möglich.

3.4 Maschinelle Entwässerung

Zur Realisierung der ersten Behandlungsstufe (maschinelle Entwässerung) des Klärschlammes kommt die Dekantierzentrifuge (auch genannt Vollmantelschneckenzentrifuge oder nur Dekanter) zum Einsatz. Sie arbeitet nach dem Prinzip der Fliehkraftabscheidung und ermöglicht einen kontinuierlichen Betrieb. Hierbei ist besonders wichtig, dass gleich bleibende Prozessbedingungen, gleichmäßiger Durchsatz und Klärschlammbeschaffenheit gewährleistet ist. Ansonsten kann es zu Unregelmäßigkeiten (z. B. Leerlauf, Entwässerungsgrad) kommen. Nach Herstellerangaben¹⁷ hängt ein TR-Gehalt im Austrag der Zentrifuge von Parametern, wie z. B. dem Temperaturverhältnis beim Stabilisierungsprozess, des freien Wasseranteils, des pH-Wertes und des anorganischen Anteils ab.

Das Ziel der Entwässerung ist eine Volumen- und Gewichtsreduzierung bei gleichzeitiger Erhöhung des Feststoffgehalts sowie im weiteren Sinne eine Einsparung von, zur Wasserverdampfung, benötigter Wärme im nachgeschalteten Trockner.

¹⁶ BCS Containersystem e.K., Daxweiler, <http://www.containersystem.de>, 2008

¹⁷ Westfalia Separator Industry GmbH, Abteilung Mechanische Trenntechnik, Oelde, 2008

Das im Klärschlamm enthaltene Wasser kann mit den Feststoffen verschiedenartig gebunden sein. Man gliedert in drei verschiedenen Hauptwasseranteilen:

- Zwischen- und Hohlraumwasser, auch freies Wasser (ca. 70 bis 85 Vol.-%),
- Haft- und Kapillarwasser (ca. 10 bis 22 Vol.-%) und
- Adsorptions- und Oberflächenwasser (ca. 5 bis 8 Vol.-%).

Es ist zu Bemerkem, dass es nur möglich ist mit der maschinellen Entwässerung das freie Wasser abzutrennen.

Vor der Einleitung des Nassschlammes in die Zentrifuge muss, durch die Konditionierung, die starke Bindung des Schlammwassers zu den Feststoffen gelockert werden, um einen besseren und beschleunigten Entwässerungsvorgang zu erreichen. Abgesehen von unterschiedlichen Konditionierungsgrad ist das Verfahren auf alle KS anwendbar. Zum Einsatz kommt die chemische Konditionierung, bei der chemische wirkende organische Flockungsmittel (Polyelektrolyte) in dosierter, verdünnter Form zugesetzt werden. Im Gegensatz zu anorganischen Flockungsmitteln (z. B. Eisen- und Aluminiumsalze) erhöht sich nicht der unverbrennbare Anteil (Ascheanteil) im entwässerten Schlamm.

Die Dekantierzentrifuge wird mittels eines undurchlässigen Trommelmantels nach außen abgegrenzt. Durch Einwirkende Fliehkräfte bzw. Zentrifugalkräfte werden Wasser und Schlammstoffe voneinander getrennt. Der zu entwässernde Schlamm gelangt über ein feststehendes Zulaufrohr in die Trommel und wird dort beschleunigt. Innerhalb der rotierenden Trommel erfolgt so eine Schichtung an die Wand nach dem spezifischen Gewicht. Außen sind die schweren mineralischen Schlammanteile, dann folgen nach innen zu die leichten organischen Stoffe und ganz innen das Schlammwasser. Mit unterschiedlicher Drehzahl rotieren Schnecke und Trommel in gleicher Drehrichtung. Dadurch gelangen die Feststoffe (Filterkuchen) zum konisch zulaufenden Trommelende und werden aus den Austragsbuchsen abgeführt. Die geklärte Flüssigkeit (Zentrat) läuft in entgegen gesetzter Richtung über verstellbare Wehre ab (siehe Abbildung 3.3).

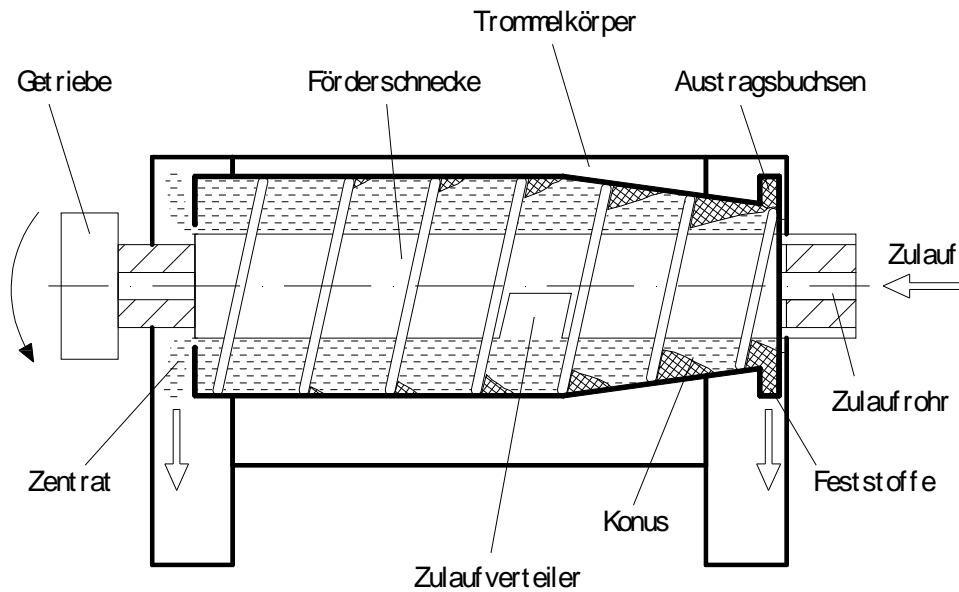


Abbildung 3.3: Dekantierzentrifuge¹⁸

Zur Anwendung kommt die Vollmantelzentrifuge Typ ALDEC 20 (im Systemverbund Typ ALSYS 20) der Firma Alfa Laval Mid Europe GmbH. Das Angebot bzw. technische Datenblatt befindet sich im Anhang 6. Die vorgegebene Schlamm entwässerung auf TR 24 % (vgl. Abschnitt 4.2.2) kann bei gegebenem aerob stabilisiertem Klärschlamm erreicht werden. Da allerdings die TR-Gehalte je Schlammqualität unterschiedlich sind, können nur durch eine Schlammuntersuchung oder nach einem Entwässerungsversuch die Leistungswerte genau festgestellt werden. Alle benötigten Komponenten sind bereits auf einer Plattform montiert und vom Hersteller getestet. Dazu gehören neben der Zentrifuge, eine kontinuierliche Polymer-Aufbereitungsanlage, eine Schaltanlage zur Regelung und Überwachung der Anlage und eine Trogförderschnecke zur Abförderung des Schlammes.

¹⁸ eigene Darstellung, Grundlage „Hochleistungs-Dekanter“ von Alfa Laval Mid Europe GmbH, Glinde, 2008

3.5 Thermische Trocknung

Bei der Anwendung von mechanischer Klärschlammwässerungstechnik ist es nicht möglich, dass im KS enthaltene Wasser vollkommen zu beseitigen. Um dennoch das Restwasser weitestgehend aus dem KS zu entfernen, d. h. es verdampfen bzw. verdunsten zu lassen, ist es notwendig Energie in Form von Wärme zu zuführen. Die erforderliche Menge an Wärmeenergie (ca. 0,73 kWh / kg Wasser) kann durch verschiedene Wärmequellen (z. B. Primärenergieträger, Abwärme von Blockheizkraftwerken, Nutzung von Solarenergie oder Wärmepumpen) bereitgestellt werden. Genutzt wird die in den Rauchgasen beinhalten Wärme, die bei dem Betrieb des KS-Verbrennungssofens anfällt. Über ein Wärmerückgewinnungssystem gelangt sie zu dem Trockner.

Durch den Einsatz eines thermischen Trockners ergeben sich folgende Vorteile:

- Verringerung der Klärschlammmenge,
- bessere Lager- und Transportfähigkeit,
- bessere Förder- und Dosierbarkeit,
- mikrobiologische Stabilisierung und hygienische Unbedenklichkeit und
- Erhöhung des Heizwertes.

Prinzipiell sind die thermischen Trocknungsverfahren, je nach Art des Wärmeüberganges, in direkte und indirekte Verfahren unterteilt. Bei dem Direkttrockner (auch Konvektionstrockner) kommt der zu trocknende KS unmittelbar mit dem Wärmeträger (Luft oder Rauchgase) in Kontakt. Die dabei entstehenden Brüden (Gemisch aus Wasserdampf, Luft und dem KS ausgetriebenen Gasen) und Rauchgasen müssen einer Reinigung (Entstauber sowie zur Beseitigung von Geruchsstoffen einer Nachverbrennungsanlage oder einem Wäscher) unterzogen werden. Einzusetzen wären u. a. Trommeltrockner, Bandtrockner und Wirbelschichttrockner.

Bei dem Indirektrockner (auch Kontaktrockner) erfolgt die Übertragung der Wärmeenergie von indirekt beheizten Oberflächen auf den zu trocknenden Schlamm. D. h. Wärmeträgermedium (Thermoöl) und KS sind dabei getrennt. Es kommt somit

zu keiner Vermischung von Wärmeträger und entstehenden Brüden. Eine erleichterte Reinigung der Brüden, in Gegensatz zum Direktrockner, stellt sich ein. Beispiele sind Schneckenrockner, Scheibentrockner und Dünnschichtrockner.

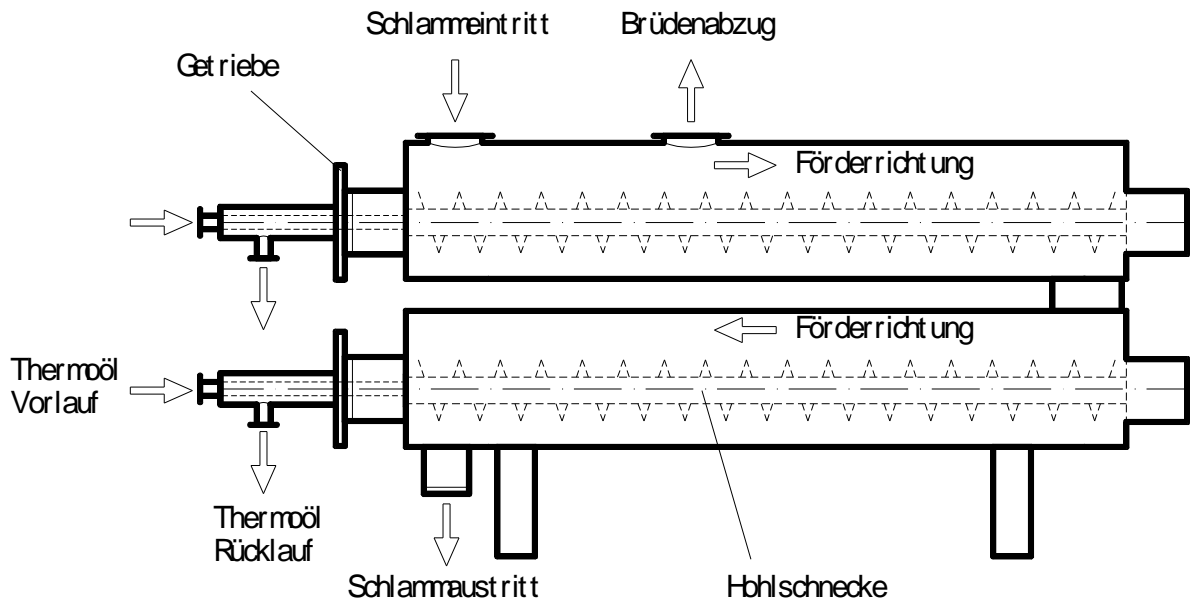


Abbildung 3.4: Zweistufiger Schneckenrockner¹⁹

Zur Anwendung kommt der zweistufige Schneckenrockner Typ RSD 2-600 von der Firma Rosoma GmbH (Abbildung 3.4). Das Angebot bzw. technische Datenblatt befindet sich im Anhang 7. Der vorgegebene Trocknungsgrad auf 90 % TR (vgl. Abschnitt 4.2.3) wird realisiert. Mittels des Spiralfördersystems gelangt der entwässerte Schlamm in den seitlich angebrachten Eingabeschacht. Das Thermoöl (Vorlauftemperatur 280 °C) als Wärmeträgermedium beheizt die Schneckenröhre, die Schneckenwendel und die Schneckenrohre. Es wird eine optimale Heizfläche bei kompakter Bauweise erreicht. Durch die langsame Bewegung der beheizten Hohlschnecke wird der Schlamm an die allseitig beheizten Flächen vorbei bewegt und dabei getrocknet. Am unteren Gehäuse wird der getrocknete Schlamm (Schlammtemperatur ca. 50 °C) durch eine verschließbare Ausfallöffnung ausgeworfen und gelangt über ein Spiralfördersystem zum Verbrennungskessel. Im ganzen Trockner herrscht Unterdruck um die geruchsintensiven Brüden nicht

¹⁹ eigene Darstellung, Grundlage „Trockner RSD 2-600“ von Rosoma GmbH, Rostock, 2008

austreten zulassen. Die Brüden (ca. 150 °C) werden im oberen Teil durch geschlossene Leitungen mittels eines Seitenkanalverdichters abgesaugt und zu dem Belüftungssystem des Belebungsbeckens oder des belüfteten Sandfangs geführt. Dort werden sie direkt in das Becken eingeblasen. Beim Kontakt mit dem vorhandenen Wasser beginnen die Brüden zu kondensieren bzw. zu desodorieren (Entfernung von Geruchsemissionen).

3.6 Verbrennungskessel

Die Verbrennung des Klärschlammes gewährleistet die Zerstörung der organischen Bestandteile bzw. Schadstoffe und dient somit der Voraussetzung für die Deponieablagerung (GV < 5 %). Des Weiteren ist durch den Energiegehalt des Klärschlammes eine selbstgängige Verbrennung möglich.

Bei der DKVA kommt eine automatisch beschickte Feuerung mit Vorschubrost zum Einsatz. Der Brennstoff getrockneter Klärschlamm gelangt zerkleinert und granulatähnlich zur Feuerstätte und kann dort kontinuierlich bei gleicher, konstanter Leistung verbrannt werden. Die Luftmengendosierung sorgt für eine gleich bleibende Temperatur im Feuerraum. Zudem stellt sich durch den gleichmäßigen Betrieb eine gleichmäßige und relativ geringe Schadstofffreisetzung ein.

Bei einer Vorschubrostfeuerung (Abbildung 3.5) durchwandert das getrocknete und allmählich verbrennende Schlammgranulat auf den einzelnen schräg stehenden Vorschubrostelementen, welche Vor- und Rückwärtsbewegungen ausüben, langsam den Brennraum. Am Anfang des Rostes erfolgt die weitere Trocknung des Schlammes. Im mittleren Bereich findet die pyrolytische Zersetzung und Vergasung und zum Schluss im letzten Bereich der Ausbrand statt. Am unteren Ende (Rostende) erfolgt dann die automatische Entaschung. Die zur Schlackenbildung neigende Rostasche wird über einen Schlackenbrecher aufgenommen und so zerkleinert, dass sie über Förderschnecken gehoben und in Container abgeworfen werden kann.

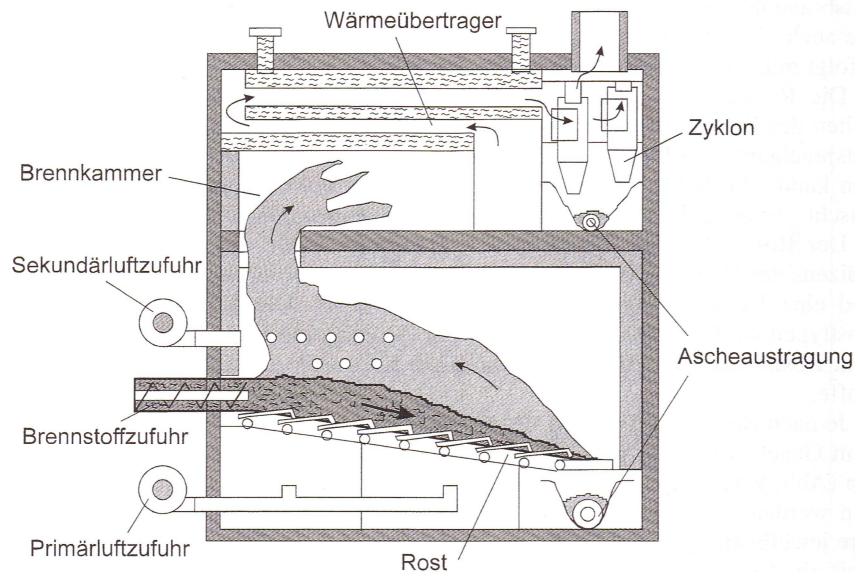


Abbildung 3.5: Vorschubrostfeuerung nach dem Gegenstromprinzip²⁰

Die Menge und die Verteilung der Verbrennungsluft über dem Feuerraum sind von entscheidender Bedeutung, da die Luft mehrere Aufgaben gleichzeitig erfüllen muss. Sie stellt u. a. den für eine vollständige Verbrennung erforderlichen Sauerstoff zur Verfügung, ist die wichtigste Regelgröße zur Erzielung gleichmäßiger Verbrennungsbedingungen bei schwankender Klärschlammqualität, dient zur Durchmischung der Rauchgase und als Kühlmedium für Bauteile der Feuerstätte.

Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft unterhalb des Rostes eingeblasen und erfüllt auch die Funktion der Rostkühlung (Verminderung Schlackenanbackungen und Materialüberhitzung). Allerdings sind durch eine verbrennungsoptimierte Luftmengenregelung dieser Kühlfunktion Grenzen gesetzt. Durch bauseitige Spalten zwischen den Rosten wird luftseitig ein Widerstand aufgebaut, wodurch eine gleichmäßige Verteilung der Verbrennungsluft über die jeweilige Rostfläche erreicht wird. Die Sekundärluft wird oberhalb des Rostes zugeführt und stellt den für eine vollständige Verbrennung der Rauchgase benötigten Sauerstoff bereit.

²⁰ [KAL01], Abb. 9.39, S. 349

Es ist nach 17. BImSchV²¹ eine Mindesttemperatur von 850 °C im Verbrennungsraum bei einer Mindestverweilzeit von Zwei Sekunden einzuhalten. Sollte durch einen zu hohen Anteil an anorganischem Material die Verbrennungstemperatur unter den Mindestwert sinken, schaltet automatisch ein Stützbrenner zu, um die Temperatur im Arbeitsbereich zu halten. Daneben sichert er die Mindesttemperatur beim Abfahren der Anlage, solange sich noch Brennstoff auf dem Rost befindet. Bei Temperaturen unter 850 °C kann es zu Geruchsemissionen und bei über 1200 °C zu Versinterung der Asche (Schlackenbildung) kommen. Die eingesetzten Zünd- und Stützbrenner sind für den Betrieb mit Heizöl ausgeführt.

3.7 Rauchgasreinigung

Zur Verminderung und Vermeidung von Emissionen die schädlich auf die Umwelt einwirken, sind nach 17. BImSchV Anforderungen an die Verbrennungsanlage gestellt. Die DKVA ist so zu errichten und zu betreiben, dass kein Tagesmittelwert und kein Halbstundenmittelwert die Emissionsgrenzwerte nach Tabelle 3.2 überschreiten. Die Messwerte werden kontinuierlich ermittelt, registriert und ausgewertet.

Zunächst dient ein Zyklon als Vorabscheider, der im Rauchgasstrom dem Wärmeübertrager nachgeschaltet ist. Die, bei der Verbrennung von Klärschlamm, freigesetzte Staubemission setzt sich zusammen aus Aschepartikeln sowie Ruß und unverbrannten Stoffen (letztere sind durch eine vollständige Verbrennung zu vermeiden). Die Abscheidung beruht auf dem Prinzip der Fliehkraft. Das Rohgas (Heißgas) wird auf eine Kreisbahn gezwungen. Durch die Kreisbewegung schleudern die Partikel wegen ihrer Trägheit radial an die Zyklonwandung und gelangen mittels Unterstützung der Gasströmung zum unteren Ende des Zyklons. Dort werden sie abgeschieden und das vom Staub befreite Heißgas steigt durch ein Tauchrohr nach oben, wodurch es abgeführt wird. Abhängig ist der Entstaubungsgrad eines Rohgases von der Geometrie des Zyklons sowie von der Größe und Dichte der Partikel.

²¹ § 4 Abs. 2, 17. BImSchV

Tabelle 3.2: Emissionsgrenzwerte für die Verbrennungsanlage²²

Schadstoff	Tagesmittelwert ^{a)} [mg / m ³]	Halbstundenmittelwert ^{a)} [mg / m ³]
Gesamtstaub	10	30
organische Stoffe	10	20
gasförmige anorganische Chlorverbindungen	10	60
gasförmige anorganische Fluorverbindungen	1	4
Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid	50	200
Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid	200	400
Quecksilber und seine Verbindungen	0,03	0,05
Kohlenmonoxid	50	100

^{a)} bezogen auf das Abgasvolumen im Normzustand (273 K , 1013 mbar) nach Abzug des Feuchtegehaltes an Wasserdampf und auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von 11 %

Nach der Vorentstaubung des Rauchgases erfolgt seine Konditionierung. Durch Wassereindüsung im Verdampfungskühler wird die Temperatur gesenkt und der Wasserdampfgehalt steigt an. Eine Verbesserung der Sorptionsfähigkeit ist die Folge. Jedoch muss aus Verstopfungs- und Korrosionsschutzgründen ein gewisser Abstand zum Taupunkt gewahrt bleiben.

Bei der konditionierten Trockensorption wird in den Wirbelschichtreaktor Sorbalit eingebracht. Sorbalit ist ein aus Kalkhydrat und Aktivkohle bestehendes homogenes Gemisch. Das Kalkhydrat nimmt besonders die sauren Schadgase Fluorwasserstoff, Chlorwasserstoff und Stickstoffdioxid auf und reagiert mit diesem irreversibel zu deponierfähigen Endprodukten. Daneben nimmt die Aktivkohle die flüchtigen Schwermetalle (hauptsächlich Quecksilber und Cadmium), polychlorierte Dibenzodioxine und -furane und schwerflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe an sich.

²² § 5 Abs. 1, 17. BImSchV

Für gute Abscheidegrade sind verfahrenstechnisch folgende Voraussetzungen zu schaffen:

- gute Durchmischung der Adsorbenspartikel mit dem Rauchgas,
- Erzeugung einer ständig neuen reaktionsfähigen Oberfläche und
- einer hohen Adsorbensdichte im Rauchgas.

Das Gemisch aus Reststaub, Reaktionsprodukten und nicht abreagiertem Kalkhydrat wird im Staubfilter abgeschieden und entsorgt. An dem aufbauenden Filterkuchen findet ebenfalls ein Teil der Reaktion statt. Ein Anteil des abgeschiedenen Materials wird dem Wirbelschichtreaktor rückgeführt. Zum Einsatz kommt ein Schlauchfilter mit Keramikeinsatz (Keramikfeinstaubfilter). Dieses Filtermedium auf anorganischer, mineralischer Basis ist chemisch sehr beständig und nicht brennbar (Einsatztemperatur bis 450 °C). Das gereinigte Rauchgas kann dann über einen Schornstein an die Atmosphäre abgegeben werden. Für die Rauchgasreinigung ist im Container ein Platzbedarf von 3,9 m Länge und 2,2 m Breite zugrunde gelegt wurden.

3.8 Förderungstechnik

Bei der Förderung des Klärschlammes, zu den einzelnen Behandlungsapparaten, kommen mechanische Systeme zum Einsatz. Dabei kann unterschieden werden in durch Berührung mitreißende Systeme oder ohne Schlupf und ohne Reibung transportierende Systeme. Letztere genannte stellen die Förderbänder oder die Kettenförderer dar. Sie sind geeignet für horizontale oder bei profiliertem Gurt, für leicht geneigte Förderstrecken. Aufgrund der ungünstigen Realisierung von Übergabestellen an andere Maschinen kommen sie nicht zum Einsatz.

Zur Anwendung kommen die Spiralförderer (auch als Schneckenförderer bezeichnet). In Abbildung 3.6 ist ein Spiralförderer dargestellt. Sie werden insbesondere bei kleinen Durchsatzmengen für die Lagerbeladung und die Lagerentnahme als auch zur Beschickung von Schlammbehandlungsapparaten eingesetzt. Der Förderdurchsatz ist dabei unter anderem von der Neigung (bis 30°

nach Herstellerangabe) der Förderstrecke abhängig, was wiederum die Füllhöhe zwischen den Schneckenwindungen bestimmt.

In einem Rohr gleitet eine starkwandige Spirale auf einer verschleißarmen Einlage aus hochmolekularem Kunststoff. Die Spirale kann dabei mit oder ohne Welle ausgeführt sein. Bei einem Wellenlosen System sind bis zu einem gewissen Grad Rohrbögen möglich. Die Förderspirale kann einachsig (begrenzt die maximale Länge auf Zwei Meter) oder zweiachsig gelagert sein. Die Art und Konsistenz des Fördergutes KS, die erforderliche Förderleistung, Förderlänge und -steigung bedingen konstruktive Details die individuell vom Hersteller angepasst werden müssen.

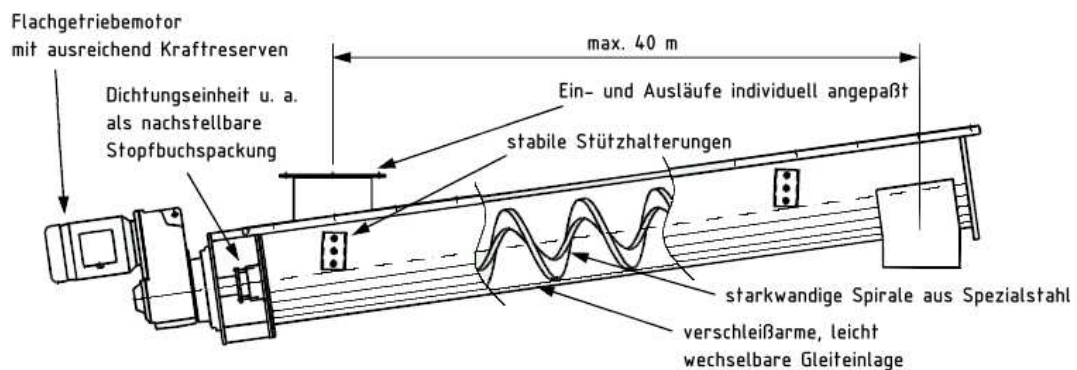


Abbildung 3.6: Starre Förderschnecke²³

Zum Einsatz kommen Zehn Förderungssysteme um den Klärschlamm bzw. die Klärschlammasche zu transportieren. Zur Beschickung des Zwischensilos ist die zur Entwässerungsmaschine dazugehörige Trogförderschnecke vorgesehen (bauseitige Längenkürzung notwendig). Der thermische Trockner wird direkt mit einer einachsig gelagerten Förderschnecke, die axial zum Schlammeingabeflansch ausgerichtet ist befüllt. Um den Weg, zwischen Trockner und Verbrennungskessel (d.h. zwischen den beiden Containern) zu überbrücken, kommt eine mobile Förderungsanlage zum Einsatz, welche je nach Aufstellungs- und Platzbedingungen der DKVA angepasst werden kann. Für den Schlammasche- bzw. den Filterascheaustrag sind weitere Drei Schnecken vorgesehen, welche die entsprechenden Aschecontainer befüllen.

²³ „Puratek-Spiralförderer“, Puratek Anlagentechnik GmbH, Marktredwitz, 2008

4. Auslegung der Behandlungskomponenten

4.1 Stoff- und Grundwerte für Berechnungen

Für die Berechnung der Auslegungsvorgaben der Schlammbehandlungsapparate sind für Energie- und Mengenbilanzen Stoff- und Grundwerte für die spezifische Wärmekapazität, der Heizwert, der Dichte usw. von Wasser, Luft, Rauchgasen und Feststoffen von Bedeutung. Alle verwendeten Werte sind im Anhang 4 aufgelistet, wenn nicht anders angegeben.

Als Wärmeträgerflüssigkeit wird das THERMINOL® 66²⁴ verwendet. Im Anhang 5 befindet sich das entsprechende Datenblatt.

Als Basis für den Berechnungsablauf dient das Verfahrensfließbild²⁵. Die Dimensionierung der Rauchgasreinigungsanlage einschließlich des Schornsteins ist nicht erfolgt.

Die mittlere spezifische Wärmekapazität eines Stoffes bei Wärmezufuhr- oder Wärmeabfuhr ist von der Temperatur abhängig. Bei Temperaturdifferenzen kleiner 200 K kann sie vernachlässigt werden [WAL88]. Hingegen sie bei Temperaturdifferenzen größer 200 K nach Gleichung (4.1) ermittelt wird.

$$c_m = c_{|t_1}^{t_2} = \frac{c_{|0}^{t_2} \cdot t_2 - c_{|0}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

Die Berechnungen sind auf dem stationären Fall bezogen. Sämtliche Randbedingungen bleiben konstant und sind als gleich bleibend anzusehen, wie zum Beispiel Massestrom, End- und Ausgangstemperatur.

²⁴ Thermoölhersteller: Fragol Schmierstoff GmbH & Co.KG, Mülheim

²⁵ siehe Abbildung 3.2: Prinzip Verfahrensfließbild, S. 17

4.2 Ermittlung der Auslegungsdaten

4.2.1 Schlammanfall

Die Grundlage für die Dimensionierung der einzelnen Verfahrenskomponenten ist der stündlich zu behandelnde Klärschlamm. In Kläranlagen ist die Schlammmenge abhängig von dem Reinigungsverfahren und der angeschlossenen Einwohner. Analog wird bei der dezentralen Klärschlammverbrennungsanlage (DKVA) verfahren. Angegeben als Durchsatz wird die Menge aus der Anzahl der angeschlossenen Einwohner (häuslicher Schlamm) ermittelt. Nicht berücksichtigt in Form von Zuschlägen sind gewerbliche Abwasser, welche stark schlammhaltig sein können.

Die Bemessungsgrenze für den Einsatz der DKVA wird bei einem häuslichen Schlammanfall von maximal 50.000 angeschlossenen Einwohnern gesetzt. Kleinkläranlagen realisieren für diese Größenordnung die Abwasserreinigung. Es fällt dabei ein aerob stabilisierter Klärschlamm (Sekundärschlamm) an. Eine nachträgliche KS-Faulung findet, aufgrund der Heizwertminderung, keine Anwendung.

Die Ermittlung der durch die aerobe Abwasserbehandlung in Kläranlagen entstehende reine tägliche, spezifische Sekundärschlammfall KS_E (als Trockenmasse) je Einwohner ergibt sich nach Gl. (4.2):

$$KS_E = BSB_5 \cdot \ddot{U}S_{BSB5} \quad (4.2)$$

mit KS_E als der spezifische Klärschlammfall in kg / E d,

mit BSB_5 als der biologische Sauerstoffbedarf in 5 Tagen in kg BSB₅ / E d,

mit $\ddot{U}S_{BSB5}$ als die spezifische Überschussschlammproduktion in kg / kg BSB₅.

Der Wert des benötigten biologischen Sauerstoffbedarfes in 5 Tagen (BSB₅) beträgt für deutsche Verhältnisse bei Rohabwasser²⁶ 60 g / E d. Bei aeroben, stabilisierten

²⁶ [IMH99], Tabelle „Lastzahlen des Einwohners“, S.112

Schlamm wird von einer spezifischen Überschussschlammproduktion²⁷ von 0,9 kg Trockenmasse je kg BSB₅ ausgegangen.

$$KS_E = 0,06 \frac{\text{kg BSB}_5}{\text{E} \cdot \text{d}} \cdot 0,9 \frac{\text{kg}}{\text{kg BSB}_5} = \underline{\underline{0,054 \frac{\text{kg}}{\text{E} \cdot \text{d}}}}$$

Durch das Einsetzen der Zahlenwerte kommt ein KS-Anfall von 54 g Trockenmasse je Einwohner und Tag zusammen. Hochgerechnet auf ein Jahr sind das entsprechend 19,7 kg Trockenmasse je Einwohner und bei einem Anschluss von 50.000 Einwohnern entsteht somit ein Klärschlammgesamtanfall KS_{ges} von ca. 985 t m_T pro Jahr.

4.2.2 Maschinelle Entwässerung

Der maschinell zu entwässernde Schlamm hat einen Trockenmasseanteil (bzw. Trockenrückstand) von 4 % (entspricht 0,04 t Trockenmasse / t Nassschlamm). Bezogen auf die Gesamt anfallende KS-Trockenmasse von 985 t pro Jahr bei 50.000 Einwohnern fallen in etwa 25.000 t Nassschlamm gemäß Gl. (4.3) an.

$$KS_{Nass} = \frac{KS_{ges}}{TR} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

mit KS_{Nass} als der Nassschlammanfall in t / a,

mit KS_{ges} als der Klärschlammgesamtanfall in t / a,

mit TR als der Trockenrückstand in %.

Durch Einsetzen der Zahlenwerte folgt:

$$KS_{Nass} = \frac{985 \frac{\text{t m}_T}{\text{a}}}{4\%} \cdot 100\% = 24.625 \frac{\text{t}}{\text{a}} \approx \underline{\underline{25.000 \frac{\text{t}}{\text{a}}}}$$

²⁷ [IMH99], Tabelle „Bemessungstabelle für das Belebungsverfahren“, S.207

Bei der Annahme von 6.500 Betriebsstunden pro Jahr der DKVA und der zu entwässernden Menge von 25.000 t Nassschlamm kommt ein mindest Auslegungsdurchsatz von 3,85 t / h gemäß Gl. (4.4) zustande.

$$\dot{m}_{\text{Entwässerung}} = \frac{KS_{\text{Nass}}}{B_h} \quad (4.4)$$

mit $\dot{m}_{\text{Entwässerung}}$ als Durchsatz (Massestrom) der Entwässerung in t / h,

mit B_h als die Betriebsstunden in h / a.

Durch Einsetzen der Zahlenwerte folgt:

$$\dot{m}_{\text{Entwässerung}} = \frac{25.000 \frac{t}{a}}{6.500 \frac{h}{a}} = \underline{\underline{3,85 \frac{t}{h}}}$$

Die ausfallende Wassermenge ergibt sich aus der Differenz der Wassermassen vor und nach der maschinellen Entwässerung. Die Masse des Trockenanteils ist während des Entwässerungsvorganges konstant. Vorausgesetzt wird ein Wassergehalt vor der Entwässerung von 96 % (TR 4 %) bzw. nach der Entwässerung von 76 % (TR 24 %). Nach folgender Gl. (4.5) lässt sich der ausfallende Wassermassestrom berechnen.

$$\Delta \dot{m}_w = \dot{m}_1 \cdot \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} \quad (4.5)$$

mit $\Delta \dot{m}_w$ als der ausfallende Wassermassestrom in kg / h,

mit w_1 als der Ausgangswassergehalt in %,

mit w_2 als der Endwassergehalt in %,

mit \dot{m}_1 als der Ausgangsmassestrom in kg / h.

Durch Einsetzen der Zahlenwerte folgt:

$$\Delta \dot{m}_w = 3,85 \frac{t}{h} \cdot \frac{96-76}{100-76} = \underline{\underline{3,21 \frac{t}{h}}}$$

Somit ergibt sich der Wasserausfall zu 3,21 t / h. Zur Übersicht der Stoffbilanz dient folgende Zusammenstellung.

Vor der Entwässerung: 0,154 t / h Trockenmasse (4 %)
 + 3,696 t / h Wasser (96 %)
 = 3,850 t / h Nassschlamm

Nach der Entwässerung: 0,154 t / h Trockenmasse (24 %)
 + 0,486 t / h Wasser (76 %)
 = 0,640 t / h Entwässerter Klärschlamm

Die Zugabe der Flockungsmittel bleibt aufgrund der zu geringen Menge in der Stoffbilanz unberücksichtigt. Als Richtwert²⁸ für den spezifischen Polymerbedarf gilt 10 kg je t Trockenmasse. Somit fällt $10 \text{ kg} / \text{t} \cdot 0,154 \text{ t} / \text{h} = 1,54 \text{ kg} / \text{h}$ Flockungsmittel an. Bei 6.500 Betriebsstunden beträgt der Gesamtbedarf infolgedessen $1,54 \text{ kg} / \text{h} \cdot 6.500 \text{ h} / \text{a} = 10.010 \text{ kg} / \text{a}$.

Das Volumen des Nassschlammes wird durch die Entwässerung um 83 % reduziert.

4.2.3 Thermische Trocknung

Der zu trocknende Schlamm hat einen Trockenrückstand von 24 % (entspricht 0,24 t Trockenmasse / t Nassschlamm). Gemäß dem Durchsatz nach der maschinellen Entwässerung sind 640 kg / h Schlamm zu trocknen.

²⁸ Richtwert nach Alva Laval Mid Europe GmbH, Glinde, 2008

Die zu verdampfende Wassermenge ergibt sich aus der Differenz der Wassermassen vor und nach der thermischen Trocknung. Die Masse des Trockenanteils bleibt auch während des Trocknungsvorganges konstant. Vorausgesetzt wird ein Wassergehalt vor der Trocknung von 76 % (TR 24 %) bzw. nach der Trocknung von 10 % (TR 90 %). Gemäß Gl. (4.5) lässt sich die geforderte zu verdampfende Wassermenge berechnen.

$$\Delta \dot{m}_w = 0,64 \frac{t}{h} \cdot \frac{76-10}{100-10} = \underline{\underline{0,469 \frac{t}{h}}}$$

Somit ergibt sich der Wasserausfall zu 0,469 t / h. Zur Übersicht der Stoffbilanz dient folgende Zusammenstellung.

Vor der Trocknung: 0,154 t / h Trockenmasse (24 %)
 + 0,486 t / h Wasser (76 %)
 = 0,640 t / h Entwässerter Klärschlamm

Nach der Trocknung: 0,154 t / h Trockenmasse (90 %)
 + 0,017 t / h Wasser (10 %)
 = 0,171 t / h Getrockneter Klärschlamm

Die Brüden bzw. Abluft aus dem Trockner setzen sich zum Teil aus Wasserdampf, Luft und aus dem KS ausgetriebene Gase zusammen. Der Luftanteil²⁹ ist näherungsweise mit 15 % vom ausfallenden Wasser anzunehmen. Somit ergibt sich die Nebenluft zu $469 \text{ kg} / \text{h} \cdot 0,15 = 70 \text{ kg} / \text{h}$.

Für die Ermittlung der stündlich aufzubringenden Wärmeleistung zur Wasserverdampfung sind folgende Nennauslegedaten zu Grunde gelegt:

- Wassergehalt im entwässerten Schlamm von 76 %
- Wassergehalt im getrockneten Schlamm von 10 %
- Temperatur entwässertes Schlamm von 20°C

²⁹ Luftanteil nach Rosoma GmbH, Rostock, 2008

- Lufttemperatur von 20°C
- Verdampfungstemperatur Wasser von 100°C bei Luftdruck 1013 mbar
- Verdampfungswärme³⁰ Wasser von 2.259 kJ / kg \approx 628 Wh / kg bei 100°C
- mittlere spezifische Wärmekapazität Wasser von 4,19 kJ / kg K \approx 1,163 Wh / kg
- mittlere spezifische Wärmekapazität Trockenmasse von 1,05 kJ / kg K
- mittlere spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfes bei 100°C von 1,874 kJ / kg K
- Abstrahlungsverluste von 5 %

Die Ermittlung des dafür benötigten Wärmebedarfes geht grundlegend aus den Gleichungen (4.6) und (4.7) hervor.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.6)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot r \quad (4.7)$$

mit \dot{Q} als die Wärmeleistung in kJ / h,

mit \dot{m} als der Massestrom (Durchsatz) in kg / h,

mit c_p als die mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck in kJ / kg K,

mit t_1 als die Ausgangstemperatur in °C,

mit t_2 als die Endtemperatur in °C,

mit r als die Verdampfungswärme in kJ / kg.

Somit gilt für die Erwärmung des Wassers auf 100°C.

$$\dot{Q} = 486 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (100 - 20) \text{K} = \underline{\underline{162.907 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}}$$

³⁰ siehe Abschnitt 3.1

Erwärmung der ungelösten Stoffe (Trockenmasse) auf 100°C.

$$\dot{Q} = 154 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (100 - 20) \text{K} = \underline{\underline{12.936 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}}$$

Verdampfungswärme des Wassers bei 100°C.

$$\dot{Q} = 469 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 2.259 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \underline{\underline{1.059.471 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}}$$

Zusammen wird ein Wärmebedarf benötigt von 1.235.314 kJ / h \approx 343 kW.

Aus dem Erfordernis Abstrahlungsverluste von 5 % zu berücksichtigen ist eine Wärmeleistung für die Thermische Klärschlamm-trocknung von 360 kW notwendig.

Für extreme Fahrbedingungen, Anfahrphasen usw. wird zusätzlich die Überhitzung des Wasserdampfes auf die Brudentemperatur von 150°C berücksichtigt.

$$\dot{Q} = 469 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,874 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (150 - 100) \text{K} = \underline{\underline{43.945 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}}$$

Zusammen ist nun ein Wärmebedarf von 1.279.259 kJ / h \approx 355 kW erforderlich. Angesichts der Berücksichtigung von 5 % Abstrahlungsverlust ist für die Anfahrphase eine Wärmeleistung von 373 kW \approx 380 kW notwendig. Der ermittelte Wärmeleistungswert stellt aber nur den theoretischen Mindestwärmebedarf zur Wasserverdampfung dar.

Nach Herstellerangaben sind weitere Verluste beachtet wurden und es ist demgemäß von einer Trocknungsleistung³¹ von 900 kW je t Wasserverdampfung (entspricht 0,9 kW / kg) auszugehen. Für die Wasserverdampfungs-menge von 469 kg (bei Thermalölvorlauf-temperatur von 280 °C im Trockner) ist somit ein Wärmebedarf von 0,9 kW / kg \cdot 469 kg = 422 kW notwendig.

³¹ für Trockner Typ RSD 2-600, Rosoma GmbH, siehe Anhang 7

Der thermische Trockner benötigt eine Wärmeleistung von 422 kW bei vorgegebener Thermoölvorlauf­temperatur von 280 °C und Rücklauf­temperatur von 260 °C. Das ergibt nach Gl. (4.6) den Massestrom $\dot{m}_{T\ddot{o}}$ von 30.941 kg / h.

$$\dot{m}_{T\ddot{o}} = \frac{422 \text{ kW} \cdot 3600 \text{ s/h}}{2,455 \text{ kJ/kgK} \cdot 20 \text{ K}} = \underline{\underline{30.941 \text{ kg/h}}}$$

Die zur Auswahl der KS-Trocknungsanlage gewählten Nenn-Auslegungsdaten (Richtwerte) sind im Abschnitt 4.4 zusammengefasst.

4.2.4 Verbrennungskessel

4.2.4.1 Energiebilanz für den Feuerraum

Der Feuerraum im Verbrennungskessel hat gemäß die in Abbildung 4.1 dargestellten Wärmezugänge und Wärmeabgänge.

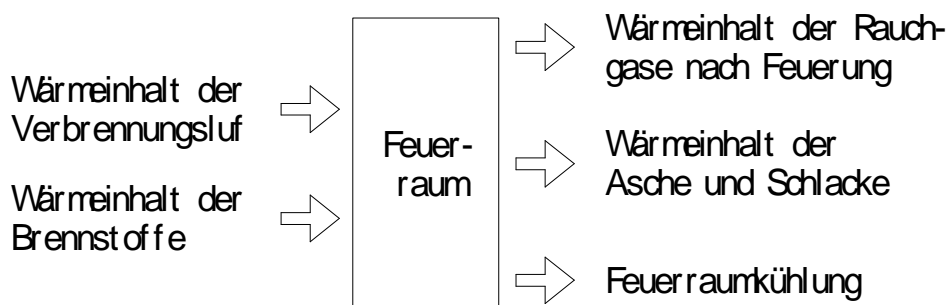


Abbildung 4.1: Energiebilanz für den Feuerraum³²

Die größte nutzbare Wärmeenergie geht von dem Brennstoff selber aus. Sie ist chemisch im Brennstoff gespeichert und wird freigesetzt bei der Reaktion mit Sauerstoff (Oxidation). Da die Verbrennungsluft als nicht vorgewärmt angenommen

³² eigene Darstellung

wird, ist die zu erwartende Energieausbeute bei 20 °C als zu gering einzustufen und wird daher nicht weiter betrachtet.

Die Wärmeenergie, welche aus dem Feuerungsraum austritt, ist hauptsächlich im Rauchgas enthalten. Mit Hilfe eines, im Rauchgasstrom nachgeschalteten Wärmeübertragers, soll die Wärmeenergie auf das Wärmeträgermedium Thermoöl übertragen werden. Nicht genutzt bleibt der Wärmeinhalt, der mit der Asche und der Schlacken aus dem Verbrennungsofen ausgetragen wird. Als Wärmeverlust gilt ebenso die Feuerraumkühlung. Darin enthalten ist die Wärme, die der Verbrennungsofen über seine Oberfläche in Form von Strahlung und Konvektion an die Umgebung abgibt. Des Weiteren muss, um ein Schmelzen der Asche bei zu hohen Temperaturen zu verhindern, der Rost mit Verbrennungsluft gekühlt werden.

Es liegt zur Bearbeitungszeit der Diplomarbeit kein reales Fabrikat von einem Verbrennungskessel sowie keine Klärschlammzusammensetzung und keine Rauchgasanalyse bei Verbrennung vor. Somit ist keine genaue Feststellung möglich, welche Raumanteile die für die Verbrennungsrechnung wichtigen Elemente, wie z. B. Sauerstoff, Wasserstoff, Kohlenstoff usw. einnehmen. Das heißt, es ist nicht genau feststellbar, welche Wärme tatsächlich bei der Verbrennung frei gesetzt wird bzw. welche Rauchgasmenge aufgrund einer stöchiometrisch vollständigen Oxidation der im Brennstoff beteiligten Elemente entsteht.

Da aber die Zusammensetzung des Klärschlammes je nach Kläranlage und Abwasserbehandlungsverfahren schwankt, ist somit bei vorhandener KS-Analyse die Verbrennungsrechnung je nach Einsatzort hinfällig und muss immer neu bestimmt werden. Durch diese Abweichungen der Eingangsgrößen entstehen Grenzwerte bzw. Bandbreiten in der die DKVA nur arbeiten kann. Die nachfolgenden Rechnungen sind als Richtwerte zu verstehen. Die genaue Feststellung der angegebenen Wärmeleistungen, Luft- und Rauchgas Mengen, Verbrennungstemperatur, Rauchgaszusammensetzung usw. muss zum späteren Zeitpunkt beim Betrieb der Pilotanlage gemessen bzw. bestimmt werden. Die theoretisch ermittelten Rechenwerte geben den Rahmen für die Baugrößen vor und sind in der späteren Detailkonstruktion nachzuprüfen.

4.2.4.2 Wärmeenergie aus dem Brennstoff Klärschlamm

Für die Ermittlung der bei der Verbrennung von getrockneten KS entstehenden Feuerungs-Wärmeleistung sind die Vorgaben aus Abschnitt 4.2.3 und folgende ergänzende Werte zu Grunde gelegt:

- Trockenrückstand im getrockneten Schlamm von 90 %
- KS-Durchsatz getrockneter Schlamm von 171 kg / h
- Temperatur getrockneter Schlamm vor Verbrennung von 50 °C
- Glühverlust (GV) von 75 %
- Heizwert Klärschlamm von 17 MJ / kg \approx 4,72 kWh / kg
- Luftüberschuss $n = 1,5$

Die Feuerungs-Wärmeleistung (auch Wärmebelastung) durch den brennbaren Anteil im Klärschlamm lässt sich nach Gl. (4.8) berechnen.

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_{Br} \cdot H_i \quad (4.8)$$

mit \dot{Q}_F als die Feuerungs-Wärmeleistung in kW,

mit \dot{m}_{Br} als der Brennstoffmassenstrom in kg / h,

mit H_i als der Heizwert des Klärschlammes in kWh / kg.

Durch das Einsetzen der entsprechenden Werte ergibt sich bei der Verbrennung die Feuerungs-Wärmeleistung von 545 kW.

$$\dot{Q}_F = 0,9 \cdot 171 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 4,72 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot 0,75 = \underline{\underline{545 \text{ kW}}}$$

Zudem muss die benötigte Wärme für die Erwärmung und Verdampfung des restlichen Schlammwassers (WG 10 %) abgezogen werden. Dazu gehört die Erwärmung des Wassers (gemäß Gl. 4.6) auf 100°C.

$$\dot{Q} = 0,1 \cdot 171 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kgK}} \cdot (100 - 50) \text{K} = 994 \text{ W} \approx \underline{\underline{1,0 \text{ kW}}}$$

Und die Verdampfungswärme des Wassers (gemäß Gl. 4.7) bei 100°C.

$$\dot{Q} = 0,1 \cdot 171 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 628 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} = 10.739 \text{W} = \underline{\underline{10,7 \text{kW}}}$$

Zusammen wird eine Wärmeleistung benötigt von 11,7 kW, welche bei der Rauchgasabkühlung theoretisch unter 100 °C wieder nutzbar wäre. Das ist aber nicht angedacht. Somit steht durch die Verbrennung des KS im Betriebszustand eine Wärmeleistung von rund 533 kW zu Verfügung.

4.2.4.3 Rauchgasmassenstrom und Verbrennungsluftbedarf

Durch die Vorgabe des Heizwertes der brennbaren Substanz des Schlammes lassen sich durch empirische Gleichungen nach Rosin und Fehling³³ näherungsweise der Luftbedarf und die Rauchgasmenge berechnen. Zu berücksichtigen ist dabei, mit wie viel Überschussluft der Feuerungsraum gegenüber dem theoretischen Bedarf gefahren wird. Schlammverbrennungsöfen werden bei einem Luftverhältnis von 1,2 bis 1,8 betrieben [LES96]. Gewählt ist ein Luftüberschuss n von 1,5.

Gemäß Rosin und Fehling gilt Gleichung (4.9) für den theoretischen Luftbedarf ($n = 1$), die Gl. (4.10) für den theoretischen Rauchgasmassenstrom und für den wahren Rauchgasmassenstrom die Gl. (4.11). Der tatsächliche Verbrennungsluftbedarf errechnet sich nach Gl. (4.12).

$$V_{L,\min} = 1,01 \cdot \frac{H_i}{4,1868} + 0,5 \quad (4.9)$$

$$V_{RG,\min} = 0,89 \cdot \frac{H_i}{4,1868} + 1,65 \quad (4.10)$$

³³ [LES96], Gleichungen für Klärschlammverbrennung, S. 428

$$V_{RG} = V_{RG,\min} + (n - 1) \cdot V_{L,\min} \quad (4.11)$$

$$V_L = n \cdot V_{L,\min} \quad (4.12)$$

mit $V_{L,\min}$ als der theoretische Luftbedarf in m^3 / kg ,

mit H_i als der Heizwert der brennbaren Substanz (GV) in MJ / kg ,

mit $V_{RG,\min}$ als der theoretische Rauchgasmassestrom (trocken) in m^3 / kg ,

mit V_{RG} als der wahre Rauchgasmassestrom (trocken) in m^3 / kg ,

mit n als das Luftverhältnis (Luftüberschusszahl),

mit V_L als der wahre Luftbedarf in m^3 / kg .

Entsprechend den Gleichungen (4.9), (4.10), (4.11) und (4.12) führt das Einsetzen der Zahlenwerte zu

dem theoretischen Luftbedarf:
$$V_{L,\min} = 1,01 \cdot \frac{17}{4,1868} + 0,5 = \underline{\underline{4,6 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

dem theoretischen Rauchgasmassestrom:
$$V_{RG,\min} = 0,89 \cdot \frac{17}{4,1868} + 1,65 = \underline{\underline{5,26 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

dem wahren Rauchgasmassestrom:
$$V_{RG} = 5,26 + (1,5 - 1) \cdot 4,6 = \underline{\underline{7,56 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

dem wahren Luftbedarf:
$$V_L = 1,5 \cdot 4,6 \text{ m}^3 / \text{kg} = \underline{\underline{6,9 \text{ m}^3 / \text{kg}}}$$

Der wahre Rauchgasmassestrom und der wahre Luftbedarf sind auf die Einheit Norm-m^3 je kg Glühverlust (im Normzustand) bezogen und sind demnach spezifische Werte. So sind die Masseströme die tatsächlich pro Zeiteinheit anfallen folglich aus dem Brennstoffmassenstrom, dem Glühverlust und der Dichte bei 0°C zu berechnen.

$$V_{RG,\text{tat}} = 7,56 \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot 154 \text{ kg} / \text{h} \cdot 0,75 \cdot 1,295 \text{ kg} / \text{m}^3 = 1.131 \text{ kg} / \text{h} = \underline{\underline{0,314 \text{ kg} / \text{s}}}$$

$$V_{L,tat} = 6,9 \frac{m^3}{kg} \cdot 154 \frac{kg}{h} \cdot 0,75 \cdot 1,2754 \frac{kg}{m^3} = \underline{\underline{1.016 \frac{kg}{h}}}$$

Infolgedessen fällt bei der Klärschlammverbrennung ein Rauchgasmassenstrom von 0,314 kg / s an und es ist ein Luftbedarf von 1.016 kg / h (entspricht 855 m³ / h bei 20 °C) notwendig.

Ebenfalls zu den Endprodukten nach der Verbrennung zählt die Klärschlammasche.

4.2.4.4 Wärmeenergie aus Rauchgas und Heizöl

Nach der Ermittlung, welcher Rauchgasmassenstrom durch die Verbrennung von Klärschlamm (siehe Abschnitt 4.2.4.3) entsteht, liegt es nun daran zu Berechnen, wie viel Wärmeenergie durch Abkühlung des Rauchgases zur Verfügung steht. Die Rauchgase haben am Eintritt des Wärmeübertrager (WÜ) eine Temperatur von 1000 °C und sollen am Austritt 300 °C betragen. Die Temperaturdifferenz beträgt somit größer 200 K und Gl. (4.1) für die mittlere spezifische Wärmekapazität muss beachtet werden. Im Anhang 4 befinden sich die spezifischen Wärmekapazitäten für Rauchgas entsprechend den Temperaturen.

$$c_m = c_{1000}^{300} = \frac{1,4366 \frac{kJ}{kgK} \cdot 300K - 1,6622 \frac{kJ}{kgK} \cdot 1000K}{(300 - 1000)K} = \underline{\underline{1,75889 \frac{kJ}{kgK}}}$$

Unter Anwendung Gl. (4.6) folgt:

$$\dot{Q}_{RG} = 0,314 \frac{kg}{s} \cdot 1,75889 \frac{kJ}{kgK} \cdot (300 - 1000)K = \underline{\underline{-387kW}}$$

Die nutzbare abgegebene Wärmeenergie bezieht sich auf 387 kW. Der Trockner benötigt allerdings eine thermische Leistung von 422 kW. Somit muss die Differenz von 35 kW mittels Unterstützbrenner erzeugt werden. Als Stützbrennstoff wird Heizöl EL nach DIN 51603 verwendet.

Die Bestimmung der zusätzlichen Wärmeleistung und der daraus resultierenden Menge an Heizöl EL erfolgt über den Rauchgasmassenstrom. Wenn direkt über die geforderte Leistung der Heizölmassenstrom ermittelt werden sollte, führt das zu einer Unterversorgung. Das heißt, dass durch die Erzeugung von 35 kW Wärmeenergie (Feuerungs-Wärmeleistung) im Verbrennungssofen, keine 35 kW zusätzliche Wärmeenergie durch die Rauchgasabkühlung genutzt werden kann.

Zur Berechnung der benötigten Rauchgasmenge werden, aufgrund des zu erwartenden geringen Anteils an Zusatzbrennstoff, die Werte der mittleren spezifischen Wärmekapazität beibehalten. Durch Umstellung der Gl. (4.6) nach dem Massenstrom und Einsetzen der benötigten Wärmeleistung (422 kW) folgt:

$$\dot{m}_{RG,ges} = \frac{-422kW}{1,75889 \frac{kJ}{kgK} \cdot (300 - 1000)K} = \underline{\underline{0,343 \frac{kg}{s}}}$$

Die Differenz von $(0,343 - 0,314) \text{ kg/s} = 0,029 \text{ kg/s}$ ist über das Heizöl EL zu kompensieren. Mittels der Gl. (4.13)³⁴ und den dazugehörigen charakteristischen Brennstoffdaten (siehe Tabelle 4.1) lässt sich der Abgasmassenstrom berechnen.

$$\dot{m}_A = \left(\frac{f_{m1}}{\sigma(CO_2)} + f_{m2} \right) \cdot \dot{Q}_F \quad (4.13)$$

mit \dot{m}_A als der Abgasmassenstrom in g / s,

mit f_{m1} als Koeffizient 1 (Brennstoffabhängig) in g-% / (kWs),

mit f_{m2} als Koeffizient 2 (Brennstoffabhängig) in g / kW s,

mit $\sigma(CO_2)$ als die Volumenkonzentration CO₂ im Abgas in Vol.-%,

mit \dot{Q}_F als die Feuerungs-Wärmeleistung in kW.

³⁴ Näherungsgleichung nach DIN EN 13384-1:2002 + A1:2005, „Abgasanlagen – Wärme- und strömungstechnische Berechnungsverfahren – Teil 1: Abgasanlagen mit einer Feuerstätte“, S.79

Tabelle 4.1: Ausgangswerte für die Berechnung des Abgasmassenstromes

Brennstoffart	DIN EN 13384-1:2002 + A1:2005 ^{a)}					DIN 51603
	H_i [kWh / kg]	$V_{L,\min}$ [m ³ / kg]	$\sigma(CO_2)_{\max}$ [Vol.-%]	f_{m1} [g-% / (kWs)]	f_{m2} [g / kW s]	ρ_{Br} ^{b)} [kg / dm ³]
Heizöl EL	11,86	11,26	15,40	4,94	0,046	0,86

^{a)} Auszug aus Tabelle B.1, S. 77

^{b)} Dichte bei 15 °C

Die Volumenkonzentration von Kohlenstoffdioxid im Abgas $\sigma(CO_2)$ wird unter Anwendung der Gl. (4.14) bestimmt.

$$n = \frac{\sigma(CO_2)_{\max}}{\sigma(CO_2)} \quad (4.14)$$

mit n als das Luftverhältnis (Luftüberschusszahl),

mit $\sigma(CO_2)_{\max}$ als die höchste Volumenkonzentration CO_2 im Abgas in Vol.-%.

Mit der festgelegten Luftüberschusszahl $n = 1,5$ (Abschnitt 4.2.4.3) und Umstellung der Gl. (4.14) ergibt sich CO_2 zu 10,3 Vol.-% im Abgas.

$$\sigma(CO_2) = \frac{\sigma(CO_2)_{\max}}{n} = \frac{15,4\%}{1,5} = \underline{\underline{10,3\%}}$$

Schließlich kann unter Verwendung von Gl. (4.13) die erforderliche Heizöl Feuerungs-Wärmeleistung \dot{Q}_F bestimmt werden. Sie beträgt 56 kW.

$$\dot{Q}_F = \frac{\dot{m}_A}{\left(\frac{f_{m1}}{\sigma(CO_2)} + f_{m2} \right)} = \frac{29 \frac{g}{s}}{\left(\frac{4,94 \frac{g\%}{kWs}}{10,3\%} + 0,046 \frac{g}{kW s} \right)} = \underline{\underline{56kW}}$$

Gemäß umstellen der Gl. (4.8) ist der Heizölmassestrom (oder Heizöldurchsatz) der Quotient aus Feuerungs-Wärmeleistung und des Heizwertes (Tabelle 4.1). Des

Weiteren ist unter Einbeziehung der Brennstoffdichte der Volumenstrom nach Gl. (4.15) bestimmbar.

$$\dot{V}_{Br} = \frac{\dot{m}_{Br}}{\rho_{Br}} \quad (4.15)$$

mit \dot{m}_{Br} als der Brennstoffmassenstrom in kg / h,

mit \dot{V}_{Br} als der Brennstoffvolumenstrom in l / h,

mit ρ_{Br} als die Brennstoffdichte in kg / dm³.

Durch Einsetzen der Zahlenwerte in Gl. (4.8) und (4.15) ergibt sich ein Heizöldurchsatz von 4,7 kg / h bzw. ein Volumenstrom von 5,5 l / h.

$$\dot{m}_{Br} = \frac{56kW}{11,86kW/h/kg} = \underline{\underline{4,7kg/h}}$$

$$\dot{V}_{Br} = \frac{4,7kg/h}{0,86kg/dm^3} = 5,5dm^3/h = \underline{\underline{5,5l/h}}$$

Der wahre Verbrennungsluftbedarf den Heizöl EL benötigt beträgt 16,89 m³ / kg gemäß Gl. (4.12). Demzufolge ist bei einem Brennstoffverbrauch von 4,7 kg / h der zusätzliche tatsächliche Luftbedarf 102 kg / h (entspricht 85 m³ / h bei 20 °C).

$$V_{L,Heizöl} = 1,5 \cdot 11,26m^3/kg = \underline{\underline{16,89m^3/kg}}$$

$$V_{L,tat,Heizöl} = 16,89m^3/kg \cdot 4,7kg/h \cdot 1,2754kg/m^3 = \underline{\underline{102kg/h}}$$

Zusammenfassend beziffert sich durch die Stützfeuerung der gesamte Verbrennungsluftbedarf auf (1.016+102)kg / h = 1.118kg / h (entspricht 941 m³ / h bei 20 °C).

Bei angesetzten 6.500 Betriebsstunden pro Jahr der dezentralen Verbrennungsanlage werden insgesamt $6.500 \text{ h/a} \cdot 5,5 \text{ l/h} = 35.750 \text{ l/a}$ Heizöl EL benötigt. Die Reichweite bzw. der Brennstoffvorrat reicht bei einem 3.000 l -Tank dementsprechend ca. 22 Tage. Dabei findet der Verbrauch der beim An- und Abfahren der DKVA entsteht keine Berücksichtigung.

$$\text{Reichweite} = \frac{6.500 \text{ h/a} \cdot 3.000 \text{ l}}{35.750 \text{ l/a}} = 545 \text{ h} \approx \underline{\underline{22 \text{ d}}}$$

4.2.4.5 Schlammmasche

Da die Verbrennungstemperatur im Verbrennungsofen unter dem Erweichungspunkt der Feststoffe liegt, fällt der gesamte Verbrennungsrückstand als Asche an. Jedoch kann man die Schlackenbildung nicht generell ausschließen, da sich durch die Stützfeuerung eine höhere Temperatur einstellen kann. Ein Teil von der Schlammmasche gelangt über den Rauchgasstrom aus dem Verbrennungsofen und wird durch die Rauchgasreinigungsanlage eingefangen und abgeschieden. Der Großteil der Schlammmasche wird jedoch als Rostasche über einen Schlackenbrecher aufgenommen. Er zerkleinert die Asche und gibt sie an den Schneckenförderer ab, der sie dann aus dem Verbrennungsraum leitet.

Die anfallende Aschemenge ist der Anteil des Glührückstandes in der Schlamm-trockenmasse. Er entspricht 25 % im Fall des betrachteten aerob stabilisierten Klärschlamm. Von dem Nassschlamm mit einem Wassergehalt von 96 % bleibt somit bei der Verbrennung noch ein zu beseitigender Ascherest von 1 % der ursprünglichen Menge übrig.

Der Durchsatz im Verbrennungsofen beträgt 171 kg/h getrockneter Schlamm bei einem Glührückstand von 25 % und einen Trockenrückstand von 90 %. Somit ergibt sich ein Ascheanfall von $\dot{m}_{\text{Asche}} = 171 \text{ kg/h} \cdot 0,9 \cdot 0,25 = 38,5 \text{ kg/h} \approx 40 \text{ kg/h}$.

Bei einem Klärschlammgesamtanfall KS_{ges} von 985 Tonnen Trockenmasse pro Jahr ist mit einem Ascheaufkommen von etwa 250 Tonnen zu rechnen.

Um die Staubentwicklung der Schlammasche beim Auf- und Abladen zu minimieren, besteht die Möglichkeit des Anfeuchtens. Des Weiteren sollten die Transportcontainer mit einer Abdeckung ausgestattet sein.

4.2.4.6 Verbrennungskesselgeometrie

Die Größe des Feuerraumes ist durch das bei der Verbrennung entstehende Rauchgasvolumen, die notwendige Verweilzeit und die für die Wärmeenergieübertragung notwendigen Oberflächen bestimmt. Nach 17. BImSchV³⁵ ist eine Mindestverweilzeit von 2 Sekunden gefordert in der die Verbrennungsgase und die Verbrennungsluft die Mindesttemperatur von 850°C nicht unterschreiten dürfen.

Der Rauchgasmassenstrom beträgt 0,343 kg / s. Bei der Rauchgastemperatur von 1000 °C stellt sich die Dichte von 0,275 kg / m³ ein. Somit ergibt sich der Rauchgasvolumenstrom zu 1,247 m³ / s.

$$\dot{V}_{RG,1000^{\circ}C} = \frac{0,343 \frac{kg}{s}}{0,275 \frac{kg}{m^3}} = \underline{\underline{1,247 \frac{m^3}{s}}}$$

Bei einer Mindestverweilzeit von 2 Sekunden folgt:

$$V_{Feuerraum,th} = 1,247 \frac{m^3}{s} \cdot 2s = \underline{\underline{2,5m^3}}$$

Die theoretische Mindestbrennkammergröße beträgt 2,5 m³. Dazu kommt ein Sicherheitszuschlag von 100 %. Das Volumen des Feuerraums ist auf 5 m³

³⁵ Vgl. § 4 Abs. 2, 17. BImSchV

festgesetzt. Für Abmessung des Verbrennungskessels und Einbau in den Normcontainer ist ein Platzbedarf (6,6 m²) von folgenden festgelegten Höchstmaßen angedacht.

- Länge = 3,00 m,
- Breite = 2,20 m,
- Höhe = 1,50 m.

Bei dieser Variation ist oberhalb des Verbrennungsofens ein liches Maß zur Unterkante Decke des Containers von 1,20 m. Der Rohrbündelwärmeübertrager wird in den Zwischenraum angeordnet. Für die Einwurfvorrichtung des Klärschlammes und der Verbrennungsluftgebläse ist auf der ganzen Kesselbreite eine zusätzliche Länge von 1,00 m angedacht. Dies entspricht einer Fläche von 2,2 m².

4.2.5 Wärmeübertrager

Als Wärmeübertrager (WÜ) bezeichnet man die Apparate, in denen Wärmeenergie von einem Stoff auf einen anderen übertragen werden. In dem Fall der DKVA ist das vom Rauchgas auf das Thermoöl. Als vorteilig erweist sich die Bauart des Rekuperativ-WÜ. Dabei strömt gleichzeitig und nur durch eine Wand (Heizfläche) getrennt der wärmeabgebende und wärmeaufnehmende Stoff.

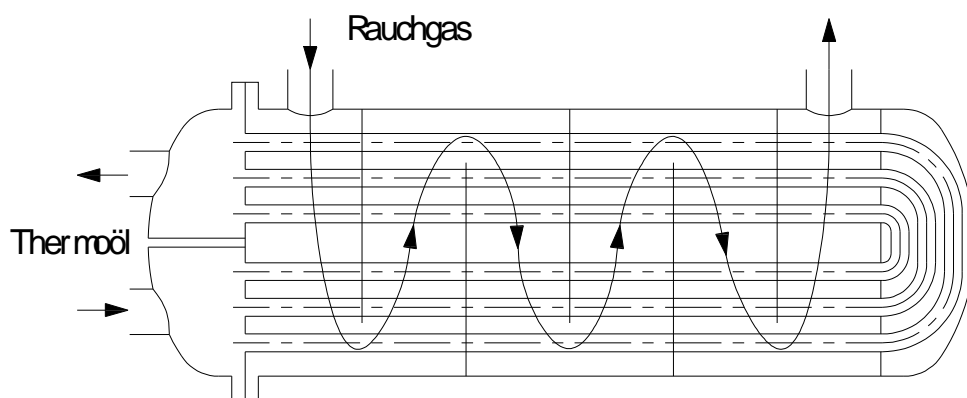


Abbildung 4.2: Prinzip Rohrbündelwärmeübertrager mit mehrfachem Kreuzgegenstrom³⁶

³⁶ eigene Darstellung, Grundlage [MEY89]

Zur Anwendung kommt ein Rohrbündelwärmeübertrager (Prinzip siehe Abbildung 4.2), welcher oberhalb des Verbrennungskessels angeordnet ist. Das wärmere Medium Rauchgas strömt im so genannten mehrfachen Kreuzgegenstrom an die in dem kälteren Thermoöl strömenden Rohrleitungen entlang. Im Gegensatz zu den Plattenwärmeübertrager existiert eine größere Strömungsfläche für das Rauchgas und somit liegt eine verminderte Gefahr für eine Verstopfung mit Staub- und Aschepartikeln vor. Nach Herstellerangaben³⁷ ist durch das Nichtvorhandensein einer Rauchgasanalyse keine Dimensionierung des WÜ möglich. Jedoch sind Richtwerte bekannt, welche unter bestimmten Voraussetzungen erreicht werden können. Der Wärmedurchgangskoeffizient stellt sich nach Erfahrung der Konstruktionsfirma in der Bandbreite $k = 200$ bis $300 \text{ W / m}^2 \text{ K}$ ein, wenn eine Rauchgasgeschwindigkeit von 20 bis 30 m / s vorliegt. Dabei muss das Rauchgas zugleich, durch innere Einbauten, in eine sehr turbulenzreiche Strömung gebracht werden.

Die näherungsweise Ermittlung der Mindestwärmeübertragungsfläche ist als Richtwert für die Größenbestimmung anzusehen. Es wird die allgemeine Gl. (4.16)³⁸ mit der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz der strömenden Medien (auch mittlere logarithmische Temperaturgefälle) nach Gl. (4.17) verwendet. Für die Temperaturdifferenzen sind beim Gegenstrom die Gl. (4.18) und Gl. (4.19) gültig. Das Primärmedium ist das Rauchgas (gibt Wärme ab) und das Sekundärmedium das Thermoöl (nimmt Wärme auf). Das System wird dabei zur Vereinfachung im stationären Fall betrachtet.

$$\dot{Q}_{WÜ} = k \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (4.16)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{Gr} - \Delta t_{Kl}}{\ln \frac{\Delta t_{Gr}}{\Delta t_{Kl}}} \quad (4.17)$$

³⁷ ANA – Verfahrenstechnik GmbH, Merseburg, 2008

³⁸ [WAL88], Grundgleichung für den Wärmedurchgang in einem Wärmeübertrager, S. 206

$$\Delta t_{Gr} = t_1' - t_2' \quad (4.18)$$

$$\Delta t_{Kl} = t_1'' - t_2'' \quad (4.19)$$

mit $\dot{Q}_{W\ddot{U}}$ als der übertragene Wärmestrom in kW,
mit k als der Wärmedurchgangskoeffizient in W / m² K,
mit A als die Wärmeübertragungsfläche in m²,
mit Δt_m als die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz in K,
mit Δt_{Gr} als die Temperaturdifferenz von t_1' und t_2' in K,
mit Δt_{Kl} als die Temperaturdifferenz von t_1'' und t_2'' in K,
mit t_1' als die Temperatur Primärmedium Zufluss in °C,
mit t_1'' als die Temperatur Primärmedium Abfluss in °C,
mit t_2' als die Temperatur Sekundärmedium Abfluss in °C,
mit t_2'' als die Temperatur Sekundärmedium Zufluss in °C.

Somit ist für eine Verlustfreie Wärmeübertragung von 422 kW, die Rauchgasabkühlung von 1000 auf 300 °C und die Therm oölaufheizung von 260 auf 280 °C bei einen gewählten ungünstigen Wärmedurchgangskoeffizienten von 200 W / m² K die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz gleich 235 K. Die erforderliche Wärmeübertragungsfläche ergibt sich zu 9,0 m².

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{Gr} - \Delta t_{Kl}}{\ln \frac{\Delta t_{Gr}}{\Delta t_{Kl}}} = \frac{(1000 - 280)K - (300 - 260)K}{\ln \frac{(1000 - 280)K}{(300 - 260)K}} = \underline{\underline{235K}}$$

$$A_{erf} = \frac{\dot{Q}_{W\ddot{U}}}{k \cdot \Delta t_m} = \frac{422.000W}{200 \frac{W}{m^2K} \cdot 235K} = 8,98 \approx \underline{\underline{9,0m^2}}$$

Bei der Annahme, dass effektiv zur Wärmeübertragung eine horizontale Rohrlänge von 2 m längs dem Kessel Verfügbar ist, beträgt bei einem Rohrdurchmesser $d_a = 114,3$ mm die Übertragungsfläche 0,718 m². Da aber 9 m² gefordert sind wächst die

gesamte Rohrlänge auf 25,1 m. Das verlangt, dass 13 Rohre á 2,0 m parallel im Rohrbündel-WÜ verlaufen. Analog dazu sind das bei $d_a = 88,9$ mm je 17, bei $d_a = 76,1$ mm je 19 und bei $d_a = 60,3$ mm 24 Rohrleitungen. Allerdings erhöht sich auch mit abnehmendem Rohrdurchmesser das Rohrreibungsdruckgefälle.

Der wahre Wärmestrom, welcher vom Rauchgas auf das Thermoöl übergeht ist durch nachträgliche Messungen an der Pilotanlage zu ermitteln. Des Weiteren muss untersucht werden, wie sich der Betrieb von Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom-WÜ auf die Ablauftemperaturen auswirkt, da die zur Berechnung angenommenen Werte den Optimalfall darstellen. Bzw. ab welcher Abgastemperatur die erforderliche Wärmeleistung nicht übertragen wird. Bei Veränderung der Rohrnennweiten stellt sich zudem eine neue Strömungsgeschwindigkeit ein, was sich auf den Wärmedurchgangskoeffizient auswirkt und die Mindestwärmeübertragungsfläche beeinflusst.

4.3 Zeichnerische Darstellung

Die ermittelten Auslegungsdaten sind Zusammen mit den Hauptkomponenten der Schlammbehandlung im Rohrleitungs- und Installationsschema (R+I-Schema, Zeichnung 1) dargestellt. Es ermöglicht neben der schematischen Übersicht zum Verfahrensablauf eine grobe Anordnung der einzelnen Apparate im jeweiligen ISO Normcontainer. Die räumliche Containerbegrenzung ist mittels einer Strichlinie angegeben. Auf die Darstellung von Armaturen ist weitestgehend verzichtet wurden.

Der Aufstellplan (Zeichnung 2) zeigt als maßstäbliche Übersicht (ohne Detaildarstellung) die Anordnung der beiden Container, das heißt der dezentralen Klärschlammverbrennungsanlage im Einsatz- bzw. Betriebsfall. Bei einer Standfläche von 14 x 14 m sind die Container im Abstand von 4 m parallel zueinander ausgerichtet. Die einzelnen Rohrleitungen sind in Fließrichtung der Medien gekennzeichnet. Für eine zweckmäßige An- und Abfuhr der Aschecontainer, ist unterhalb deren Freiraum zum Wenden der Transportfahrzeuge bereitzustellen.

Eine detaillierte Darstellung des Grundrisses mit der dazugehörigen Seitenansicht ist als Zeichnung 3 vorhanden. Zudem sind spezifische Angaben zu den Anlagen vorhanden.

Alle Zeichnungen befinden sich im Anhang 1.

4.4 Zusammenfassung der Auslegungsdaten

Im folgenden Abschnitt sind alle zu Grunde gelegten Ausgangswerte und die ermittelten Auslegungsdaten für die DKVA zusammengestellt. Es handelt sich ausschließlich um eine Betriebsvariante. Bei abweichenden Eingangsparametern können sich entsprechende Differenzen zum Durchsatz, Wärmerenergieaufwendung und benötigter Zusatzbrennstoffmenge sowie Auswirkungen auf die Betriebskosten einstellen. Die Zwei Normcontainer benötigen eine Standfläche von 14 x 14 m als befestigte Fläche.

Die Ausgangsdaten sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Auf die spezifischen Stoff- und Grundwerte wurde verzichtet. Sie befinden sich im Anhang 4.

Tabelle 4.2: Ausgangsdaten

Bezeichnung	Zahlenwert	Einheit
Jährlicher Klärschlammgesamtanfall (Trockenmasse)	985	t / a
Jährlicher Nassschlammanfall	25.000	t / a
Angeschlossene Einwohner	50.000	
Betriebsstunden DKVA	6.500	h / a
Betriebstage DKVA	271	d / a
aerob stabilisierter Überschussschlamm (Nassschlamm)		
Heizwert Schlamm Trockenmasse	17	MJ / kg
Glühverlust Schlamm Trockenmasse	75	%
Trockenrückstand Überschussschlamm	4	%
Temperatur Überschussschlamm	20	°C

In Tabelle 4.3 befinden sich die Auslegungsvorgaben der maschinellen Schlammmentwässerungsanlage.

Tabelle 4.3: Auslegungsdaten Entwässerungsanlage

Bezeichnung	Zahlenwert	Einheit
Durchsatz Nassschlamm	3,85	t / h
Trockenrückstand vor Entwässerung	4	%
Trockenrückstand nach Entwässerung	24	%
ausfallende Wassermenge	3,21	t / h
Durchsatz Trockenmasse	154	kg / h
Flockungsmittelverbrauch	1,54	kg / h

Für die Schlammrocknungsanlage sind die entsprechenden Auslegungsdaten In Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Auslegungsdaten Trocknungsanlage

Bezeichnung	Zahlenwert	Einheit
Durchsatz entwässerter Schlamm	640	kg / h
Trockenrückstand vor Trocknung	24	%
Trockenrückstand nach Trocknung	90	%
ausfallende Wassermenge	469	kg / h
Brüden Nebenluft	70	kg / h
Durchsatz Trockenmasse	154	kg / h
Thermische Wärmeleistung (Bedarf)	422	kW
Thermoöltemperatur VL / RL	280 / 260	°C
Thermoölmassenstrom	30.941	kg / h

Die Auslegungsdaten des Schlammverbrennungsofens mit dem Wärmeübertrager sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Auslegungsdaten Verbrennungskessel und Wärmeübertrager

Bezeichnung	Zahlenwert	Einheit
Durchsatz getrockneter Schlamm	171	kg / h
Trockenrückstand	90	%
Feuerungs-Wärmeleistung getrockneter Schlamm	545	kW
Feuerungs-Wärmeleistung Heizöl EL	56	kW
Feuerungs-Wärmeleistung Gesamt	601	kW
Rauchgasmassestrom	343	g / h
Nutzbare Wärmeleistung aus Rauchgasmassestrom	422	kW
Heizöl EL Verbrauch Betriebszustand	5,5	l / h
Heizöl EL Jahresverbrauch Betriebszustand	35.750	l / a
Ascheanfall	40	kg / h
Jahreascheanfall	250	t / a
Luftverhältniszahl	1,5	
Verbrennungsluftbedarf	941	m ³ / h
Mindestvolumen Feuerraum	5	m ³
Wärmedurchgangskoeffizient Wärmeübertrager mindestens	200	W / m ² K
Rauchgasabkühlung (1000 °C → 300 °C)	700	K
Übertragener Wärmestrom (Verlustfrei)	422	kW
Mindestwärmeübertragungsfläche	9	m ²
Vorgesehene Fläche für Verbrennungskessel + Einrichtungen	8,8	m ²
Heizöltankinhalt	3.000	l

4.5 Optimierungsmöglichkeiten

In der Vorgestellten technischen Variante ist der kontinuierliche Bedarf an Zweitbrennstoff (Heizöl EL) Voraussetzung, um die für die Trocknung benötigte Wärmeenergie im Rauchgas zu erzeugen. Der Jahresverbrauch an Heizöl EL beziffert sich daher auf rund 35,8 m³ und belastet die Gesamtanlage mit unnötigen Kosten. Um diese Kosten zu verringern bzw. zu vermeiden sind nachfolgend potentielle Optimierungsmöglichkeiten beschrieben.

Die benötigte thermische Wärmeenergie der Trocknungsanlage ist abhängig von der zu verdampfenden Wassermenge. Diese ist wiederum beeinflussbar von dem Trockenrückstand. Infolgedessen ist davon auszugehen, dass bei Erhöhung des TR-Gehaltes nach der Entwässerungsanlage weniger Wasser im Trockner verdampfen muss, bei gleich bleibendem Nassschlammdurchsatz. Da aber die Schlammentwässerung von der Qualität des Klärschlammes abhängt (s. Abschnitt 3.4), besteht auch keine Gewährleistung, dass der TR-Gehalt als Dauerzustand auftritt. Dem ungeachtet ist in anschließender Tabelle 4.6 zusammengetragen, wie sich der notwendige Wärmebedarf bei unterschiedlichen TR theoretisch einstellt.

Tabelle 4.6: Trockenrückstand und Trocknungswärme

Bezeichnung	Einheit	Trockenrückstand					
		20	22	23	24	25	26
TR nach Entwässerung	%	20	22	23	24	25	26
Wasserausfall Entwässerung	kg / h	3.080	3.150	3.180	3.210	3234	3258
Durchsatz Trockner	kg / h	770	700	670	640	616	592
Wasserverdampfung auf TR 90 % nach Trocknung	kg / h	599	529	499	469	445	421
Wärmebedarf Trockner	kW	539	476	449	422	400	379
Heizöl EL Zusätzliche Feuerungs-Wärmeleistung	kW	236	139	97	56	21	0
Heizöl EL Verbrauch Betriebszustand ^{a)}	l / h	23,2	13,6	9,5	5,5	2,1	0
Heizöl EL Jahresbedarf Betriebszustand ^{a)}	m ³ / a	150,8	88,4	61,8	35,8	13,7	0

^{a)} Keine Berücksichtigung An- und Abfahrbetrieb

Bei Auswertung der Tabelle ist festzustellen, dass ab einem Trockenrückstand von 26 % keine Stützfeuerung mittels Heizöl EL mehr notwendig ist. Die durch die alleinige Verbrennung von Klärschlamm erzeugte Wärmeleistung (387 kW) reicht aus, den Wärmebedarf des Trockners (379 kW) zu decken. Infolgedessen arbeitet die DKVA Wärmeautark.

Der Wärmeinhalt der Brüden kann über einen Wärmerückgewinnungssystem dazu verwendet werden, den Nassschlamm aufzuwärmen. Das bringt den Vorteil, den Entwässerungsgrad zu steigern. Des Weiteren ist durch die Vorwärmung der Wärmebedarf in der Trocknungsanlage geringer.

Darüber hinaus sind durch eine Erhöhung des Brennstoffheizwertes auch eine höhere Wärmeenergieerzeugung und deren Gebrauch möglich. Bleibt der KS-Durchsatz im Verbrennungsofen konstant, so beträgt schon bei Erhöhung des Schlammheizwertes auf 18 MJ / kg und des Glühverlustes auf 80 % die nutzbare Rauchgaswärmeleistung 431 kW. Analog kann eine Heizwerterhöhung durch zusätzliche Fremdbrennstoffe den gleichen Effekt erzielen. Zugegeben werden kann neben Rechengut, Altholz, durch Parasiten belastetes Holz auch verschiedene Kunststoff- und Krankenhausabfälle (mit verminderter seuchenhygienischer Anforderung). Problematisch ist die Eigenschaft der dadurch entstehenden Rostasche anzusehen. Durch zusätzliche Einführung von Schadstoffen kann eine weitergehende Aschebehandlung erforderlich werden. Es sind Probenahmen und Untersuchungen im Fall der Mitverbrennung zu tätigen.

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

5.1 Verfahren zur Beurteilung von Investitionen

Mit der Überprüfung der Wirtschaftlichkeit einer technischen Anlage soll anhand bestimmter Wirtschaftlichkeitskriterien die Ertragsaussichten des erforderlichen Kapitaleinsatzes im Zeitablauf überprüft und damit eine Anlagenvariante mit dem geringstem wirtschaftlichen Risiko gefunden werden.

Es gibt mehrere ökonomische Berechnungsverfahren für die Beurteilung von Investitionen, bei deren Anwendung unterschiedliche Betrachtungsweisen bzw. verschiedene Maßstäbe zur Kennzeichnung der Wirtschaftlichkeit herangezogen werden. Deshalb ist es wichtig, sich entsprechend den gegebenen Eingangsgrößen für das Verfahren zu entscheiden, welches die gesuchte Zielfunktion am zweckmäßigsten beschreibt.

Bei der Investitionsbeurteilung wird unterschieden in dynamische und statische Methoden. Bei den dynamischen Methoden werden die zeitlichen Unterschiede zwischen Ein- und Auszahlung betrachtet, wobei alle Nutzungsperioden einbezogen werden. Mit Hilfe eines Zinssatzes sind die Zahlungen auf einen gemeinsamen Zeitpunkt bezogen. Sie gelten damit als gleichwertig. Dadurch ist eine exaktere, umfassendere Bewertung möglich. Allerdings ist die Berechnung aufwendiger, da mehr bzw. umfangreichere Eingangsgrößen benötigt werden. Zu den dynamischen Verfahren gehören u. a. die Barwertmethode, die Kapitalwertmethode und die Annuitätsmethode.

Die statischen Verfahren vernachlässigen die zeitliche Verteilung der Zahlungen aus einer Investition und der zugrunde liegenden Finanzierung. Die gesamte Nutzungsdauer wird auf ein Jahr heruntergerechnet. Dadurch entsteht ein relativ einfacher Berechnungsaufbau, welcher in der Praxis für einen ersten Vergleich bzw. für eine vorläufige Bewertung von Investitionen geeignet ist. Des Weiteren kommen die statischen Methoden mit wenigen Eingangsgrößen aus. Zu den Verfahren zählen die Kostenvergleichsrechnung, die Gewinnvergleichsrechnung, die Rentabilitätsvergleichsrechnung und die Amortisationsrechnung.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung begrenzt sich im Fall der dezentralen Klärschlammverbrennungsanlage auf die Aussage, welcher spezifische Preis sich für die Schlamm Entsorgung einstellt und welchen Zeitraum die Amortisationszeit in Anspruch nimmt. Abhängig ist dies hauptsächlich von den Investitions- und Betriebskosten, der zu behandelnden Nassschlammmenge sowie von dem festgesetzten Entsorgungspreis.

5.2 Amortisationsmethode

Die Amortisationsmethode ist ein Verfahren zur Bestimmung des benötigten Zeitraumes (Amortisationszeit), um den Kapitaleinsatz einer Investition aus den Rückflüssen wiederzugewinnen. Dabei gilt die Amortisationszeit als Kriterium zur Risikoabschätzung des Kapitaleinsatzes und als Beurteilungsmaß für die Liquidität des Investors (Unternehmen) aufgrund des Kapitalrückflusses. Je kürzer die Amortisationsdauer ist, desto geringer ist das Verlustrisiko. D. h. der Rückfluss investierter Mittel aus den Erträgen einer getätigten Investition wird zeitlich betrachtet. Das Ziel ist es eine minimale Amortisationszeit oder das Unterschreiten einer Mindest-Amortisationszeit unter Einhaltung von Grenzwerten, z. B. Nutzungsdauer, zu realisieren.

Die Amortisationsrechnung ist geeignet für die Risikobeurteilung von Investitionen. Denn je länger eine Planungsperiode ist, desto größer ist die Unsicherheit gegenüber von Wertannahmen und Spekulationen. Eine kurze Amortisationszeit minimiert das Risiko, dass Gefahren aus dieser Unsicherheit auftreten.

Bei der einfachen Durchschnittsmethode (Anwendung ausschließlich bei konstanten Jahresbeträgen) erfolgt die Berechnung durch Gl. (5.1). Als Kapitaleinsatz gelten die Anschaffungskosten (Investition) abzüglich eines eventuellen Restwertes (muss nicht mit amortisiert werden). Der durchschnittliche Rückfluss setzt sich aus dem erzielten Gewinn und den Abschreibungen zusammen. Die linearen Abschreibungen mit ihren jährlichen gleichgroßen Beträgen ergeben sich gemäß Gl. (5.2). Sie dienen zur Erfassung der Leistungs- und Wertminderung eines Wirtschaftsgutes.

$$T_A = \frac{A_0 - RW}{G + A_{AB}} \quad (5.1)$$

$$A_{AB} = \frac{A_0 - RW}{T_N} \quad (5.2)$$

mit T_A als die Amortisationszeit in a,
mit A_0 als die Investitionskosten in €,
mit RW als der Restwert am Ende der Nutzungsdauer in €,
mit G als der jährliche Gewinn in € / a,
mit A_{AB} als der jährliche Abschreibungsbetrag in € / a,
mit T_N als die rechnerische Nutzungsdauer in a.

5.3 Aufstellung der Investitionskosten

In Tabelle 5.1 sind die Investitionskosten der DKVA aufgelistet. Da nicht zu jeder Position entsprechende Angebote eingeholt werden konnten, sind erfahrungsgemäß Annahmen³⁹ für entstehende Kosten getroffen wurden.

³⁹ Kostenannahmen nach Ingenieurbüro für Abwassertechnik Payer GmbH, Erfurt, 2008

Tabelle 5.1: Investitionskosten

Pos.	Bezeichnung	Kosten
1	ISO Normcontainer 40 ft (2 Stück)	20.000,00 €
2	Entwässerungsanlage ALSYS 20 mit Zuförderpumpenaggregat	98.000,00 €
3	Zwischensilo	1.000,00 €
4	Schlamm-trocknungsanlage RSD 2-600	350.500,00 €
5	Seitenkanalverdichter (Brüdenabzug)	3.000,00 €
6	Spiralförderanlage	25.000,00 €
7	Verbrennungskessel mit Wärmeübertrager	175.000,00 €
8	Anfahr-brenner, Luftgebläse	20.000,00 €
9	Heizöltank	2.000,00 €
10	Thermoölanlage	15.000,00 €
11	Schlackenförderer	15.000,00 €
12	Aschezyklon	10.000,00 €
13	Wirbelschichtreaktor mit Verdampfungskühler	15.000,00 €
14	Sorbalitsilo mit Fördertechnik	24.000,00 €
15	Keramikfeinstaubfilter	30.000,00 €
16	Schornstein mit Saugzug	15.000,00 €
17	MSR-Anlage	70.000,00 €
18	Messtechnik	60.000,00 €
19	Werksmontage	40.000,00 €
20	Ingenieurleistungen, Dokumentation usw.	60.000,00 €
	Nettoinvestitionskosten DKVA	1.048.500,00 €
	Umsatzsteuer 19 %	199.215,00 €
	Bruttoinvestitionskosten	1.247.715,00 €

5.4 Aufstellung der Betriebskosten

Bei der Ermittlung der jährlichen Betriebskosten wird von ca. 10 Umsetzungen der DKVA pro Jahr und von insgesamt 6.500 Betriebsstunden (271 Arbeitstage) ausgegangen. In folgender Tabelle 5.2 sind die jährlich zu erwartenden Betriebskosten aufgelistet.

Tabelle 5.2: Jährliche Betriebskosten

Pos.	Bezeichnung	Kosten
1	Heizölkosten Normalbetrieb	32.175,00 €
2	Heizölkosten Anfahr- und Abfahrbetrieb (20 % vom Normalbetrieb)	6.435,00 €
3	Mittlerer Energieverbrauch (ca. 42 kW)	62.920,05 €
4	Personalkosten	90.000,00 €
5	Entsorgungskosten Asche (50 € / t)	12.500,00 €
6	Reparaturkosten 2 % der Nettoinvestitionskosten	20.970,00 €
7	Transportkosten Umsetzung	15.000,00 €
8	Montagekosten In- und Außerbetriebnahme	10.000,00 €
9	Versicherungen, TÜV usw.	8.000,00 €
10	Verwaltungskosten	12.000,00 €
11	Zur Sicherheit und Rundung	4.999,95 €
	Summe Nettobetriebskosten	275.000,00 €

Zur Ermittlung der Heizölkosten für den Normalbetrieb sind 0,90 € je Liter Heizöl EL⁴⁰ zugrunde gelegt. Es erfolgt keine Berücksichtigung von Preisänderungssätzen oder Preisänderungsfaktoren. Somit ergeben sich Kosten für den Heizöljahresbedarf von $35.750\text{l/a} \cdot 0,90\text{ €/l} = 32.175\text{ €/a}$.

Der mittlere Energieverbrauch (ca. 42 kW als Wirkleistung) setzt sich zusammen aus der Elektrischen Anschlussleistung der Dekantierzentrifuge (15 kW), Flockungsmitteldosierung (0,15 kW), Trocknungsanlage (6 kW), Förderungseinrichtungen (10 x 1 kW) sowie pauschal des Verbrennungskessels, Pumpen- und Verdichteraggregate, MSR-Einrichtungen (10 kW). Als spezifische

⁴⁰ Durchschnittspreis Heizöl EL Bundesgebiet, 01.08.2008, <http://www.tecson.de>

Kosten für die Wirkarbeit sind $0,23 \text{ € / kWh}^{41}$ angesetzt. Der Blindstromanteil sowie Preisänderungen werden nicht berücksichtigt. Die Grundgebühr ist bei der Betriebszeit ausschlaggebend. Die Wirkarbeit ergibt sich zu $42 \text{ kW} \cdot 6.500 \text{ h / a} = 273.000 \text{ kWh / a}$. Damit ist es möglich die Gesamtbetriebskosten für den elektrischen Energieverbrauch zu berechnen. Er beträgt $273.000 \text{ kWh / a} \cdot 0,23 \text{ € / kWh} + 9 \text{ Monate / a} \cdot 14,45 \text{ € / Monat} = 62.920,05 \text{ € / a}$.

5.5 Ermittlung des Klärschlammensorgungspreises

Die Finanzierung der Investitionskosten des Projektes DKVA soll mittels Fremdkapital erfolgen. Dazu fällt ein Kapitaldienst von 13 % auf die Nettoinvestitionskosten an, der jährlich zu entrichten ist und zusammen mit den Betriebskosten die jährlichen Gesamtkosten ausmachen. Der Quotient aus dem jährlichen Gesamtkosten und der zu behandelnden Klärschlammmenge beschreibt die resultierenden spezifischen Schlammensorgungskosten. Dabei ist unterschieden in Kosten für den anfallenden Nassschlamm (4 % TR) und der Schlamm Trockenmasse.

Der Berechnungsgang ist in nachfolgender Übersicht (Tabelle 5.3) zusammengestellt. Für die Behandlung von 1 Tonne Nassschlamm entstehen Kosten von 16,46 € bzw. bei 1 Tonne Schlamm Trockenmasse von 417,57 €.

Tabelle 5.3: Schlammensorgungspreis

1	Nettoinvestitionskosten	1.048.500,00	€
2	Kapitaldienst 13 % der Nettoinvestition	136.305,00	€ / a
3	Jährliche Betriebskosten	275.000,00	€ / a
4	Jährliche Gesamtkosten	411.305,00	€ / a
5	Jährlicher Klärschlammgesamtanfall (Trockenmasse)	985	t / a
6	Resultierender Schlammensorgungspreis (Trockenmasse)	417,57	€ / t
7	Jährlicher Nassschlammdurchsatz	25.000,00	t / a
8	Resultierender Nassschlammensorgungspreis	16,46	€ / t

⁴¹ „Allgemeiner Tarif Gewerbe“, 23 Cent / kWh, Grundgebühr: 14,45 € / Monat, Technische Werke Naumburg, August 2008

Der Gewinn der durch die DKVA erwirtschaftet werden soll, ist abhängig von dem realen Schlamm Entsorgungspreis der an den Kunden (z. B. Klärwerksbetreiber) weitergegeben wird. Das Niveau des Annahmepreises auf dem deutschen Entsorgungsmarkt liegt derzeit bei der thermischen Klärschlammbehandlung zwischen 40 bis 60 € pro Tonne Nassschlamm [HAN07]. Zu dem sind Transportkosten zu berücksichtigen. In der landwirtschaftlichen Verwertung und im Rekultivierungsbau ist mit Preisen ab 30 € je Tonne zu rechnen. Tendenz steigend.

Gewählt sind zum Vergleich die Schlamm Entsorgungspreise von 25, 30 und 35 € je Tonne. Dadurch ergeben sich nachstehende (Tab. 5.4) Einzahlungen (Erlöse) und Jahresgewinne.

Tabelle 5.4: Gewinnermittlung

1	Schlammpreis gewählt	25,00	30,00	35,00	€/t
2	Nassschlammdurchsatz	25.000			t/a
3	Einzahlungen (Erlöse)	625.000,00	750.000,00	875.000,00	€/a
4	Gesamtkosten jährlich	411.305,00			€/a
5	Gewinn jährlich	213.695,00	338.695,00	463.695,00	€/a

5.6 Ermittlung der Amortisationszeit

Für die Bestimmung der Amortisationszeit sind folgende Bedingungen zu Grunde gelegt:

- Nettoinvestitionskosten von 1.048.500,00 €,
- Rechnerische Nutzungsdauer der DKVA von 15 Jahren,
- Restwert am Ende der Nutzungsdauer von 50.000,00 € (geschätzt).

Gemäß Gl. (5.2) ergibt sich der jährliche Abschreibungsbetrag zu 66.566,67 €/a.

$$A_{AB} = \frac{1.048.500 \text{ €} - 50.000 \text{ €}}{15 \text{ a}} = \underline{\underline{66.566,67 \text{ €/a}}}$$

Die Amortisationsdauer beträgt nach Gl. (5.1) demzufolge für die angesetzten Entsorgungspreise von

$$25 \text{ € / t} \quad \rightarrow \quad T_A = \frac{(1.048.500 - 50.000) \text{ €}}{(213.695 + 66.566,67) \text{ €/a}} = \underline{\underline{3,6 a}}$$

$$30 \text{ € / t} \quad \rightarrow \quad T_A = \frac{(1.048.500 - 50.000) \text{ €}}{(338.695 + 66.566,67) \text{ €/a}} = \underline{\underline{2,5 a}}$$

$$35 \text{ € / t} \quad \rightarrow \quad T_A = \frac{(1.048.500 - 50.000) \text{ €}}{(463.695 + 66.566,67) \text{ €/a}} = \underline{\underline{1,9 a}}$$

Der Vergleich der jeweiligen angesetzten Preise hat ergeben, dass eine Amortisationszeit von 2 Jahren möglich ist. Allerdings ist zu bemerken, dass keine Preissteigerung von z. B. Heizöl und Elektroenergie sowie unterschiedliche hohe Rückflüsse beachtet wurden.

Bei steigenden Annahmepreisen der konventionellen Schlamm Entsorgungsverfahren kann die DKVA auch dementsprechend zu höheren Preisen verkauft werden. So dass sich die Amortisationszeit weiter verringern lässt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Jeden Tag fallen durch die kommunale und industrielle Abwasserbehandlung als Nebenprodukt Klärschlämme verschiedener Art an. Aufgrund von gesetzlichen Vorgaben, dem Druck der Öffentlichkeit und der Lebensmittelindustrie wird die stoffliche Verwertung dieser Schlämme in der Landwirtschaft heruntergefahren. Auch der Transport dieser Schlämme von ländlichen Kläranlagen zu den Großverbrennungsanlagen, ist durch steigende Dieselpreise auf Dauer keine Lösung mehr.

Die in dieser Diplomarbeit entwickelte und vorgestellte transportable, dezentrale Klärschlammverbrennungsanlage ist in der Lage, den anfallenden Nassschlamm von bis zu 50.000 EW zu behandeln. Dabei sind sämtliche Einrichtungen in Zwei ISO Normcontainer untergebracht, die vor Ort aufgestellt und betrieben werden. In diesem durchläuft der Klärschlamm kontinuierlich die Entwässerungsanlage mit anschließender thermischer Trocknung, bevor er über Beförderungssysteme in den Verbrennungsofen gelangt. Dort wird er zu einem hygienisch unbedenklichen Reststoff, die Klärschlammasche, umgewandelt und kann bei Eignung in der Baustoffindustrie verwendet oder auf Deponien abgelagert werden. Die entstehenden Rauchgase werden gemäß 17. BImSchV gereinigt.

Die DKVA kann aufgrund ihrer Mobilität an jedem Ort zum Einsatz kommen. Der Kundenkreis beschränkt sich dann nicht nur auf Kläranlagenbetreiber, sondern kann auch auf private Entsorger ausgedehnt werden. Kommunale Behördenauflagen sowie Genehmigungen, sind bei mobilen Verbrennungsanlagen in einem nicht definierten Gesetzesbereich. Somit sind die Widerstände zum Betrieb geringer, als bei stationären Anlagen. Die transportable Verbrennungsanlage führt zu einer Vergrößerung der Unabhängigkeit des Nutzers gegenüber den Preisvorgaben von Logistikunternehmen und Großschlamm Entsorgern.

Bei Betrachtung der entstehenden spezifischen Schlamm Entsorgungskosten ist festzustellen, dass sich das Preisniveau auf etwa 17,- € pro Tonne Nassschlamm einstellt. Wird der Schlammannahmepreis auf 35,- € pro Tonne festgelegt, so ist eine Amortisation der DKVA in Zwei Jahren möglich. Beim derzeitigen Erwerb der Anlage

ist davon auszugehen, dass die laufenden Kosten eines Abwasserverbandes oder privaten Entsorgers sich senken werden.

Zukünftig ist davon auszugehen, dass aufgrund des zu erwartenden Preisanstieges im Bereich der Schlamm Entsorgung, die transportable dezentrale Klärschlammverbrennungsanlage eine elegante und preiswerte Lösung darstellt. Als technologische Neuentwicklung und als Alternative für den ländlichen Raum, hat sie ein hohes Marktpotential.

Abschließend ist festzustellen, dass die Realisierung einer dezentralen Klärschlammverbrennungsanlage in Zwei ISO Normcontainern möglich ist. Unter Voraussetzung der vorgestellten und ausgelegten Komponenten. Da zurzeit kein Kesselanbieter zur Verfügung steht, sind die vorgegeben Rahmenbedingungen als Grundlage für weitere Entwicklungsarbeiten an dieser Anlage zu sehen.