

**Universität für Bodenkultur Wien**

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

**Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt**

Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

Leiter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Thomas Ertl



# **INTEGRALE BETRACHTUNG DER KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG DURCH MONOVERBRENNUNG**

**Masterarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur**

eingereicht von:  
**ZINGERLE THOMAS**

Betreuer: Ertl Thomas, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.

Mitbetreuer: Kretschmer Florian, Dipl.-Ing. Dr.

Mitbetreuer: Neugebauer Georg, Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.

# Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „Integrale Betrachtung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung“ wurde an der Universität für Bodenkultur Wien am Institut für Siedlungswasserbau, Industrieressourcenmanagement und Gewässerschutz (SIG) unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Thomas Ertl (Institutsvorstand) durchgeführt und betreut. Außerdem wird vorliegende Masterarbeit durch den BOKU-Energiecluster unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Stöglehner zum Themenschwerpunkt „Die Kläranlage als regionale Energiezelle“ koordiniert.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Thomas Ertl und Dipl.-Ing. Dr. Florian Kretschmer vom Institut für Siedlungswasserbau, Industrieressourcenmanagement und Gewässerschutz (SIG) möchte ich an dieser Stelle recht herzlich für die Ermöglichung der Bearbeitung der Masterarbeit am SIG danken. Besonderen Dank möchte ich an Dipl.-Ing. Dr. Florian Kretschmer richten, da er mir zu jeder Zeit mit gutem Rat und unterstützender Tat zur Seite stand.

Ebenso möchte ich Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Georg Neugebauer vom Institut für Raumplanung, Umweltplanung und Bodenordnung (IRUB) für seine hilfreiche Unterstützung bei der Erarbeitung vorliegender Masterarbeit danken. Ebenso danken möchte ich BSc David Wagner, der durch die Bearbeitung seiner eigenen Masterarbeit, koordiniert vom BOKU-Energiecluster zum Themenschwerpunkt „Die Kläranlage als regionale Energiezelle“, mir gute Gesellschaft bei der Ausarbeitung der Masterarbeit geleistet und mich mit seinen inhaltlichen Fragen motiviert hat neue Literatur zu durchkämmen sowie verschiedene Perspektiven einzunehmen.

Danken möchte ich auch allen Experten, die für ein Interview im Rahmen vorliegender Masterarbeit zur Verfügung standen und bereitwillig Auskunft gaben.

Nun möchte ich diese Gelegenheit nutzen, um meinen lieben Eltern zu danken. Ohne sie wäre diese Arbeit nie zu Stande gekommen. Meine Familie hat mich geduldig unterstützt und motiviert. Ist mir in schwierigen Zeiten zur Seite gestanden und trägt deshalb einen beträchtlichen Anteil am Zustandekommen dieser Masterarbeit.

Mami, Papi, Sophi und Vera danke! Des sat ollbm fi mi do wenni enk brauch!

Ebenso möchte ich meinen Freunden Manu und Stephan danken, die immer bereit sind mit mir langandauernde, für mich tiefgehende Gespräche und manchmal auch hitzige Diskussionen zu führen, die mich stets motivieren am Ball zu bleiben.

Danke enk zwoa!

Geli, danke für olls, für dein Untostützung, für dein Hilfe, für dein Rot, fürs an meino Seite sein!

*„der Beobachter ist das ausgeschlossene Dritte seines Beobachtens“*

(LUHMANN, 1997, S. 69)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>V</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Zielsetzung</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
3.1 Aktuelles Klärschlammmanagement .....	5
3.1.1 Anfall, Arten und Zusammensetzung .....	5
3.1.2 Behandlung .....	10
3.1.3 Verwertung .....	14
3.1.4 Rechtliche Rahmenbedingungen .....	23
3.2 Entwicklungen in der Klärschlammverwertung .....	26
3.2.1 Thermische Verwertung .....	27
3.2.2 Klärschlamm als Energie- und Ressourcenquelle .....	54
<b>4. Material und Methoden</b> .....	<b>63</b>
4.1 Grundlagenerhebung .....	64
4.1.1 Literaturrecherche .....	64
4.2 Datenerhebung .....	66
4.2.1 Experteninterview .....	66
4.3 Datenauswertung .....	69
4.3.1 Qualitative Inhaltsanalyse .....	69
<b>5. Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>74</b>
5.1 Stoffstrom und Prozesskette des Klärschlammes .....	77
5.1.1 Abwasserproduktion .....	79
5.1.2 Abwassersammlung .....	80
5.1.3 Abwasserreinigung und Klärschlammproduktion .....	81
5.1.4 Klärschlammbehandlung .....	82
5.1.5 Klärschlammverwertung .....	83
5.2 An Klärschlammverwertung beteiligte Fachbereiche und die sich aus ihnen ergebenden Chancen, Barrieren und Herausforderungen .....	90
5.2.1 Ressourcenmanagement .....	93
5.2.2 Akteursmanagement .....	97
5.2.3 Landwirtschaft .....	102
5.2.4 Energiewirtschaft .....	104
5.2.5 Naturschutz und Umweltschutz .....	106
5.2.6 Verfahrenstechnik .....	108
5.2.7 Abwasserwirtschaft .....	110

5.2.8	Abfallwirtschaft .....	111
5.2.9	Logistik .....	113
5.2.10	Raumplanung .....	115
<b>6.</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>117</b>
6.1	Klärschlammbewirtschaftung als integraler Prozess .....	117
6.2	Unterschiedliche Perspektiven der Klärschlammbewirtschaftung .....	121
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>126</b>
<b>8.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>131</b>
<b>9.</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>140</b>
<b>10.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>143</b>
<b>11.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>146</b>
<b>12.</b>	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>149</b>
<b>13.</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>152</b>
<b>Anhang A.....</b>	<b>153</b>	
	Standardisierte E-Mail zur Kontaktaufnahme mit den Experten .....	153
	Standardisierte Vorabinformation für die Experten per Anhang im E-Mail zur Kontaktaufnahme .....	153
<b>Anhang B.....</b>	<b>155</b>	
	Stichpunktsammlung als Leitfaden für das erste Experteninterview .....	155
<b>Anhang C.....</b>	<b>157</b>	
	Leitfaden und Stichpunktsammlung für die Experteninterviews .....	157

## Kurzfassung

Klärschlamm fällt kontinuierlich als Schadstoffsенке bei der Abwasserreinigung an und als Abfall definiert, muss er einer gesicherten Entsorgung zugeführt werden. Klärschlamm stellt jedoch eine potenziell verwertbare Ressource dar. In Zukunft soll das Potenzial dieser Ressource stofflich und energetisch genutzt werden. Entwicklungen wie der österreichische Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017 zeigen, dass die Monoverbrennung von Klärschlamm und anschließende Gewinnung von Sekundärressourcen als aussichtsreichste, zukünftig umzusetzende Verwertungsstrategie angesehen wird. Es stehen einige thermochemische Verfahren wie z.B. Verbrennung, Pyrolyse, Vergasung oder Hydrothermale Karbonisierung zur Verfügung um Energie und/oder Sekundärressourcen zu erzeugen. Die Entwicklung und Kombination dieser Verfahren sowie die optimale Integration in den regionalen und lokalen Kontext und Wirtschaftskreislauf stellt eine wesentliche Herausforderung dar. Es zeigt sich, dass die Klärschlammbewirtschaftung und -verwertung durch Monoverbrennung eine sehr komplexe Thematik ist, die interdisziplinär, über verschiedenste Fachbereiche hinweg bearbeitet werden sollte. In vorliegender Masterarbeit wird eine integral betrachtete Prozesskette der Klärschlammbewirtschaftung erarbeitet, sowie absehbare Chancen, Barrieren und Herausforderungen aufgezeigt. Ebenso werden, die an der zukünftigen Klärschlammbewirtschaftung zu beteiligenden Fachbereiche identifiziert und die, aus den unterschiedlichen Perspektiven sich ergebenden Chancen, Barrieren und Herausforderungen angeführt. Durch Information, Kommunikation, Erfassung, Integration und Partizipation aller beteiligten und betroffenen Akteure sowie der Gesellschaft im Allgemeinen soll die Klärschlammbewirtschaftung in Zukunft möglichst nachhaltig gestaltet werden, um somit die Ressource Klärschlamm langfristig und sinnvoll zu nutzen.

## Abstract

Sewage sludge is continuously produced and serves as a sink for pollutants originating from the wastewater treatment. Thus, it is defined as waste and must be disposed safely, although it is a potentially exploitable resource. In future, the material and energetic potential of this resource should be used. Current developments like the Austrian Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017 show that monoincineration of sewage sludge and subsequent extraction of secondary resources is the most promising valorisation-strategy. Different thermochemical treatment technologies like incineration, pyrolysis, gasification or hydrothermal carbonisation can be applied for recovering energy and/or secondary resources. The development and combination of such treatment technologies and the optimal integration of them in the regional and local context and economic cycle means a big challenge. It can be seen that sewage sludge management and valorisation of sewage sludge through monoincineration is a sophisticated topic, which should be dealt with interdisciplinary, involving various different disciplines. In this master thesis, a holistic considered process chain will be developed and conceivable opportunities, barriers and challenges indicated. Also in future sewage sludge management involved disciplines should be identified and opportunities, barriers and challenges viewed from their perspectives revealed. Through information, communication, acquisition, integration and participation of all relevant parties involved and the public in general a sustainable sewage sludge management should be realized prospectively. In future sewage sludge should be used as a long-lasting and useful resource.

## 1. Einleitung

Um das im Klima-Übereinkommen von Paris definierte Ziel, Reduktion der Treibhausgas(THG)-Emissionen zur Begrenzung des weltweiten Temperaturanstiegs (anthropogenen Klimawandels) zu erreichen werden 17 Sustainable Development Goals (SDGs), nachhaltige Entwicklungsziele, als unbedingt umzusetzende Maßnahmen definiert (UN-General Assembly, 2015). Für die künftige Klärschlammbewirtschaftung können dabei die Ziele 6 „*Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitätsversorgung für alle gewährleisten*“, 7 „*Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern*“, 8 „*Dauerhaftes, breitenwirksames und nachhaltiges Wirtschaftswachstum, produktive Vollbeschäftigung und menschenwürdige Arbeit für alle fördern*“, 9 „*Eine widerstandsfähige Infrastruktur aufbauen, breitenwirksame und nachhaltige Industrialisierung fördern und Innovation unterstützen*“, 11 „*Städte und Siedlungen inklusiv, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig gestalten*“, 12 „*Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen*“ und 13 „*Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen*“ als bedeutende Anknüpfungspunkte angesehen werden (UN-General Assembly, 2015). Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz sind die zukunftsweisenden Klimaschutz-Konzepte der europäischen Union (EU) für ein intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum in Europa, das den hohen Lebensstandard der Menschen langfristig erhält und gleichzeitig Leben gefährdende Umweltbelastungen vermeidet (EU-KOM, 2010). Da rd. 2/3 der THG-Emissionen aus dem Energiesektor stammen, können im Bereich der Abwasser- und Klärschlammbewirtschaftung, um einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutz-Ziele zu leisten, wichtige Maßnahmen ergriffen werden. Unter anderem indem durch Energie und Ressourcen bezogener Klärschlammverwertung THG-Emissionen vermieden und Primärenergiequellen (fossile Brennstoffe) ersetzt (EU-KOM, 2013) (EU-KOM, 2017) sowie Primärressourcen (z.B. Phosphor aus natürlichen Lagerstätten) geschont werden und eine umfassende Kreislaufwirtschaft (EU-KOM, 2015) ausgebaut wird (RAM, et al., 2017). In Österreich wird das Ende der Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft genauso wie durch Kompostierung und Vererdung für Abwasserreinigungsanlagen (ARA) mit einer Ausbaugröße von über 100.000 Einwohnerwerten (EW) durch das Positionspapier des österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbands (ÖWAV) zum Thema „Klärschlamm als Ressource“ (ÖWAV, 2014) empfohlen. Der aktuelle österreichische Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP) 2017 (BMNT, 2017, S. 261) fordert, dass bis zum Jahr 2030 zwischen 65 und 85 % des in Österreich anfallenden kommunalen Klärschlammes einer Ressourcenrückgewinnung (Phosphor) zuzuführen sind.

Zur Realisierung der genannten Maßnahmen sind ARA ab einer Ausbaugröße von 50.000 EW aufgerufen eine Strategie zur künftigen Klärschlammbewirtschaftung (z.B. Monoverbrennung) und Ressourcenrückgewinnung (Phosphor) zu erarbeiten (BMNT, 2017, S. 261). Zukünftig soll also in Österreich der stetig anfallende Klärschlamm vor allem durch Monoverbrennung einer thermischen Verwertung zugeführt werden, um die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus dem festen Rückstand der thermischen Verwertung, der Asche, ohne Verunreinigungen und Schadstoffeintrag durch andere mitbehandelte, an Ressourcen arme Abfallarten zu garantieren (BMNT, 2017, S. 260). Rund die Hälfte des im Jahr 2015 in Österreich anfallenden Klärschlammes wird unter Nutzung der Abwärme einer thermischen Behandlung zugeführt. Der Großteil davon wird nach dem aktuellen Statusbericht zur Abfallwirtschaft in Österreich (BMNT, 2018) in 4

Anlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen und in 53 weiteren (Mit-) Verbrennungsanlagen behandelt. Die dabei anfallenden phosphorarmen Aschen sind also keine reinen Klärschlammaschen und erweisen sich für die effiziente und wirtschaftliche Phosphorrückgewinnung als nicht gut geeignet. In Österreich gibt es nach Oliva et al. (2009) zwei Monoverbrennungsanlagen. Eine Anlage befindet sich am Standort Simmeringer Haide in Wien und die andere in Bad Vöslau. Die Anlage in Bad Vöslau wird jedoch aktuell wegen technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht betrieben (MÜLLER, 2017). In anderen Ländern Europas gibt es mittlerweile schon eine Vielzahl an Monoverbrennungsanlagen in denen Klärschlamm thermisch (Monoverbrennung) verwertet wird und welche einen wirtschaftlichen, Ressourcen und Energie schonenden und effizienten Betrieb ermöglichen. Das dabei am häufigsten angewendete Verfahren ist die Verbrennung des Klärschlammes durch Wirbelschichtfeuerung unter Auskoppelung von thermischer Energie und vielversprechender Möglichkeiten für die Gewinnung von Sekundärrohstoffen wie z.B. Phosphor als Düngemittel. Um die Vorgaben des BAWP 2017 erreichen zu können, müssen in Österreich in den nächsten Jahren Monoverbrennungsanlagen zur thermischen Verwertung des Klärschlammes errichtet werden. Dabei ist die Standortfindung für die Umsetzungsplanung und zur Ermöglichung einer nachhaltigen Ressourcenwirtschaft ein zentraler Punkt, bei dem nach Stoeglehner et al. (2011) Raumtypen wie der ländliche Raum und dazugehörige Kleinstädte mit der Funktion zur Ressourcenbereitstellung und -konvertierung sowie der urbane Raum mit seiner Funktion als Energie- und Ressourcenverbraucher berücksichtigt werden sollten. Genauso wie der Umstand, dass Abwasser- und Klärschlammbewirtschaftung einen eher dezentralen Charakter aufweisen.

Die im Rahmen dieser Masterarbeit durchzuführenden Untersuchungen sollen zum einen, einen Überblick über das Energie- und Ressourcenpotenzial der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung und der optimalen Nutzung desselben, im Kontext zur räumlichen Verteilung, ergeben. Zum anderen soll eine mögliche Prozesskette der künftigen Klärschlammbewirtschaftung und der dabei verwendeten Technologien erarbeitet sowie sich dabei ergebende Chancen, Barrieren und Herausforderungen hervorgehoben werden. Dabei wird ein interdisziplinärer Ansatz gewählt, um die an Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung beteiligten Fachbereiche zu identifizieren und einen Ausblick auf die Möglichkeiten der Einbindung und Zusammenarbeit der zu integrierenden Fachbereiche zu geben. Schließlich sollen Herausforderungen, Barrieren und Chancen der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung, aus der Perspektive der beteiligten Fachbereiche, eruiert und inhaltlich zentrale Verknüpfungen dargestellt werden. Die wesentlichen Fragestellungen, die durch diese Masterarbeit verfolgt werden, sind in Kapitel 2 wiedergegeben.

## 2. Zielsetzung

Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, einen Überblick über das Potenzial des Klärschlammes als Ressource hinsichtlich Energiegewinnung, Ressourcenschonung und –effizienz zu geben. Ausgehend davon werden mögliche künftige Verwertungspfade des Klärschlammes erarbeitet. Dabei soll im Besonderen die Möglichkeit der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung und die hierbei erfolgende Nutzung (Verbrauch und Produktion) von elektrischer, chemischer und thermischer Energie (z.B. resp. Stromeinspeisung, heizwertreiche Endprodukte, Wärmeauskopplung) Berücksichtigung finden. Untersuchungen der verschiedenen Prozessschritte der Klärschlammverwertung, im Besonderen der Monoverbrennung und der dabei anfallenden Zwischen- sowie Endprodukte (z.B. Klärschlammmasche), sollen deren Eignung für die Gewinnung von Sekundärrohstoffen beleuchten. Um dem Vorsatz eines interdisziplinären Ansatzes gerecht zu werden, sollen im Laufe der Masterarbeit die an Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung beteiligten Fachbereiche identifiziert und deren Anknüpfungspunkte dargestellt werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Masterarbeit erlauben es, die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung als gesamtheitliches Konzept, das über den Horizont der konventionellen Abwasser- und Klärschlammbewirtschaftung hinausreicht, zu sehen und dabei die Integration der ARA durch Klärschlammmonoverbrennung in räumliche Energie- sowie Siedlungskonzepte zuzulassen.

Es werden zwei wesentliche Forschungsfragen (FF) definiert, die die Durchführung und den Aufbau der Masterarbeit bestimmen und als „roter Faden“ bei der Ausarbeitung dienen. Im nachfolgenden Absatz sind die zwei Kern-Forschungsfragen ausformuliert:

FF1: Was ist der aktuelle Stand und die momentane Entwicklung der Klärschlammbewirtschaftung und wie schaut eine mögliche zukünftige Prozesskette der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus?

FF2: Welche Fachbereiche sind aus integraler Sicht der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung betroffen und welche Chancen, Barrieren und Herausforderungen ergeben sich aus den einzelnen Perspektiven?

Die angeführten Forschungsfragen werden im Laufe der Masterarbeit allgemein behandelt, wozu eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt wird, um das theoretische Fundament der Klärschlammverwertung, im Besonderen durch Monoverbrennung, zu bestimmen. Ebenso dient die Literaturrecherche dazu, den aktuellen Stand und momentane Entwicklungen in der Klärschlammbewirtschaftung zu eruieren. Darüber hinaus sollen Experten auf unterschiedlichen Gebieten befragt werden, um die an Klärschlammverwertung beteiligten Fachbereiche zu identifizieren und Chancen, Barrieren und Herausforderungen aus der jeweiligen Perspektive des Fachbereichs erheben zu können. Durch eine qualitative Inhaltsanalyse sollen die relevanten Informationen der Experteninterviews bestimmt und in das theoretische Fundament eingearbeitet werden. Schließlich soll sich durch die Verknüpfung der Ergebnisse der Literaturrecherche, der Expertenbefragungen und der qualitativen Inhaltsanalyse ein allgemeines, möglichst realitätsnahes Bild ergeben, das die Chancen, Barrieren und Herausforderungen der nachhaltigen Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung mit Bezug auf die zu beteiligenden Fachbereiche und die mögliche künftige Prozesskette darlegt und Ansatzpunkte mit großer Hebelwirkung im System „Klärschlammverwertung“ aufzeigt.

Es ergibt sich im Folgenden eine Gliederung der vorliegenden Masterarbeit bei der in Kapitel 3 die zugrunde liegenden theoretischen und rechtlichen Voraussetzungen, der aktuelle Stand und Entwicklungen der Klärschlammverwertung im Allgemeinen und durch Monoverbrennung im Besonderen ausführlich behandelt werden und FF1 zum Teil beantwortet wird.

In Kapitel 4 wird die Planung, Durchführung und Bearbeitung des praktischen Teils der Arbeit, also die Literaturrecherche, die Experteninterviews und die qualitative Inhaltsanalyse beschrieben.

Die erarbeiteten und aufbereiteten Ergebnisse des theoretischen und praktischen Teils der vorliegenden Masterarbeit werden in Kapitel 5 dargestellt, ausgeführt und diskutiert. In Unterkapitel 5.1 wird FF1 beantwortet und die Beantwortung der FF2 erfolgt im Unterkapitel 5.2.

In Kapitel 6 werden FF1 und FF2 abschließend beantwortet und mögliche Handlungsoptionen für die an Klärschlammverwertung beteiligten Fachbereiche erläutert sowie vorausblickende wichtige Aspekte für die zukünftige Strategie der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung gegeben.

Als Abschluss der Arbeit wird in Kapitel 7 die gesamte vorliegende Arbeit inhaltlich zusammengefasst.

Die letzten Kapitel vorliegender Masterarbeit, Kapitel 8 – 13, beinhalten das Literaturverzeichnis, das Tabellenverzeichnis, das Abbildungsverzeichnis, das Abkürzungsverzeichnis, den Lebenslauf des Verfassers vorliegender Masterarbeit und abschließend die eidesstattliche Erklärung des Verfassers.

Am Ende vorliegender Masterarbeit befinden sich die Anhänge A, B und C, in denen das standardisierte E-Mail zur Kontaktaufnahme mit den Experten, die Vorabinformation für die Experten, die Stichpunktsammlung und der Leitfaden für die Experteninterviews enthalten sind.

## 3. Grundlagen

In diesem Kapitel sollen allgemeine fachliche Grundlagen der Klärschlammverwertung, die Klärschlammmonoverbrennung wird dabei besonders berücksichtigt, dargelegt und FF1 teilweise, zumindest was den aktuellen Stand und die Entwicklung der Klärschlammverwertung betrifft, beantwortet werden. Dazu wird eine Literaturrecherche, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, durchgeführt.

Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Unterkapitel, in denen Schritt für Schritt die Grundlagen dieser Masterarbeit dargelegt werden sollen. In Unterkapitel 3.1 wird ausführlich der Anfall und die verschiedenen Arten von Klärschlamm, die möglichen und aktuellen Arten und Pfade der Klärschlammbehandlung und –verwertung beschrieben sowie auf die momentan geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen hingewiesen. Im folgenden Unterkapitel 3.2 wird das Energie und Ressourcen bezogene Potenzial, das im Klärschlamm steckt, beschrieben und die mögliche Nutzung desselben durch thermische Verwertung, im Besonderen durch Monoverbrennung, ausblickend erläutert sowie fachliche und verfahrenstechnische Grundlagen der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung dargelegt.

### 3.1 Aktuelles Klärschlammmanagement

Ein integrales Management von Klärschlamm erstreckt sich vom Anfall des Klärschlammes auf ARA über die Behandlung eben da bis hin zur Verwertung und Entsorgung des Klärschlammes außerhalb der ARA durch abfallwirtschaftliche Verwertungs-, Recyclings- und Entsorgungsbetriebe. Ein zusammenfassender Überblick soll in den nun folgenden Unterkapiteln gegeben werden.

#### 3.1.1 Anfall, Arten und Zusammensetzung

##### 3.1.1.1 Anfall

Klärschlamm fällt bei der Abwasserreinigung als Senke für die im Abwasser enthaltenen Stoffe (Schadstoffe, organische und anorganische Substanz etc.) an. Im BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 58) wird der Anfall von Klärschlamm in Österreich, aus kommunalen ARA mit einer Kapazität ab 2.000 EW<sub>60</sub>, für 2015 mit rd. 234.900 t Trockenmasse (TM) Klärschlamm angegeben.

##### 3.1.1.2 Arten

Je nachdem bei welchem Prozessschritt der Abwasserreinigung Klärschlamm anfällt werden unterschiedliche Arten von Klärschlamm definiert. Z.B. Primärschlamm, der während der mechanischen Reinigung sedimentiert wird, oder Überschussschlamm (Sekundärschlamm), der nach der biologischen Reinigung also in der Nachklärung abgezogen wird (OLIVA, et al., 2009, S. 10). Ein mögliches Prozessschema einer ARA und des dabei anfallenden Klärschlammes wird in Abbildung 1 dargestellt. Daraus soll ersichtlich werden, dass bei der Abwasserreinigung und der nachfolgenden Klärschlammbehandlung weitere Arten von Klärschlamm definiert werden können, die, gemeinsam mit den vorher erwähnten, im Folgenden kurz erläutert werden und in Tabelle 1 gemäß dem europäischen Abfallkatalog aufgelistet sind.

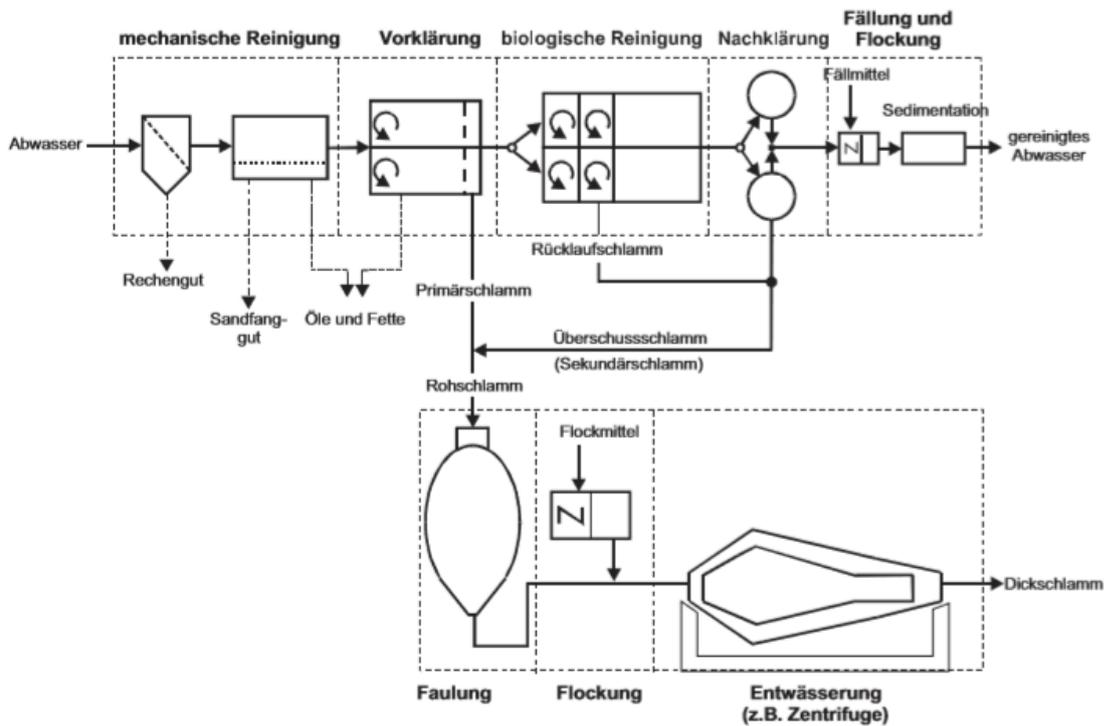


Abbildung 1: Reststoffanfall auf einer Kläranlage in Abhängigkeit der Prozessstufen (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 115).

Tabelle 1: Fraktionen aus der kommunalen Abwasserbehandlung gemäß Europäischem Abfallkatalog (EAK), ONR 1921 und ÖNORM S 2100 (OLIVA, et al., 2009, S. 12).

EAK		ÖNORM S 2100		
Abfallcode	Abfallbezeichnung	Schlüsselnummer (SN)	Spez. g	Abfallbezeichnung
		92201		kommunale Qualitätsklärschlämme
		92212		kommunale Klärschlämme
190805	Schlämme aus der Behandlung von kommunalem Abwasser	94302		Überschussschlamm aus der biologischen Abwasserbehandlung
		94302	77 g	Überschussschlamm aus der biologischen Abwasserbehandlung – gefährlich kontaminiert
		94501		anaerob stabilisierter Schlamm (Faulschlamm)
		94502		aerob stabilisierter Schlamm
190899	Abfälle a.n.g.	94301		Vorklärschlamm
		94301	77 g	Vorklärschlamm – gefährlich kontaminiert
200304	Fäkalschlamm	94303		Fäkalschlamm aus Hauskläranlagen und Sammelgruben
		94303	77 g	Fäkalschlamm aus Hauskläranlagen und Sammelgruben – gefährlich kontaminiert

Spez. 77... Spezifikation 77 = gefährlich kontaminiert; g...gefährlich, a.n.g. ... anderswo nicht genannt

### Primärschlamm

Primärschlamm fällt in der mechanischen Abwasserreinigung durch den Einsatz von physikalischen Verfahren, zur Abtrennung von im Abwasser enthaltenen absetzbaren Stoffen, an. Er enthält u.a. erkennbare Bestandteile wie Kot, Gemüse, Obstreste, Papier, Korken und Toilettenpapier. Der grauschwarze, graubraune bis gelbliche Primärschlamm geht nach der Entnahme aus dem System schnell in stinkende Fäulnis über. Die vollständige Abtrennung der Sandfraktion aus dem Primärschlamm ist ein wichtiges Ziel auf ARA, um negative abrasive Auswirkungen auf Rohrleitungen, Pumpen, Behälter usw. zu vermeiden (DICHTL & SCHMELZ,

2015, S. 116). Vielfach erfolgt die Abtrennung der Sandfraktion in einem, dem Vorklärbecken vorgeschalteten, Sandfang, durch den auch Fette und Öle, in Kombination, abgeschieden werden.

Als Ausblick kann an dieser Stelle angemerkt werden, dass die Steigerung des Primärschlammmanfalls, auf ARA mit anaerober Stabilisierung (Faulung), wesentlich zur Erhöhung der Gasausbeute durch die anaerobe Fermentation beitragen kann, da mehr Kohlenstoff mit dem Primärschlamm aus dem Abwasserreinigungssystem ausgetragen und für die Produktion von Methangas (Biogas) zur Verfügung steht. Dazu kann die Primärschlammfracht nach Dichtl und Schmelz (2015, S. 123) durch eine Erhöhung der Verweilzeit im Vorklärbecken von einer Stunde auf zwei Stunden um ca. 10 % gesteigert werden.

Nach Ansicht des Verfassers dieser Arbeit, dürften sich durch genannte Optimierungsstrategie evtl. auch günstigere Bedingungen für die Umsetzung der anaeroben Ammoniumoxidation (Anammox) im Hauptstrom der Abwasserreinigung ergeben, da weniger Kohlenstoff in der biologischen Reinigungsstufe abgebaut werden muss. Jedoch müsste dies durch praktische Experimente kritisch untersucht und belegt werden. Genauso wie auch die Auswirkungen, evtl. Reduktion, auf den Kohlenstoffdioxid(CO<sub>2</sub>)-Ausstoß (u.U. auch Ausstoß von Stickstoff(N)-Emissionen) durch die Veratmung der organischen (org.) Substanz durch Mikroorganismen in der biologischen Reinigungsstufe, geprüft werden sollte.

### Sekundärschlamm (Überschussschlamm)

In der biologischen Stufe der Abwasserreinigung, bei der u.a. gelöste org. Substanz entfernt wird, entsteht durch die Lebenstätigkeit der beteiligten Mikroorganismen neue Zellsubstanz, die zur Erhaltung des Gleichgewichts der biologischen Abwasserreinigung kontinuierlich entnommen wird (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 117). Dieser aus dem Zuwachs organischer Zellsubstanz gebildete Schlamm wird Überschussschlamm oder Sekundärschlamm genannt (DIN 4045, 1985, zit. bei (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 117)).

### Tertiärschlamm

Tertiärschlamm, der durch chemische Fällungsreaktionen während der Abwasserreinigung, um z.B. Phosphor(verbindungen) mit metallischen Salzen oder Kalk in gebundene Formen zu überführen, entsteht, fällt meist gemeinsam mit Primär- oder Sekundärschlamm an. Tertiärschlamm aber unterscheidet sich in seinen Eigenschaften, welche durch die entsprechende stoffliche Reaktion bedingt sind, wesentlich von Primär- und Sekundärschlamm (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 117).

Zu beachten ist, dass die Wahl und der Einsatz von Fällungsmitteln wie z.B. Aluminium(Al)- oder Eisen(Fe)salzen, evtl. Abfallprodukte aus der Metallverarbeitung, letztlich mitbestimmen welche Stoffe im Klärschlamm enthalten sind und ob sich bestimmte Stoffe (Schadstoffe wie Schwermetalle) erst dadurch anreichern. Deshalb sollte aus Sicht des Verfassers dieser Masterarbeit vermehrt Wert auf die optimale Wahl des Verfahrens zur Phosphorelimination gelegt werden. So können z.B. durch Optimierung der Prozesse in der biologischen Reinigungsstufe der Abwasserreinigung, evtl. anaerobe Ammoniumoxidation, gute Bedingungen für eine fast vollständige biologische Phosphorelimination erreicht werden.

### Rohschlamm

Als Rohschlamm wird im Allgemeinen jede Art von nicht stabilisiertem Schlamm bezeichnet, d.h. Primär-, Sekundär- und Tertiärschlamm, unabhängig davon ob sie einer Schlammwasserabtrennung unterzogen werden oder nicht (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 117).

Genauso wie auch ein Gemisch der genannten Klärschlammarten als Rohschlamm bezeichnet werden kann.

### Stabilisierter Schlamm

Wird Rohschlamm einer geordneten Schlammbehandlung wie z.B. einem biologischen (z.B. Faulung) oder chemischen Stabilisierungsverfahren unterzogen, so wird der Schlamm nach erfolgter Behandlung als stabilisierter Schlamm bezeichnet (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 118).

### Faulschlamm

Faulschlamm wird der anaerob stabilisierte Schlamm genannt, welcher tiefschwarz ist und leicht erdig, teerartig riecht (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 118). Wichtig zu beachten ist, im Zusammenhang mit vorhergehender biologischer Phosphorelimination in der biologischen Reinigungsstufe, dass durch die anaerobe Stabilisierung u.U. ein Teil der Phosphorverbindungen durch chemische Reaktionen als z.B. Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) ausgefällt wird und zu Schäden an Pumpen, Rohrleitungen u.dgl. führen kann. Unter kontrollierten Bedingungen kann dieser Vorgang jedoch zur Rückgewinnung von Phosphor genutzt werden, genauere Beschreibungen folgen in Unterkapitel 3.2.2.

### Kennwerte der verschiedenen Arten von Klärschlamm

Nachfolgende Tabelle 2 gibt, zusammenfassend, wichtige Kennwerte einiger vorher genannter Schlammarten wieder. Dabei kann besonderes Augenmerk auf die Kennwerte Trockenrückstand (TR), Glühverlust (GV) und Heizwert (HW) gelegt werden, da sie, wie in Unterkapitel 3.2.1 detailliert beschrieben, wichtige Parameter für die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung sind.

Tabelle 2: Zuordnung wichtiger Kennwerte zu den Schlammarten (BAHRS, 1997. zit. bei (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 122)).

Schlammkennwert	Einheit	Rohschlamm (RS) Mischung aus Primär- und Überschuss-schlamm	Überschuss-schlamm (ÜS)	Faulschlamm (FS) schlecht ausgefault	Faulschlamm (FS) gut ausgefault
Bereits mit den 5 Sinnen erkennbar		grobe Struktur gelb bis grau, stinkt, Schlammwasser trüb	flockige Struktur, bräunlich, erdiger Geruch, klares Schlammwasser	zwischen Rohschlamm und gut ausgefaultem Schlamm	homogen, feinkörnig schwarz, teerartiger Geruch, Schlammwasser klarer als RS
pH-Wert	-	5,5–6,5	6,5–7,5	6,5–7,0	7,2–7,5
Trockenrückstand TR	%	3–5	0,5–1,0	2,5–4,0	2,0–3,5
Glühverlust GV	%	60–75	55–80	>55	45–55
Säureverbrauch	mval/L	10–20	<2–10	20–50	60–90
Organ. Säuren	mval/L	30–60	nahe 0	10–70	<5,0/nur Essigsäure <3,0
Spez. Filtrationswiderstand	m/kg	10 <sup>13</sup> –10 <sup>15</sup>	10 <sup>13,5</sup> –10 <sup>14,5</sup>	10 <sup>13,5</sup> –10 <sup>15</sup>	10 <sup>12,5</sup> –10 <sup>14</sup>
Heizwert	cal/g TM	3.500–4.500	3.500–5.000	>3.500	2.500–3.500

### 3.1.1.3 Klärschlammzusammensetzung

In folgender Tabelle 3 wird eine zusammenfassende Übersicht der wichtigsten Parameter und Inhaltsstoffe des Klärschlammes aus österreichischen ARA, geordnet nach deren Ausbaugröße (Kapazität der Abwasserreinigungsleistung in  $EW_{60}$ ), gegeben.

Tabelle 3: Median-Werte der Klärschlamm-Parameter zusammengefasst nach  $EW_{60}$ -Werte der entsprechenden Abwasserreinigungsanlagen von 1998 - 2002 (KÜGLER, et al., 2004, S. 75).

Parameter	Einheit	< 2000	2000-10000	10001-15000	15001-50000	50001-150000	>150000
Trockensubstanz	Gew %	14,38	20,40	25,90	35,71	27,54	21,00
Wassergehalt	Gew %	85,62	79,60	65,40	63,98	72,60	71,25
pH-Wert		7,24	7,09	7,67	7,83	7,89	10,03
Ammonium-Stickstoff	g/kg TS	3,02	0,60	0,85	1,71	1,96	2,03
Nitrat-Stickstoff	g/kg TS	0,02	0,04	0,25	0,14	0,10	0,01
organ. Stickstoff	g/kg TS	-	-	5,35	14,77	12,66	-
Stickstoff ges.	g/kg TS	41,00	26,36	26,00	23,45	22,20	34,90
Kalzium	g/kg TS	14,21	16,22	144,71	111,54	64,18	246,71
Kalium	g/kg TS	3,40	2,89	2,58	2,44	3,10	2,07
Magnesium	g/kg TS	4,28	6,11	7,13	9,25	13,35	18,14
Phosphor	g/kg TS	31,61	26,50	23,53	31,08	35,71	68,49
Arsen	mg/kg TS	-	-	8,01	6,93	5,80	6,02
Blei	mg/kg TS	40,33	41,45	42,00	52,53	74,39	90,38
Cadmium	mg/kg TS	1,67	1,13	0,80	1,10	1,65	1,93
Chrom	mg/kg TS	52,08	39,38	37,60	44,30	47,02	52,78
Kobalt	mg/kg TS	29,76	14,88	4,97	7,31	6,16	7,81
Kupfer	mg/kg TS	306,26	225,78	196,92	180,00	208,15	211,79
Mangan	mg/kg TS	123,23	0,84	326,94	330,00	190,00	117,09
Molybdän	mg/kg TS	4,40	3,00	2,69	5,17	5,54	5,36
Nickel	mg/kg TS	55,65	37,91	23,75	28,36	24,91	28,03
Quecksilber	mg/kg TS	0,69	1,08	0,80	1,00	1,08	1,89
Zink	mg/kg TS	1.4763,78	768,70	716,27	876,67	797,13	837,47
AOX	mg/kg TS	-	157,63	191,00	118,33	143,00	-

Daraus soll ersichtlich werden wie unterschiedlich Klärschlamm zusammengesetzt sein kann und wie unterschiedlich die Konzentrationen bestimmter Stoffe im Klärschlamm, in Abhängigkeit der Ausbaugröße der ARA, sind. Wobei dafür vor allem die Charakteristik des Einzugsgebiets der ARA, im Sinne von ob aus urban oder ländlich, industriell oder landwirtschaftlich geprägtem Raum entwässert wird, verantwortlich ist. Saisonale Schwankungen der Klärschlammzusammensetzung und der Konzentrationsschwankungen bestimmter Stoffe im

Klärschlamm werden aus Tabelle 3 nicht ersichtlich, sind auch im Einzelnen nur unter erheblichem Messaufwand zu bestimmen. Dennoch soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass saisonale Unterschiede in der Charakteristik des Einzugsgebiets der ARA, z.B. touristische Gebiete, zu erheblichen Unterschieden in der Klärschlammzusammensetzung führen können. In Tabelle 3 sind als bekannte Schadstoffe hauptsächlich Schwermetalle angeführt, um jedoch ein vollständigeres Bild der potenziell im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe zu geben werden in Tabelle 4 ausgewählte org. Schadstoffe aufgelistet.

Tabelle 4: Konzentration ausgewählter org. Schadstoffe in den Klärschlämmen der EU (FÜRHACKER & BURSCH, 2007. zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 21)).

Organischer Schadstoff	Konzentrationsbereich in mg/kg	Tendenz des Schadstoffgehalts
AOX	200–400	gleichbleibend/leicht fallend
PCB <sub>6</sub>	0,01–0,02	abnehmend
PCDD/F	5–100 ng/kg TE	abnehmend
LAS	5–18.000	abhängig von Behandlung
Nonylphenol	1–600	abhängig von Behandlung
PAK	1–50	gleichbleibend
DEHP	1–200	gleichbleibend/leicht fallend
PBDE	10–400 µg/kg	gleichbleibend

D.h. im Klärschlamm finden sich nicht nur anorganische (anorg.) Schadstoffe wie Schwermetalle sondern auch org. Schadstoffe wie adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX), polychlorierte Biphenyle (PCB), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Pestizide, Tenside, Hormone, Pharmazeutika, Nanopartikel sowie Pathogene wie Bakterien, Viren, Protozoen und Wurmeier von Parasiten ((SIBIELSKA, 2014), (FIJALKOWSKI et. al., 2014) und (KACPRZAK und STANCZYK-MAZANEK, 2003) zit. bei (KACPRZAK, et al., 2017, S. 41)). Aufgrund des potenziellen Risikos durch Ausbringung von Pathogenen und Schadstoffen verbieten viele Länder den Einsatz von Klärschlamm in der Lebensmittelproduktion, also auch in der Landwirtschaft (KACPRZAK, et al., 2017, S. 42).

### 3.1.2 Behandlung

Eine Klärschlammbehandlung wird durchgeführt um 1. das Volumen des Klärschlammes zu reduzieren, 2. den Klärschlamm zu stabilisieren und hygienisieren und 3. den Klärschlamm in eine Form, in der „er ohne Geruchsbelästigung gelagert und in die Umwelt zurückgegeben werden kann“ (OLIVA, et al., 2009, S. 11), zu bringen. Bei der Klärschlammbehandlung geht es also um die Schlammstabilisierung und die dabei zu erreichenden Ziele wie Reduzierung org. und geruchsbildender Inhaltsstoffe, Verringerung der Schlammfeststoffe, Verbesserung der Entwässerbarkeit und Verminderung von Krankheitserregern (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 125). Eine Auswahl der bekanntesten Behandlungsverfahren ist in Abbildung 2 dargestellt, wobei vorausblickend auf das Unterkapitel 3.2 auch einige, an die Klärschlammbehandlung anschließende, Verfahren zur Klärschlammverwertung und –entsorgung abgebildet sind.

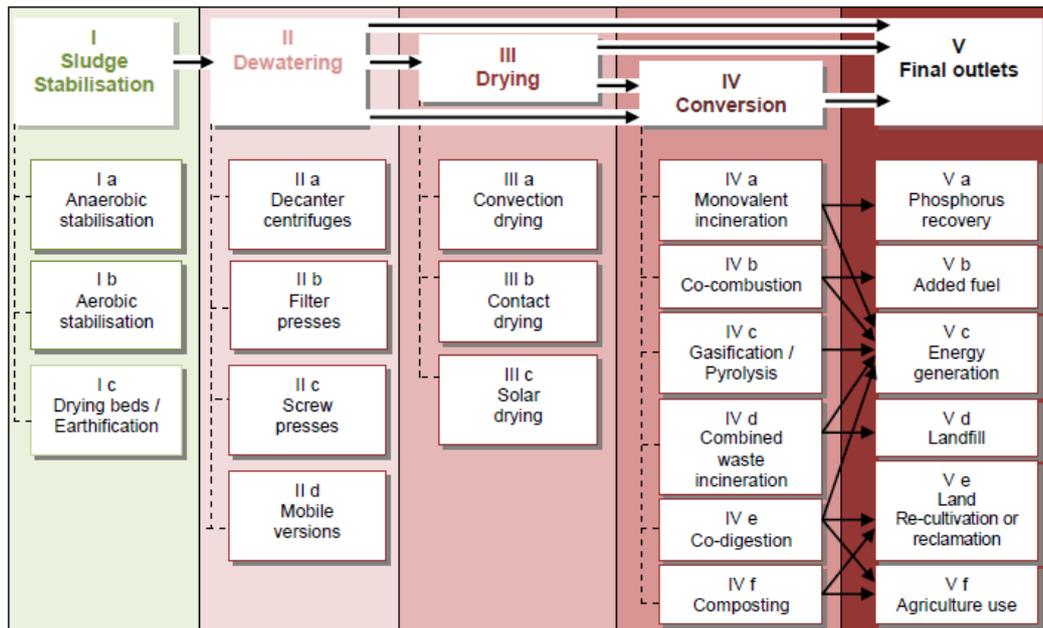


Abbildung 2: Überblick über die möglichen Klärschlammverwertungspfade (INTECUS GmbH, 2016b, S. 5).

Als Grundregel für die Klärschlammbehandlung ist zu beachten, dass je weniger Wasser der Klärschlamm enthält umso kosteneffizienter kann die weitergehende Klärschlammbehandlung oder –verwertung erfolgen (INTECUS GmbH, 2016a, S. 24). Im Folgenden wird eine Auswahl, aus Sicht des Verfassers dieser Masterarbeit, wichtiger Behandlungsverfahren einzeln und etwas detaillierter beschrieben.

### 3.1.2.1 Desintegration von Klärschlamm

Ziel der Klärschlamm-desintegration ist es, die Zellen der im Überschussschlamm vorhandenen lebenden wie abgestorbenen Bakterien und anderer biologischer Substanz durch geeignete technische Verfahren zu zerstören um das gesamte Zellmaterial für die anaerobe Fermentation (Faulung - Biogasproduktion) zur Verfügung stellen zu können (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 166).

Es bieten sich verschiedene Verfahren zur Klärschlamm-desintegration an (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 166):

1. Thermisch Verfahren, die bei Temperaturen  $<100\text{ °C}$  oder  $>100\text{ °C}$  ablaufen können;
2. Chemische Verfahren wie z.B. Nassoxidation, Ozonierung, alkalische oder saure Hydrolyse;
3. Biochemische Verfahren wie z.B. Enzymzugabe oder Autolyse;
4. Physikalische und mechanische Verfahren wie z.B. Rührwerkskugelmühle, Scherspalthomogenisator, Ultraschall, Elektroimpuls oder Lysatzentrifuge;

Der durch Klärschlamm-desintegration zunehmende Aufschlussgrad bedeutet für die nachfolgende anaerobe Fermentation (Faulung - Biogasproduktion) einen höheren erreichbaren Abbaugrad (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 174). D.h. es kann mehr Methan, also Biogas produziert werden. In Abbildung 3 ist die Steigerung des Abbaugrades durch Klärschlamm-desintegration dargestellt.

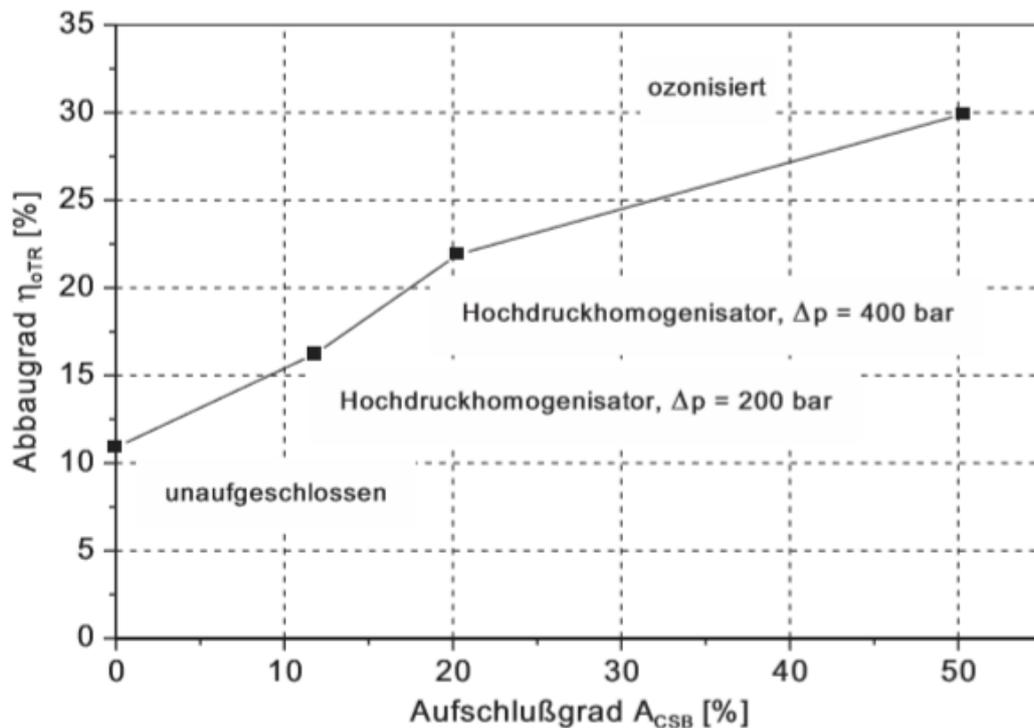


Abbildung 3: Erreichte Abbaugrade für verschieden aufgeschlossene Faulschlämme bei anaerober Behandlung im submersen Betrieb (KOPP et al., 1997, zit. bei (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 175)).

### 3.1.2.2 Anaerobe Stabilisierung von Klärschlamm

Die anaerobe Stabilisierung, auch bezeichnet als anaerobe Fermentation, Vergärung oder Faulung von Klärschlamm und evtl. anderen biogenen Abfällen (Co-Fermentation) dient der Produktion von Biogas (auch als Faulgas oder Methangas bezeichnet), aus welchem, nach einer durchzuführenden Gasreinigung, Strom erzeugt werden kann (OLIVA, et al., 2009, S. 60-61). Ebenso ist ein positiver Effekt der anaeroben Stabilisierung (Faulung) die Volumenreduktion des Klärschlammes um etwa 30 % (NIKODEM, et al., 2018, S. 397), sowie dass durch die anaerobe Stabilisierung des Klärschlammes seine Entwässerbarkeit gesteigert werden kann. Durch die Verwertung des gewonnenen Biogases in Blockheizkraftwerken (BHKW) kann, wie erwähnt, elektrische Energie erzeugt und gleichzeitig über Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) thermische Energie ausgekoppelt werden (NIKODEM, et al., 2018, S. 397). Zu beachten ist, dass das durch anaerobe Stabilisierung (Faulung) des Klärschlammes gewonnene Biogas einer Aufbereitung unterzogen werden muss, da erhebliche Mengen von Schwefelwasserstoff und anderer, für Verbrennungsmotoren schädliche Komponenten enthalten sein können. Auch für die Einspeisung in bestehende (Erd)Gasnetze muss das Biogas aufbereitet und konzentriert werden.

Das am öftesten eingesetzte und praktikabelste Verfahren zur anaeroben Fermentation ist ein geschlossener, volldurchmischer und möglichst kontinuierlich beschickter Faulbehälter mit einstufiger mesophiler Betriebsweise, daher auch als „konventionelles Faulverfahren“ oder „konventioneller Faulbehälter“ bezeichnet (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 128 ff.). In nachfolgender Abbildung 4 ist ein solcher Anlagentyp dargestellt.

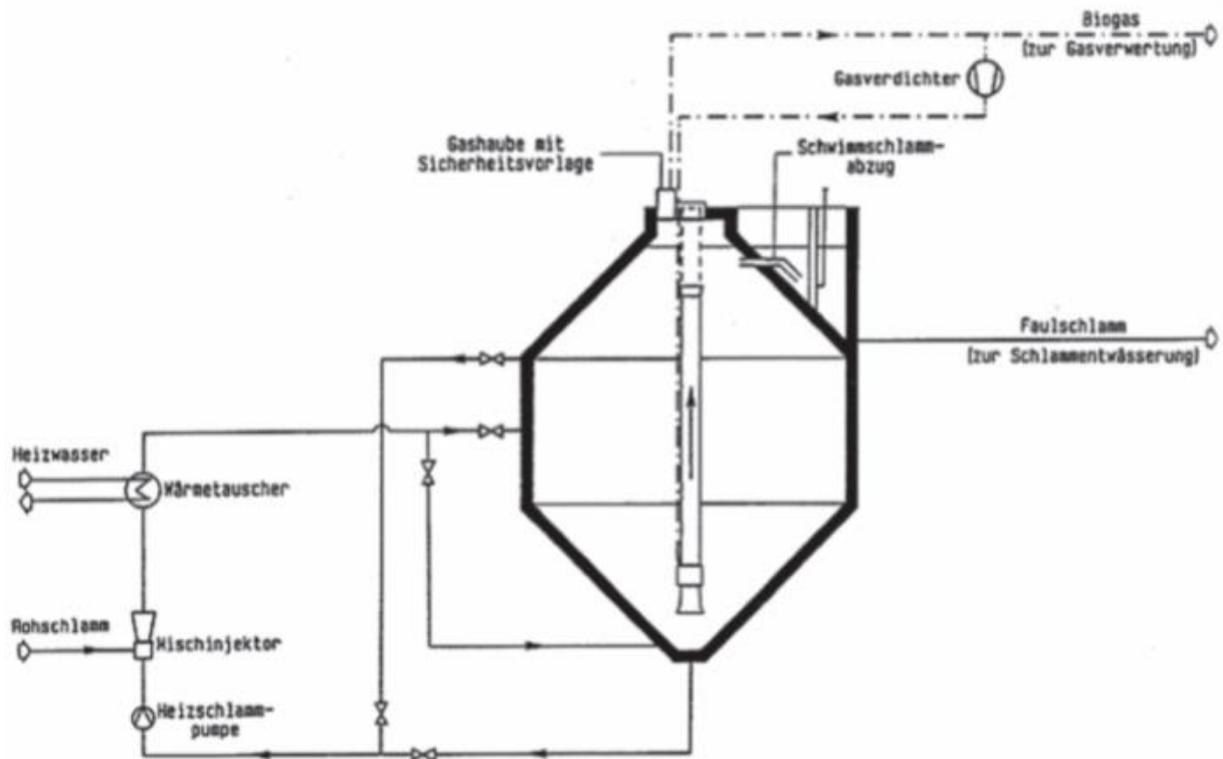


Abbildung 4: Konventionelle Faulbehälter mit Betriebseinrichtungen (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 131).

Neben einstufigen Betriebsweisen können noch zweistufige und kaskadische Betriebsweisen als bewährte Verfahrenstypen erwähnt werden (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 156). Die zweistufige Betriebsweise realisiert eine räumliche Trennung der bei der Faulung ablaufenden Prozesse, der Hydrolyse und Versäuerung einerseits und der Acetogenisierung und Methanogenisierung andererseits, wobei eine vollständige Trennung, aufgrund der komplexen Klärschlammzusammensetzung und der dadurch erschwerten Hydrolyse, nicht erreicht werden und für den Betrieb von Nachteil sein kann (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 158-159). Durch die zweistufige Betriebsweise kann der anaerobe Abbauprozess erheblich beschleunigt und evtl. auch das erforderliche Behältervolumen reduziert werden, vor allem dann, wenn der erste Faulbehälter im thermophilen Bereich betrieben wird (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 159). Bei der kaskadischen Betriebsweise durchläuft der Schlamm mehrere Faulbehälter nacheinander. Dadurch ergeben sich für die nachgeschalteten Faulbehälter wesentlich geringere org. Belastungen als für den ersten Faulbehälter und das kann für den optimalen Betrieb von Nachteil sein (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 157-158). Um die mesophile Betriebsweise zu gewährleisten wird der Rohschlamm auf 30 – 37 °C erwärmt und dazu eignet sich die indirekte Wärmeübertragung mittels Wärmetauschern bestens (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 136).

Durch die anaerobe Stabilisierung (Faulung) des Klärschlamms können 800 – 1.000 l Faulgas (mit 60 – 65 % Methangehalt) je kg abgebauter org. Substanz gewonnen werden (SCHMELZ, 2002, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 61)). Um die Gasausbeute in Faulbehältern zu erhöhen empfiehlt sich eine mögliche Klärschlammdeintegration, im Vorherigen beschrieben, in Betracht zu ziehen (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 166).

### 3.1.2.3 Entwässerung von Klärschlamm

Die Entwässerung von Klärschlamm kann auf natürliche Weise durch z.B. Vererdung oder durch den Einsatz von geeigneten Maschinen erfolgen (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 208 ff.). Die

maschinelle Entwässerung von Klärschlamm kann hinsichtlich ihrer Wirkungsweise in zwei Ansätze unterteilt werden und zwar zum einen in die Entwässerung durch Filtration und zum anderen in die Entwässerung durch Erzeugung eines künstlichen Schwerefeldes (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 211). Mögliche Verfahren und Technologien, die dabei zum Einsatz kommen können, sind (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 212 ff.):

- Kammerfilterpressen
- Membranfilterpressen
- Bandfilterpressen
- Zentrifugen

Durch mechanische Entwässerungsverfahren können, unter Einsatz von Konditionierungsmitteln wie Kalk oder Polymeren, Trockensubstanz(TS)-Gehalte von max. 45 % erreicht werden, höhere TS-Gehalte sind nur durch thermische Trocknungsverfahren möglich (AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG, 2007, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 52-53)). Die Wahl und der Einsatz von Konditionierungsmitteln bestimmen mit welche Stoffe letztlich im Klärschlamm oder auch in der Asche aus der Klärschlammverbrennung enthalten sind. Bei der Entwässerung von Klärschlamm sind 3 - 5 kWh<sub>elektrisch</sub> pro kg entwässertem H<sub>2</sub>O nötig um den TS-Gehalt des Klärschlammes von 5 % auf 35 % zu erhöhen (INTECUS GmbH, 2016b, S. 13). Die dafür nötigen monetären Kosten liegen im Bereich von 50 - 100 €/t TS Klärschlamm (KÜGLER, et al., 2004, S. 2). An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass das durch Klärschlamm-entwässerung anfallende Prozesswasser u.U. erhebliche negative Rückwirkungen auf die Abwasserreinigung haben kann und einer geeigneten Behandlungsstrategie, evtl. im Seitenstrom, zugeführt werden sollte (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 217 ff.).

### 3.1.2.4 Transport von Klärschlamm

Wenn in Zukunft eine thermische Behandlung des Klärschlammes priorisiert wird, so ist zu bedenken, dass die in Österreich betriebenen Abfallverbrennungsanlagen ungleichmäßig über das Staatsgebiet verteilt sind und es somit zu langen Transportwegen des Klärschlammes kommen kann (OLIVA, et al., 2009, S. 69). Genauso wie die Lösung des „Logistikproblems“ für die künftige Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung essenziell ist, s.a. Unterkapitel 5.2.9. Die Kosten für den Transport von Klärschlamm können mit 3 – 30 €/t angegeben werden (INTECUS GmbH, 2016a, S. 27). Soll eine Tonne entwässert Klärschlamm mit 37,7 % TR über eine Distanz von 100 km transportiert werden, so entstehen dabei 15,3 kg CO<sub>2</sub>-äq. und ein kumulierter Energieaufwand von 0,2 TJ (MONTAG, et al., 2015, S. 84).

### 3.1.3 Verwertung

Für die Klärschlammverwertung können ähnliche Ziele angeführt werden wie für die Klärschlammbehandlung, also Volumenreduktion, Stabilisierung und Überführung in eine geeignete Form für die Entsorgung. Darüber hinaus kann aber durch Klärschlammverwertung der Klärschlamm einer energetischen und/oder stofflichen Nutzung zugeführt werden. Aktuelle und mögliche Arten und Verfahren zur Klärschlammverwertung werden im Nachfolgenden beschrieben.

#### 3.1.3.1 Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

Stabilisierter und entseuchter Klärschlamm wird in flüssiger oder entwässert Form in der Landwirtschaft als Bodenverbesserungsmittel und zu Düngezwecken eingesetzt, da er wichtige Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor, Kalzium, Magnesium, Kalium usw. sowie org. Substanz

(Humuswert) enthält (OLIVA, et al., 2009, S. 54-57). Inwieweit Klärschlamm in Zukunft noch in der Landwirtschaft Verwendung finden wird ist ungewiss, da die im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe zu erheblichen negativen Wirkungen in der Umwelt (Gewässer, Boden usw.) führen können (OLIVA, et al., 2009, S. 55-57). So wird auch im BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 260) darauf hingewiesen, dass die direkte landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm für die Zukunft nicht gesichert ist.

### **3.1.3.2 Klärschlammkompostierung**

Entwässerter Klärschlamm kann zusammen mit anderen Stoffen wie z.B. Strauchschnitt und Mähgut kompostiert werden. Durch die Kompostierung kann neben einer strukturellen Verbesserung (Volumenreduktion) auch die hygienische Beschaffenheit des Klärschlammes optimiert werden, jedoch ist die Verwendung von Klärschlammkomposten, wegen der enthaltenen Schadstoffe, in vielen Fällen bedenklich (OLIVA, et al., 2009, S. 57-58).

### **3.1.3.3 Klärschlammvererdung**

Mineralische und org. Ausgangsmaterialien (Klärschlamm) werden vermischt, in einem biologischen Prozess verarbeitet und anschließend mit Bodenaushub versetzt oder weiteren Stabilisierungs-, Durchmischungs- und Lagerungsphasen zugeführt um für Landschaftsbau, Rekultivierung, Schutzbau oder Untergrundverfüllung als Boden oder Bodenersatz zu dienen (UMWELTBUNDESAMT, 2004 und AMT DER SALZBURGER LANDESREGIERUNG, 2001, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 59)).

### **3.1.3.4 Klärschlammverwertung durch mechanisch-biologische Abfallbehandlung**

Da das Endprodukt der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) auf Deponien abgelagert wird, ist ungewiss ob diese Verwertungsart für den Klärschlamm in Zukunft noch in Frage kommt, da für den Klärschlamm am 01.01.2009 ein Deponieverbot erlassen wurde und außerdem erhebliche Nachteile für die MBA durch die Mitbehandlung von Klärschlamm entstehen (OLIVA, et al., 2009, S. 63).

### **3.1.3.5 Klärschlammverwertung durch Trocknung**

Die Trocknung von Klärschlamm wird vor allem durchgeführt um ein heizwertreiches Produkt zu erzeugen, wobei auch die Reduktion von Volumen und Gewicht ein wichtiges Ziel ist (MELSA, 1998, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 53)).

Eine detailliertere Beschreibung der Klärschlammverwertung durch Trocknung findet sich in Unterkapitel 3.2.1.

### **3.1.3.6 Klärschlammverwertung durch Verbrennung**

Durch die thermische Behandlung von Klärschlamm können die org. Schadstoffe vollständig zerstört, die anorg. Schadstoffe abgetrennt und die Inertisierung sowie Hygienisierung des Abfalls (Klärschlamm) umgesetzt werden. Ebenso wird eine wesentliche Gewichts- und Volumenreduktion erreicht. Zusätzlich trägt der Klärschlamm als Ersatzbrennstoff in Anlagen zur Zementerzeugung, der Energieversorgung sowie der Papier- und Zellstoffindustrie zur Energiegewinnung und Emissionsreduktion treibhausrelevanter Gase bei (OLIVA, et al., 2009, S. 63-64/78).

Eine detailliertere Beschreibung der Klärschlammverwertung durch (Mono)Verbrennung findet sich in Unterkapitel 3.2.1.

### 3.1.3.7 Deponierung von Klärschlamm

Die Deponierung von Klärschlamm kann eigentlich nicht als Verwertungsart angesehen werden, da sie aber lange Zeit einen wichtigen Entsorgungspfad dargestellt hat, soll sie hier vollständigheitshalber erwähnt werden.

In Österreich ist die Deponierung von unbehandeltem Klärschlamm seit 01.01.2009 nicht mehr zulässig (BMNT, 2017, S. 259). Ebenso ist sie in Deutschland seit 01.01.2005 untersagt (NIKODEM, et al., 2018, S. 385). Jedoch werden in Deutschland derzeit ca. 46 % der deutschen Klärschlammaschen über Tage und ca. 13 % untertage deponiert (PLANK, n.v.). Für die Entsorgung von Klärschlamm, der stofflich und energetisch verwertet worden ist, sprich Klärschlammaschen, oder in Zukunft verwertet werden soll, kann ein System des intelligenten Deponierens zum Einsatz kommen, das gezielt Sekundärrohstofflager einrichtet (ÖWAV, 2016).

### 3.1.3.8 Kosten der Behandlung und Verwertung von Klärschlamm

Die Wahl der optimalen Klärschlammbehandlung und -verwertung ist für die Wirtschaftlichkeit des Betriebs einer ARA ein sehr wichtiger Punkt, da die Klärschlammbehandlung und -verwertung insgesamt ca. 30 – 50 % der Gesamtkosten der Abwasserreinigung ausmachen (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 125). In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die Kosten für die Klärschlammverwertung in Österreich aufgelistet.

Tabelle 5: Kosten der Behandlung ohne Entwässerung in Österreich (OLIVA, et al., 2009, S. 52).

Behandlungsweg	Kosten	Quellen
Landwirtschaft	80–200 €/t TS	DICKER 2006
Kompostierung mit Verwertung in Landwirtschaft oder Landschaftsbau	160–240 €/t TS	DICKER 2006
MBA	160–260 €/t TS	UMWELTBUNDESAMT 2004a
Vererdung	143–286 €/t TS	UMWELTBUNDESAMT 2004a
Mitverbrennung*	200–480 €/t TS	UMWELTBUNDESAMT 2004a
Monoverbrennung	230 €/t TS 330–500 €/t TS	DICKER 2006 ERMEL 2002

\* Die Kosten der Mitverbrennung hängen vom Sektor ab, in dem die Mitverbrennung stattfindet:  
Zementindustrie < Kohlekraftwerke < Klärschlammmitverbrennung in Abfallmonoverbrennungsanlagen

Die Kosten für die Klärschlammmonoverbrennung, ohne die Transportkosten zu berücksichtigen, variieren zwischen 180 – 550 €/t TS entwässerten Klärschlamm (>25 % TS) (INTECUS GmbH, 2016a, S. 28). Im Vergleich dazu können die Kosten für die Co-Verbrennung in gemischten Verbrennungsanlagen inklusive Transportkosten im Bereich von 120 – 320 €/t TS für entwässerten Klärschlamm (25 % TS) und 40 – 100 €/t TS für getrockneten Klärschlamm (90 % TS) liegen (INTECUS GmbH, 2016a, S. 28).

### 3.1.3.9 Aktueller Stand der Klärschlammverwertung in ausgewählten Ländern

In den folgenden Unterkapiteln soll ein kurzer Überblick über die gegenwärtige Situation der Klärschlammverwertung in Österreich und ausgewählten Nachbarländern (Schweiz, Deutschland, Italien) sowie der EU gegeben werden. Darüber hinaus soll die sich abzeichnende künftige Strategie zur Klärschlammverwertung dieser Länder, die aus momentanen Entwicklungen absehbar ist, kurz angerissen werden. Detailliertere Ausführungen über

Entwicklungen und Herausforderungen der künftigen Klärschlammverwertung in Österreich finden sich in Unterkapitel 3.2.

### Stand der Klärschlammverwertung in Österreich

Laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 58) werden 2015 von den rd. 239.800 t TM statistisch erfassten kommunalen Klärschlamms (die Differenz von 4.900 t zum Klärschlammanfall (siehe Unterkapitel 3.1.1) ergibt sich dadurch, dass in einer ARA in Vorarlberg Lagerbestände an Klärschlammgranulat abgearbeitet werden), der nachfolgenden Behandlungen oder Verwertung zugeführt:

- rd. 19 % werden auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht;
- rd. 52 % werden unter Nutzung der Abwärme thermisch behandelt (auch dezentral);
- rd. 29 % werden sonstig behandelt (z.B. MBA, Kompostierung, Vererdung);

Tabelle 6 gibt die genauen Zahlen für die einzelnen Behandlungs- und Verwertungsarten und Entsorgungspfade an.

Tabelle 6: Aufkommen und Behandlung der kommunalen Klärschlämme (BMNT, 2017, S. 58).

Bundesländer	Aufkommen [t TM, gerundet] <sup>1</sup>	Statistisch erfasste Behandlung [t TM, gerundet]			Behandlung gesamt
		Landwirtschaft	Thermische Behandlung	Sonstige Behandlung <sup>4</sup>	
Burgenland	11.000	3.900	0	7.100	11.000
Kärnten	13.000	700	7.300	5.000	13.000
NÖ <sup>2</sup>	44.500	18.500	8.500	17.500	44.500
OÖ	36.200	18.900	14.300	3.000	36.200
Salzburg	13.100	0	12.700	400	13.100
Steiermark	22.400	3.800	10.100	8.500	22.400
Tirol	17.400	0	3.500	13.900	17.400
Vorarlberg <sup>3</sup>	9.800	1.000	0	13.700	14.700
Wien	67.500	0	67.500	0	67.500
Gesamt [t]	234.900	46.800	123.900	69.100	239.800
Verwertung/Beseitigung [%]		19	52	29	100

<sup>1</sup> Aufkommen in den kommunalen Kläranlagen Österreichs mit einer Kapazität ab 2.000 EW<sub>60</sub>

<sup>2</sup> Daten aus 2013 übernommen

<sup>3</sup> Die gegenüber dem Anfall um rd. 4.900 t höhere behandelte Menge resultiert aus dem Abbau von Klärschlammgranulat aus den Lagerbeständen (Depot) der ARA Dornbirn. Das Granulat aus diesem Depot wurde zum Großteil kompostiert und für Rekultivierungszwecke eingesetzt.

<sup>4</sup> Beispiele für „sonstige Behandlung“ sind mechanisch-biologische Behandlung, Kompostierung und Vererdung

Zusätzlich zu dem Aufkommen an kommunalen Klärschlämmen berichtet der BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 90) von einem Aufkommen an Schlämmen aus der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, Rückstände aus der Kanalisation sowie Abfälle aus der Gewässernutzung von rund 634.100 t im Jahr 2015. Der Großteil, rd. 73 %, davon wird thermisch verwertet. Außerdem werden im Jahr 2015 laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 123) rd. 17.300 t kommunaler Klärschlamm aus Österreich exportiert.

Nach BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 97) werden 2015 in Österreich in vier thermischen Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle hauptsächlich Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung und Klärschlamm eingesetzt. Die entsprechenden Behandlungsanlagen der Abfallwirtschaft sind in der folgenden Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Thermische Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle (BMNT, 2017, S. 97).

Thermische Abfallbehandlungsanlage	Feuerung/Abfalleinsatz	Kapazität [t/a]
Wirbelschichtofen 4 Wien Simmeringer Haide	Wirbelschicht (Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung, Klärschlamm)	110.000
Reststoffverwertung Lenzing	Wirbelschicht (Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung, Rückstände aus der Altpapieraufbereitung, Klärschlamm)	300.000
RHKW Linz	Wirbelschicht (Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung, Klärschlamm)	255.000
ENAGES Niklasdorf	Wirbelschicht (Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung, Klärschlamm)	131.000

In diesen Anlagen werden im Jahr 2015 rd. 2,4 Mio. t Abfälle verbrannt und es fallen dadurch rd. 650.000 t Sekundärabfälle an, insbesondere Schlacken und Aschen (BMNT, 2017, S. 98). In der folgenden Tabelle 8 sind die einzelnen Abfallarten angeführt und die Lage der Behandlungsanlagen ist in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt.

Tabelle 8: Wesentliche Abfallarten und zugehörige Massen der in thermischen Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle eingesetzten Abfälle (BMNT, 2017, S. 98).

SN	Abfallbezeichnung	Masse 2014 [t]	Masse 2015 [t]
91101	Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle	1.036.662	1.026.667
91103	Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung	890.514	891.561
94501	anaerob stabilisierter Schlamm (Faulschlamm)	104.606	107.481
18407	Rückstände aus der Altpapierverarbeitung	81.375	91.319
91401	Sperrmüll	64.429	68.584

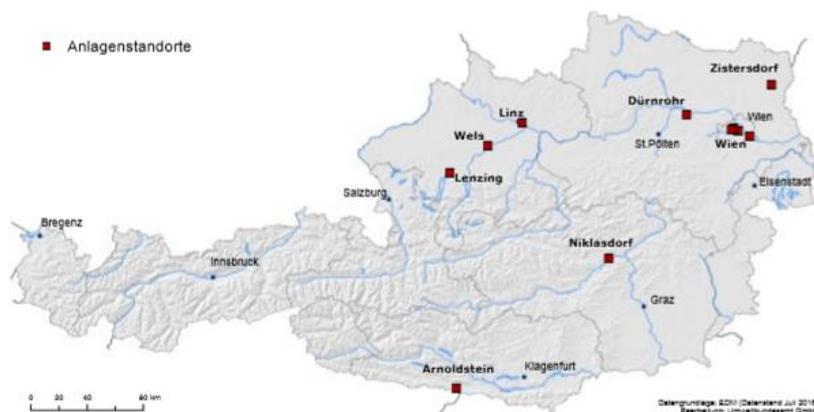


Abbildung 5: Thermische Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle im Jahr 2015 (BMNT, 2017, S. 98).

In 54 weiteren thermischen Behandlungsanlagen (ohne Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle) werden im Jahr 2015 laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 99) rd. 1,8 Mio. t Abfälle verbrannt. In nachstehender Tabelle 9 werden die Abfälle aufgelistet und in der folgenden Abbildung 6 die Behandlungsanlagen lokalisiert.

Tabelle 9: Wesentliche Abfallarten und zugehörige Massen der in thermischen Behandlungsanlagen (ohne Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle) eingesetzten Abfälle (BMNT, 2017, S. 99).

SN	Abfallbezeichnung	Masse [t]
94802	Schlamm aus der mechanischen Abwasserbehandlung der Zellstoff- und Papierherstellung	299.147
91108	Ersatzbrennstoffe, qualitätsgesichert	270.395
94302	Überschussschlamm aus der biologischen Abwasserbehandlung	189.142
17202	Bau- und Abbruchholz	96.971
94803	Schlamm aus der biologischen Abwasserbehandlung der Zellstoff- und Papierherstellung	95.963

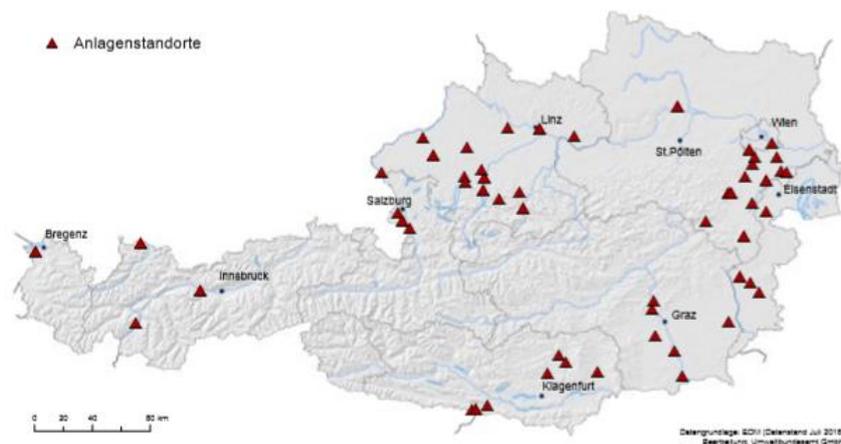


Abbildung 6: Thermische Behandlungsanlagen (ohne thermische Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle) (BMNT, 2017, S. 99).

Außer durch Verbrennung werden im Jahr 2015 rd. 17.600 t aerob stabilisierter Schlamm (SN 94502) in MBA verwertet (BMNT, 2017, S. 101). Sowie 41 anaerobe biologische Behandlungsanlagen (Biogasanlagen) auf ARA, die biogene Abfälle mitbehandeln, im Jahr 2015 betrieben werden (BMNT, 2017, S. 102). Darüber hinaus werden im Jahr 2015 in Österreich rd. 159.600 t kommunale Qualitätsklärschlämme in aerob biologischen Behandlungsanlagen (Kompostierungsanlagen) mitverarbeitet (BMNT, 2017, S. 105).

Als regionales Beispiel wird nun kurz die Strategie zur Klärschlammverwertung des Bundeslandes Wien vorgestellt.

### Stand der Klärschlammverwertung im Bundesland Wien

Im Bundesland Wien wird das gesamte Klärschlamm aufkommen von rd. 67.500 t TM in den vier Wirbelschichtöfen der Müllverbrennungsanlage Simmeringer Haide, wie in Tabelle 7 ersichtlich, thermisch verwertet (BMNT, 2017, S. 58). Jedoch werden mit dem Klärschlamm auch Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung mitverbrannt. In Zukunft sollen die Aschen aus Wirbelschichtöfen 1-3, in denen hauptsächlich Klärschlamm verbrannt wird, einer stofflichen Verwertung, d.h. Rückgewinnung von Wertstoffen wie z.B. Glas, Metalle, Salze, Nährstoffe (Phosphor) und anderer mineralischer Bestandteile, zugeführt werden insofern dies ökologisch sinnvoll, wirtschaftlich vertretbar und technisch umsetzbar ist (EGLE, et al., 2018, S. 39 und 78). Derzeit werden die Klärschlammaschen zusammen mit Aschen aus der Müllverbrennung in der Behandlungsanlage für Verbrennungsrückstände der MA 48 aufbereitet und anschließend zu Asche-Schlacke-Beton verarbeitet oder deponiert (EGLE, et al., 2018, S. 79 ff.). Für die Zukunft sollen günstige Voraussetzungen geschaffen werden um durch Monoverbrennung reine Klärschlammaschen zu gewinnen und daraus, in Abstimmung mit Düngemittelherstellern, ein

geeignetes und handelsfähiges Phosphordüngemittel, zur Substitution von Rohphosphat, herzustellen (EGLE, et al., 2018, S. 225).

### Stand der Klärschlammverwertung in der Schweiz

Seit 2006 ist die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, aus gesundheitlichen Gründen und zum Schutz der Böden, in der Schweiz nicht mehr erlaubt (WÄLTI & ALMEIDA, 2016, S. 16). Daher wird in der Schweiz das gesamte Klärschlammaufkommen verbrannt oder exportiert. D.h. exportiert wird nur ein kleiner Anteil, rd. 3 % (6.182 t TS) des Gesamtaufkommens, und der Rest wird zu 27 % (53.073 t TS) in Kehrlichtverbrennungsanlagen (Müllverbrennungsanlagen), 27 % (52.382 t TS) in Zementwerken und 43 % (82.897 t TS) in Schlammverbrennungsanlagen (Monoverbrennungsanlagen) verbrannt (TECZAN, 2013, S. 2). Dabei wird der entwässerte Klärschlamm mit einem mittleren TS-Gehalt von 27,9 % den 30 Kehrlichtverbrennungsanlagen, von  $\geq 90$  % den 6 Zementwerken und von ca. 30 % den 11 Schlammverbrennungsanlagen zugeführt (TECZAN, 2013, S. 2, 6 und 20). Der Verbrennung gehen Vorbehandlungsmaßnahmen wie Eindickung, Faulung, Entwässerung und Trocknung voraus, um die Transport- und Lagerfähigkeit des Klärschlammes zu verbessern (TECZAN, 2013, S. 7). Auch in der Schweiz gibt es Bestrebungen aus dem Klärschlamm wichtige Ressourcen wie z.B. Phosphor zurückzugewinnen. Darum werden vermehrt Schlammverbrennungsanlagen (Monoverbrennung) errichtet, jedoch wird derzeit die Strategie verfolgt die Klärschlammaschen einer Monodeponie zuzuführen um in einem späteren Moment, wenn effiziente und wirtschaftliche Rückgewinnungstechnologien zur Verfügung stehen, die deponierten Klärschlammasche zu recyceln (BÄTTIG, et al., 2011, S. III).

### Stand der Klärschlammverwertung in Deutschland

Mit der Novellierung der AbfKlärV vom 27.09.2017 wird die Möglichkeit der Klärschlammverwertung im landwirtschaftlichen Bereich weiter eingeschränkt und ebenso eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, wenn dieser min. 20 g Phosphor je kg TM aufweist, vorgesehen (NIKODEM, et al., 2018, S. 387-389). Deshalb kann für Deutschland angenommen werden, dass in absehbarer Zeit die Verwertung des Klärschlammes von ARA, ab einer Ausbaugröße von 50.000 EW, nur noch in thermischen Anlagen erfolgen wird (NIKODEM, et al., 2018, S. 386). Durch die starke Einschränkung der Klärschlammmitverbrennung kann davon ausgegangen werden, dass in den nächsten 10 – 15 Jahren in Deutschland 5 – 10 neue Klärschlammmonoverbrennungsanlagen errichtet werden (NIKODEM, et al., 2018, S. 386). Derzeit bestehen in Deutschland insgesamt 26 Klärschlammmonoverbrennungsanlagen und davon werden 19 als Wirbelschichtfeuerungen betrieben (PLANK, n.v.). Auch in Deutschland gibt es Bestrebungen Wertstoffe wie z.B. Phosphor aus den Klärschlammaschen zurückzugewinnen, dabei werden, wie in der Schweiz auch, Strategien der Zwischenlagerung verfolgt darüber hinaus aber auch in Forschung und Entwicklung von effizienten und wirtschaftlichen Verfahren investiert (PLANK, n.v.). Als regionale Beispiele werden nun kurz die Strategien zur Klärschlammverwertung in zwei deutschen Bundesländern vorgestellt.

### Stand der Klärschlammverwertung in Baden-Württemberg

Die folgenden Informationen können der Abfallbilanz 2016 des Bundeslandes Baden-Württemberg (MUKE, 2017, S. 81-87) entnommen werden.

In Baden-Württemberg werden rd. 56,1 % des gesamten Klärschlammaufkommens (235.000 t TM) in vier Zementwerken, zwei Klärschlammmonoverbrennungsanlagen, in zwei Klärschlammvergasungsanlagen, in einem Kohlekraftwerk und in einer Papierfabrik verbrannt. Rd. 40 % des gesamten Klärschlammfalls werden jedoch zur Verbrennung in andere

Bundesländer exportiert. Da also die Verbrennungskapazitäten des Bundeslandes für die Verbrennung des eigenen Klärschlammaufkommens nicht reichen, wird der Bau und der Betrieb von neuen Monoverbrennungsanlagen als sehr wichtig erachtet. Genauso wie in Forschung und technologische Entwicklung für einsetzbare Phosphorrückgewinnungsverfahren investiert wird.

### Stand der Klärschlammverwertung in Bayern

In Bayern fielen im Jahr 2014 rd. 283.000 t TR Klärschlamm an, davon wurden rd. 78.000 t TR einer Monoverbrennung und rd. 90.500 t TR einer Mitverbrennung, unter Nutzung thermischer und Produktion elektrischer Energie, zugeführt (ABTEILUNG MSE-Z, 2016, S. 24). Der Rest rd. 114.500 t TR wurden in der Landwirtschaft oder durch landschaftsbauliche Maßnahmen verwertet (ABTEILUNG MSE-Z, 2016, S. 24). Die Monoverbrennung des Klärschlammes wird auf drei verschiedenen Standorten, im Bundesland Bayern, durchgeführt, die mit einem Durchsatz von 2,5 – 3 t TM/h betrieben werden (LfU BAYERN, 2018). Insgesamt wird Klärschlamm in sechs Müllverbrennungsanlagen, fünf Monoverbrennungsanlagen (zwei außerhalb von Bayern), in zwei Zementwerken und in einem Kohlekraftwerk verbrannt (LfU BAYERN, 2018). Da die Kapazitäten für die Verbrennung, aufgrund steigender Nachfrage wegen deutlicher Einschränkungen für die landwirtschaftliche Verwertung, gegenwärtig nicht ausreichen, ist mit einer verstärkten Bautätigkeit von Monoverbrennungsanlagen zu rechnen (ABTEILUNG MSE-Z, 2016, S. 24).

### Stand der Klärschlammverwertung in Italien

Um Italien mit zu berücksichtigen wird im Folgenden kurz auf die Strategie der Klärschlammverwertung in der Provinz Südtirol eingegangen.

### Stand der Klärschlammverwertung in der Provinz Südtirol

Das Klärschlammaufkommen Südtirols stammt im Jahr 2016 zu 85,6 % von 5 ARA (>100.000 EW), zu 9 % von 24 ARA (2.000 – 100.000 EW) und macht insgesamt 52.879 t/a aus, wobei ein durchschnittlicher TS-Gehalt von 23,2 % erreicht wird (ANGELUCCI, 2017). Im Jahr 2017 wird rd. die Hälfte des Klärschlammfalls Südtirols in der Landwirtschaft ausgebracht, ein zu vernachlässigender Teil von 0,9 % wird kompostiert und der restliche große Anteil von 45,1 % auf der ARA TOBL thermisch verwertet (ANGELUCCI, 2017). Die Strategie zur Klärschlamm Entsorgung des Landes Südtirol sieht vor, da die Ausbringung in der Landwirtschaft durch den Abfallplan 2004 und der damit zusammenhängenden ungelösten Schadstoffverfrachtung in Frage gestellt wird, dass 100 % der anfallenden Schlämme in nur einer Behandlungsanlage thermisch verwertet werden sollen. Jedoch soll die enthaltene Phosphorfracht von 350 – 400 t P/a rückgewonnen oder die Klärschlammmasche für die Rückgewinnung aufbereitet werden (ANGELUCCI, 2017). Mögliche Strategien der Klärschlammverwertung in Südtirol sind in folgender Abbildung 7 dargestellt. Die grundsätzliche Entscheidung über die Wahl der zukünftigen Strategie der Klärschlammbewirtschaftung in Südtirol obliegt den zuständigen öffentlichen Stellen und wird derzeit erwartet, steht also, nach Kenntnisstand des Verfassers dieser Masterarbeit, noch aus.

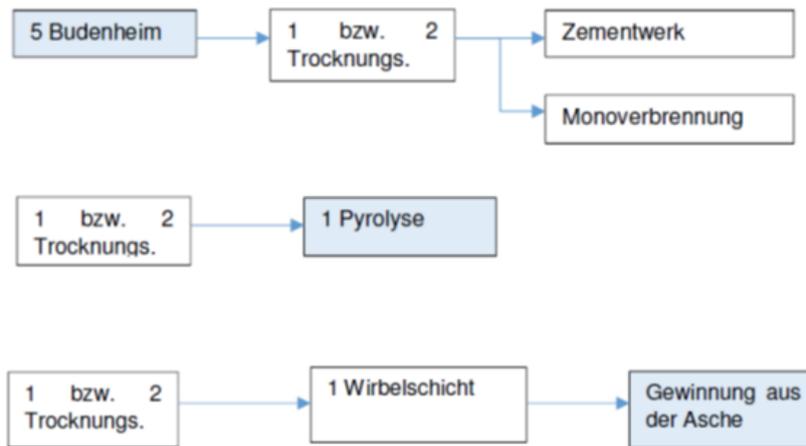


Abbildung 7: Szenarien der Klärschlammverwertung für Südtirol (ANGELUCCI, 2017).

Für die zukünftige Strategie der Klärschlammverwertung in Südtirol sollte beachtet werden, dass in einer Region, die ihren Energiebedarf durch Produktion aus erneuerbaren Quellen bereits decken kann, jede weitere verfügbare erneuerbare Energiequelle aufbereitet und in Regionen, die ein Defizit an erneuerbaren Energiequellen aufweisen, exportiert werden sollte (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 69).

### Stand der Klärschlammverwertung in der EU

In Abbildung 8 wird eine Übersicht über die gängigen Entsorgungs- und verwertungsrouten in 29 europäischen Staaten gegeben, wobei nur die in den jeweiligen Ländern tatsächlich entsorgten oder verwerteten Klärschlammengen dargestellt sind und grenzüberschreitende Entsorgung nicht ersichtlich wird (KABBE & KRAUS, 2018, S. 692). Die Verwertung des gesamten Klärschlammmanfalls in der EU, von rd. 10 Mrd. t TS, deckt dabei ein breites Spektrum an verschiedenen Verwertungsarten ab, wobei zwischen 100 % Verbrennung (Schweiz und Niederlande) und 100 % landwirtschaftlicher Verwertung (Zypern) eine Vielzahl an unterschiedlichen Kombinationen vorkommt (KABBE & KRAUS, 2018, S. 692). Insgesamt werden dabei 2008 noch immer 36 % also rd. 3,7 Mrd. t TS Klärschlamm in der Landwirtschaft verwertet ((EU-KOM, 2008) zit. bei (KACPRZAK, et al., 2017, S. 41)).

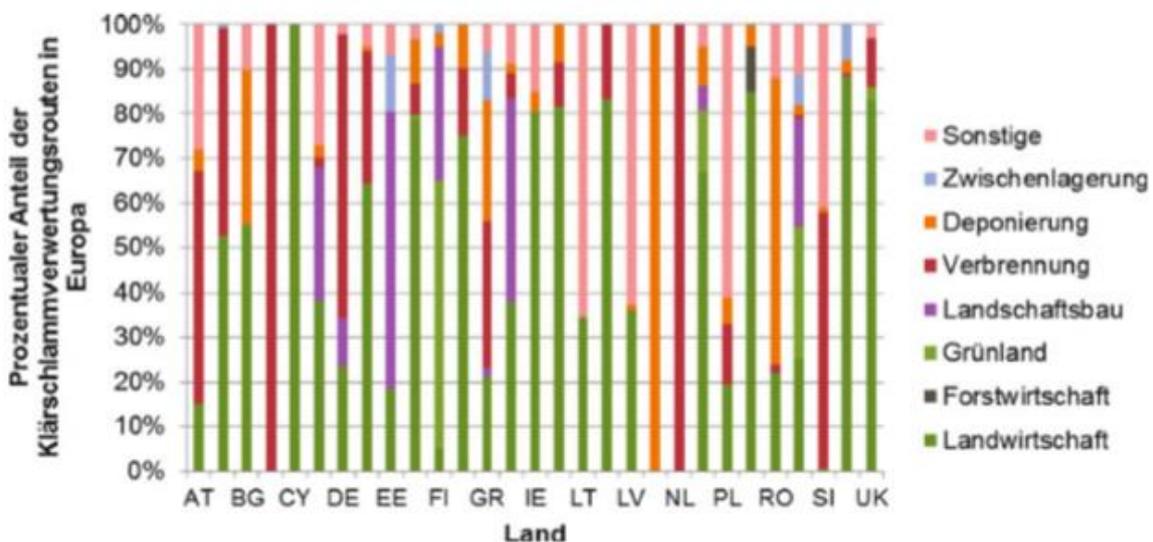


Abbildung 8: Klärschlammverwertungsrouten in 29 europäischen Staaten 2012 – 2015 (EurEau , 2016, EUROSTAT, 2016, und DESTATIS, 2016, zit. bei (KABBE & KRAUS, 2018, S. 693)).

### 3.1.4 Rechtliche Rahmenbedingungen

Zahlreiche Gesetze, Verordnungen, Richtlinien usw. können im Zusammenhang mit Klärschlammbehandlung und Klärschlammverwertung, im speziellen durch Monoverbrennung, als relevant angesehen werden. In den nun folgenden Unterkapiteln soll ein Überblick über die wichtigsten Rechtstexte u.dgl., die in Europa und in Österreich gelten und die Klärschlammverwertung betreffen, gegeben werden. An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass zur Erreichung von erwünschten Entwicklungen wie z.B. der Etablierung „neuer“ Stoffströme im Sinne der Ressourcenschonung bzw. –effizienz oder der aktiven Entwicklung eines Marktes für Sekundärrohstoffe oder -produkte, neue regulative Lenkungsmaßnahmen wie die Einführung einer Ökosteuer oder Ressourcensteuer zur Internalisierung der (Umwelt)Kosten und zur Stabilisierung der Preise für nachhaltige Sekundärrohstoffe oder –produkte auf den volatilen Rohstoffmärkten zielführend sein können und angestrebt werden sollten (ÖWAV, 2016). Grundsätzlich haben Voraussetzungen wie z.B. öffentliche Unterstützung, klare legislative Rahmenbedingungen und Ende der Unterstützung von fossiler und nuklearer Energieproduktion für die angestrebte weltweite Energiewende, auch für die Wende in der Klärschlammverwertung, einen hohen Stellenwert (RAM, et al., 2017, S. 81). Im Speziellen für die Gewinnung von Sekundärrohstoffen oder -produkten aus Klärschlamm, die auf dem Düngemittelmarkt gehandelt werden sollen, könnte die Einführung eines Quotensystems für nicht fossil-basierte Düngemittel unterstützend wirken (EIP-WATER, 2017).

#### 3.1.4.1 Rechtlicher Rahmen in Europa

Die folgenden angeführten Richtlinien der EU sind eine Auswahl an vielfältigen europäischen Gesetzestexten, die die Klärschlammverwertung betreffen (können). Sie sollen vollständigkeithalber kurz vorgestellt werden, detailliertere Informationen können den entsprechenden Quellen entnommen werden.

##### Wasserrahmenrichtlinie der EU

Die Wasserrahmenrichtlinie hat das Ziel einen umfassenden Schutz der Gewässer zu gewährleisten. Dadurch sind ARA davon betroffen und aufgerufen alles ihnen mögliche zu unternehmen um einen Beitrag zur Vermeidung bzw. Reduzierung der Gewässerverschmutzung zu leisten. Darüber hinaus muss auch bei einer künftigen Klärschlammverwertung der Schutz der Gewässer gewahrt bleiben. (EU-PARL/RAT, 2000)

##### Richtlinie der EU zur kommunalen Abwasserbehandlung

Die Richtlinie betrifft das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser und das Ziel ist der Schutz der Umwelt vor schädlichen Auswirkungen. Art. 14 weist explizit darauf hin, dass Klärschlamm wiederverwendet werden soll, wobei die Belastung auf ein Minimum begrenzt werden muss. Das kann als Aufforderung für die künftige Klärschlammverwertung verstanden werden und man beachte, dass genannte Richtlinie aus dem Jahr 1991 stammt. (EU-RAT, 1991)

##### Nitratrichtlinie der EU

Mit dieser Richtlinie wird versucht die Nitratbelastung von Oberflächengewässern und des Grundwassers zu verringern. Im Vordergrund steht dabei die Landwirtschaft als Quelle des Nitrats, das in die Gewässer gelangt. Bei der Klärschlammverwertung ist also zu beachten, dass durch den Austrag des verwerteten Klärschlammes kein Nitrat oder kein leicht auswaschbares Nitrat in die Umwelt gelangen kann. (EU-RAT, 1991b)

### Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)/Industrieemissionen-Richtlinie

Die Richtlinie regelt eine integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung durch Emissionen in Luft, Wasser und Boden. Neben Industrie und anderen gewerblichen Produktionsanlagen wird mit dieser Richtlinie auch der Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen, also auch Klärschlammmonoverbrennungsanlagen, geregelt. Dabei werden z.B. Stoffe aufgelistet, die bei der Behandlung beachtet werden müssen und Grenzwerte für selbige Stoffe definiert, die eingehalten werden müssen. Darüber hinaus schreibt die Richtlinie auch vor, dass z.B. in Verbrennungsanlagen die besten zur Verfügung stehenden Technologien (BAT – Best Available Technologies) eingesetzt werden müssen. (EU-RAT, 2010)

### Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)

Die Richtlinie über die UVP bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten gewährleistet, dass zuständige Behörden Zugang zu relevanten Informationen über ein bestimmtes Projekt mit evtl. erheblichen Umweltauswirkungen bekommen um dem entsprechende Entscheidungen treffen zu können. Im Weiteren regelt die Richtlinie die Genehmigungspflicht und Vorgangsweise für die Realisierung von Projekten mit evtl. erheblichen Umweltauswirkungen sowie dass die betroffene Öffentlichkeit zumindest Gelegenheit bekommt sich zu dem Projekt zu äußern. Die Richtlinie stellt für die Klärschlammverwertung und vor allem für die Umsetzung von Monoverbrennungsanlagen einen wichtigen Anhaltspunkt dar. (EU-RAT, 1985/1997)

### Klärschlammrichtlinie der EU

*„Zweck dieser Richtlinie ist es, die Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft so zu regeln, daß schädliche Auswirkungen auf Böden, Vegetation, Tier und Mensch verhindert und zugleich eine einwandfreie Verwendung von Klärschlamm gefördert werden.“* (EU-RAT, 1986, S. 7 Art. 1) Darüber hinaus werden Grenzwerte definiert, die bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm einzuhalten sind, die auch für den Einsatz von Produkten aus der Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft gelten. Sowie die nötigen Probenahmen und Analyseverfahren bestimmt werden. (EU-RAT, 1986)

### Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)-Verordnung

Stoffe und Verbindungen, die im Laufe eines Jahres in der Größenordnung von 1 t nach Europa importiert, in Europa produziert oder gehandelt werden, wie z.B. Produkte die durch eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm gewonnen werden, müssen bei der Europäischen Chemikalienagentur registriert sein (NIKODEM, et al., 2018, S. 394). Dies betrifft u.U. nicht nur Phosphordüngemittel, die durch Klärschlammverwertung hergestellt werden, sondern auch andere Stoffe und Produkte (z.B. Bioöle, Metalle, Salze usw.), die dabei anfallen und anschließend weiterverwendet werden sollen.

#### **3.1.4.2 Rechtlicher Rahmen in Österreich**

In Österreich gelten eine Vielzahl an Gesetzen und Verordnungen aus unterschiedlichen Bereichen, die den Umgang mit Klärschlamm sowie die Verwertung bzw. Entsorgung betreffen. In den folgenden Abschnitten dieses Unterkapitels werden die wesentlichsten Gesetze und Verordnungen, die Klärschlammverwertung betreffen, kurz angeführt.

### Abfallwirtschaftsgesetz

Da Klärschlamm aus Sicht des Gewässerschutzes als Schadstoffsene dient, soll er grundsätzlich nicht vermieden werden, jedoch kann die Menge des Klärschlammes durch passende Wahl des Schlammbehandlungsverfahren (z.B. zusätzliche Schlammdeintegration (OLIVA, et al., 2009, S. 50)) und durch Optimierung der Schadstoffabtrennung aus dem Abwasser reduziert werden (OLIVA, et al., 2009, S. 38). Neben der quantitativen Vermeidung greift beim Klärschlamm vor allem die Strategie der qualitativen Vermeidung, d.h. die Verminderung des Schadstoffeintrags in das Abwasser (OLIVA, et al., 2009, S. 38).

### Bundekompostverordnung

Soll Klärschlamm zur Herstellung von Komposten eingesetzt werden, so unterliegt er strengen Anforderungen wie z.B. Schadstoffgrenzwerten, Aufzeichnungspflichten, Meldepflichten, Untersuchungsanforderungen sowie Kennzeichnungspflichten, die durch die Bundekompostverordnung geregelt werden (OLIVA, et al., 2009, S. 40).

### Wasserrechtsgesetz 1959

Das Wasserrechtsgesetz besagt, dass die Verwertung des Klärschlammes keine Beeinträchtigung für die Gewässer darstellen darf und im Weiteren, dass die Ausbringung von Klärschlamm in wasserrechtlich besonders geschützten Gebieten besonderen Einschränkungen unterliegt (OLIVA, et al., 2009, S. 41).

### Düngemittelgesetz 1994

Grundsätzlich ist das Düngemittelgesetz auf Klärschlamm und Produkten aus der Klärschlammverwertung nicht anzuwenden, jedoch verbietet es Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel, welche unbehandelten oder kommunalen Klärschlamm(kompost) enthalten, in Verkehr zu bringen (OLIVA, et al., 2009, S. 41).

### Düngemittelverordnung

Die Düngemittelverordnung besagt, dass Produkte nur in Verkehr gebracht werden dürfen, wenn sie bei bestimmungsgemäßer Verwendung keine Gefahr für die Bodenfruchtbarkeit, die pflanzliche, tierische und menschliche Gesundheit und die Umwelt darstellen, sowie die angeführten Grenzwerte für Schwermetallfrachten und Schwermetallkonzentrationen nicht überschreiten (OLIVA, et al., 2009, S. 41).

### Abfallverbrennungsverordnung (AVV)

Die AVV und die entsprechenden Gesetzes-Novellen regeln den Einsatz von gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen in Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen. Dabei sollen die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen möglichst geringgehalten werden und der Energieeinsatz zur Verbrennung der Abfälle möglichst effizient sein. Darüber hinaus wird in dieser Verordnung auch der Stand der Technik in Bezug auf Verbrennungsanlagen definiert und einzuhaltende Emissionsgrenzwerte bestimmt. Ebenso regelt sie wie der Betrieb und die Qualitätsprüfung, also Messungen, anzulegen und durchzuführen sind sowie was aufgezeichnet und aufbewahrt werden muss. Die AVV ist bei der Monoverbrennung von Klärschlamm anzuwenden und stellt einige wesentliche Herausforderungen dar. (BMLFUW & BWFJ, 2010)

### Programme österreichischer Institutionen

In Österreich gibt es einige wichtige Programme, die die Klärschlammverwertung betreffen und z.B. EU-Richtlinien umsetzen. Von Bedeutung sind das „Österreichische Aktionsprogramm Nitrat

2008“ und das „Österreichische Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft (ÖPUL 2007)“ (OLIVA, et al., 2009, S. 42).

### BAWP

Wird Klärschlamm zur Düngung und Bodenverbesserung verwendet, so ist die Verwertung, die erst mit dem Aufbringen des Klärschlammes auf den Boden stattfindet, entsprechend den Vorgaben der Abfallbilanzverordnung aufzuzeichnen und zu melden (BMNT, 2017, S. 259). Die Ausbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzten Boden ist nur dann eine zulässige Verwertungsart, wenn sie einen konkreten Nutzen erfüllt, das heißt ein Nutzen für die Landwirtschaft oder die Ökologie liegt nur dann vor, wenn der Klärschlamm in ausreichendem Ausmaß pflanzenverfügbare Nährstoffe enthält und die Ausbringungsmenge auf den Pflanzenbedarf abgestimmt ist (BMNT, 2017, S. 259). Ob die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm zulässig ist, hängt vom Gesamtgehalt an Schwermetallen im Schlamm und der, nach vorangegangener Behandlung erreichter Hygienisierung ab (BMNT, 2017, S. 259). So darf Klärschlamm seit 01.01.2009 nicht mehr deponiert werden (BMNT, 2017, S. 259) und die Mitbehandlung von Klärschlämmen bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung mit anschließender Deponierung ist nur für geeignete, vorher stabilisierte und entwässerte Klärschlämme vorzusehen und in jedem Einzelfall zu prüfen (BMNT, 2017, S. 260).

### Regelungen der einzelnen Bundesländer

Die Regelung bezüglich der Klärschlammverwertung, vor allem der Aufbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzte Flächen und Böden generell, fällt in die Kompetenz der einzelnen Bundesländer. Es gibt daher in jedem Bundesland unterschiedliche Regelungen. So haben die Bundesländer Salzburg, Wien und Tirol z.B. ein generelles Ausbringungsverbot von Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Grundflächen erlassen (OLIVA, et al., 2009, S. 43).

## 3.2 Entwicklungen in der Klärschlammverwertung

Der BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 32) prognostiziert für 2021 ein Aufkommen von kommunalem Klärschlamm in Österreich im Bereich von rund 231.000 t. Bis zum Jahr 2030 sollen laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 261) 65 bis 85 % des in Österreich anfallenden kommunalen Klärschlammes einer Phosphorrückgewinnung unterzogen werden. Die vielversprechendste Technologie ist nach Ansicht der Verfasser des BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 260) die Phosphorrückgewinnung aus Verbrennungsaschen aus der Klärschlammmonoverbrennung. Zufeuerung ist dabei zulässig, wenn die verwendeten Brennstoffe selbst über einen erheblichen Phosphorgehalt verfügen (z.B. Tiermehl) oder einen geringen Aschegehalt aufweisen (z.B. Erdgas). Neben der Rückgewinnung aus Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung können laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 261) auch andere Verfahren, die aber eine Rückgewinnungsquote von 45 gew. % (bezogen auf den ARA-Zulauf) erreichen sollen, angewendet werden. Die Entwicklung hin zur thermischen Verwertung von Klärschlamm stellt Österreich und damit die Betreiber von ARA eindeutig vor die Herausforderung, in nächster Zukunft, ausreichend Monoverbrennungskapazitäten zu errichten.

In diesem Unterkapitel sollen also die Entwicklung der Klärschlammverwertung, die laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 261) eindeutig in die Richtung der thermischen Verwertung von Klärschlamm weist, ergänzend zu Unterkapitel 3.1.3, dargestellt und die Herausforderungen, die sich dabei ergeben, erläutert werden. Dabei werden in Unterkapitel 3.2.1 die Grundlagen thermochemischer Umwandlungsprozesse dargelegt und die Trocknung von Klärschlamm kurz

beschrieben. Im Weiteren findet sich in Unterkapitel 3.2.1 eine ausführliche Erläuterung der Monoverbrennung von Klärschlamm und in der Praxis bereits angewendeter Verfahren. In Unterkapitel 3.2.2 wird auf das Energie und Ressourcen bezogene Potenzial des Klärschlammes eingegangen und beachtenswerte Herausforderungen der energetischen und stofflichen Verwertung des Klärschlammes sowie der Bezug zum räumlichen Kontext hervorgehoben.

### 3.2.1 Thermische Verwertung

In diesem Unterkapitel wird die thermische Verwertung von Klärschlamm, im speziellen durch Monoverbrennung, detailliert beschrieben. Dazu werden zum einen wichtige allgemeine Grundlagen für die thermische Verwertung von biogenen Brennstoffen, wozu auch Klärschlamm gezählt werden kann, abgehandelt. Zum anderen wird auf die speziellen Grundlagen und Voraussetzungen für die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung eingegangen sowie allgemeine und mögliche technische Verfahren und einzelne, in der Praxis erprobte, technische Verfahren vorgestellt.

#### 3.2.1.1 Grundlagen von thermochemischen Umwandlungsprozessen

Das übergeordnete Ziel von thermochemischen Umwandlungsprozessen ist, die in biogenen Brennstoffen gespeicherte chemische Energie in Form von thermischer Energie, als Wärme, möglichst effizient nutzbar zu machen, wobei durch anfängliche Wärmeaufnahme der Brennstoff erhitzt und anschließend mit einem Oxidationsmittel unter Wärmeabgabe oxidiert wird und am Ende Abgas, bestehend aus Oxidationsprodukten wie Kohlenstoffdioxid und Wasser, und Asche, bestehend aus oxidierten mineralischen Bestandteilen, übrig bleiben (BAUMBACH, et al., 2016, S. 646). Der biogene Brennstoff kann direkt, durch vollständige Oxidation und Freisetzung von Wärme, oder indirekt, durch Herstellung von noch nicht vollständig oxidierten Sekundärenergieträgern (heizwertreiche Produkte), umgewandelt werden (BAUMBACH, et al., 2016, S. 646). In Abbildung 9 sind die wichtigsten Phasen der thermochemischen Umwandlung mit einigen Zwischenproduktgruppen dargestellt.

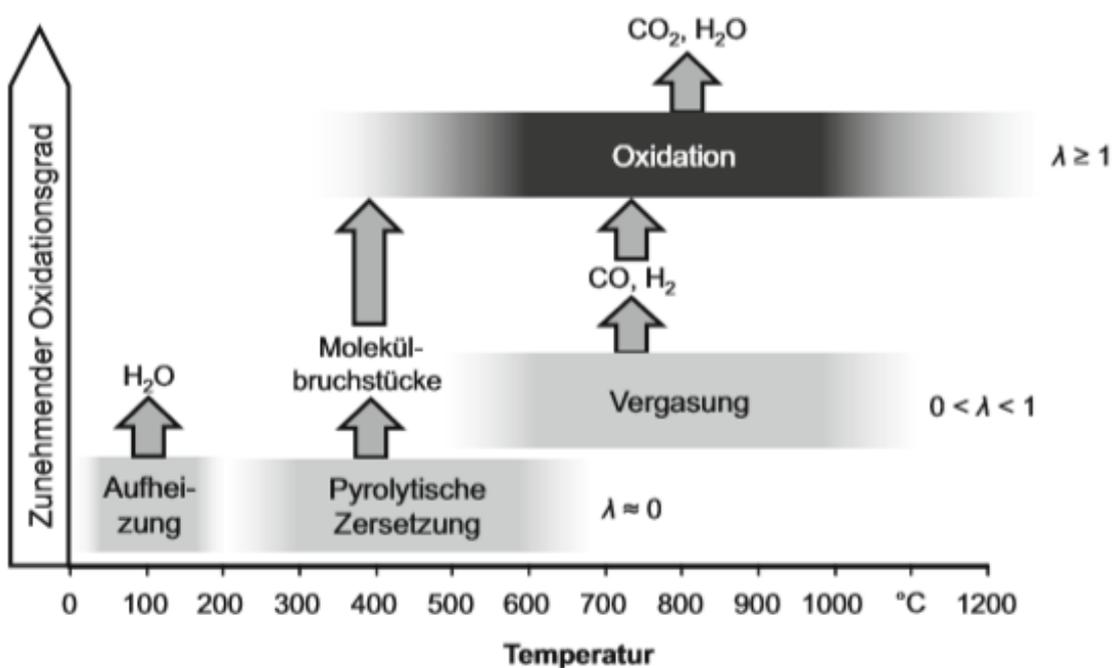


Abbildung 9: Ablauf der thermochemischen Umwandlung in Luftatmosphäre (BAUMBACH, et al., 2016, S. 648).

Grundlegend ist festzuhalten, dass die chemisch-stofflichen und nebensächlich auch die physikalisch-mechanischen Eigenschaften von biogenen Brennstoffen wesentlich die Vorgänge bei thermochemischen Umwandlungsprozessen, also auch die Prozesse der Schadstoffbildung, beeinflussen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 580).

In diesem Kapitel werden nun zuerst die Eigenschaften von biogenen Brennstoffen, wie Klärschlamm, beschrieben.

### Chemische und stoffliche Eigenschaften von biogenen Brennstoffen

Wesentliche Parameter und Eigenschaften von biogenen Brennstoffen, die die thermochemischen Prozesse beeinflussen sind in Tabelle 10, Tabelle 11, Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 10: Qualitätsrelevante Eigenschaften der Hauptelemente biogener Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 580).

Qualitätsmerkmal	Wichtige Auswirkungen
<b>Elementgehalt</b>	
<i>Hauptelemente</i>	
Kohlenstoff (C)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf, Partikelemissionen
Wasserstoff (H)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf
Sauerstoff (O)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf

Wichtigste Komponente bei thermochemischen Umsetzungen ist der in teiloxydierter Form vorhandene organische Kohlenstoff, daneben liefert aber auch Wasserstoff Energie. Sauerstoff hingegen wirkt nur unterstützend für den Oxidationsvorgang (BAUMBACH, et al., 2016, S. 587). Die aufgelisteten Hauptelemente beeinflussen wesentlich den Heizwert, also auch die Energie, die durch Verbrennung gewonnen werden kann.

Tabelle 11: Qualitätsrelevante Eigenschaften der Nebenelemente sowie der Spurenelemente biogener Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 581).

Qualitätsmerkmal	Wichtige Auswirkungen
<i>Nebenelemente</i>	
Stickstoff (N)	Ascheverwertung, NO <sub>x</sub> - und N <sub>2</sub> O-Emissionen
Kalium (K)	Ascheerweichungsverhalten, Ascheverwertung, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Magnesium (Mg)	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Natrium (Na)	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Partikelemissionen
Kalzium (Ca)	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Phosphor (P)	Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Schwefel (S)	SO <sub>x</sub> -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Silizium (Si)	Ascheerweichung, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Chlor (Cl)	Emissionen von HCl und halogenorganischen Verbindungen (z. B. PCDD/F), Hochtemperaturchlorkorrosion, Partikelemissionen
<i>Spurenelemente</i>	
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemissionen, z. T. katalytische Wirkung (z. B. bei PCDD/F-Bildung), Partikelemissionen

Die in Tabelle 11 angeführten Neben- und Spurenelemente steuern für thermochemische Umsetzungen kaum relevante nutzbare Energie bei, sie werden eher als unerwünschte,

problematische und aschebildende Begleitelemente angesehen, sowie sie unter Umständen für kritische Schwermetallgehalte in den anfallenden Aschen sorgen können (BAUMBACH, et al., 2016, S. 590 ff.). Einige der wohl wichtigsten Eigenschaften, deren Wirkungen auf andere Eigenschaften oder Vorgänge, für die Verbrennung von biogenen Brennstoffen wie Klärschlamm sind in nachfolgender Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Brennstofftechnische Eigenschaften biogener Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 581).

Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit (Verluste durch biologischen Abbau, Selbstentzündung), Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur
Heizwert	Energieinhalt des Brennstoffs, Energiedichte, Anlagenauslegung
Aschegehalt	Partikelemission (Staub), Rückstandsbildung und -verwertung, Heizwert
Ascheerweichungsverhalten	Schlackebildung und -ablagerungen, Betriebssicherheit und -kontinuität, Wartungsbedarf, Ascheverwendung

Eigenschaften der Brennstoffe, die für die Verarbeitung derselben und für z.B. Transport, Lagerung usw. von Bedeutung sind, werden in Tabelle 13 zusammenfassend aufgelistet. Hier soll angemerkt werden, dass sich in dieser Hinsicht der Klärschlamm von anderen biogenen Brennstoffen unterscheidet, vor allem wenn berücksichtigt wird, dass Klärschlamm in Abhängigkeit des Grades und der Art der Vorbehandlung, der er unterzogen wird, zum einen flüssig oder fest anfällt und unterschiedliche Eigenschaften aufweist.

Tabelle 13: Physikalisch-mechanische Eigenschaften biogener Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 581).

Stückigkeit (Abmessung, Geometrie)	Zuordnung zu mechanischen Systemen und Feuerungsanlagentypen, Aufbereitungsbedarf, Zündfähigkeit, Trocknungsvermögen
Größenverteilung/Feinanteil	Störungen in Förderelementen, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Belüftungs- und Trocknungseigenschaften, Staubentwicklung, Explosionsgefahr, Selbstentzündung
Brückenbildungsneigung	Fließfähigkeit, Störungen bei Umschlagprozessen und Lagerentnahme
Schütt- bzw. Lagerdichte	Energieeintrag in Feuerung, Lager- und Transportaufwendungen, Leistung der Förderelemente, Vorratsbehältergröße usw.
Rohdichte (Teilchendichte)	Schütt- und Lagerdichte, pneumatische Fördereigenschaften, Brenneigenschaften (spezifische Wärmeleitfähigkeit usw.)
Abriebfestigkeit	Feinanteil (Staubentwicklung, Entmischung)

Neben den einzelnen angeführten Elementen sind natürlich auch die wichtigsten chemischen Verbindungen, in denen die Inhaltsstoffe der biogenen Brennstoffe vorkommen, von großer Bedeutung (BAUMBACH, et al., 2016, S. 582).

### Brennstoffindizes

Brennstoffindizes dienen als Indikatoren für die Abschätzung potenzieller Probleme, die sich bei einer Verbrennung ergeben können und berücksichtigen dafür das physikalische Verhalten von Brennstoffen bzw. deren Aschen, die chemischen Bildungsmechanismen von Luftschadstoffen und/oder die Wechselwirkungen zwischen Elementen bzw. Elementgruppen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 603). Brennstoffindizes können in zwei Hauptgruppen zusammengefasst werden, wobei sie entweder die Bildung von Luftschadstoffen und Probleme im Zusammenhang mit dem Ascheverhalten oder die Korrosionswirkungen charakterisieren (BAUMBACH, et al., 2016, S. 603). Brennstoffindizes für biogene Brennstoffe sind (BAUMBACH, et al., 2016, S. 603 ff.):

- Stickstoff-Gehalt als Indikator für Stickstoffoxide  $\text{NO}_x$
- Molares  $(\text{K}+\text{Na})/[\text{x}(2\text{S}+\text{Cl})]$ -Verhältnis als Indikator für  $\text{HCl}/\text{SO}_x$ -Emissionen
- Summe aus  $(\text{K}+\text{Na}+\text{Pb}+\text{Zn})$  als Indikator für Aerosolbildung (Feinstaubemissionen)
- Molares  $\text{Si}/\text{K}$ -Verhältnis als Indikator für Kaliumfreisetzung
- Molares  $(\text{Si}+\text{P}+\text{K})/(\text{Ca}+\text{Mg})$ -Verhältnis als Indikator für Ascheerweichung bei stark phosphorhaltigen Brennstoffen
- Molares  $2\text{S}/\text{Cl}$ -Verhältnis als Indikator für Hochtemperaturkorrosion

### Brennstofftechnische Eigenschaften von biogenen Brennstoffen

#### Heizwert und Brennwert

Als Heizwert, früher auch als „unterer“ Heizwert bezeichnet, versteht man die Menge an Wärme, angegeben als absoluter Wert in Joule, die bei der vollständigen Oxidation einer Masseneinheit eines Brennstoffs in Sauerstoff und unter konstantem Volumen bzw. Druck, ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme, des im Abgas befindlichen Wasserdampfes, frei wird (BAUMBACH, et al., 2016, S. 607).

Der Brennwert, früher auch als „oberer“ Heizwert bezeichnet, ist definiert als die Menge an Wärme, die bei einer vollständigen Oxidation eines Brennstoffs frei wird, wenn auch die Kondensationswärme, des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfes, nutzbar gemacht wird (BAUMBACH, et al., 2016, S. 607). Für die Beurteilung der nutzbaren Energiemenge eines biogenen Brennstoffs stellt vor allem der Heizwert die maßgebliche Größe dar, da die Kondensationswärme zur Wärmebereitstellung nur genutzt werden kann, wenn sowohl das Wärmenutzungssystem auf ein ausreichend niedriges Temperaturniveau als auch das Kaminsystem für den Anfall von Kondensat ausgelegt sind (BAUMBACH, et al., 2016, S. 608). Heizwert und Brennwert werden mittels kalorimetrischem Verfahren gemäß DIN EN 14 918 bestimmt und berechnet, der prinzipielle Unterschied und der starke Einfluss des Wassergehaltes des biogenen Brennstoffes auf die beiden Werte ist in Abbildung 10 ersichtlich (BAUMBACH, et al., 2016, S. 608-610).

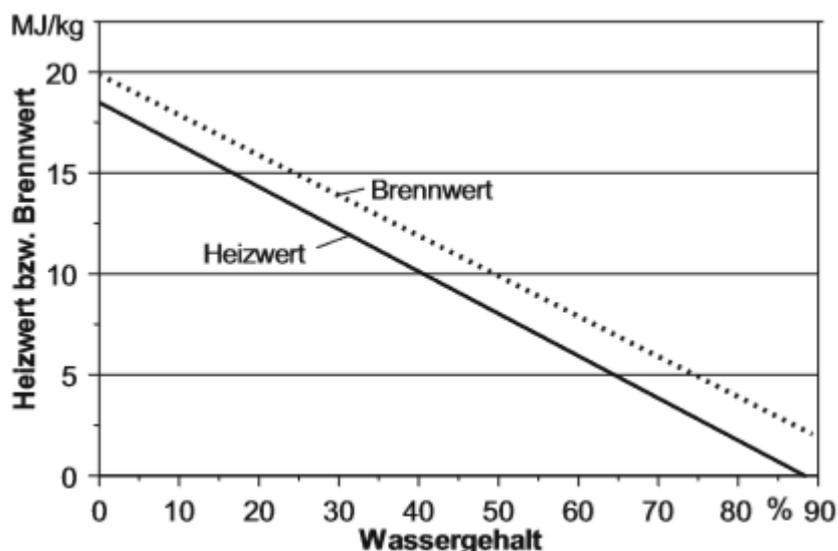


Abbildung 10: Differenz zwischen Heizwert und Brennwert bei unterschiedlichem Wassergehalt (BAUMBACH, et al., 2016, S. 610).

Heizwert von Klärschlamm

Der Heizwert des Klärschlammes hängt, wie in folgender Abbildung 11 ersichtlich, im Wesentlichen von einigen Faktoren, wie bereits im Vorherigen erwähnt, ab. Dabei ist der Wassergehalt, auf der Abszisse dargestellt, ganz wesentlich und kann durch Entwässerung, Trocknung u.a. Verfahren weiter vermindert werden, stellt jedoch aus energetischer Sicht des gesamten Prozesses eine nicht unwesentliche Herausforderung dar. Wobei hier auch erwähnt werden soll, dass auch alternative Verfahren wie z.B. hydrothermale Karbonisierung (HTC) oder verschiedene Vorbehandlungen eingesetzt werden können, die u.U. die Entwässerbarkeit des Klärschlammes deutlich verbessern können. Umso geringer der Aschegehalt des Klärschlammes, in Abbildung 11 durch unterschiedlich gefärbte Kurven dargestellt, ist, d.h. umso höher der Gehalt an org. Substanz, die während der Verbrennung exotherm umgesetzt werden kann, desto höher ist der Heizwert.

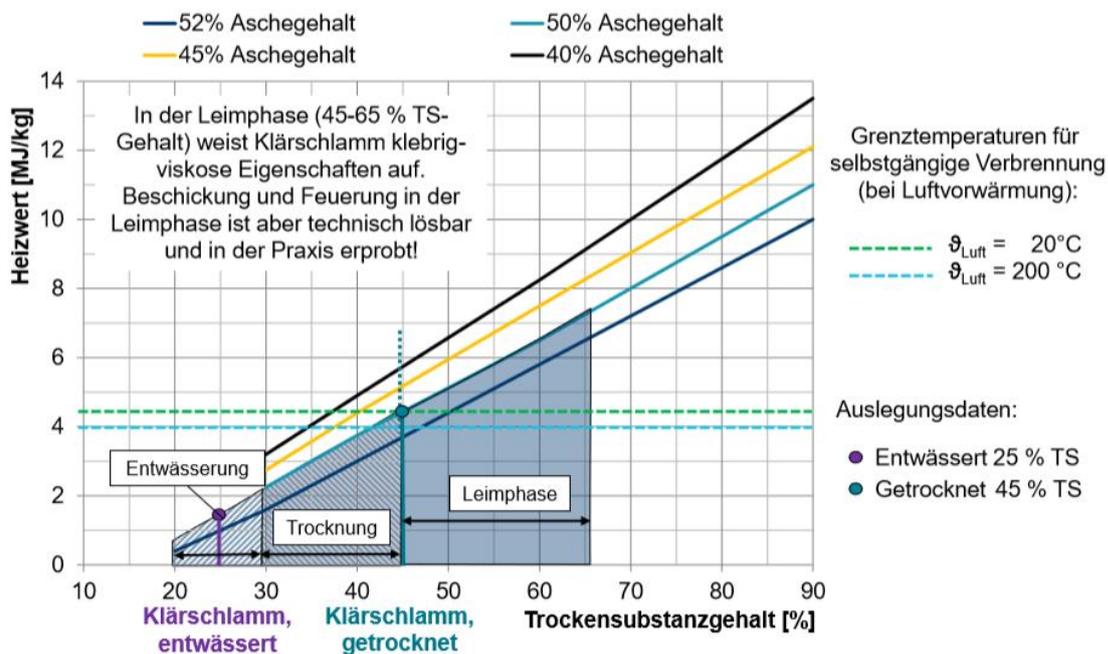


Abbildung 11: Heizwert von Klärschlamm in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehalts (NOLTE & HENSEL, 2017).

Im Vergleich zu Abbildung 11 wird in Abbildung 12 auf der Abszisse nicht der TS-Gehalt aufgetragen sondern der Aschegehalt (Glührückstand GR) des Klärschlammes und der TS-Gehalt wird durch die verschieden eingefärbten Kurven dargestellt. Die beiden genannten Abbildungen sollen nur einen Bereich aufzeigen in dem der Heizwert von Klärschlamm zu erwarten ist, denn nicht nur TS und GR beeinflussen den Heizwert, wie aus vorherigen Unterkapiteln hervorgehen soll und auch wenn man beide Abbildungen vergleicht ergeben sich für den selben TS und GR unterschiedliche Heizwerte. Daraus soll auch ersichtliche werden, dass der Heizwert von der Klärschlammzusammensetzung im Allgemeinen abhängt und für jeden Einzelfall gesondert bestimmt werden sollte. Jedoch sollen diese Darstellungen aufzeigen, dass Klärschlamm durchaus als Brennstoff geeignet ist, da er Heizwerte im Bereich von Braunkohle erreicht.

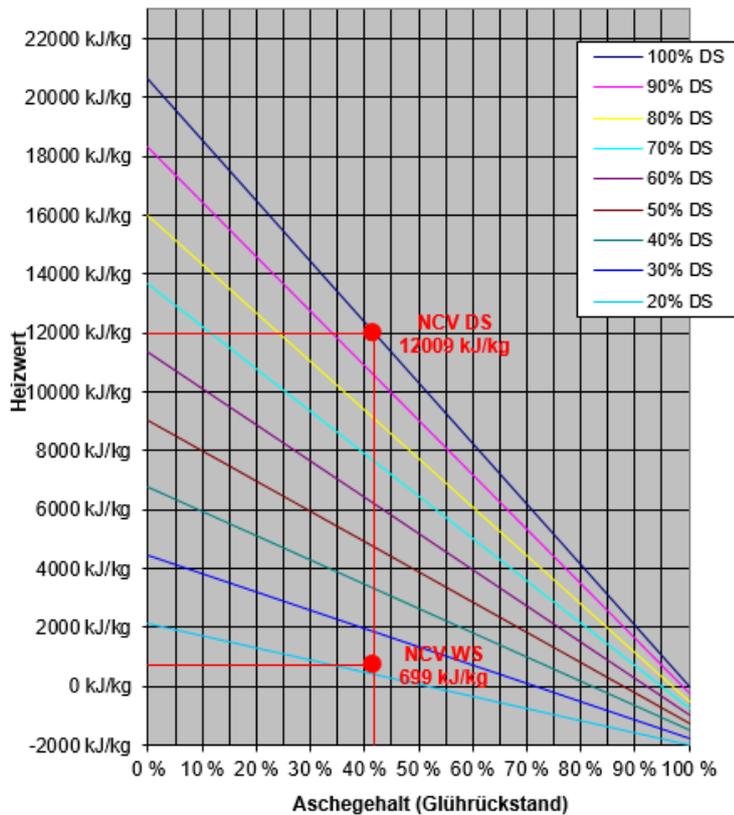


Abbildung 12: Heizwert von Klärschlamm in Abhängigkeit des Aschegehalts und bezogen auf Referenz-Schlamm (PLANK, n.v.).

An dieser Stelle soll auch erwähnt werden, dass je nachdem mit welchen Temperaturen eine thermische Klärschlammverwertung (Pyrolyse oder Vergasung) zur Produktion von heizwertreichen Produkten betrieben wird, unterschiedliche Endprodukte anfallen, d.h. je niedriger die Betriebstemperatur desto höher der Heizwert des Produkts (GWI, 2017).

#### Flüchtige Bestandteile und Emissionen

Die Eigenschaften eines biogenen Brennstoffes, unter Einwirkung von Wärme in brennbare gasförmige Bestandteile und Koks zu zerfallen, bei der Verbrennung Flammen und bei der Vergasung Gas zu bilden, werden maßgebend durch den Gehalt an flüchtigen Bestandteilen bestimmt. Dieser Gehalt ist auch für die Konstruktionsart einer Feuerung oder Vergasers ausschlaggebend, so sollte z.B. die Sekundärluftzufuhr bei einer Verbrennung an den Gehalt von flüchtigen Bestandteilen angepasst werden (BAUMBACH, et al., 2016, S. 613). Mögliche Verbindungen, die emittiert werden und überwacht werden sollten sind HCL, HF, SO<sub>2</sub>, Staub, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, TVOC, CO, PCDD/F, PCB, PAH, Hg, sowie im Staub enthaltene Metalle (BAT-WI, 2017, S. 266 ff.).

#### Wassergehalt

Der Wassergehalt  $w$  in % ist das Verhältnis von aus dem Klärschlamm entfernbarem Wasser und feuchtem Klärschlamm. Er wird bestimmt indem eine Probe in einem Trockenschrank bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet wird, dabei ist allerdings darauf zu achten, dass sich z.B. bei ölhaltigen Materialien unter Umständen Fehler ergeben, da sie Extraktstoffe, flüchtige energiereiche Verbindungen, enthalten, die bei der Trocknung entweichen können (BAUMBACH, et al., 2016, S. 614). Die wesentliche Einflussgröße des Heizwertes biogener Brennstoffe ist der Wassergehalt, da bei einer thermochemischen Umsetzung das enthaltene Wasser verdampft

wird und die dafür notwendige Wärme die Nettoenergieausbeute des Vorgangs mindert, insofern keine Rückkondensation des entstandenen Wasserdampfes im Abgas durch eine Abgaskondensationsanlage vorgenommen wird (BAUMBACH, et al., 2016, S. 615). Der Wassergehalt bestimmt auch die Lagerfähigkeit des biogenen Brennstoffes, da durch das enthaltene Wasser biologische Ab- und Umbauprozesse ermöglicht werden, die das Energiepotenzial vermindern und durch die freiwerdende Wärme bei den biologischen Prozessen zur Brandgefahr durch Selbstentzündung führen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 615).

### Aschegehalt

Als Asche wird der nach der Verbrennung eines biogenen Brennstoffes übrigbleibende anorg. Rückstand, auch GR, bezeichnet, der direkt vom Brennstoff oder aber auch aus mineralischen Verunreinigungen, die im gesamten Verlauf der Bereitstellungskette wie z.B. Aufbereitung, Lagerung oder Transport hinzukommen, her stammt (BAUMBACH, et al., 2016, S. 616). Der Aschegehalt wird bestimmt durch die Verbrennung einer Probe des Brennstoffes bei 550 °C für min. zwei Stunden, wobei die Temperaturerhöhung und der Verbrennungsvorgang im Ofen klar definierten Regeln entsprechen muss (BAUMBACH, et al., 2016, S. 616). Der Aschegehalt bestimmt unmittelbar die Umweltauswirkungen, z.B. in Form von Feinstaubfreisetzungen, durch eine thermochemische Umsetzung und auch die technische Auslegung der Feuerungsanlage, da mit zunehmenden Aschegehalt die freigesetzten Staubfrachten und somit auch der Aufwand für die Entstaubung sowie für die Verwertung und/oder Entsorgung der anfallenden Rückstände steigt (BAUMBACH, et al., 2016, S. 617). Wird über den Abgasstrom Wärme, durch z.B. Wärmetauscher, gewonnen, so ist hierfür auch der Aschegehalt sehr wesentlich, da er den Aufwand für die Entaschung und Reinigung der Wärmeüberträgerflächen bestimmt (BAUMBACH, et al., 2016, S. 617).

### Aschebildende Komponenten im Klärschlamm

Klärschlamm hat einen hohen Anteil an Si als aschebildende Komponente (BAUMBACH, et al., 2016, S. 722). In nachfolgender Abbildung 13 wird schematisch die Transformation eines Klärschlammteilchens während der Verbrennung dargestellt.

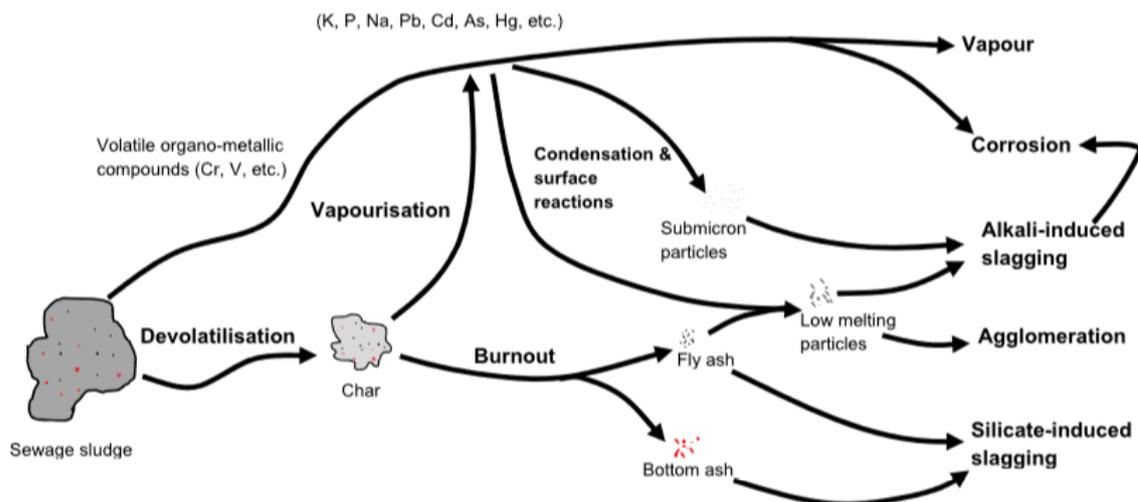


Abbildung 13: Formation und Transformation der Asche(partikel) während der Verbrennung von Klärschlamm (SYED-HASSAN, et al., 2017, S. 903).

Außerdem hängt der Aschegehalt von Klärschlamm vom Wetter ab, d.h. bei Regen finden sich mehr Ton- und Sandpartikel im Klärschlamm, die schlussendlich als Asche bei der Verbrennung

übrigbleiben (BAT-WI, 2017, S. 364). Wie schon erwähnt hängt die Klärschlammzusammensetzung vom Einzugsgebiet der ARA sowie von der Art der Abwasserreinigung ab, denn befindet sich z.B. im Einzugsgebiet schwere Industrie, dann sind meist auch die Schwermetallkonzentrationen im Abwasser höher und verbleiben mehr Schwermetalle auch in der Klärschlammmasche (BAT-WI, 2017, S. 364).

### Phosphor

Phosphor weist eine höhere Sauerstoffaffinität als die Kohlenstoffmatrix der Biomasse auf und wird daher bei thermochemischen Umwandlungsprozessen oxidiert und in extrem flüchtige Verbindungen überführt, die mit zunehmender Verweilzeit und Temperatur in die Gasphase übergehen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 722).

In der Asche ist Phosphor hauptsächlich als Phosphat in den Wirtsgittern des Apatit und Whitlockit vorhanden, daneben aber auch als Bestandteil von amorphen Verbindungen mit geschmolzenem Silikat (BAUMBACH, et al., 2016, S. 726).

### Ascheerweichungsverhalten

Bei thermochemischen Umsetzungen kann es im Glutbett zu physikalischen Veränderung der Asche wie z.B. Verkleben, „Versintern“ und völliges Aufschmelzen der Aschepartikel kommen, was zu erheblichen technischen Nachteilen in der Konversionsanlage wie z.B. Anpackungen, Ablagerungen oder Hochtemperaturkorrosion führen kann (BAUMBACH, et al., 2016, S. 617 ff.). Das Erweichungsverhalten der Aschen, auch als Schmelzverhalten bezeichnet, hängt vor allem von der Brennstoffzusammensetzung und der evtl. Anwesenheit von Störstoffen ab, so erhöhen die Elemente Kalzium und Magnesium generell die Ascheschmelztemperatur und die Elemente Silizium und Kalium senken sie (BAUMBACH, et al., 2016, S. 617 ff.).

### Physikalisch – mechanische Eigenschaften von biogenen Brennstoffen

Die physikalisch – mechanischen Brennstoffeigenschaften, wie z.B. Korngrößenverteilung, Oberflächenbeschaffenheit, Fließeigenschaften, Schüttdichte etc. stehen in hohem Maße in Wechselwirkung zueinander. Diese Beziehungen untereinander sind in Abbildung 14 dargestellt (BAUMBACH, et al., 2016, S. 619-620).

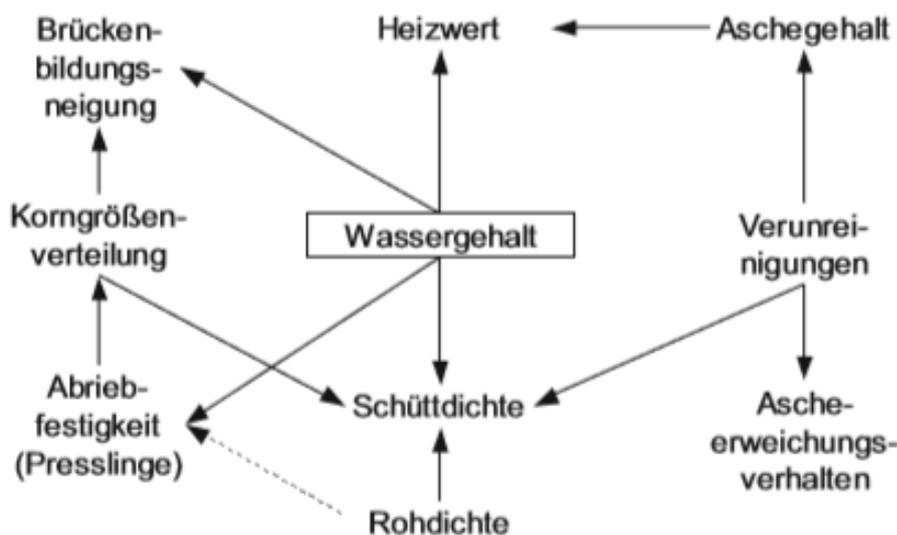


Abbildung 14: Wechselwirkungen zwischen den physikalischen – mechanischen Eigenschaften von biogenen Brennstoffen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 620).

### Korngrößenverteilung

Um mechanische Prozesse wie z.B. Entnahme-, Förder- und Beschickungssysteme einer Konversionsanlage, Transportvorgänge im Allgemeinen sowie auch thermische Prozesse wie z.B. Trocknung und den dafür notwendigen Luftdurchtrittswiderstand störungsfrei zu gewährleisten, ist die Kenntnis der physikalischen Merkmale wie Partikelform und -größe, Korngrößenverteilung und Feinanteil wichtig (BAUMBACH, et al., 2016, S. 622 ff.). Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgt mittels Siebung einer Brennstoffprobe durch übereinander angeordneter horizontaler Rüttelsiebe mit unterschiedlichen Sieblochweiten (BAUMBACH, et al., 2016, S. 623).

### Fließeigenschaften

Werden Brennstoffe oder auch Aschen gelagert so ist für die Bildung von Hohlräumen, wie Brücken oder Gewölben, und Schächten, die zu Problemen in der Bereitstellungskette, z.B. Blockieren von Förderaggregaten, führen, vor allem die Fließ- oder Rieselfähigkeit des Materials ausschlaggebend (BAUMBACH, et al., 2016, S. 626).

### Lagerdichte und Rohdichte

Lager- und Rohdichte beeinflussen die Schüttdichte des biogenen Brennstoffes oder der Asche und sind wesentlich für die Bestimmung des erforderlichen Lager- und Transportvolumens (BAUMBACH, et al., 2016, S. 629). Folgende Abbildung 15 zeigt übliche Klärschlammdichten in Abhängigkeit von TS und GV.

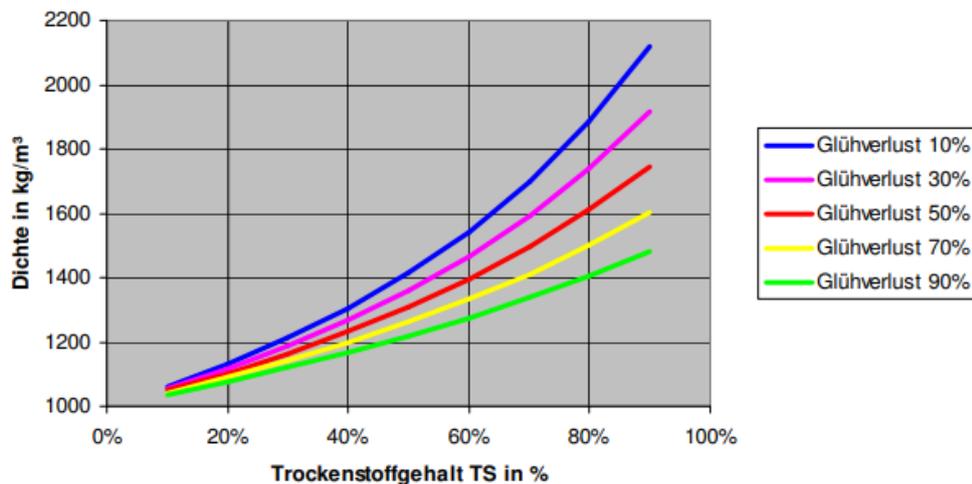


Abbildung 15: Abhängigkeit der Schlammdichte vom TS und GV (DÜNNEBEIL, n.a.)

### Energiedichte

Die Energiedichte gibt die jeweilige Masse bzw. das jeweilige Volumen je Energieeinheit an, wobei der Heizwert bei gegebenem Wassergehalt verwendet wird (BAUMBACH, et al., 2016, S. 636). Für Klärschlamm kann die Energiedichte aus Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 15 errechnet werden und dabei ergibt sich exemplarisch für einen Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von 40 % und einem GV von 50 % eine Energiedichte von ca. 4.840 - 6.050 MJ/m<sup>3</sup>.

### Brennstoffmengenabschätzung

Um die in einer Brennstoffcharge oder Lieferung enthaltene Energiemenge abschätzen zu können, wird die Masse der Charge mit dem Heizwert des Brennstoffes beim vorliegenden Wassergehalt multipliziert (BAUMBACH, et al., 2016, S. 636 ff.).

### 3.2.1.2 Thermochemische Umwandlungsprozesse

Im Nachfolgenden werden die vier Hauptphasen, Aufheizung/Trocknung, Pyrolyse, Vergasung und Oxidation/Verbrennung eines thermochemischen Umwandlungsprozesses kurz beschrieben und die einzelnen Schritte Trocknung und Monoverbrennung von Klärschlamm etwas detaillierter ausgeführt.

#### Aufheizung/Trocknung

Beim ersten Teilschritt einer thermochemischen Umwandlung wird das im Brennstoff enthaltene Wasser unter Wärmezufuhr, bei Temperaturen zwischen 100 – 200 °C, in Gasatmosphäre verdampft, d.h. eigentlich wird die hygroskopische Bindung des Wassers bei Temperaturen zwischen 98 – 103 °C gesprengt (BAUMBACH, et al., 2016, S. 653 ff.). Findet die Aufheizung in hydrothermaler Atmosphäre, also in unter-, nah- bzw. überkritischem Wasser, statt, so wird das im Brennstoff enthaltene Wasser nicht verdampft sondern bleibt aufgrund der hohen Drücke flüssig und dient gleichzeitig als Reaktionsmedium, Lösungsmittel und Katalysator (BAUMBACH, et al., 2016, S. 656 ff.).

#### Trocknung von Klärschlamm

Durch die Trocknung des Klärschlammes auf bis zu 90 % TS kann ein Heizwert von 8.000 - 10.000 kJ/kg getrocknetem Klärschlamm erreicht werden (AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG, 2008, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 53)). Um den TS-Gehalt des Klärschlammes bei der Trocknung von 25 % auf 90 % zu erhöhen sind 70 - 80 kWh<sub>thermisch</sub> pro kg verdampftem H<sub>2</sub>O aufzubringen (INTECUS GmbH, 2016b, S. 19). Bei der Trocknung von Klärschlamm sollte unbedingt die nachfolgende Verwertungsart und der gesamte Energiehaushalt der Prozesskette der Klärschlammverwertung in Betracht gezogen werden (INTECUS GmbH, 2016b, S. 20). Auch um bei der Trocknung des Klärschlammes entweichende Gase einer Reinigung, evtl. als Sekundärluft bei der Verbrennung, zuzuführen (BAT-WI, 2017, S. 33). Da die Klärschlamm-trocknung ein sehr energieintensiver Prozess ist, sollten alle auf einer ARA vorhandenen potenziellen Energiequellen genutzt werden. So kann z.B. die durch die Gebläsestationen der biologischen Reinigungsstufe frei werdende Wärme, über Wärmetauscher, für die Klärschlamm-trocknung verwendet werden und zu einer Einsparung von bis zu 50 % der Energiekosten der Konvektionstrocknung beitragen (INTECUS GmbH, 2016b, S. 22). Zur Trocknung des Klärschlammes können verschiedene (direkte, indirekte oder solare) Verfahren angewendet werden (OLIVA, et al., 2009, S. 53-54):

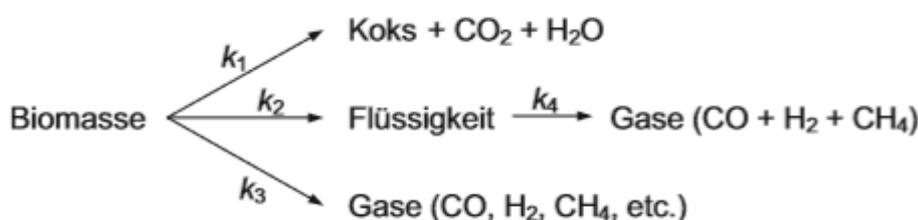
1. Konvektionstrocknung: Energieträger ist ein Trocknungsgas, welches an das Trockengut Wärme abgibt und mit dem der freigesetzte Wasserdampf abtransportiert wird. Anwendungen sind der Scheibentrockner, der Trommeltrockner und der Bandtrockner.
2. Kontaktstrocknung: ein Energieträger wie z.B. Thermoöl, Dampf oder Luft gibt indirekt über Kontaktflächen Wärme an das Trockengut ab und der freigesetzte Wasserdampf wird mit der Leckluft dem System entzogen. Anwendungen sind der Dünnschichttrockner, Scheibentrockner und der Wirbelschichttrockner.
3. Strahlungstrocknung: Energieträger sind elektromagnetische Wellen, wie z.B. Infrarotlicht, die auf das Trockengut Wärme übertragen und dabei Wasserdampf freisetzen, welcher mit der Leckluft dem System entzogen wird. Eine Anwendung ist die solare Trocknung.
4. Biotrocknung (HAO, et al., 2018): das Trockengut, bestehend v.a. aus biologischer Substanz, wird durch aerobe mikrobielle Abbauprozesse und unter Freisetzung von Wärme, durch die metabolische Tätigkeit, getrocknet. Ein Vorteil, der sich aus diesem

Trocknungsverfahren ergibt ist, dass bei anschließender Verbrennung des Trockenguts weniger Schadstoffe wie CO und NO emittiert werden.

Dezentrale Trocknung des Klärschlammes kann den Ressourcenverbrauch, welcher für den Transport notwendig ist, deutlich verringern (OLIVA, et al., 2009, S. 54). Sowie die Implementierung des Verfahrens zur HTC des Klärschlammes die Energiebilanz einer ARA verbessern kann. Zum einen dadurch, dass das Endprodukt, der hochentwässerte Klärschlamm, einen besseren Heizwert aufweist und dadurch für die Klärschlammmonoverbrennung vorteilhafter ist als für die Mitverbrennung. Zum anderen dadurch, dass durch die anaerobe Behandlung des Filtrats der HTC zusätzliches Faulgas erzeugt werden und zur Stromproduktion genutzt werden kann (REMY & STÜBER, 2015, S. 30). Je nach momentaner und allgemeiner Situation und Ausstattung der ARA und welcher Entsorgungsweg für den Klärschlamm gewählt wird, lassen sich Einsparungen im Bereich von 1.250 – 3.071 MJ/t TS erreichen (REMY & STÜBER, 2015, S. 30). Auch wenn zusätzliche Aufwendungen für die HTC wie z.B. Rückbelastung der ARA durch das Filtrat sowie der Energieverbrauch der HTC selbst von untergeordneter Rolle sind, sollten sie nicht vernachlässigt werden, da sie unter ungünstigen Konstellationen zu erheblichen Beeinträchtigungen, auch der Reinigungsleistung der ARA, führen können (REMY & STÜBER, 2015, S. 6, 10, 30, 36, 40). Nicht nur energetisch kann sich die HTC von Klärschlamm positiv auf den Betrieb der ARA auswirken sondern auch in Hinsicht auf die Emission von THG, da durch HTC und anschließender Monoverbrennung des Klärschlammes die N<sub>2</sub>O-Emissionen im Abgas reduziert werden können (REMY & STÜBER, 2015, S. 31).

### Pyrolyse

Die Pyrolyse, ein endothermer Prozess bei dem kein zusätzliches Oxidationsmittel zugeführt wird, findet bei Temperaturen zwischen 150 – 500 °C statt und dabei werden langkettige org. Verbindungen in kleinere Moleküle bzw. Molekülbruchstücke aufgespalten, welche den Ort der Reaktion gasförmig als flüchtige Bestandteile verlassen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 652 und 657 ff.). Gase wie z.B. CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> usw., Pyrolyseöl und Pyrolysekoks, der feste Rückstand, die gasförmigen, flüssigen und festen Produkte der Pyrolyse sind im kinetischen Schema, Abbildung 16, ersichtlich (BAUMBACH, et al., 2016, S. 657).



Aktivierungsenergien:  $E_1 < E_2 < E_3$  ( $k_1$  sehr niedrig bei Temperaturen  $< 650$  °C)

Abbildung 16: Vereinfachtes kinetisches Schema der pyrolytischen Zersetzung von Biomasse (SHAFIZADEH & CHIN, 1977, zit. bei (BAUMBACH, et al., 2016, S. 664)).

Bei der pyrolytischen Zersetzung in hydrothormaler Atmosphäre laufen vor allem hydrolytische Zersetzungsprozesse ab, da durch die Apolarität des Wassers bei diesen Bedingungen die Biomasse sich teilweise im Wasser löst (BAUMBACH, et al., 2016, S. 665 ff.). Da die Aktivierungsenergie für Hydrolysereaktionen geringer ist, sind wesentlich niedrigere Temperaturen als bei der Pyrolyse in Gasatmosphäre nötig (BAUMBACH, et al., 2016, S. 666). Die pyrolytische Zersetzung in hydrothormaler Atmosphäre kann unterteilt werden in die HTC und die hydrothermale Verflüssigung (HTL). Durch HTC wird bei Temperaturen von 150 – 250 °C und

Drücken bis zu 20 bar vor allem fester Hydrolysekoks produziert. Bei HTL fallen bei Temperaturen von 280 – 370 °C und Drücken von 40 – 200 bar bevorzugt flüssige Produkte an (BAUMBACH, et al., 2016, S. 667).

### Vergasung

Als Vergasung werden solche thermochemische Umwandlungsprozesse bezeichnet, bei denen z.B. biogene Brennstoffe unter Zufuhr von thermischer Energie und einem Vergasungsmittel in gasförmige Brennstoffe, Produkt- oder Chemiegase, überführt werden (BAUMBACH, et al., 2016, S. 652 und 667 ff.). Wie in Abbildung 17 ersichtlich kommt es bei der Vergasung, im Unterschied zur Aufheizung und Pyrolyse, zu einer Reaktion des Brennstoffs mit der umgebenden Atmosphäre (BAUMBACH, et al., 2016, S. 668).

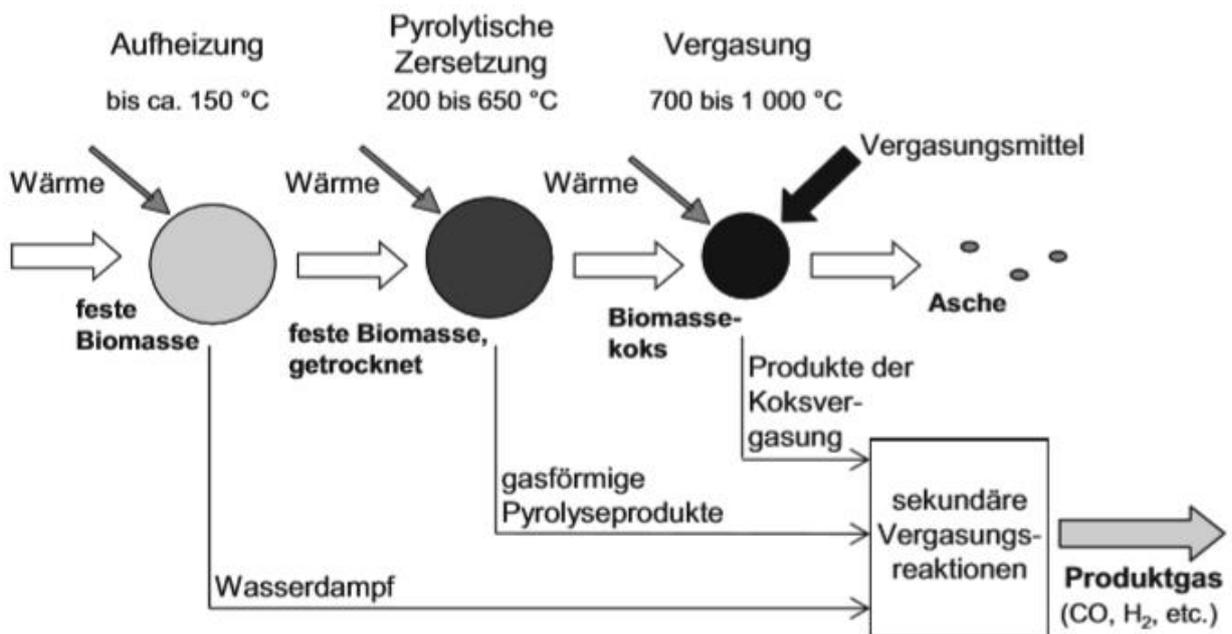


Abbildung 17: Stufen der Biomassevergasung dargestellt an einem Biomassepartikel als eigenständiger Prozess (BAUMBACH, et al., 2016, S. 668).

Eine Vielzahl an chemischen Reaktionen wie z.B. heterogene Gas-Feststoffreaktionen und homogene Gasphasenreaktionen, die entweder exotherm oder endotherm und daher für die Energiegewinnung wichtig sind, laufen bei der Vergasung eines biogenen Brennstoffes ab. In Abbildung 18 ist zu erkennen wie sich der Energieinhalt des Produktgases während der Vergasung in Luftatmosphäre, abhängig von der Luftüberschusszahl  $\lambda$ , verändert und dass bei einer Luftüberschusszahl zwischen 0,2 und 0,3 ein Maximum an chemischer Energie im Produktgas erreicht werden kann (BAUMBACH, et al., 2016, S. 675).

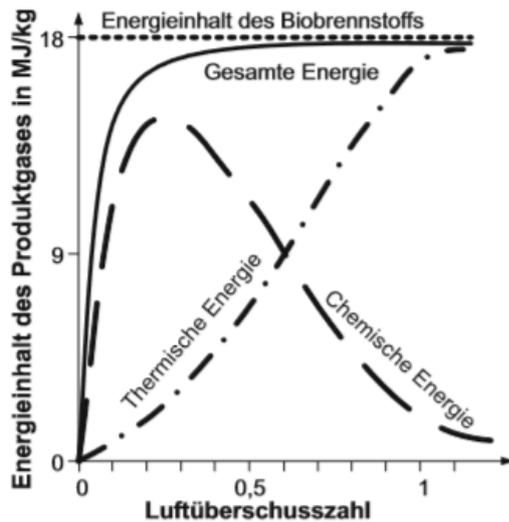


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Luftüberschusszahl und Energieinhalt des Produktgases (GOMEZ-BAREA & LECKNER, 2010, zit. bei (BAUMBACH, et al., 2016, S. 675)).

Bei der katalytischen Vergasung in hydrothormaler Atmosphäre ab 500 °C entsteht hauptsächlich CH<sub>4</sub>, bei Temperaturen > 600 °C vor allem H<sub>2</sub> (BAUMBACH, et al., 2016, S. 679). Ein Vorteil der Vergasung in hydrothormaler Atmosphäre ist, dass durch die unterschiedliche Löslichkeit von CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> die Produkte durch Abkühlen und Entspannen des Produktgases voneinander getrennt werden können (BAUMBACH, et al., 2016, S. 680).

### Oxidation/Verbrennung

Die vollständige Oxidation der bei der pyrolytischen Zersetzung und Vergasung gebildeten Produkte mit Sauerstoff, unter Wärmefreisetzung, bildet den letzten Schritt eines thermochemischen Umwandlungsprozesses bei dem hauptsächlich CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O als Endprodukte übrigbleiben (BAUMBACH, et al., 2016, S. 681). Heterogene Oxidationsreaktionen im Glutbett sowie homogene Oxidationsreaktionen in der Gasphase kommen bei der Verbrennung von biogenem Brennstoff vor und sind in Tabelle 14 dargestellt (BAUMBACH, et al., 2016, S. 681).

Tabelle 14: Oxidationsreaktionen in Verbrennungsanlagen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 681).

	$\Delta H_{R,298}$	$\Delta H_{R,1123}$
	in kJ/mol	
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-393,4	-394,9
$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	-110,5	-87,6
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	-282,9	-366,8
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	-241,8	-224,1
$CH_4 + 2 O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O$	-808,2	-801,0
$C_m H_n + (m+n/4) O_2 \rightarrow m CO_2 + \frac{1}{2} n H_2O$		

Wichtige Anforderungen an die Verbrennungsanlage stellt das 3-T-Kriterium (engl.: temperature/turbulence/time) dar, d.h. die Modifikation von auf das 3-T-Kriterium bezogener Prozessparameter verändert den gesamten Prozess und kann ggf. erhebliche negative Auswirkungen z.B. auf die Emissionen haben (BAUMBACH, et al., 2016, S. 681).

### Monoverbrennung von Klärschlamm

Übergeordnetes Ziel der Klärschlammmonoverbrennung, also der thermischen Umwandlung und vollständigen Oxidation von Klärschlamm ist unter anderem die Volumenreduzierung. Daneben ist aber auch die Nutzung von Klärschlamm als erneuerbare Energiequelle, wie z.B. Produktion von erneuerbarem, natürlichem Gas (SYNGAS wie z.B. Bio-Methan oder Wasserstoff), nahezu schwefelfreiem Diesel, Bio-Rohöl oder Bio-Kohle ein höchst aktueller Ansatz (GWI, 2017). Bei der Verbrennung von Klärschlamm kann durch Dampf- und/oder Abgasnutzung Wärme ausgekoppelt und/oder elektrischer Strom produziert werden. Anfallendes Abgas, das unterschiedlich umweltschädlich sein kann, ist in jedem Fall einer Abgasreinigung zu unterziehen, was einen beachtlichen Mehraufwand an Kosten, der von Anlagenbetreibern in der Planung und im Betrieb unbedingt beachtet werden sollte, bedeutet (GWI, 2017). Um die Wirtschaftlichkeit von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen zu gewährleisten war in der Vergangenheit eine Kapazität der Anlage, die das Aufkommen an Klärschlamm von 100.000 EW verwertet, nötig. Seit einigen Jahren sind auch Verfahren, z.B. das PYREG-Verfahren, verfügbar die sich für wesentlich kleinere Anlagen wirtschaftlich rechnen können (GERBER, et al., 2010). Ein Vorteil der Monoverbrennung von Klärschlamm ist, dass sich durch diesen thermochemischen Umwandlungsprozess Energie- und Ressourcenrückgewinnung kombinieren lassen (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 24). Ein Variantenvergleich durch Multikriterien- und Sensitivitätsanalyse von Bättig et al. (2011) zeigt, dass die Monoverbrennung von Klärschlamm und anschließende Phosphorrückgewinnung sehr gut abschneiden.

Für die Verbrennung von Klärschlamm in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen ist im Allgemeinen ein TS-Gehalt von 35 % ausreichend, doch ist die Energieausbeute stark von der Klärschlammzusammensetzung (Gehalt an org. Substanz) und dem spezifischen Energiegehalt abhängig (INTECUS GmbH, 2016b, S. 19). Da ein TS-Gehalt von 35 % ausreichend sein kann, ist eine thermische Trocknung des Klärschlammes nicht unbedingt erforderlich (BAT-WI, 2017, S. 32). Für die autotherme Verbrennung von Klärschlamm ist ein TS-Gehalt von min. 25 % nötig (GWI, 2017), wobei der HW des Klärschlammes min. 4.500 – 5.000 kJ/kg betragen sollte. Liegt ein TS > 85 % vor kann ein Heizwert von bis zu 12.000 kJ/kg erreicht werden (PLANK, n.v.). Wichtige Faktoren für die Verbrennung von Klärschlamm sind (INTECUS GmbH, 2016b, S. 27):

- der TS-Gehalt des Klärschlammes (im Bereich von 10 – 45 % nach (BAT-WI, 2017, S. 31))
- anaerobe oder aerobe Klärschlammstabilisierung
- Verwendung von verschiedenen Konditionierungsmitteln
- die Klärschlammzusammensetzung (Primär/Sekundär/Tertiär-Schlamm)
- Geruchsentwicklung bei der Lagerung
- Nikodem et al. (2018, S. 400) betonen die große Bedeutung des org. Gehaltes des Klärschlammes für die Realisierbarkeit einer Primärenergie-Autarken Verbrennung;
- Gerber et al. (2010) weisen darauf hin, dass die niedrige Ascheerweichungstemperatur des Klärschlammes für Verbrennungsanlagen problematisch sein kann;

#### 3.2.1.3 Technische Verfahren thermochemischer Umwandlungsprozesse

Im Folgenden wird ein Überblick über mögliche Verfahren für thermochemische Umwandlungsprozesse, wozu auch die Monoverbrennung von Klärschlamm gezählt werden kann, gegeben.

Technische Verfahren zur Realisierung von thermochemischen Umwandlungsprozessen sind modifiziert nach Baumbach et al. (2016, S. 688 ff.):

- Verbrennung (Monoverbrennung von Klärschlamm)
- Verkohlung/langsame Pyrolyse
- Schnelle Pyrolyse/mittelschnelle Pyrolyse
- Vergasung
- Hydrothermale Karbonisierung HTC
- Hydrothermale Verflüssigung HTL
- Hydrothermale Vergasung HTG
- Torrefizierung

In den folgenden Unterkapiteln wird hauptsächlich auf die Verbrennung, also Monoverbrennung von Klärschlamm, näher eingegangen, da dieses technische Verfahren im Focus vorliegender Masterarbeit liegt. Dabei soll zuerst ein allgemeiner Überblick über mögliche Feuerungstechnologien gegeben und anschließend dann einzelne technische Verfahren genauer beschrieben werden. Neben der Monoverbrennung werden vollständigshalber auch einzelne technische Verfahren wie Pyrolyse, Vergasung, hydrothermale Verfahren und ein alternatives Verfahren angeführt. Die eben erwähnten Verfahren und andere, in vorstehender Auflistung angeführte, technische Verfahren sollten jedoch in der Planung und der Strategiefindung für die zukünftige Klärschlammverwertung nicht vernachlässigt werden, da sie u.U. einen wichtigen Beitrag zur Schonung und Erhaltung von bestimmten Wertstoffen leisten können, s.a. Unterkapitel 5.2.6.

Abbildung 19 zeigt die heute gängigen technischen Verfahren in denen thermochemische Umwandlungen großtechnisch umgesetzt werden und deren wesentliche Prozessparameter (BAUMBACH, et al., 2016, S. 684 und 693).

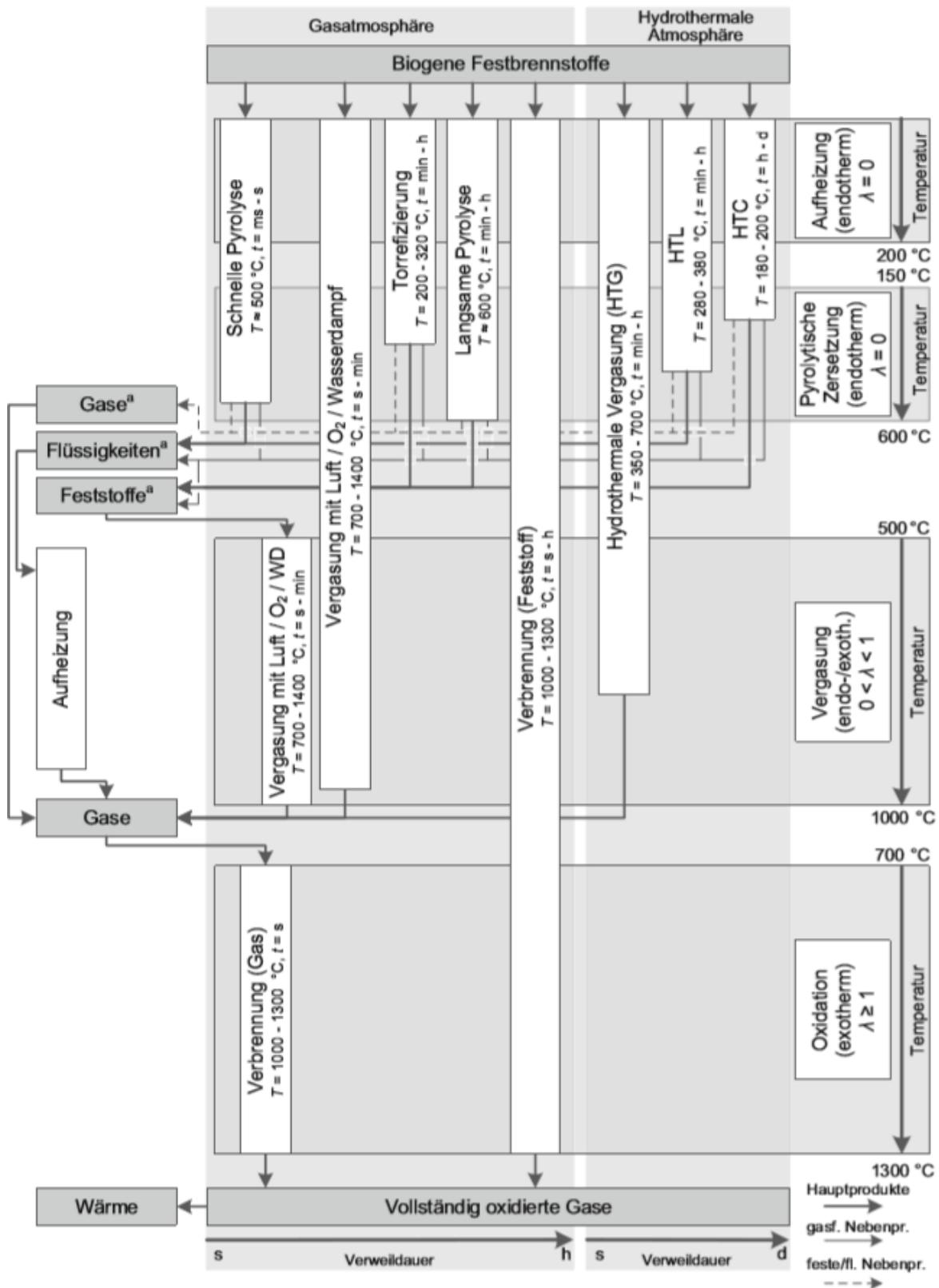


Abbildung 19: Detaillierte Abgrenzung der einzelnen Prozesse der thermochemischen Umwandlung (t Verweildauer, T Temperatur, WD Wasserdampf, <sup>a</sup> unter Normalbedingungen) (BAUMBACH, et al., 2016, S. 693).

Wichtige Kenngrößen werden für den besseren Überblick in Tabelle 15 nochmal zusammengefasst (BAUMBACH, et al., 2016, S. 692).

Tabelle 15: Temperatur, Atmosphäre, Verweildauer und Produkte der einzelnen Prozesse der thermochemischen Umwandlung (BAUMBACH, et al., 2016, S. 694).

Prozess	Temperatur in °C	Atmosphäre	Verweildauer	Produkte
Torrefizierung	200–320	Gasatmosphäre $\lambda = 0$	min–h	fester Brennstoff
Langsame Pyrolyse	~ 600	Gasatmosphäre $\lambda = 0$	min–h	Pyrolysekoks (Holzkohle), -gas und -öl
Schnelle Pyrolyse/ mittelschnelle Pyrolyse	~ 500	Gasatmosphäre $\lambda = 0$	ms–s	Pyrolyseöl, -koks und -gas
Vergasung	700–1 400	Gasatmosphäre $0 < \lambda < 1$	s–min	Synthesegas (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> )
Verbrennung	1 000–1 300	Gasatmosphäre $\lambda \geq 1$	s–h	Wärme, Abgas, Asche
HTC	150–250	Hydrothermale Atmosphäre, unterkritisch	h–d	Hydrokoks
HTL	280–380	Hydrothermale Atmosphäre, unterkritisch	min–h	Bio-Rohöl
HTG	350–700	Hydrothermale Atmosphäre, überkritisch	min–h	Gas (reich an H <sub>2</sub> oder CH <sub>4</sub> )

### 3.2.1.4 Feuerungstechnologien für die Monoverbrennung

Mögliche Technologien für die Klärschlammmonoverbrennung sind ((INTECUS GmbH, 2016b, S. 31-35) und (OLIVA, et al., 2009, S. 66-69)):

- Wirbelschichtfeuerung (nahezu 100 % der angewandten Technologien zur Klärschlammmonoverbrennung nach (BAT-WI, 2017, S. 36)).
- Rostfeuerung (hauptsächlich für Müllverbrennung eingesetzt)
- Vorschubrostfeuerung mit Wurfbeschickung
- Schmelzkammerfeuerung
- Etagenofen (Mehrfachherdfeuerung/Multiple hearth furnace)
- Drehrohrfeuerung
- Zyklonfeuerung

Rostfeuerung, Vorschubrostfeuerung und Schmelzkammerfeuerung werden in vorstehender Aufzählung vollständigshalber angeführt, im Weiteren aber nicht behandelt, da sie sich für die Monoverbrennung von Klärschlamm, nach Ansicht des Verfassers dieser Arbeit, weniger gut eignen.

#### Wirbelschichtfeuerung

Die Wirbelschichtfeuerung ist für die Klärschlammmonoverbrennung ein praxisbewährtes und weit verbreitetes Verfahren, da es einige wichtige Vorteile bietet. Z.B. sind im Vergleich zur Rostfeuerung im Verbrennungsraum keine beweglichen Teile angeordnet und somit ist der Instandhaltungsaufwand, verursacht durch Abrieb, gering sowie, dass durch die mögliche zweistufige Ausgestaltung des Ofens weniger NO<sub>x</sub> entstehen und durch ein verbessertes Teillastverhalten der Betrieb stabiler gegenüber schwankenden Schlammengen wird (ABTEILUNG MSE-Z, 2016, S. 47). Bei der Wirbelschichtfeuerung wird vorgetrockneter Klärschlamm in einer in Schwebelage gehaltenen Wirbelschicht, bestehend aus einem fluidisierten Sandbett, getrocknet, ent- und vergast sowie verbrannt. Flugfähige Aschepartikel und das

entstehende Gasgemisch werden über den Rauchgasstrom, nicht flugfähige grobe Aschepartikel am Boden der Brennkammer abgezogen. Die stationäre (oder bubbling regime) Wirbelschicht besteht üblicherweise aus einer zylindrischen oder rechteckigen Brennkammer, einem Düsenbett und einer Start- und Stützfeuereinrichtung (BAT-WI, 2017, S. 55). Entwässerter Klärschlamm (TS-Gehalt ca. 45 %) wird dabei bei 850 – 950°C verbrannt (BAT-WI, 2017, S. 57). Soll getrockneter Klärschlamm verbrannt werden, ist die zirkulierende Wirbelschicht besser geeignet, da feineres Bettmaterial eingesetzt wird und dadurch höhere Geschwindigkeiten des Gases und damit eine gleichförmigere Temperaturverteilung erreicht werden können (BAT-WI, 2017, S. 57).

### Mehrfachherdfeuerung/Etagenofen

Bei der Mehrfachherdfeuerung wird feuchter Klärschlamm von oben in einen Stahlzylinder mit etwa 3 – 10 horizontalen Etagen und einer drehbaren Mittelwelle, mit angeflanschten Rührarmen, eingebracht und durch Abgas im Gegenstrom im oberen Teil getrocknet und im mittleren Teil verbrannt. Diese Feuerungstechnologie wird hauptsächlich für Schlammverbrennung, u.a. Klärschlamm, eingesetzt (BAT-WI, 2017, S. 75). Die Verbrennungstemperatur liegt wie bei der Wirbelschicht im Bereich von 850 – 950°C, wobei sie jedoch nicht höher als 980°C sein sollte, da sonst die Ascheerweichungstemperatur des Schlammes erreicht wird und Schlacke entsteht (BAT-WI, 2017, S. 76 ff.). Im Unterschied zur Wirbelschichtfeuerung braucht es bei der Mehrfachherdfeuerung eine Nachbrennkammer, in der die entstehenden Abgase und mitgerissene Partikel vollständig oxidiert werden (BAT-WI, 2017, S. 77). Ein Vorteil ist die gute innere Energieausnutzung sowie, dass nasser, nur entwässerter Klärschlamm genutzt werden kann und ein Nachteil ist die notwendige Stützfeuerung (SYED-HASSAN, et al., 2017, S. 901).

### Drehrohrfeuerung

Die Drehrohrfeuerung wird hauptsächlich zur Verbrennung von gefährlichen Müllarten eingesetzt, kann aber auch zur Verbrennung von Klärschlamm effizient eingesetzt werden (siehe ARA Tobl in Südtirol <https://www.arapustertal.it/de/anlagen/ara-tobl-stlorenz/thermische-schlammverwertungsanlage>).

### Zyklonfeuerung

Bei der Zyklonfeuerung wird vorgetrockneter Klärschlamm (min. 90 % TS) in einer Zyklonbrennkammer bei Temperaturen von 900 – 1.000 °C, also möglichst unterhalb der Ascheerweichungstemperatur, verbrannt, wobei die Flugasche mit dem Abgas entfernt wird und die Restasche vom unteren Teil der Brennkammer abgezogen wird (BAT-WI, 2017, S. 80).

### 3.2.1.5 In der Praxis realisierte Verfahren zur Monoverbrennung

In diesem Unterkapitel wird ein genereller Überblick über in der Praxis angewendeter Verfahren zur Monoverbrennung gegeben und anschließend einige ausgewählte Verfahren genauer beschrieben. Abschließend folgt ein genereller Überblick über die Kosten der Monoverbrennung.

Tabelle 16 bietet einen Überblick über mögliche Konzepte der dezentralen Klärschlammmonoverbrennung. Die Klärschlammmonoverbrennung ist auf dezentralen Anlagen im Vergleich zu Großanlagen durchaus im Bereich der Wirtschaftlichkeit, dies wird aus Tabelle 17 ersichtlich (OLIVA, et al., 2009, S. 74).

Tabelle 16: Verfahren und Anbieter dezentraler Kleinanlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung (QUICKER, 2008, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 72)).

Verfahren	Firma	Pyrolyse	Vergasung	Verbrennung
EcoDry	Andritz (ERMEL 2002)			Zyklonofen
AWINA	Aldavia BioEnergy			Rost mit Schleuderrad
sludge2energy	Hans Huber (BOGNER et al. 2008)			Rost
BioCon	Krüger A/S Veolia Water Systems			Rost
PyroFluid				Stationäre Wirbelschicht
KALOGEO	KALOGEO Anlagenbau			Stationäre Wirbelschicht
SWSF-Verfahren	ES*S Energy Systems			Stationäre Wirbelschicht
Pyrobustor	Eisenmann	Drehrohr (1. Kammer)		Drehrohr (2. Kammer)
Kopf Verfahren	Kopf AG		Stationäre Wirbelschicht	
G&A-Verfahren	G&A Industrieanlagen Unitechnik	Pyrolysereaktor		
OHLTHERM PYRO-3	OHL Technologies Polytherm Hamburg	Pyrolysereaktor		
HD-PAWA-THERM	UC Prozesstechnik	Drehrohr		
Thermokatalyse	FH Gießen-Friedberg	Schlaufenreaktor		
PYROMEX	PYROMEX AG	Hochtemperaturreaktor		

Tabelle 17: Prozessparameter von 4 ausgewählten Konzepten zur dezentralen Klärschlammmonoverbrennung (UMWELTBUNDESAMT, 2004, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 73)).

	KALOGEO Verfahren von Tecno Engineering	Eco-Dry-Verfahren von Andritz AG	Ultrahochtemperaturvergasung von Pyromex AG	HD-PAWA-THERM von UC Prozesstechnik	Bestehende Monoverbrennung
Trocknung	Solar oder Abwärme	Abwärme	Pyrogas, Abwärme	Pyrolysegas, Erdgas	
Reaktor	Stationäre Wirbelschicht	Zyklonofen	Entgasung im Hochtemperaturreaktor	Pyrolyse im Drehrohr	
Energiezufuhr durch	Erd- oder Biogas	energieautark (Erdgas, Erdöl beim Anfahren)	Induktionsstrom	indirekt durch Erdgas	
Temperatur in °C	650 bzw. 850	> 850	1.200–1.700	700	
Abgasreinigung	Trockene Sorption (Kalkhydrat, Aktivkoks), Quench, Keramikfilter	trocken (Kalkhydrat, Herdofenkoks) oder nass (Venturiwäscher + alkalischer Wäscher	alkalischer und saurer Wäscher	Aktivkohlefilter und Wäscher	
Energienutzung	Strom, Trocknung, Faulturm, Fernwärme	Trocknung	Trocknung, Gasmotor, Strom	Trocknung, Wärme, Strom	
Kosten in €/t TS	143–268	125–225	325–375	160–320	233

In Tabelle 18 werden die einzigen in Österreich betriebenen Klärschlammmonoverbrennungsanlagen angeführt (OLIVA, et al., 2009, S. 73). Tabelle 19 bietet einen Überblick über wichtige Prozessparameter einiger Verfahrensanbieter.

Tabelle 18: Monoverbrennungsanlagen in Österreich (STUBENVOLL, 2002, UMWELTBUNDESAMT, 2007 und BAYER, 2007, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 74)).

Anlage	BL	Betreiber	Inbetriebnahme	Feuerung	Abfallart	genehmigte bzw. durchschnittliche Kapazität in t/a <sup>1)</sup>
Simmeringer Haide WSO 1-3	W	Fernwärme Wien	1980-1992	Stationäre WS	Klärschlamm	180.000
Bad Vöslau	NÖ	Abwasser-verband Bad Vöslau	2004	Stationäre WS	Klärschlamm	9.000 <sup>2)</sup>

Tabelle 19: Übersicht über die aktuellen Konzepte der Verbrennung von kommunalem Klärschlamm in dezentralen kleinen Verbrennungsanlagen (KÜGLER, et al., 2004, S. 2).

	Tecon Engineering GmbH	Andritz AG	Pyromex AG	UC Prozesstechnik GMBH
Trocknung	Solar od. Abwärme	Abwärme	Pyrogas, Abwärme	Pyrolysegas, Erdgas
Reaktor	Verbrennung in stationärer Wirbelschicht	Verbrennung im Zyklonofen	Entgasung im Hochtemperaturreaktor	Pyrolyse im Drehrohr
Energiezufuhr über	Erd- oder Biogas	energieautark (Erdgas, Erdöl beim Anfahren)	Induktionsstrom	Indirekt durch Erdgas
Temperatur [°C]	650 bzw. 850	>850	1.200 - 1.700	700
Abgasreinigung	Trockene Sorption (Kalkhydrat, Aktivkoks), Quench, Keramikfilter	Trocken (Kalkhydrat, Herdofenkoks) oder nass (Venturiwäscher und alkal. Wäscher)	Alkalischer und saurer Wäscher	Aktivkohlefilter und Wäscher
Energienutzung	Strom, Trocknung, Faulturn, Fernwärme	Trocknung	Trocknung, Gasmotor, Strom	Trocknung, Wärme, Strom
Kosten [€/t TS]	143 - 268 (28 % TS)	200 - 300 (5 % TS, nass)	400 - 450 (3 - 8 % TS)	160 - 320 (25 % TS)

Nun folgt die Beschreibung einiger ausgewählter Verfahren zur thermischen Verwertung, insbesondere Monoverbrennung, von Klärschlamm.

### EcoDry-Verfahren

Das EcoDry-Verfahren der Andritz AG, dargestellt in Abbildung 20 und beschrieben nach Kügler et al. (2004, S. 28-35), kombiniert Klärschlamm-trocknung in einer Trommeltrocknungsanlage und Klärschlammverbrennung in einem Zyklonofen. Neben der Trommeltrocknung sind auch andere Trocknungstechnologien wie z.B. Bandrockner oder Wirbelschichtrockner anwendbar und in Abhängigkeit der Trocknungstechnologie kann das Verfahren der Wärmeauskopplung über z.B. Thermal-Öl, Wasserdampf, Gas oder Abgas angepasst werden. Das produzierte Trockengranulat wird in einem Feinbrecher zerkleinert, in den Zyklonofen pneumatisch eingedüst und dort bei

Temperaturen über 850 °C verbrannt. Die Abgasreinigung erfolgt mittels selektiver nichtkatalytischer Reduktion (SNCR) sowie einer nassen oder trockenen Rauchgasreinigung. Die Durchsatzleistung der Verbrennung im EcoDry-Verfahren beträgt 800 – 2.290 kg TS/h. Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass bei einem TR von 25 % und einem org. Anteil von über 50 % keine thermische Fremdenergie für die Trocknung benötigt wird, da Primärenergie nur beim Anfahren der Anlage eingesetzt wird (THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 33)). Die spezifischen Betriebskosten liegen im Bereich von 200 – 300 €/t TS (5 %) und die Investitionskosten ohne Errichtungskosten betragen 5 – 8 Millionen €.

**EcoDry DDS**

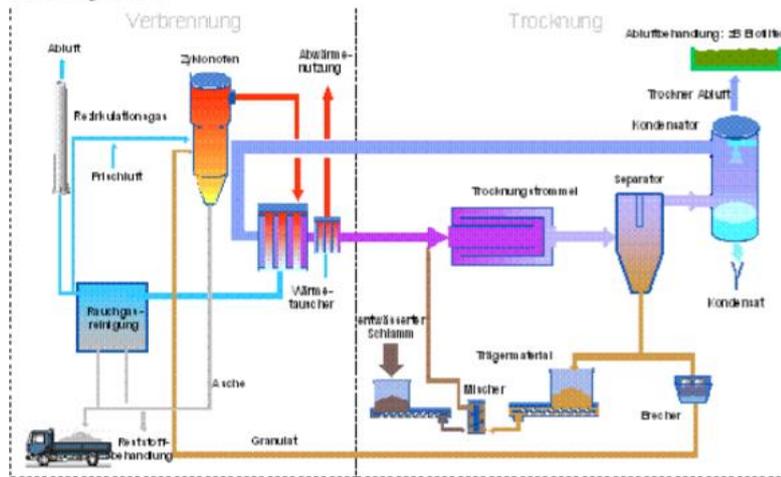


Abbildung 20: Schema des EcoDry-Verfahrens (ANDRITZ AG, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 29)).

**Biocon™-Verfahren**

Das Biocon™-Verfahren realisiert die Klärschlammverbrennung durch Rostfeuerung, in Abbildung 21 dargestellt, mit einer Durchsatzkapazität von 20.000 t/a TS und einer Produktion von elektrischer Energie von 0,35 MW (PLANK, n.v.). Dabei werden 500 kg/h getrockneter Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von 90 % bei 1000 – 1200°C verbrannt.

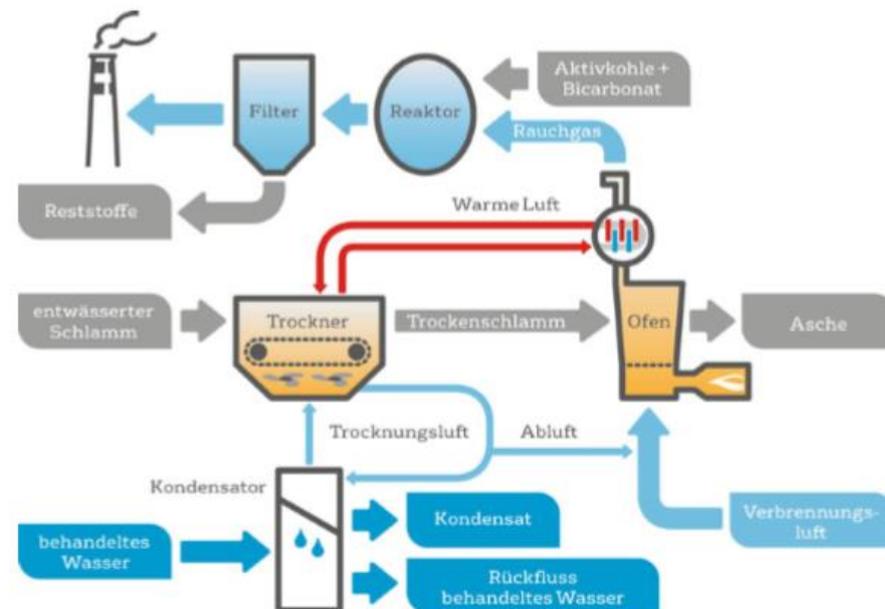


Abbildung 21: Prozessschema der Klärschlammmonoverbrennung BioCon™ Energy Recovery System (NIKODEM, et al., 2018, S. 401).

KALOGEO-Verfahren

Das KALOGEO-Verfahren der Tecon Engineering GmbH, dargestellt in Abbildung 22 und beschrieben nach Kügler et al. (2004, S. 21-28), besteht aus einer vorgeschalteten „kalten“ solaren Trocknung und einem Wirbelschichtofen. Durch die solare Trocknung bei Temperaturen um 55 °C wird der TS-Gehalt des Klärschlammes von 25 – 35 % auf 60 – 65 % erhöht. In den Wintermonaten wird zusätzlich zur Solarenergie Abwärme von der thermischen Anlage für die Trocknung verwendet. Die thermische Verwertung findet im Wirbelschichtofen bei 650 °C statt und eine anschließende Nachbrennkammer mit Temperaturen um die 850 °C sorgt für die vollständige Oxidation aller org. Stoffe des Abgases. Über einen Wärmetauscher im Abgasstrom, betrieben mit Thermoöl, kann elektrischer Strom durch z.B. Organic Rankine Cycle (ORC) produziert oder die gewonnene Wärme für Heizzwecke genutzt werden. Der Abgasstrom wird durch eine trockene Sorption mit Kalkhydrat und Aktivkoks gereinigt und durch Eindüsung von Wasser schnell abgekühlt um das Entstehen von Dioxinen und Furanen zu vermeiden. Die Asche wird über einen Keramikfilter abgeschieden und auf einer Deponie gesondert abgelagert. Die Kosten des Betriebs des Verfahrens belaufen sich auf 143 – 268 €/t TS entwässerten Klärschlamm (28 % TS). Die Investitionskosten der Anlage betragen 900 – 2.300 €/t TS.



Abbildung 22: Kalogeo Anlagenkonzept (TECON ENGINEERING GMBH, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 22)).

Pyrobustor-Anlage von Eisenmann

Die Pyrobustor-Anlage von Eisenmann, dargestellt in Abbildung 23 und beschrieben nach Kügler et al. (2004, S. 50-51), besteht aus einem ausmauerungsfreien Drehrohrföfen in dem Pyrolyse und Verbrennung nacheinander im Zwei-Stufen-Verfahren ablaufen. Der Pyrobustor besteht aus zwei in Trommelform und ineinander drehfest gelagert ausgeführten Kammern, der Pyrobustor-Kammer und der Verbrennungskammer. Beide Kammern sind mit Abzügen für Pyrolyse- und Rauchgas ausgestattet. In einem solchen Pyrobustor kann nur getrockneter Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von min. 90 % eingesetzt werden. Das in der Pyrolysekammer entstehende Pyrolysegas wird in einer Nachbrennkammer vollständig oxidiert und der erzeugte Koks in die Verbrennungskammer transportiert. Die Wärme des Rauchgases, das eine Temperatur von ca. 750 °C hat, deckt den Wärmebedarf des Pyrolyseprozesses. Diese Pyrobustor-Anlage ist besonders gut für mittlere bis kleinere ARA mit einer Durchsatzleistung ab 300 kg/h Trockengranulat (10 % TS) geeignet.

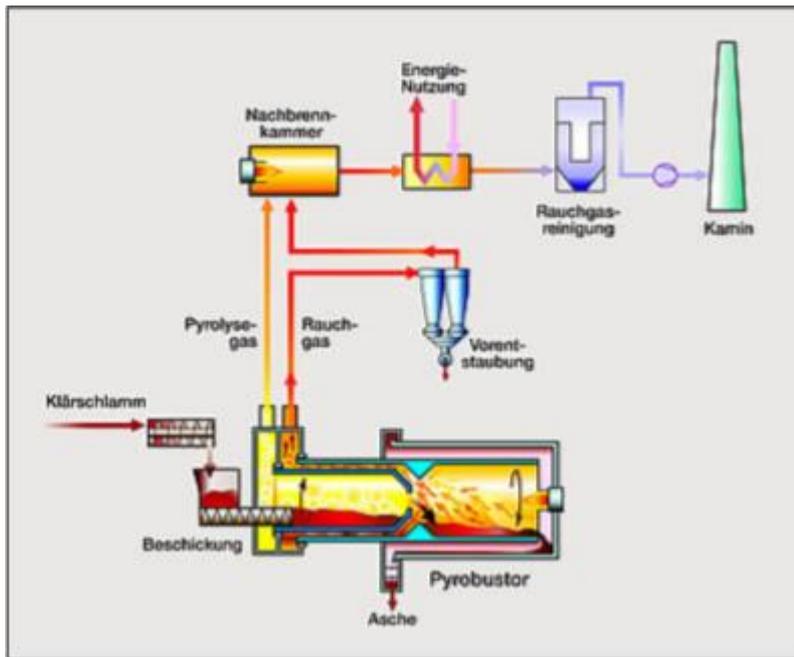


Abbildung 23: Schema der Pyrobustor-Anlage für dezentrale Klärschlammmentsorgung (EISENMANN, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 50)).

#### HD-PAWA-THERM®-Verfahren

Das HD-PAWA-THERM®-Verfahren der UC Prozesstechnik GmbH, dargestellt in Abbildung 24 und beschrieben nach Kügler et al. (2004, S. 43-50), ist ein Verfahren zur thermischen Behandlung von Klärschlamm mittels Pyrolyse. Als Hauptprodukt fällt ein heizwertreiches Schwelgas, das energetisch mittels KWK verwertet werden kann um elektrische Energie zu produzieren, an. Vor der Pyrolyse wird der Klärschlamm in einem Umlauftrockner getrocknet und erreicht einen TS-Gehalt von 90 %. Die für die Trocknung nötige Energie wird mittels Wärmetauscher im Abgasstrom der Pyrolyse und des BHKW gewonnen. Die Pyrolyse findet in einem indirekt durch Erdgas befeuerten Drehrohrföfen bei Temperaturen um ca. 700 °C unter Sauerstoffabschluss statt. Die bei der Pyrolyse entstehenden Reststoffe sind fester Rückstand, Öl und Pyrolysewasser. Der feste Rückstand wird in einen Container überführt und entsorgt. Das Pyrolysegas wird nach einer Gaswäsche und einem nachgeschalteten Schwermetall-Absorber in einem BHKW energetisch verwertet. Das anfallende Washwasser muss auf der ARA behandelt werden und stellt eine Rückbelastung dar. Die mechanische Energie aus der KWK wird zur Stromproduktion verwendet um den Eigenbedarf zu decken und/oder ins Stromnetz eingespeist zu werden. Auch kann bei Vorhandensein geeigneter Abnehmer die Abwärme des Kühlwassers der Gasmotoren genutzt werden. Die Durchsatzleistung beträgt 670 kg/h mit einem TS-Gehalt von 20 % und dabei werden 30 kg/h Heizöl benötigt. Tabelle 20 gibt eine ungefähre Energiebilanz des Verfahrens wieder.

Tabelle 20: Energiebilanz einer HD-PAWA-THERM®-Anlage (UC PROZESSTECHNIK GMBH, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 48)).

Input-Ströme			Output-Ströme		
	[kW]				
			Pyrolyserückstand	20	
Klärschlamm TS=20 %	76	vor Trocknung	Pyrolyseöl	38	
Klärschlamm TS=90%	433	Nach Trocknung	Elektrische Energie	140	
Pyrolysegas, -öl, Wasserdampf	471	Nach Pyrolyse	Kühlwasser	130	
Pyrolysegas	399		Abgas (gesamt)	87	
Heizöl primär	356		Abgas aus BHKW	61	

Die spezifischen Betriebskosten betragen 160 – 320 €/t TS (25%).

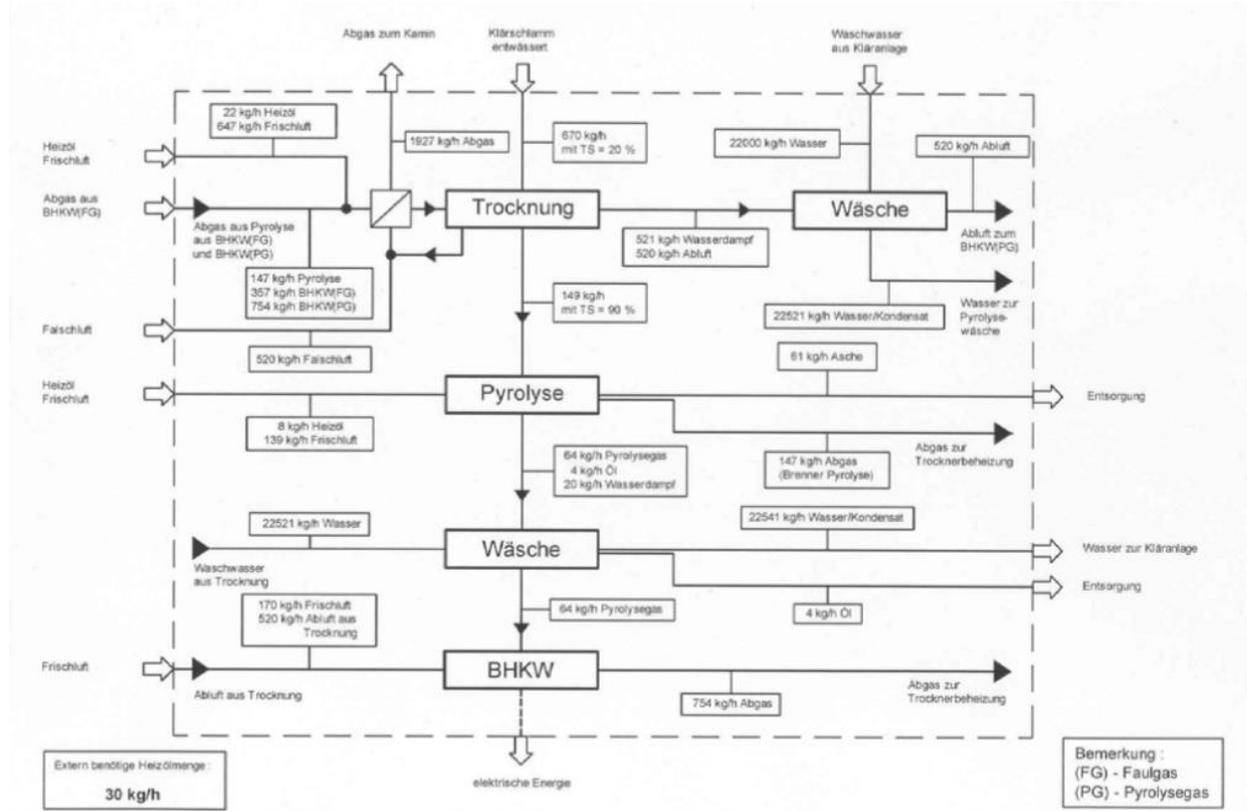


Abbildung 24: Grundfließbild mit Massenbilanz (UC PROZESSTECHNIK GMBH, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 47)).

### Ultrahochtemperatur-Entgasung

Das Ultrahochtemperatur-Entgasungsverfahren der Pyromex AG, beschrieben nach Kügler et al. (2004, S. 35-43), nutzt die sauerstofffreie Entgasung um den Klärschlamm in zwei Fraktionen, ein energiereiches nutzbares Brenngas (Pyrogas) und in eine anorg. Fraktion (Inert-Material), zu trennen. Nach der Vorbehandlung, Entwässerung und Trocknung, durch die der TS-Gehalt auf 80 % erhöht wird, wird der Klärschlamm entgast und dabei über einen Gasmotor elektrische Energie gewonnen. Die Compact-Trocknungsanlage betrieben mit 280 – 300 °C wird durch die Wärmenutzung des Pyrogases beheizt. Der Hochtemperaturreaktor, bestehend aus einer Induktionsspirale aus einer speziellen Metalllegierung, wird mit Induktionsstrom aus Eigenproduktion im Hochtemperaturbereich von 1.200 – 1.700 °C betrieben. Das anfallende mineralische Granulat kann verwertet oder deponiert werden. Die Abgasreinigung einer Hochtemperatur-Entgasungsanlage besteht aus einer alkalischen und sauren Gaswaschanlage, das dabei entstehende Rauchgasreinigungsprodukt muss deponiert werden. Tabelle 21 gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der Stromproduktion durch die Klärschlamm-Entgasung. Durch eine Hochtemperatur-Entgasungsanlage können 10 – 15 t TS/d verarbeitet werden. Die spezifischen Betriebskosten werden mit 200 – 300 €/ t TS (70 – 80 %) angegeben, wenn die Anlage als Dienstleistung durch die Pyromex AG betrieben wird. Die Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage belaufen sich auf 6 – 7 Millionen €.

Tabelle 21: Möglichkeiten der Stromproduktion (PYROMEX AG, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 41)).

Ermittelte Energiewerte Klärschlamm Entgasung	
Verfügbar pro Tonne Klärschlamm	1.035 kWh
Eigenbedarf	345 kWh
Bedarf für Klärschlamm (Bedeutet Öleinsparung von ca. 100 ltr./h)	540 kWh
Vertrieb für Verkauf	150 kWh

### PYREG-Technologie

Das PYREG-Verfahren, schematisch in Abbildung 25 dargestellt, besteht im Wesentlichen aus einer thermischen Vergasung bei Temperaturen von rd. 700 °C und einer flammenlosen Oxidation durch einen FLOX-Brenner und kann auf kleineren dezentralen ARA eingesetzt werden (GERBER, et al., 2010).

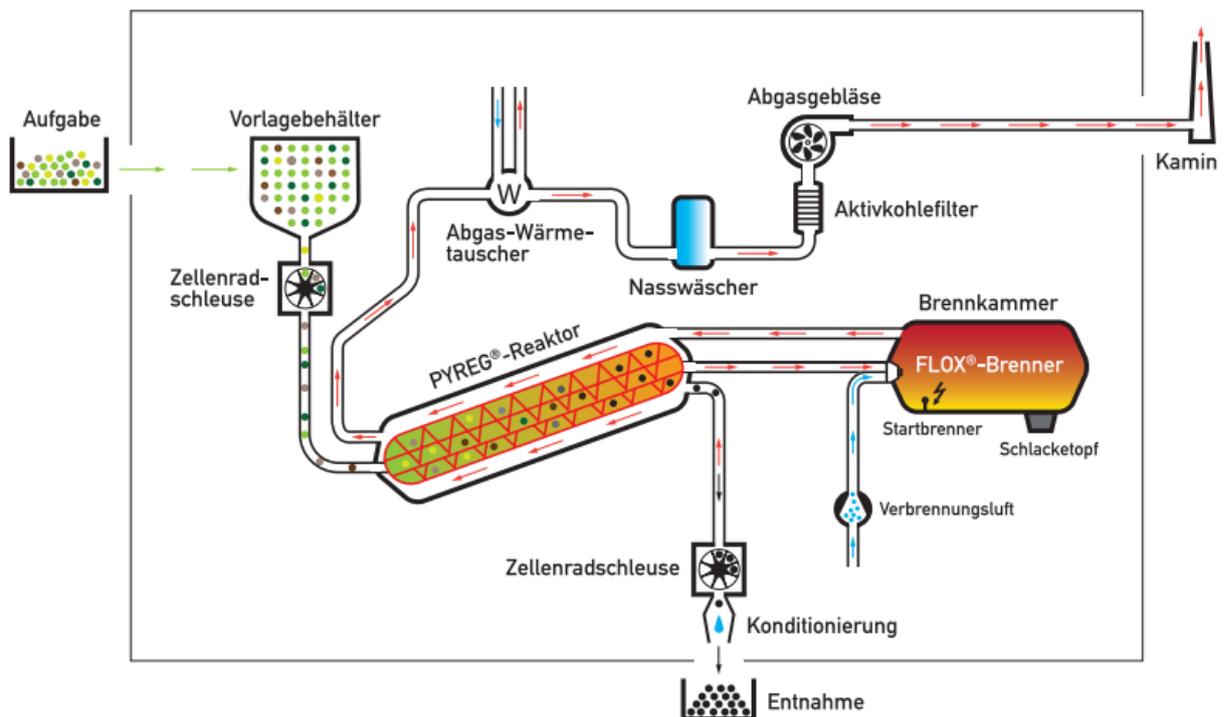


Abbildung 25: PYREG-Verfahren (PYREG®GmbH).

### Hydrothermale Verfahren

Hydrothermale Verfahren zur thermischen Verwertung von Klärschlamm benötigen weniger Energie als andere herkömmliche Verfahren, da für den Betrieb nur Temperaturen von rd. 200 °C und Drücke von 10 – 20 bar nötig sind und da der rohe, nicht verfaulte Klärschlamm nicht getrocknet, sondern nur eingedickt werden muss, wobei heizwertreiche Produkte wie z.B. Bio-Rohöl oder Bio-Kohle-Pellets hergestellt werden können (GWI, 2017).

### Superkritische Nassoxidation

Superkritische Nassoxidation von Klärschlamm hat laut Rulkens (2008, S. 13-14) den Vorteil, dass die toxischen org. Komponenten im Klärschlamm vollständig oxidiert werden, die nötige Reaktorgröße sehr klein ist, sehr einfach Wärme zurückgewonnen werden kann, das anfallende

Abgas sehr einfach zu behandeln ist, der Klärschlamm vor der Behandlung nicht entwässert werden braucht, anorg. Komponenten aus dem anfallenden Abwasser leicht als Aschen abgeschieden werden können, Schwermetalle sowie Phosphor sehr einfach aus der Asche abgeschieden werden können und dass die Kosten im Bereich anderer thermischer Verwertungstechnologien liegen.

Alternative thermische Verfahren

Veolia-Verfahren Athos™

Bei dem „Advanced thermal oxidation system“ Athos™ von der Firma „Veolia Water Solutions & Technologies“, dargestellt in Abbildung 26 und beschrieben nach Nikodem et al. (2018, S. 397-399), wird andgedickter Klärschlamm (7,7 % TS, nicht entwässert) bei Temperaturen von etwa 250 °C und Drücken von 54 bar zu Technosand, biologisch abbaubarem Abwasser und sauberem Abgas verarbeitet.

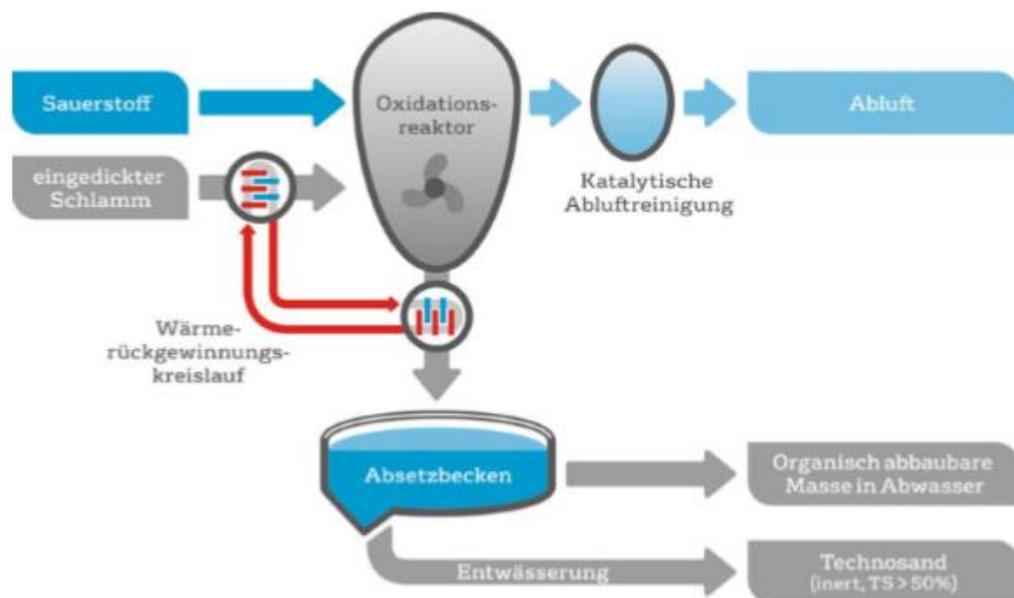


Abbildung 26: Prozessschema der thermischen Oxidation Athos™ (NIKODEM, et al., 2018, S. 398).

Aus dem org. Anteil im Klärschlamm entstehen nach einer Verweilzeit von ca. einer Stunde im Oxidationsreaktor hauptsächlich Fettsäuren und Kohlendioxid. Aus den anorg. Anteilen entstehen mineralische Komplexe, die auch Schwermetalle nachhaltig binden und aus denen nach einer Entwässerung der inerte Technosand produziert wird, der im Straßen- und Kanalbau eingesetzt werden kann. Das anfallende Abwasser weist eine 15%ige CSB-Belastung auf und kann zum Zulauf der ARA rückgeführt werden. Um im Abgas enthaltenes CO und evtl. vorhandene org. Anteile zu eliminieren, wird das Abgas einer weiteren Oxidationsstufe zugeführt, jedoch ist es frei von Staub, Stickoxiden, Schwefeldioxid, Chlorwasserstoff, Dioxinen, Furanen usw. und hat geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen als Verbrennungsprozesse. Das Athos™-Verfahren eignet sich besonders gut für ARA mit Kapazitäten ab 70.000 EW und benötigt keine vorhergehende Entwässerung oder Trocknung des Klärschlammes. Außerdem ist ein chemischer Aufschluss des Technosands zur Phosphorrückgewinnung möglich.

Kosten der Monoverbrennung von Klärschlamm

Die Kosten der Klärschlammmonoverbrennung setzen sich aus den folgenden Faktoren zusammen:

- Finanzierung (Investitionskosten/Betriebskosten)
- Standortsynergien
- Stromkosten vs. Stromerlöse
- Wärmekosten vs. Wärmeerlöse (Fernwärmeauskopplung)
- Ascheverwertung
- Phosphorrückgewinnung
- (Ersatz)Brennstoff

Dabei bewegen sich die Investitionskosten für das Bauwerk und die technische Ausrüstung, in Abhängigkeit der Kapazität, wie in Abbildung 27 ersichtlich, im Bereich von 10 – 40 Mio. €.

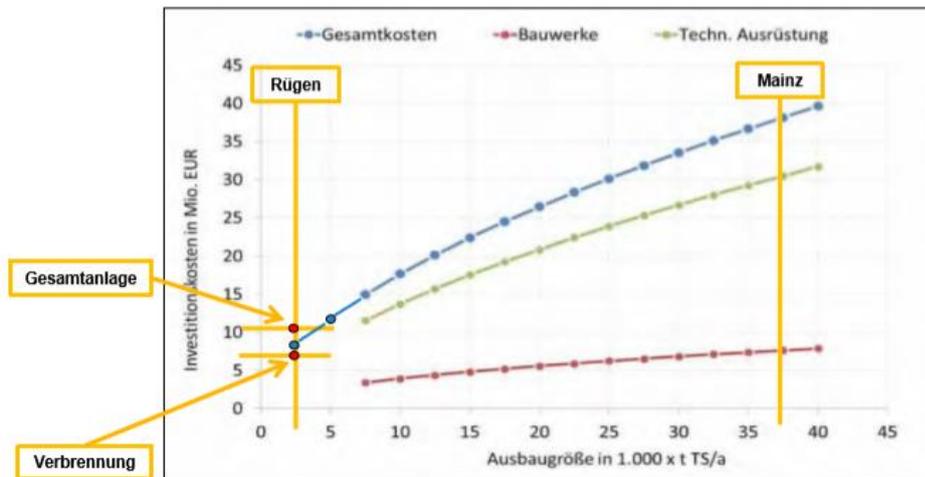


Abbildung 27: Investitionskosten von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen (16. DIALOG ABFALLWIRTSCHAFT, 2014, zit. bei (FRANCK, 2017)).

Werden Monoverbrennungsanlagen verschiedener Ausbaugrößen wie in Abbildung 28 verglichen, so wird ersichtlich, dass vor allem die Kapital-, Personal-, Strom- und Entsorgungskosten den Unterschied ausmachen.

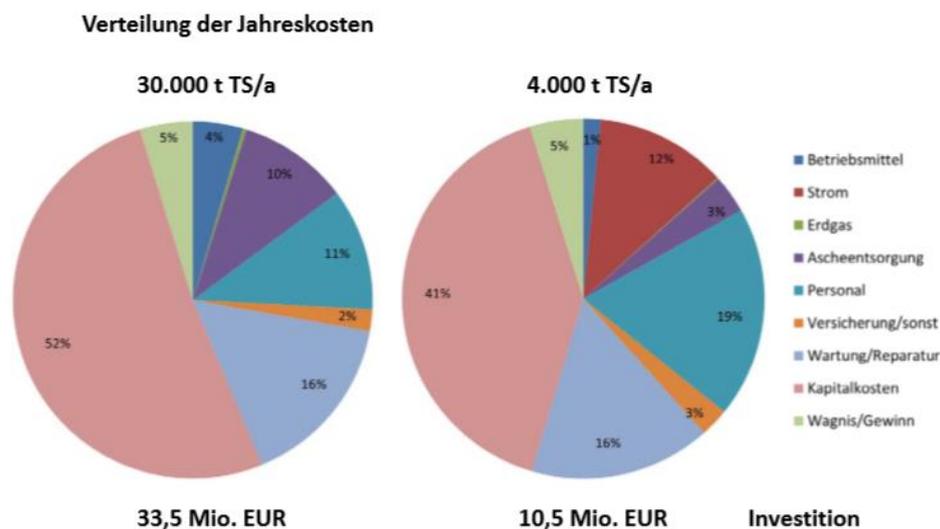


Abbildung 28: Kostenvergleich von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen (GLATZER & FRIEDRICH, 2015).

### 3.2.2 Klärschlamm als Energie- und Ressourcenquelle

Durch die Klärschlammbehandlung (z.B. anaerobe Stabilisierung/Faulung) und/oder die Klärschlammverwertung (thermische Verwertung z.B. Monoverbrennung) lässt sich Energie aus Klärschlamm gewinnen. Dazu wird vor allem der im Klärschlamm org. gebundene Kohlenstoff umgesetzt. Durch Faulung entsteht Methangas, das in weiterer Folge zur Stromproduktion und Wärmeauskoppelung genutzt werden kann (s.a. Unterkapitel 3.1.2). Durch die thermische Verwertung (Verbrennung) von Klärschlamm wird der gebundene Kohlenstoff hauptsächlich zu CO<sub>2</sub> umgesetzt und dabei wird Wärme, die genutzt werden kann, frei. Wie in Unterkapitel 3.1.1 erwähnt, setzt sich Klärschlamm aus unterschiedlichsten Inhaltsstoffen, die durch Klärschlammverwertung genutzt werden sollen, zusammen. Die Rückgewinnung von Nährstoffen, z.B. Phosphor, aus Klärschlamm sollte in Zukunft, da die weltweiten Phosphorvorkommen begrenzt sind, forciert werden (UBA, 2016, S. 104). Die endliche Ressource Phosphor steht deshalb im Vordergrund, jedoch enthält Klärschlamm auch andere Stoffe (Kohlenstoff, Stickstoff, (Erd-Alkali-) Metalle usw.), die evtl. einer Nutzung zugeführt werden sollten. Die energetische und stoffliche Verwertung von Klärschlamm kann dazu beitragen fossile Brennstoffe und endliche Rohstoffe zu ersetzen. Im Bereich des nachhaltigen Phosphorrecyclings aus Klärschlamm und Tiermehl besteht laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 165) Handlungsbedarf. So ergibt sich ein zusätzlicher ökologischer Nutzen, wenn die Verbrennungsrückstände im selben Prozess einer stofflichen Verwertung zugeführt werden (BMNT, 2017, S. 167). Die hohe Importabhängigkeit Österreichs im Bereich fossiler Energieträger machen die Substitution und Einsparung derselben zu wichtigen Themen (BMLFUW & BMWFW, 2015, S. 47-48). Durch den kontinuierlichen Anfall von Klärschlamm kann die Energieversorgung durch energetische Klärschlammverwertung zur Standortsicherheit bezüglich Energie beitragen (ÖWAV, 2016). Dadurch kann die Klärschlambewirtschaftung einen wichtigen Beitrag leisten, denn es heißt *„der sparsame und effiziente Umgang mit natürlichen Ressourcen gilt als eine der Schlüsselstrategien für eine nachhaltige Entwicklung von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft“* (BMLFUW & BMWFW, 2015, S. 9). Dabei ist das Konzept „Ressourcenschonung“, das einen breiten makroökonomischen Ansatz darstellt, durch den die gesamte Volkswirtschaft betrachtet wird und dabei Maßnahmen zur Realisierung der Nachhaltigkeitsziele (SDG) aufzeigt, von großer Bedeutung (ÖWAV, 2016). Ein wichtiges Etappenziel der Ressourcenschonung, das es zu erreichen gilt, ist die Entkoppelung des ökonomischen Wachstums von fossilen Brennstoffen (RAM, et al., 2017, S. 1). Ein genauso wichtiges Konzept für ein umweltschonendes Wirtschaften stellt die Material- oder Ressourceneffizienz dar, vor allem auf betrieblicher Ebene (ÖWAV, 2016). In Österreich kann im Jahr 2012 mit dem Verbrauch einer Tonne Material ein Wert von 1.454 € erwirtschaftet werden, was unter dem europäischen Durchschnitt von 1.730€/t liegt (BMLFUW & BMWFW, 2015, S. 58-59). Dennoch ist bei diesem Ansatz zu beachten, dass erhöhte Ressourceneffizienz, wenn auch für die gesamte Volkswirtschaft betrachtet, nicht zwangsläufig zu erhöhter Ressourcenschonung führt (ÖWAV, 2016). Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft gilt es die stoffliche sowie die energetische Nutzung von schon verwendeten Ressourcen wie z.B. Klärschlamm zu forcieren. Dabei soll der Fokus auch auf die Nutzung von Abwärme, durch industrielle Anlagen (z.B. Verbrennungsanlagen) erzeugt, gelegt werden (BMLFUW & BMWFW, 2015, S. 58).

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf wichtige Anknüpfungspunkte der Klärschlammverwertung zur Nutzung des energetischen und Ressourcen bezogenen Potenzials, das der Klärschlamm darstellt, eingegangen.

### 3.2.2.1 Energiegewinnung

Die Klärschlammverwertung zur Energiegewinnung wird dann energieeffizient sein, wenn die Verwertung einer umfassenden Lebenszyklusbetrachtung (LCA) unterzogen wird und nur dann zum Einsatz kommt, wenn sie eine positive Energiebilanz aufweist (ÖWAV, 2016). Nach Lombardi et al. (2017, S. 365) schneidet die Verbrennung im Vergleich mit anderen Methoden der Klärschlammverwertung sehr gut ab, vor allem im Bereich der ökologischen Auswirkungen. Jedoch ist der Beitrag zur Erderwärmung unter Umständen nicht vernachlässigbar, vor allem wenn als Stützfeuerung fossile Brennstoffe eingesetzt werden müssen (LOMBARDI, et al., 2017, S. 373). Die Rückgewinnung von elektrischer und thermischer Energie sowie von Rohstoffen aus der Asche trägt wesentlich zur Verbesserung der Umweltauswirkungen des Prozesses bei (LOMBARDI, et al., 2017, S. 375). Eine umfassende Lebenszyklusbetrachtung bedeutet auch, dass eine integrale Betrachtung der Klärschlammprozesskette angestellt werden soll, um die dabei nötige und freiwerdende Energie bilanzieren zu können sowie sinnvolle Ansatzpunkte zur Verbesserung aufzeigen zu können. Detailliertere Informationen und Ausführungen dazu finden sich im Unterkapitel 5.1. Bei der Umsetzung des Abfalls Klärschlamm von einer Schadstoffsenke zu einer Energiequelle ist wichtig zu beachten in welcher Qualität schlussendlich die Energie bereitgestellt wird. Für die Optimierung von kommunalen Energieversorgungs- und Energieabnahmesystemen ist eine Untersuchung des gesamten kommunalen Energiesystems, einschließlich der ARA und möglicher Klärschlammverwertung, bezüglich seines exergetischen Zustands von großer Bedeutung (HERTLE, et al., 2016, S. 37). Ziel dieser exergetischen Untersuchung sollte es sein die Energiequalität der Versorgung an die Energiequalität des tatsächlichen Bedarfs, z.B. Niedertemperatur-Wärme, anzupassen um unnötige Verlust zu vermeiden (HERTLE, et al., 2016, S. 44). Heute werden in der Energieversorgung häufig Energieträger von sehr hoher Energiequalität eingesetzt um auch den Energiebedarf von niedriger Energiequalität zu decken, hieraus ergeben sich erhebliche Optimierungspotenziale (HERTLE, et al., 2016, S. 44-45). Mit exergetischen Untersuchungen können nicht nur Energie-Rohstoffe, z.B. heizwertreiche Produkte aus der Klärschlammverwertung, sondern auch stoffliche Rohstoffe berücksichtigt werden, was Aussagen über die umfassende Ressourceneffizienz der Wirtschaft, sowie Klärschlammverwertung als Teil davon, zulässt (HERTLE, et al., 2016, S. 47). Im Allgemeinen können nach Stoeglehner et al. (2016, S. 3) drei Qualitätsstufen von Energie unterschieden werden:

1. hoch-qualitative Energie (elektrische und mechanische Energie sowie hoch-temperatur Wärme über 100 °C)
2. mittel-qualitative Energie (mittel-temperatur Raum-Wärme oder Prozess-Wärme von 50 – 100 °C)
3. niedrig-qualitative Energie (Umgebungs-Wärme, Raum-Wärme und Prozess-Wärme unter 50 °C)

Da nach dem ersten thermodynamischen Gesetz Energie weder geschaffen noch zerstört werden kann, sind alle Prozesse der sog. Energieproduktion und -konsumtion eigentlich nur Umwandlungsprozesse von einer Energieform in eine andere, wobei zu beachten ist, dass die Umwandlung von hoch-qualitativer Energie in Energie mit niedrigerer Qualität und die Speicherung von Energie in Form von hoch-qualitativer chemischer Energie nahezu verlustlos geschehen kann (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 3 ff.). Bei einem jährlichen Anfall von rd. 260.000 t TS Klärschlamm in Österreich ergibt sich ein maximal mögliches Energiepotenzial von 4,4 PJ/a, wobei davon ca. 50 % über die Gewinnung von Faulgas genutzt werden (ÖWAV, 2014, S. 5). Ungenutzte Energiepotentiale wie z.B. Abwärme, die durch Verbrennung von Klärschlamm entsteht, sollen mit Hilfe einer aktiven Energieraumplanung erschlossen und über

Lenkungsmaßnahmen nutzbar gemacht werden (UBA, 2016, S. 44-45). Solche Lenkungsmaßnahmen können Genehmigungskriterien wie z.B. verbindliche und effiziente Abwärmenutzung für Industrie- und Abfallverbrennungsanlagen sein (UBA, 2016, S. 54). Die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan soll in Zukunft, durch eine Anpassung des Ökostromgesetzes, attraktiver werden (UBA, 2016, S. 238). Dies kann für ARA eine Zukunftschance sein, da sie Biogas erzeugen und für die regionale Nutzung von Strom, Wärme oder Biomethan zur Verfügung stellen können (UBA, 2016, S. 238). Neben der Netzeinspeisung von durch thermische Verwertung des Klärschlammes gewonnenes SYNGAS (Methan, Wasserstoff) ist auch die Verwendung für den Betrieb von Fahrzeugen ein mögliches Einsatzgebiet (GWI, 2017). Da die Verwendung von Biomasse zur Energiegewinnung oftmals in Konkurrenz zur Verwendung in der landwirtschaftlichen Produktion steht (BMLFUW & BMWFW, 2015, S. 46), ergibt sich ein Potenzial für die Verwendung von Klärschlamm zur Energiegewinnung, da dieser nicht vordergründig in Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Produktion steht. Klärschlammverbrennung sollte zukünftig nur noch in Monoverbrennungsanlagen vorgenommen werden (UBA, 2016, S. 237). Die dabei anfallenden Klärschlammaschen sind für eine landwirtschaftliche Nutzung aufzubereiten. Sollte die Aufbereitung für die landwirtschaftliche Nutzung nicht wirtschaftlich sein, so ist für eine getrennte und unvermischte Lagerung der Aschen zu sorgen, um sie bei Bedarf einer Aufbereitung zuführen zu können (UBA, 2016, S. 237). Durch die Klärschlammverbrennung wird über die Abgase Wärme frei, die durch Wärmetauscher zur Dampferzeugung und dessen Umwandlung zu elektrischem Strom, der Erzeugung von Heißwasser oder allgemein in KWK genutzt werden kann (GLEIS, 2018, S. 632). In Zukunft wird die Energieversorgung durch thermische Kraftwerke, aufgrund ihres geringen Wirkungsgrades, reduziert werden (RAM, et al., 2017, S. 76), was für die Versorgung mit Fernwärme durch ARA einen Vorteil bedeuten kann, da der Bedarf und die Abnahmesicherheit an Wärme steigen wird.

### Klärschlammverwertung als integraler Teil der Energiestrategie Österreich

Die Energie- und Klimastrategie Österreichs soll aus einem Zielquartett der Energiepolitik bestehen, welches vordergründig die Ziele Nachhaltigkeit, Versorgungssicherheit, Wettbewerbsfähigkeit und Leistbarkeit umfasst (BMWFW & BMLFUW, 2016, S. 4). Großes Potenzial liegt im Bereich Bioenergie, welche in verschiedenen Formen und unterschiedlichen Temperaturbereichen zur zukünftigen Energieversorgung beitragen kann, z.B. als Netz-Einspeisung von Biogas und Bio-Methan (BMWFW & BMLFUW, 2010, S. 49) Im Gebäudebereich besteht eine hohe Nachfrage nach Niedertemperaturwärme, welche bis 2020 zu großen Teilen durch erneuerbare Energieträger gedeckt werden soll (BMWFW & BMLFUW, 2010, S. 57). Der Nutzung von Abwärme und dem Einsatz von effizienten Technologien zur KWK wird im Bereich der Energiebereitstellung von Raumwärme hohe Priorität eingeräumt (BMWFW & BMLFUW, 2010, S. 80). Im Dienstleistungssektor und im Bereich der privaten Haushalte machen Raumwärme/Klimatisierung und Prozesswärme/Warmwasser über 80 % des Endenergieverbrauchs aus (BMWFW & BMLFUW, 2016, S. 19).

### Räumlich-energetische Aspekte mit Bezug auf Klärschlammverwertung

Die oft unterschiedliche räumliche Verteilung von Energiequellen und Energiesenken stellt die Versorgung und Verteilung mit/von Energie, wie z.B. den Transport von Energieträgern, vor logistische Probleme. Diese können für die verschiedenen Energieformen mit unterschiedlichen Kosten, Verlusten und verschiedenartigem Bedarf an Infrastruktur gelöst werden, wobei die Umstellung des Energiesystems von fossilen und nuklearen auf erneuerbare Energiequellen für das vorhandene logistische Energie-Versorgungs-System nach Stoeglehner et al. (2016, S. 4)

„dramatische Auswirkungen“ haben wird. Um die Organisation der Energieversorgung der Zukunft optimieren zu können, ist es sehr wichtig bei der Planung von Energiegewinnungs-, Energieverteilungs- und Energiespeicherungsanlagen die Bedarfsfrage zu berücksichtigen (STÖGLEHNER, et al., 2014, S. 4). Die hohe Funktionsmischung in und eine angemessene Dichte von kompakten Siedlungsstrukturen begünstigt, bei gegebener Energieversorgungstechnologie, die effiziente Nutzung jeglicher Form von leitungsgebundener Energieversorgung (STÖGLEHNER, et al., 2014, S. 5/9), durch kürzere Transportstrecken und –zeiten (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 5) sowie durch Etablierung von Energie-Kaskaden für z.B. thermische Energie (AYRES et al., 1998, zit. bei (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 17 ff.)). Stöglehner et al. (2014, S. 11-12) halten fest *„räumliche Analysen gefordert, die eine realistische Einschätzung von Potenzialen für erneuerbare Energieversorgung unter Berücksichtigung lokaler und regionaler Einsparpotenziale, Gegebenheiten und räumlicher Bedingungen erlauben.“* Ein Grund für die Ineffizienz von Energieversorgungs- und –verteilungssystemen ist, dass diese zu wenig in die räumlichen Gegebenheiten eingebunden sind und werden, wie z.B. die nicht Nutzung von Abwärme aus Kraftwerken, deshalb sollen alle verfügbaren Energieressourcen, unter Berücksichtigung der Ressourcenkette, optimal genutzt werden, da der Konkurrenzkampf um die grundlegende Ressource „Land“ erbittert geführt wird (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 68). Um strukturelle Energieeffizienz erreichen zu können sollte möglichst viel Abwärme genutzt werden, dazu ist eine Erhebung der ungenutzten Energiequellen wie z.B. abwassertechnischer Infrastruktur und der Energieverbraucher sowie deren räumliche Verteilung notwendig (STÖGLEHNER, et al., 2014, S. 28). Ein sehr wichtiger Punkt in der Energieraumplanung ist die *„Erhebung und Darstellung der regionalen Ressourcenpotenziale aufgrund detaillierter räumlicher Analysen;“* (STÖGLEHNER, et al., 2014, S. 32). Die Bestimmung des möglichen Deckungsbeitrages von lokalen verfügbaren, erneuerbaren Energieträgern ist für die Nutzung von bestehenden oder zukünftigen Abwärmequellen von maßgebender Bedeutung (STÖGLEHNER, et al., 2014, S. 35). Die Kartierung von Energiezonen ist ein unterstützendes Instrument für Entscheidungen in der integrierten Raum- und Energieplanung, das hilft den räumlich verteilten, gegenwärtigen und zukünftigen Bedarf an Wärme zu analysieren und herauszufinden ob, von einem wirtschaftlichen Standpunkt aus gesehen, die zu untersuchenden Energiezonen mit netzgebundener Wärmeversorgung abgedeckt werden können (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 104 ff.).

### Kläranlagen als regionale Energiezellen

In naher Zukunft sollen die derzeitigen Netzsysteme zur Energieversorgung optimiert und zu sogenannten „Smart Grids“ ausgebaut werden. Dabei ist die Einbindung der Infrastruktur, wie z.B. vorhandene Netzsysteme sowie Versorgungs- und Entsorgungsunternehmen (ARA), in das Gesamtenergiesystem von zentraler Bedeutung (ÖWAV, 2018). Auch dezentrale Energiemanagementsysteme können dezentrale Informationen vor Ort berücksichtigen, durch Maximierung des Energieeigenverbrauchs die Nutzung der Energienetze und die damit verbundenen Verluste verringern und Verknappung im Energie-Gesamtsystem in der dezentralen Optimierung abbilden (BAUKNECHT, et al., 2017, S. 15-16). Für die nachhaltige Integration von erneuerbaren Energiequellen in bestehende Energieversorgungssysteme wird in Zukunft die Speicherung von Energie, wie z.B. in Groß-Batterien entscheidend sein. Wobei unter Batterien nicht nur herkömmliche Speichermedien zu verstehen sind, sondern auch Technologien wie Power-to-X (X=Gas/Wärme/Mobilität/Flüssigkeit) oder Elektrolyse (SYNGAS-Produktion) sowie auch Gasspeicher, die Energie speichern und/oder transformieren um dieselbe an unterschiedlichen Orten und Zeiten zu nutzen (RAM, et al., 2017, S. 3,8,12,15,73). Knotenpunkte von Energieverteilungsnetzen, mit Potential zur Energieumwandlung (z.B. Power-to-X) und zum

Transfer von Energieverlusten in nutzbare Energie, sollten mit Anlagen zur Umwandlung von Energie, wie z.B. Wärme-Kraft-Kopplung(WKK)- oder KWK-Technologien, versehen werden um energieintensive Industrie, in diesen räumlichen Bereichen, zu versorgen (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 70). In Zukunft wird Elektrizität die wichtigste Energieform sein, daher sollen ARA unter anderem als Speicherzellen (Thermische-Energie-Speicher, Gasspeicher) in regionale Energieversorgungssysteme integriert werden und können dabei, zusammengefasst in der Branche „Energieproduktion aus Biomasse und Abfall“ zur Schaffung von bis zu 5 Millionen Arbeitsplätzen bis 2020 und darüber hinaus beitragen (RAM, et al., 2017, S. 3,8,12,15,78). Die Energiewende erfordert es dezentral produzierten Strom durch moderne Speichermedien und verlustarme Transportmedien einer bedarfsabhängigen Nutzung zuzuführen, die z.B. auf ARA durch Power-to-Gas Technologien erfolgen kann (ÖWAV, 2018). Hybride Energieversorgungssysteme wie z.B. WKK-Anlagen, die Wärme und Elektrizität durch Verwertung von heizwertreichen Zwischenprodukten (z.B. Biogas und SYNGAS) aus der Bioraffinerie (z.B. ARA) generieren und somit unterschiedliche Verteilungsnetze verlinken, können, wenn sie an die Größenordnung des regionalen Wärmebedarfs angepasst und Teil eines Smart-Grid sind, einen Beitrag zur Deckung des wechselnden Bedarfs an unterschiedlichen Energieformen und zur Stabilisierung des Elektrizitätsnetzes leisten (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 24 ff.). Auch kann durch solche hybride WKK-Systeme ein evtl. vorhandener Überschuss an elektrischer Energie im Versorgungsnetz in Wärme umgewandelt und gespeichert werden, wobei über 90 % der Kosten, die für die Speicherung von elektrischer Energie aufgebracht werden müssten, eingespart werden können (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 25). Der Sektor Waste-to-Energy wird von 8 GW Leistung in 2015 auf 20 GW in 2050 anwachsen (RAM, et al., 2017, S. 111). Unter bestimmten Konditionen können ARA den Bedarf an elektrischer Energie durch Eigenproduktion decken. Dabei können verschiedenste Technologien zur Produktion elektrischer Energie wie z.B. Wasserkraftanlagen im Auslauf der ARA, Windkraftanlagen auf dem Gelände der ARA, Photovoltaikanlagen und Solarthermieanlagen auf der ARA (z.B. Dachflächen), die unabhängig von der Art der Klärschlammverwertung sind und Technologien während der Klärschlammverwertung wie z.B. die Verstromung von Biogas, das durch anaerobe Fermentation gewonnen wird, eingesetzt werden (KRETSCHMER, et al., 2016). Der Bedarf einer ARA an thermischer Energie lässt sich leicht durch Eigenproduktion decken (KRETSCHMER, et al., 2016). So könnte die durch Klärschlammmonoverbrennung gewonnene überschüssige thermische Energie, sofern sie nicht intern genutzt wird, umgewandelt werden in elektrische Energie (für Eigenverbrauch oder Netzeinspeisung) und/oder in chemische Energie (Speicherung z.B. Herstellen von heizwertreichen Produkten oder durch Wasserstoffproduktion) oder aber abgegeben werden an „Wärmekonsumenten“ (Industrie, Haushalte und/oder Energieversorger). Thermische Energie kann durch Wärme-Kaskaden auf unterschiedliche Konsumenten, mit unterschiedlichem Bedarf an Wärme (z.B. Temperaturniveau) verteilt werden und dabei können sogenannte kombinierte WKK-Anlagen, z.B. Klärschlammmonoverbrennungsanlagen, zur Wärmeversorgung von Siedlungsgebieten herangezogen werden (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 18).

### **3.2.2.2 Ressourcenrückgewinnung**

Als potenzielle Ressourcen, die im Klärschlamm enthalten sind, werden die Nährstoffe Stickstoff, Phosphor, Schwefel und Calcium, wobei aus Sicht der Pflanzenernährung auch essenzielle Spurenelemente wie Chrom, Kupfer, Nickel und Zink erwähnt werden sollen, sowie der Energiegehalt angesehen (ÖWAV, 2014, S. 3 und 5). Nährstoffe, die im Klärschlamm oder z.B. auch in Tiermehl enthalten sind, sollen vorrangig in der Landwirtschaft zur Anwendung kommen,

insofern die Umweltverträglichkeit gegeben ist (UBA, 2016, S. 237). Um nachhaltige Sekundärressourcen aus dem Klärschlamm zu gewinnen sind Qualitätssicherungs-Systeme notwendig, die die hohe Qualität von Recyclingmaterial bzw. von den Sekundärrohstoffen (qualitativ gleich- oder höherwertig im Vergleich zu Primärrohstoffen) garantieren und dafür sorgen, dass die anfallenden Schadstoffe durch geeignete Behandlungsverfahren sicheren Senken zugeführt werden (ÖWAV, 2016). Wichtige Voraussetzungen für die Ressourcengewinnung aus Klärschlamm sind das Vorhandensein gewisser Grundmengen, die Homogenität des Abfalls und die qualitative Verwertungsmöglichkeit, wobei die Existenz eines Marktes für die gewonnenen Sekundärrohstoffe oder –produkte eine Grundbedingung darstellt (ÖWAV, 2016). Einige Inhaltsstoffe des Klärschlammes sollten wegen ihrer geringen Konzentration bzw. Menge in einer europaweiten Behandlungsstruktur für Produkte oder Abfälle, wie z.B. kritische Metalle (große wirtschaftliche Bedeutung und hohes Versorgungsrisiko), erfasst und wirtschaftlich verwertet werden (ÖWAV, 2016). Als Vorteil für die Herstellung von Sekundärressourcen und –produkten aus Klärschlamm, die als Düngemittel zum Einsatz kommen sollen, kann die relativ geringe Konzentration an Cadmium im Klärschlamm angesehen werden, da in der konventionellen Düngemittelproduktion in Zukunft vor allem Cadmium als begrenzender Parameter hervortreten wird (GWI, 2017).

### Kläranlagen als Rohstoffminen des 21. Jh.

Um die Schließung von Nährstoffkreisläufen voranzutreiben soll die Abwasserwirtschaft Verfahren zur Nährstoffrückgewinnung implementieren und dabei kann das Konzept des „Ressourcenmappings“ hilfreich sein (ÖWAV, 2018). Neben der Nährstoffrückgewinnung wird vor allem die dezentrale Energieversorgung, durch z.B. Mikro-Biogasnetze, Wasserstoffproduktion, biochemischer Stromerzeugung, Groß- und Biobatterien, für ARA eine wichtige Rolle spielen, wobei die ARA als „Smart-Waste-Factory“ und somit als „First-of-circle“ eingesetzt wird, die die Aufbereitung bzw. Verwertung der Ressourcen (Nährstoffe und Energie) an die aktuelle Nachfrage anpassen kann (ÖWAV, 2018). Im Klärschlamm sind nicht nur wichtige Pflanzennährstoffe enthalten sondern auch viele Metalle, die für die Wirtschaft sehr wichtig sind sowie in Hinsicht auf die Versorgungssicherheit als zum Teil sehr kritisch eingestuft werden und deshalb als potenzielle Sekundärressourcen betrachtet werden können (ANGERER et al. , 2009 zit. bei (DEHOUST, et al., 2016, S. 18)).

### Kaskadennutzung

Wird Klärschlamm als Biomasse in kaskadischer Nutzung angesehen so bedeutet dies im Allgemeinen, dass eine stoffliche Nutzung des Klärschlammes, z.B. Vererdung oder Phosphorrückgewinnung vor einer energetischen Nutzung, wie z.B. Biogas-Produktion oder Verbrennung stehen sollte (FEHRENBACH, et al., 2017, S. 19). In nachfolgender Abbildung 29 wird versucht eine mögliche kaskadische Nutzung des Klärschlammes darzustellen. In grau hinterlegte Felder sollen verfahrenstechnische Prozessschritte darstellen durch die Ausgangsprodukte, Zwischenprodukte und Endprodukte generiert werden. Hellgrün hinterlegte Felder stellen bio-basierte-Produkte wie z.B. Klärschlamm als Dünger oder aus Klärschlamm gewonnener Stickstoff oder Phosphordüngemittel dar. In Gelb werden die Felder hinterlegt mit denen die Abnehmer, also Konsumenten von den möglichen während der Kaskade anfallenden Produkten repräsentiert werden. Am Ende der Kaskade, ganz rechts in der Abbildung, steht die energetische Verwertung, wobei jedoch zu beachten ist, dass auch diese Stufe nicht die letzte sein muss, denn anschließende Ressourcenrückgewinnung aus den Verbrennungsrückständen, der Asche, soll ja laut BAWP 2017 in Zukunft vermehrt stattfinden (BMNT, 2017, S. 260).



Abbildung 29: Kaskadennutzung von Biomasse nach Fehrenbach et al. (2017, S. 28) (Eigene Darstellung).

Abbildung 29 soll natürlich nur eine schematische Darstellung sein, die mögliche Ansatzpunkte und Verfahrenswege aufzeigt und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

### Ressource Phosphor

Das Ausbringen von Düngemitteln ist neben anderen landwirtschaftlichen Intensivierungsmaßnahmen ein Grund für die Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion in Österreich, wodurch z.B. der Getreideertrag seit 1960 um den Faktor 2,3 angestiegen ist (BMLFUW & BMFW, 2015, S. 45). Dabei lässt sich aber auch die Effizienzsteigerung in der landwirtschaftlichen Produktion selbst gut beobachten, denn seit den 1970ern ist eine stetige Abnahme des Düngemittelverbrauchs bei gleichzeitiger Getreideertragsteigerung feststellbar (BMLFUW & BMFW, 2015, S. 45). Nicht nur in der Landwirtschaft wird Phosphor eingesetzt. 10 % der in Europa verwendeten Gesamtmenge an Phosphat, wird nicht in der Landwirtschaft verwertet und stellt somit eine potenziell substituierbare Menge dar (MONTAG, et al., 2015, S. 45), die auch durch die Extraktion von Phosphor aus Klärschlamm ersetzt werden kann. Nicht nur Klärschlamm ist in Bezug auf die Ressource Phosphor von Bedeutung, sondern auch andere Abfallarten wie z.B. Tiermehl, die u.U. bei der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung mit verwertet werden könnten. Nach dem BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 79) werden 2015 rund 90.800 t Tiermehl erzeugt, wovon knapp 66 % aus Österreich exportiert, 13 % technisch verwendet, 8 % thermisch verwertet, 10 % in der Landwirtschaft eingesetzt und 3 % als Futtermittel/Petfood verwendet werden.

### Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

Grundsätzlich können nach Kabbe und Kraus (2018, S. 696) drei Arten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm unterschieden werden. Zum einen die traditionelle direkte Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft, die jedoch, wie in Unterkapitel 3.1.3 erwähnt, in Zukunft immer weiter abnehmen wird. Im Weiteren die Phosphorrückgewinnung aus der wässrigen Phase, also dem Abwasser oder wässrigem Klärschlamm (Rohschlamm, Faulschlamm u.dgl.). Sowie die Phosphorrückgewinnung aus der Festphase, wie z.B.

entwässertem, getrocknetem Klärschlamm und aus Klärschlammaschen. In nachfolgender Abbildung 30 wird das Potenzial der Phosphorrückgewinnung bezogen auf den ARA-Zulauf und den zwei möglichen Strategien, wässrige oder feste Klärschlammphase, entsprechend dargestellt. Darüber hinaus wird das Potenzial einzelner Technologien zur Phosphorrückgewinnung ersichtlich.

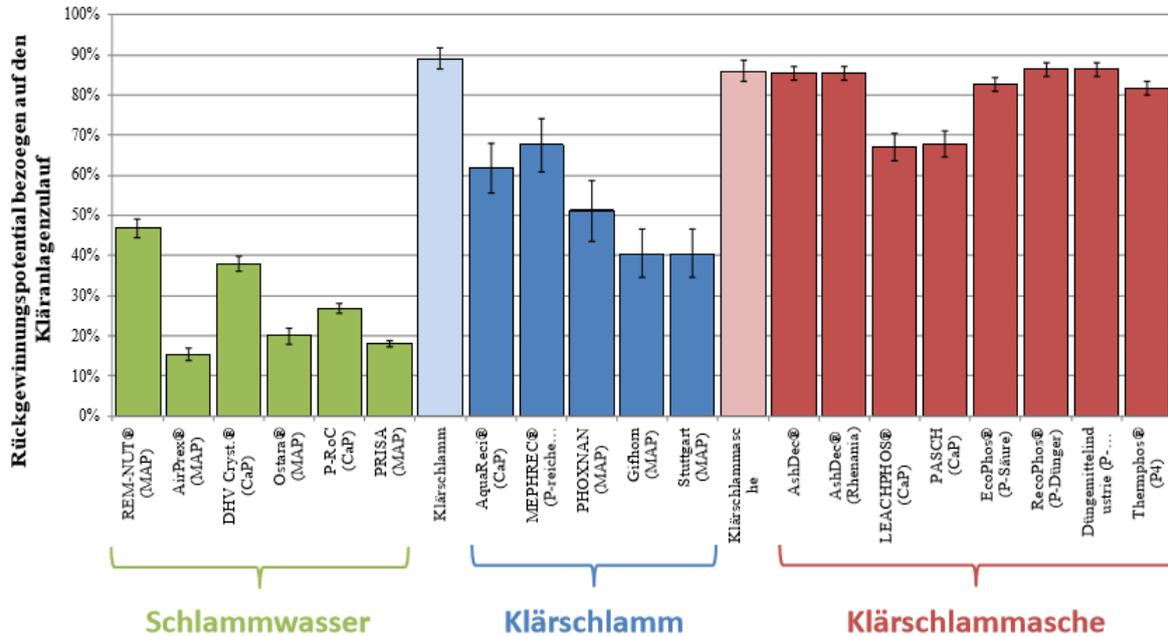


Abbildung 30: Phosphorrückgewinnungspotenzial (AMANN, et al., 2017).

Das entscheidende Kriterium für eine effiziente Phosphorrückgewinnung stellt die Pflanzenverfügbarkeit des Endprodukts, des Phosphordüngers, dar (MONTAG, et al., 2015, S. 27). Daneben sind natürlich auch die Kosten des jeweiligen Verfahrens ein wichtiges Kriterium für den wirtschaftlichen Betrieb und die Realisierung eines Projekts zur Phosphorrückgewinnung. Abbildung 31 zeigt mit welchen einwohnerspezifischen und phosphorspezifischen Kosten bei der Phosphorrückgewinnung zu rechnen ist.

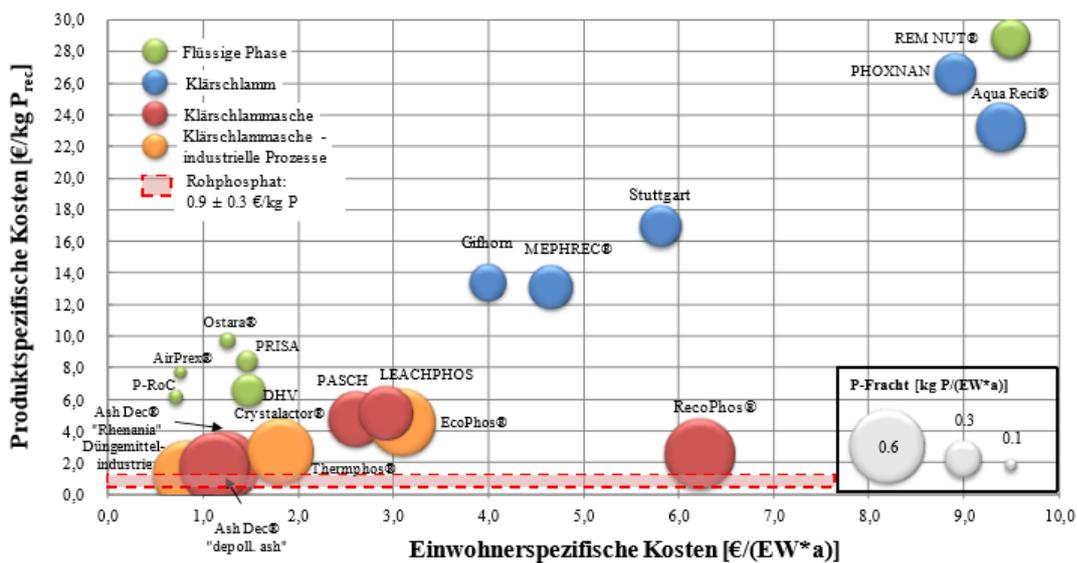


Abbildung 31: Kosten der Phosphorrückgewinnung 1 – 5 €/EW\*a (AMANN, et al., 2017).

Aus Abbildung 31 wird ersichtlich, dass Verfahren die Klärschlammaschen verwerten durchaus wirtschaftlich betrieben werden können und im Vergleich zu Verfahren, die Phosphor aus der wässrigen Phase rückgewinnen, ein deutlich größeres Rückgewinnungspotenzial aufweisen. Als Nachteil der Verfahren die Klärschlammaschen verwerten kann angeführt werden, dass großtechnische Anlagen derzeit nicht oder in nur sehr geringem Ausmaß bestehen oder betrieben werden. Aus nachfolgender Abbildung 32 wird auch ersichtlich, dass die meisten großtechnisch betriebenen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung die wässrige Phase des Abwassers/Klärschlammes nutzen.

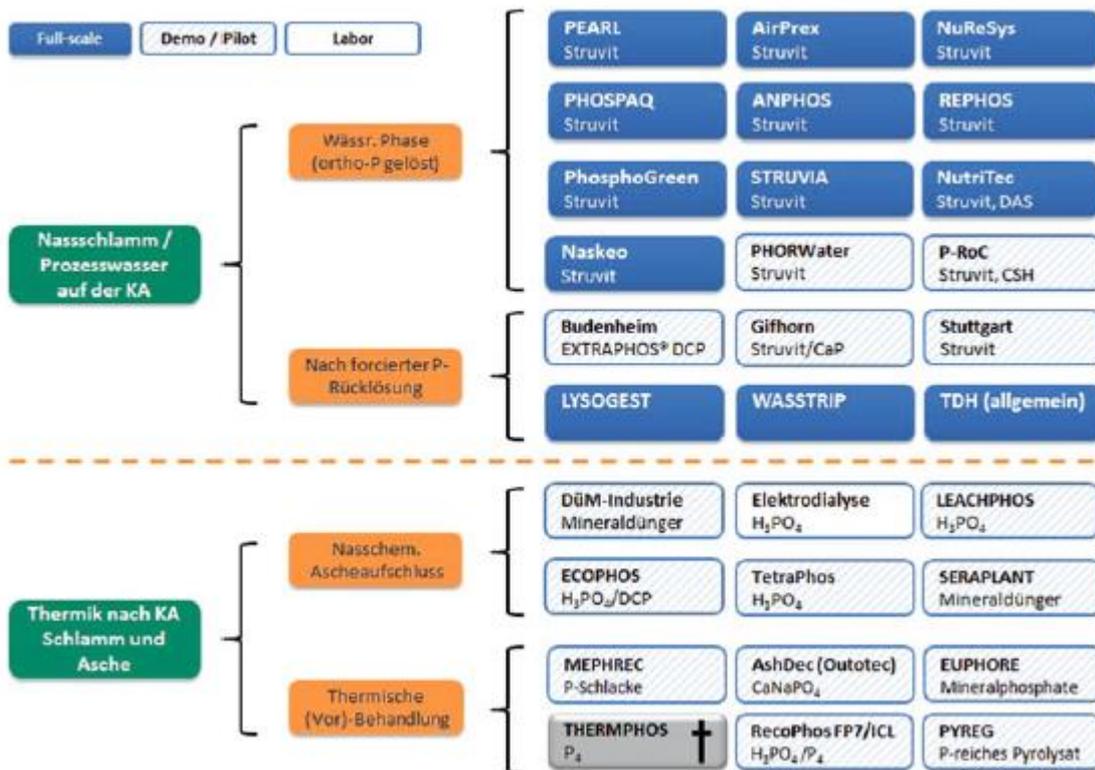


Abbildung 32: Visible Phosphorrückgewinnungs- und Recyclingverfahren und ihr Stand der Ausgereiftheit (KABBE et al., 2015, zit. bei (KABBE & KRAUS, 2018, S. 695)).

Also kann die Phosphorrückgewinnung unmittelbar nach der Faulschlammmentwässerung sehr gut in den Betrieb der ARA integriert werden und weist Kosten von 3 - 4 € pro kg Phosphor auf (INTECUS GmbH, 2016b, S. 49-50). Wenn Phosphor aus Klärschlammaschen zurückgewonnen wird können Rückgewinnungsraten von bis zu 90 % erreicht werden (INTECUS GmbH, 2016b, S. 50). In Zusammenhang mit Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung soll auf einen Vorteil des MePhrec-Verfahrens hingewiesen werden, und zwar dass die thermische Behandlung des Klärschlammes und die Phosphorrückgewinnung bei diesem Verfahren in einem Schritt vonstattengehen und dabei bis zu 90 % des Phosphors zurückgewonnen werden können (MONTAG, et al., 2015, S. 71).

Für detailliertere Informationen zur Phosphorrückgewinnung und den entsprechenden Verfahren muss an dieser Stelle auf andere interessante Quellen verwiesen werden, z.B. Egle et al. (2014).

## 4. Material und Methoden

In diesem Kapitel 4 werden die verwendeten Materialien und die angewendeten Methoden, die zur Beantwortung der in Kapitel 2 formulierten Fragestellungen FF1 und FF2 dienen, erläutert und die gewählte Vorgehensweise beschrieben.

Ein schematischer Überblick über die angewendeten Materialien und Methoden sowie über die gewählte Vorgehensweise, während vorliegender Masterarbeit, wird in Abbildung 33 gegeben.

Zunächst wird in Unterkapitel 4.1 beschrieben welche Materialien und Methoden vor allem für die Beantwortung der FF1 verwendet werden.

Die Beantwortung der FF2, die in Kapitel 5 erfolgt, orientiert sich an den Materialien und Methoden, die zur Beantwortung der FF1 angewendet werden und in Unterkapitel 4.1 beschrieben sind. Zur Erweiterung der Ergebnisse der FF1 werden für die Beantwortung der FF2 zusätzlich Experteninterviews als Methode der Datenerhebung und eine qualitative Inhaltsanalyse als Methode der Datenauswertung durchgeführt. Im nachfolgenden Unterkapitel 4.2 wird die gewählte Vorgehensweise zur Durchführung der Experteninterviews beschrieben sowie im Anschluss die Erläuterung der durchgeführten Datenauswertung folgt.

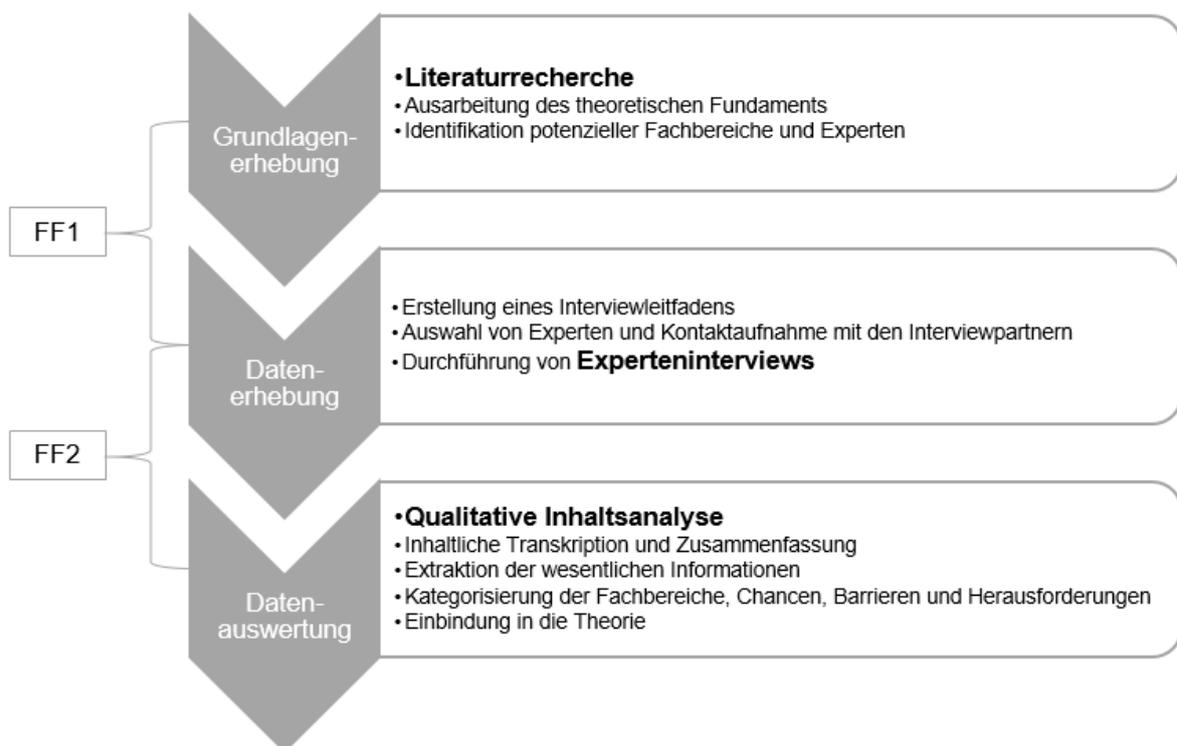


Abbildung 33: Schema der methodischen Vorgehensweise während vorliegender Masterarbeit (Eigene Darstellung).

## 4.1 Grundlagenerhebung

### 4.1.1 Literaturrecherche

Zur Erfassung des aktuellen Stands des Wissens und der Technik im Hinblick auf Klärschlammverwertung, im speziellen durch Monoverbrennung, also zur Beantwortung der FF1, wird eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Dabei werden verschiedenste Quellen, also Materialien wie z.B. vor allem wissenschaftliche Publikationen, Hand- und Lehrbücher, Strategiepapiere von wissenschaftlichen Forschungsgruppen oder öffentlichen Institutionen, Publikationen von öffentlichen Institutionen wie z.B. des Umweltbundesamtes sowie im Internet verfügbare Materialien wie Präsentationen und dergleichen verwendet. Die Erfassung der relevanten Literatur geschieht dabei zufällig und ohne vorher bestimmte Regeln oder Auswahlverfahren. Jedoch werden für die Suche nach relevanter Literatur Schlagwörter wie Klärschlamm, Klärschlammbehandlung, Klärschlammverwertung, Klärschlammmonoverbrennung, Klärschlammverbrennung, thermochemische Klärschlammbehandlung, Life-Cycle-Assesement-Klärschlamm, Klärschlamm-Strategie, Klärschlamm-Energie, Energieversorgung, Energieeffizienz usw. in deutscher wie in englischer Sprache verwendet. Die Literatur, die dadurch erhoben werden kann, wird zunächst einer überblicksmäßigen Sichtung unterzogen, d.h. Abstracts, Zusammenfassungen, Klappentexte, Inhaltsverzeichnisse u.dgl. werden einem ersten Screening unterzogen um die Relevanz für vorliegende Masterarbeit beurteilen zu können. Ob eine Literaturquelle als relevant erachtet wird, hängt dabei von der Beurteilung des Verfassers dieser Arbeit ab und in wie weit dieser einen inhaltlich ausschlaggebenden Zusammenhang herstellen kann, d.h. also vom Vorwissen des Bearbeiters, das sich im Laufe der Literaturrecherche und der Bearbeitung der Masterarbeit natürlich erweitert, im Sinne eines hermeneutischen Zirkels (STANGL, 2017). Abbildung 34 soll die methodische Vorgehensweise während dieser Masterarbeit sowie die Bildung und Erweiterung des Vorverständnisses und des Verständnisses der Materie und der Thematik verdeutlichen und dient auch als Ausblick auf die im folgenden Unterkapitel 4.2 beschriebenen Methoden der Datenerhebung und -auswertung.

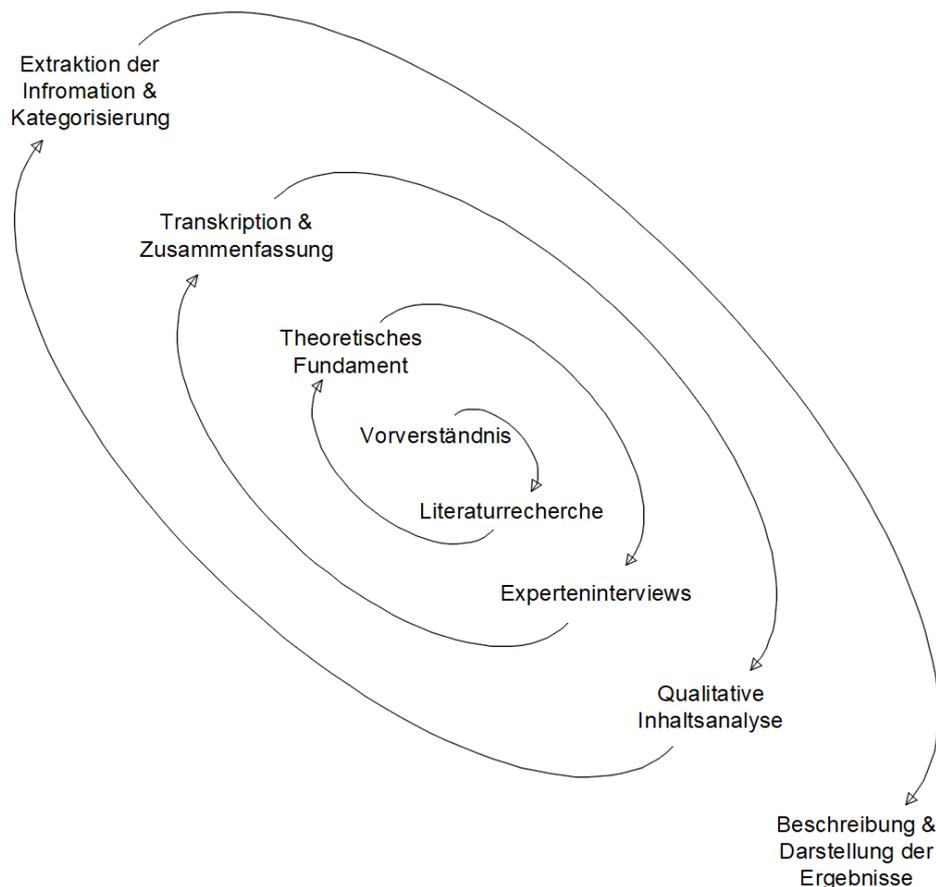


Abbildung 34: Hermeneutischer Zirkel nach Stangl (2017) (Eigene Darstellung).

Es soll hier darauf hingewiesen werden, dass die verfügbare Literatur zum Thema Klärschlamm, Klärschlammbehandlung und Klärschlammverwertung sehr umfassend ist und es dem Bearbeiter dieser Arbeit nicht möglich ist einen Anspruch auf Vollständigkeit der Wiedergabe zu erheben. D.h. viele evtl. relevante Literaturquellen können aus zeitlichen Gründen nicht erfasst werden. Diesem Umstand wird dadurch Rechnung getragen, dass vereinzelt sogenannte Review-Artikel gesichtet werden, um zum einen den Überblick über die vorhandene Literatur auszuweiten und zum anderen evtl. bis dahin nicht gesichtete Literatur mit einbeziehen zu können. Wird schließlich eine Literaturquelle als relevant erachtet, wird diese durchgearbeitet um wichtige Informationen und Aussagen sowie bedeutende Zusammenhänge in Bezug auf Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung zu extrahieren und in Beziehung zu anderen erhobenen Informationen zu setzen. Die Bearbeitung der gesichteten Literatur dient zum einen dazu FF1 in Kapitel 3 beantworten zu können, zum anderen dient sie aber auch dazu, vorgreifend auf die Beantwortung der FF2, das nötige Theoriefundament für die Ausarbeitung der Experteninterviews zu geben und die Einbettung der Ergebnisse der qualitativen Inhaltsanalyse in die Theorie zu ermöglichen. Im Detail erfolgt die Erklärung der Vorgehensweis in den folgenden Unterkapiteln und in Unterkapitel 5.2, wo die Beschreibung der Auswahl der Experten, anhand der durch die Literaturrecherche erkannten relevanten Fachbereiche, erfolgt.

## **4.2 Datenerhebung**

### **4.2.1 Experteninterview**

Grundlegend für die nach Gläser und Grit (2010, S. 41 ff.) nichtstandardisierten leitfadengestützten Experteninterviews, die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführt werden, ist das Ziel der Untersuchung (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 13), also Informationen und Einschätzungen von Experten zu sammeln, die eine integrale Betrachtung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung erlauben. Aus der formulierten Zielsetzung ergibt sich also der Zweck des Interviews, die Beantwortung der in Kapitel 2 formulierten Forschungsfragen, vor allem der FF2 und die Rolle des Interviewpartners als Fachexperten, der seine persönliche Einschätzung des Themas darlegen soll (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 13).

#### **4.2.1.1 Vorüberlegungen für die Erstellung des Interviewleitfadens**

Bevor die Experteninterviews durchgeführt werden, wird der Stand der Forschung, also der Stand des Wissens, in Kapitel 3 aufgearbeitet, um Hypothesen und Leitfragen zu erarbeiten. Diese theoretischen Vorüberlegungen sollen, nach Gläser und Grit (2010, S. 61 ff.), die Vorgehensweise bei der Erstellung des Leitfadens und der Durchführung der Interviews wegweisend anleiten. Die Aufarbeitung des Stands der Forschung erfolgt durch die umfassende Literaturrecherche, in Unterkapitel 4.1 ausführlich beschrieben. Ausgehend von diesem Vorwissen werden zunächst Leitfragen, in Form einer Stichpunktsammlung erstellt, die beim ersten Interview auf ihre Tauglichkeit hin getestet werden. Dieser erste Leitfaden kann in Anhang B eingesehen werden. Die Stichpunktsammlung erweist sich als gute Grundlage um davon ausgehend, die FF2 miteinbeziehend, die Leitfragen zu formulieren sowie bei den nächsten Interviews weiter verwendet zu werden. D.h. die Stichpunktsammlung wird bei den folgenden Interviews nicht explizit durchgearbeitet, sondern dient nur dem Interviewer als geistige Stütze um aus seiner Sicht nach wichtigen Informationen Fragen zu können und dem Gespräch einen natürlichen Lauf zu geben. Dies in dem Sinne, dass durch die Stichpunktsammlung unabhängig von den formulierten Fragen, das Gespräch durch Unterfragen und Detailfragen vertieft und evtl. flüssiger gestaltet werden kann. Genauso dient das erste Interview dazu die Zeit, die für die Interviews benötigt wird, abschätzen zu können. Für die folgenden Interviews wird mit einer Zeitdauer von ca. einer Stunde gerechnet.

#### **4.2.1.2 Erstellung und Beschreibung des Interviewleitfadens**

Der bei den Interviews verwendete endgültige Leitfaden kann in Anhang C eingesehen werden. Ausgehend von der Stichpunktsammlung und den Forschungsfragen werden 10 offene Fragen formuliert, die den Interviewpartnern möglichst viel Spielraum lassen sollen um ihre Expertise auf dem Gebiet ausführen zu können. Von den 10 Fragen beziehen sich sechs inhaltlich auf das Thema der vorliegenden Masterarbeit. Fragen 1, 8, 9 und 10 beziehen sich auf den formalen Charakter des Interviews sowie auf die Vorgehensweise, d.h. Frage 1 stellt den Einstieg ins Interview und Fragen 8, 9 und 10 das Ende des Interviews dar. Frage 1 dient dazu wichtige Formalitäten, wie informierte Einwilligung und Genehmigung der Aufzeichnung des Gesprächs, für das Interview abzuklären. Dabei soll der Interviewpartner über das Ziel der Befragung und der Untersuchung, also der vorliegenden Masterarbeit, aufgeklärt werden. Aus Gründen des Datenschutzes muss die Aufzeichnung des Gesprächs durch den Interviewpartner genehmigt werden. Die Interviewpartner werden zusätzlich darüber aufgeklärt, dass die Aufzeichnung des Gesprächs nur für den internen Gebrauch, also als Gedächtnisstütze für den Interviewer bei der anschließenden Transkription und Auswertung der Gespräche dient. D.h. die aufgezeichneten

Gespräche sind nicht für die Veröffentlichung bestimmt. Genauso soll auch an dieser Stelle angemerkt werden, dass der Verfasser dieser Arbeit sich dazu entschlossen hat, die Namen der Experten nicht zu nennen, d.h. sie durch Einsatz von Abkürzungen, die ihren Fachbereich betreffen, zu anonymisieren. Dies geschieht zum einen aus Überlegungen, die den Schutz der befragten Person betreffen und zum anderen aus der Ansicht, dass die Namen der Experten für die inhaltlichen Schlüsse, die in dieser Masterarbeit aus ihren Aussagen gezogen werden nicht relevant sind, sondern im Gegenteil dazu verleiten könnten manche Aussagen geringer, bezüglich ihrer Aussagekraft, zu erachten oder manche Aussagen auch zu überschätzen. Was den Schutz der Person betrifft, hat sich der Verfasser dazu entschieden, die Experten nur in anonymisierter Form zu nennen, da einige Aussagen aus Sicht des Verfassers für sie evtl. nachteilige Folgen haben könnten. Da dies aber nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann soll eben die Verwendung der Namen vermieden werden. Frage 8 des Leitfadens zielt darauf ab Vorschläge zu erheben um den Leitfaden inhaltlich wie auch formal verbessern zu können sowie dem Experten Möglichkeit für Kritik und Anmerkungen, z.B. auch ob seiner Meinung nach wichtige Aspekte unberücksichtigt geblieben sind, zu bieten. Mit Frage 8 wird auch die Endphase des Interviews eingeleitet, d.h. es kann an dieser Stelle noch einmal auf Aspekte eingegangen werden, die es, aus Sicht des Interviewers, ermöglichen einen angenehmen Eindruck des Interviews beim Interviewpartner zu hinterlassen. Frage 9 soll den Experten ermöglichen Vorschläge für weitere Experten, die ihrer Meinung nach auch interviewt werden sollten, zu geben. Frage 10 weist darauf hin wie die Experten zu einem späteren Zeitpunkt mit dem Interviewer Kontakt aufnehmen können, wenn ihnen noch etwas Wichtiges einfällt oder wenn jemand Feedback geben möchte. Der zentrale Teil des Interviews bilden die Fragen 2 - 7 des Leitfadens. Also die erste inhaltliche Frage, Frage 2, zielt darauf ab, als Anwärfrage, persönliche Berührungspunkte des Experten mit dem Thema Klärschlammverwertung wieder geben zu können, insofern die Thematik überhaupt bekannt ist. Die folgenden Fragen 3 und 4 stellen den Versuch dar FF2 in den Leitfaden einzubauen. Sie stellen die zentralen Fragen des Leitfadens dar und hier soll den Interviewpartnern ausreichend Zeit gegeben werden um aus ihrer Sicht Wichtiges einbringen zu können. Vor allem hier wird auch anhand der Stichpunktsammlung, die als Anhang (B und C) dem Leitfaden zugefügt ist und nur dem Interviewer als geistige Stütze dient, versucht, die vom Experten gegebenen Informationen zu vertiefen oder in einen allgemeineren Kontext zu bringen. Auch soll sie es dem Interviewer ermöglichen die Aussagen in sein theoretisches Vorwissen einbinden und mit anderen ähnlichen Aussagen verknüpfen zu können. Da die Reihenfolge, in der die Fragen gestellt werden, nicht fixiert ist, d.h. dass die im Leitfaden gegebene Reihenfolge mehr eine Richtlinie für den Interviewer ist, kann sich, durch die Ausführungen der Interviewpartner zu Frage 2 und/oder 3, das Stellen einiger der folgenden Fragen erübrigen. Deshalb wird an dieser Stelle des Leitfadens auch versucht das Gespräch so natürlich wie möglich zu gestalten und auf vom Interviewpartner erwähnte Anknüpfungspunkte zu anderen Fragen zu nutzen und ihnen gleich an dieser Stelle nachzugehen. Die anschließende Frage 5 soll einen Bezug zum BAWP 2017 (BMNT, 2017) und zum wichtigen Thema Phosphorrückgewinnung herstellen. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass der BAWP 2017 (BMNT, 2017) jedem bekannt ist, kann an dieser Stelle eine etwas längere Erklärung durch den Interviewer erfolgen. Um bei Nichtkenntnis des BAWP 2017 dennoch etwas mit der Frage anfangen zu können, soll der Interviewpartner auf die Möglichkeit hingewiesen werden, dass auch seine persönliche Sicht, also „lebensweltliche“ Praxis, von Belang und für den Interviewer von Interesse ist. Frage 6 soll, insofern der Inhalt dieser Frage nicht schon durch vorhergehende Ausführung gestreift und evtl. beantwortet wurde, einen Bezug zum räumlichen Kontext der Klärschlammverwertung, vor allem der Monoverbrennung, herstellen. Da diese Frage u.U. nicht richtig verstanden werden könnte, da sie eher offen gestellt wird und auch ein bestimmtes

Vorwissen voraussetzt, wird sie bei der Durchführung der Interviews durch Begleitfragen erweitert. Diese können eben auch ganz alltägliche Dinge mit einbeziehen, wie z.B. die räumliche Nachbarschaft von Verbrennungsanlagen und Siedlungsgebieten, also auf Themen wie Akzeptanz, Protest und Konflikte abzielen. Die letzte inhaltliche Frage, Frage 7, soll es ermöglichen das vorher Gesagte noch einmal Revue passieren zu lassen, teilweise zu wiederholen, zusammen zu fassen und evtl. zu ergänzen. Außerdem kann damit evtl. erreicht werden, dass der durch die vorher gestellten Fragen bestimmte Horizont erweitert wird und Klärschlammverwertung aus einer anderen Perspektive gesehen wird, wie z.B. aus einer persönlichen Warte, aus gesellschaftlicher Perspektive oder auch aus Sicht des Umwelt- und Landschaftsschutzes. Um das Fachgebiet, für das der Experte steht, in die Befragung explizit mit einfließen lassen zu können, werden für jeden Experten einige Fragen formuliert, die seine persönliche Forschungsarbeit betreffen. Diese Fragen sollen jedoch nicht in jedem Fall gestellt werden, sondern nur, wenn sich das Gespräch als schwierig erweisen sollte und Anknüpfungspunkte zur Thematik Klärschlammverwertung angezeigt werden sollen. Die im Leitfaden formulierten 10 Fragen werden mehr oder weniger jedem Experten gestellt, d.h. sie werden nicht explizit gestellt, wenn sich aus dem Gespräch die Beantwortung einer Folgefrage mit ergibt, wird nicht mehr extra nachgefragt, sondern u.a. anhand der Stichpunktliste versucht die erhaltenen Informationen zu detaillieren und schärfen. Der Leitfaden sowie die Stichpunktsammlung werden also für jeden Experten in der gleichen Form verwendet.

### **4.2.1.3 Kontaktaufnahme mit den Experten und Vorabinformation**

Vor dem Interview muss natürlich ein Kontakt zum Experten hergestellt werden. Dabei ist es wichtig, die zu befragende Person grundlegend zu informieren, d.h. sie über das Ziel der Untersuchung, evtl. über den/die Auftraggeber, die Vorgehensweise, den Grund für die Auswahl des Interviewpartners und den Inhalt des beabsichtigten Gesprächs aufzuklären und die Zustimmung des Interviewpartners einzuholen (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 162). Im Rahmen dieser Masterarbeit wird die Kontaktaufnahme ausschließlich per E-Mail durchgeführt. Dazu wird ein standardisierter Nachrichteninhalte erstellt, der jedem Experten, der kontaktiert wird, zugesendet wird. In Anhang A kann die standardisierte E-Mail zur Kontaktaufnahme mit den Experten und die standardisierte Vorabinformation eingesehen werden.

### **4.2.1.4 Durchführung der Experteninterviews**

Die Vorbemerkungen und ersten Fragen dienen dazu eine gerechte, respektvolle und faire Beziehung zwischen dem Interviewpartner und dem Interviewer zu etablieren, um die Gesprächssituation so natürlich wie möglich zu gestalten und doch die nötige Distanziertheit und Rollenverteilung beizubehalten (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 172). Allgemein wichtig ist es, dem Befragten rundum aktiv zuzuhören, d.h. sich auf den Inhalt seiner Ausführungen zu konzentrieren und ihm zu verstehen zu geben, dass er verstanden wird und gleichzeitig soll der Fragende einschätzen welche Informationen noch „fehlen“ (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 173). Evtl. kann der Fragende durch Rückkoppelung wie z.B. durch Blickkontakt, Kopfnicken oder bestärkenden Zuspruch dem Befragten sein Verständnis bedeuten oder ihn motivieren das eben Gesprochene weiter auszuführen (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 173). Der Interviewpartner soll, während er spricht, möglichst nicht unterbrochen werden, d.h. der Fragende soll sich Nachfragen merken und diese später als „Wiederaufnahmefragen“ stellen, sowie er Pausen zulassen und Stille tolerieren soll, da der Befragte manchmal Zeit zum Nachdenken benötigt (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 173). Spontaneität des Fragenden und flexible Reihenfolge der Fragen ist nötig um das Gespräch so natürlich wie möglich zu gestalten und sich von selbst ergebende Anknüpfungspunkte als

elegante Überleitungen zu nutzen, da plötzliche Themenwechsel das Gespräch wie ein Verhör wirken lassen (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 174). Versteht der Fragende irgendetwas nicht, so soll er den Befragten um Erklärung bitten, indem er Aussagen desselben paraphrasiert um das eigene Verständnis zu explizieren und um ihm die Möglichkeit zu bieten mit Ja oder Nein zu antworten (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 174). Mit kurzen und eindeutigen Nachfragen soll der Fragende möglichst nach Details und Beispielen fragen indem die Antwort des Befragten wiederholt und um Präzisierung gebeten wird, dabei können bewusst falsche Unterstellungen und indirekte Provokationen benutzt werden um Informiertheit und Kompetenz zu zeigen, wobei aber Bewertungen vermieden werden sollen (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 175 ff.).

Die Durchführung der Experteninterviews im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgt im Zeitraum von Ende Februar bis Anfang Juli 2018. Wie schon an anderer Stelle erwähnt wird für die Interviews ca. eine Stunde eingeplant.

### **4.2.1.5 Aufzeichnung der Experteninterviews**

Die akustische Aufzeichnung der Experteninterviews ist für die Weiterverarbeitung der erhobenen Informationen sehr wichtig und soll möglichst unkompliziert, die Gesprächsteilnehmer nicht ablenkend, vonstattengehen (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 158). Die Interviews werden mit dem Handy des Interviewers aufgezeichnet und anschließend am Server der BOKU gespeichert. Wie schon erwähnt sind die Aufzeichnungen nicht für die Veröffentlichung bestimmt, sondern dienen nur als geistige Stütze für den Interviewer und Verfasser dieser Masterarbeit bei der Auswertung der Gespräche. Im folgenden Unterkapitel 4.3 wird nun die Auswertung der Gespräche erläutert.

## **4.3 Datenauswertung**

### **4.3.1 Qualitative Inhaltsanalyse**

Die während dieser Masterarbeit durchgeführte qualitative Inhaltsanalyse der Expertengespräche wird in Anlehnung an die von Mayring (2008) und Gläser und Grit (2010) vorgeschlagene Vorgehensweise durchgeführt. Nach implizitem Wissenschaftsverständnis bedeutet diese sozialwissenschaftliche Methode einen qualitativ-verstehenden Ansatz, bei dem es nicht nur darum geht Gegenstände, Zusammenhänge und Prozesse zu analysieren sondern sich in sie hineinzusetzen, sie nachzuerleben oder sie zumindest nacherlebend sich vorzustellen und das eben in ihrer vollen Komplexität und Vielfältigkeit (MAYRING, 2008, S. 17 ff.). Es ist zu beachten, dass sich Verstehen immer in einer Dialogstruktur, Verständigung des Urhebers mit dem Interpreten durch das zu interpretierende Material, und einer Vermittlungsstruktur zwischen Subjekt und Objekt, der Interpret versucht den Gegenständen näher zu kommen, entwickelt (MAYRING, 2008, S. 27). Dabei sind, durch den Verfasser dieser Arbeit frei zusammenfassend, nach Mayring (2008, S. 58) und nach Gläser und Grit (2010, S. 202 ff.) folgende qualitativen Techniken wichtig:

- Vorbereitung der Extraktion der relevanten Informationen
- Zusammenfassung: Reduktion des zu untersuchenden Materials auf die wesentlichen Inhalte;
- Extraktion der Informationen: Filtern der relevanten Information und Ordnung derselben zu einheitlichen Kategorien;
- Einbindung der gewonnenen Informationen und Kategorien in die Theorie;

Zunächst werden also die Expertengespräche inhaltlich transkribiert und zusammengefasst. Im Anschluss folgt die Extraktion der wesentlichen Informationen sowie die Zusammenfassung und

Aufarbeitung derselben in Kategorien. Bei der abschließenden Auswertung werden die Kategorien strukturiert und soweit als möglich in die Theorie eingebunden. Die Vorgehensweise wird im Folgenden detailliert beschrieben.

#### **4.3.1.1 Vorbereitung der Extraktion**

Die aufgezeichneten Experteninterviews werden zeitlich nah, d.h. möglichst im Anschluss an das Interview, transkribiert, um wichtige Informationen festhalten und so die Auswertung der Gespräche nach den wesentlichen, die Forschungsfragen dieser Masterarbeit betreffenden Informationen durchführen zu können. Bei der Transkription wird alles inhaltlich Wesentliche wiedergegeben. Also die Aussagen des Experten werden in den Worten des Interviewers und Auswerters, den Verfasser dieser Masterarbeit, wiedergegeben. Es wird jedoch keine wörtliche Transkription durchgeführt, da nur die inhaltlichen Aspekte für die Masterarbeit relevant sind. Genauso wie für die anschließende Auswertung der Gespräche keine vollständigen Sätze, also direkte Zitate notwendig sind, sondern nur die Informationen und der Inhalt der Aussagen, die in engem Zusammenhang zu dem Thema dieser Masterarbeit stehen, weiterverarbeitet werden. Es soll hier angemerkt werden, dass bei der inhaltlichen Transkription der Interviews eine erste Reduktion des Materials durchgeführt wird. D.h. Aussagen und Informationen, die zwar interessant, jedoch aus Sicht des Verfassers und nach seinen Vorkenntnissen des Themas Klärschlammverwertung und der entsprechenden Theorien, die aus den theoretischen Vorüberlegungen, der Literaturrecherche, hervorgehen, nicht relevant für die Beantwortung der Forschungsfragen dieser Masterarbeit sind, werden nicht transkribiert und somit weggelassen. Die Struktur der Transkription ähnelt der Interviewsituation, d.h. der Dialogstruktur. Die Fragen des Interviewers werden wiedergegeben um den Kontext des Gesprächs zu wahren. Die Fragen des Interviewers und auch die Antworten des Interviewpartners werden stichpunktartig zusammengefasst. Jedoch wird dabei die zeitliche Reihenfolge des Gesagten nicht verändert. D.h. was später gesprochen wird findet sich auch später im Text der Transkription wieder. Das Gespräch wurde im Dialekt geführt und wird möglichst passend ins Hochdeutsche übersetzt, wobei manchmal bei der Übersetzung nicht der genaue Wortlaut des Gesprochenen wiedergegeben werden kann, da dies den Sinn des Gesprochenen nicht wiedergeben würde. Die Betonung wird nur kenntlich gemacht, wenn es für das Verständnis des Gesprochenen unumgänglich ist. Eine Beschreibung der Gesprächssituation, also des Ortes und der evtl. Tätigkeiten usw. wird am Anfang der Transkription beschrieben und im fixierten Text des Gesprächs nicht mehr erwähnt, außer es ist für das Verständnis unbedingt nötig.

#### **4.3.1.2 Zusammenfassung der inhaltlichen Transkription**

Vom Interviewer als wichtig erachtete Informationen werden in der Zusammenfassung wiedergegeben. Die Zusammenfassung entstand nach dem Gespräch durch sofortige Niederschrift von prägnanten Informationen, für welche keine Regeln angegeben werden können, da sie durch den aktuellen Stand des Wissens, des Bewusstseins und der Aufmerksamkeit des Interviewers geprägt sind. Grundprinzip der Zusammenfassung ist es eine zielführende Abstraktionsebene, durch Einsatz von Analyse- und Kodiereinheiten sowie von Selektionskriterien und Makrooperatoren, zur schrittweisen Verallgemeinerung des zu untersuchenden Materials, zu erreichen, um die anschließende Extraktion der wesentlichen Informationen zu erleichtern. Im Allgemeinen können, angepasst an Mayring (2008, S. 59 ff.), drei Regeln oder Schritte verfolgt werden:

1. Paraphrasierung
2. Generalisierung auf das Abstraktionsniveau

### 3. Reduktion

Unter Paraphrasierung wird dabei die freie Wiedergabe der inhaltlich transkribierten Aussagen des Experten verstanden. Wesentlich dabei ist auch, dass inhaltlich ähnliche Aussagen des Experten zusammengefasst werden, d.h. wenn an zeitlich unterschiedlichen Punkten über ähnliches gesprochen wird, dann ist dies aus der Zusammenfassung nicht mehr ersichtlich, da die unterschiedlichen Informationen der verschiedenen Aussagen zu einer zusammengefasst werden. Durch die Generalisierung auf das gewünschte Abstraktionsniveau wird die anschließende Extraktion der wesentlichen Informationen erheblich erleichtert. Über die Generalisierung fließen auch Begrifflichkeiten in die Zusammenfassung ein, die es dem Auswerter ermöglichen einen direkten Zusammenhang zu seinen theoretischen Vorüberlegungen herzustellen. D.h. bei der Zusammenfassung werden auch Begriffe verwendet, die vom jeweiligen Experten nicht verwendet wurden, jedoch durch Interpretation der Aussagen durch den Auswerter als passend erscheinen. Als Reduktion können das Auslassen, die Selektion, die Bündelung, die Konstruktion und die Integration von Aussagen, Teilen von Aussagen und im Allgemeinen von Informationen verstanden werden.

#### 4.3.1.3 Extraktion der wesentlichen Informationen

Mit einer qualitativen Inhaltsanalyse sollen Informationen mittels eines Suchrasters, das sich aus theoretischen Vorüberlegungen ergibt, extrahiert und ausgewertet werden, wobei die Extraktion eine strukturierte Informationsbasis schafft und einen entscheidenden Interpretationsschritt darstellt (GLÄSER & GRIT, 2010, S. 199 ff.). Ziel ist es eine bestimmte Struktur, evtl. in Form eines Kategoriensystems, aus dem verwendeten Material herauszufiltern und die damit erfassbaren Aussagen, d.h. Informationen zu extrahieren. Dazu können drei wesentliche Schritte verfolgt werden (MAYRING, 2008, S. 83):

- Definition der Kategorien;
- Festlegung von Ankerbeispielen, die als Beispiel für eine Kategorie dienen;
- Abgrenzung der Kategorien durch Kodierregeln zur eindeutigen Zuordnung;

Eine inhaltliche Strukturierung sichtet das zu untersuchende Material auf bestimmte Themen, Inhalte oder Aspekte und filtert sowie fasst sie zusammen (MAYRING, 2008, S. 85). Nach der inhaltlichen Transkription der Experteninterviews werden wichtige Informationen in der Zusammenfassung derselben unterstrichen, dabei werden die Informationen, die für die Beantwortung der FF2 relevant erscheinen, also zur Identifikation der Fachbereiche dienen einmal unterstrichen und für die Erhebung der Chancen, Barrieren und Herausforderungen zweimal unterstrichen. Für die Auswahl dieser Informationen gelten dasselbe vorher erwähnte Wissen des Interviewers und Transkripteurs sowie zusätzlich die folgenden Kodierregeln:

- Disziplinen/Fachbereiche, die in Bezug auf Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung erwähnt werden, werden als relevante Informationen gewertet;
- Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die in Bezug auf Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung erwähnt werden, werden als relevante Informationen gewertet;
- Chancen, Barrieren, Herausforderungen, die in Zusammenhang zur Prozesskette der Klärschlammverwertung gesetzt werden können, werden extrahiert;
- Themenschwerpunkte, die als relevant für die Monoverbrennung von Klärschlamm und Klärschlammverwertung insgesamt gewertet werden, werden extrahiert;

Wie erwähnt werden die wesentlichen Informationen für die Beantwortung der FF2 aus den Zusammenfassungen der inhaltlichen Transkriptionen extrahiert. Dabei werden unterschiedliche Strategien verwendet. Für die Identifikation der Fachbereiche werden, wie in den obigen

Kodierregeln angegeben, alle Disziplinen und Fachbereiche, die erwähnt werden, als relevante Informationen gewertet. Wichtig dabei ist zu erwähnen, dass die Begriffe Disziplin und Fachbereich sehr breit aufgefasst werden. D.h. darunter fallen sehr viele Begriffe wie Branchen, Bereiche und Anwendungsgebiete, die nicht nur als wissenschaftliche Disziplinen und Fachbereiche verstanden werden, sondern eben auch als Forschungsgebiete, Forschungsprojekte, Gewerbebranchen, Industriebranchen, öffentliche Einrichtungen im Allgemeinen sowie auch halb private – halb öffentliche Einrichtungen wie z.B. Abwasserverbände. Genauso werden zu den Fachbereichen auch eher theoretische Begriffe gezählt, die so als Fachbereich in der Praxis weniger vorkommen, sondern bisher eher projekt-, planungs- und umsetzungsbezogen interdisziplinäre Querschnittmaterien darstellen wie z.B. Ressourcen- und Akteursmanagement. An dieser Stelle soll auch angemerkt werden, dass manche verwandte Bereiche zu einem Fachbereich zusammengeführt werden und der entstehenden Kategorie der Name des, aus Sicht des Verfassers wichtigeren Fachbereichs gegeben wird. So wird z.B. der Bereich der Lebensmittelproduktion als Explikation und Charakterisierung des Fachbereichs Landwirtschaft verstanden. Die erwähnten Fachbereiche und Disziplinen werden anhand von Excel-Tabellen gesammelt und anschließend einer Zusammenfassung und Kategorisierung unterzogen. Das Ergebnis der Extraktion, also die Kategorien der Fachbereiche und Disziplinen sind in Kapitel 5 in Tabelle 29 aufgelistet sowie die detaillierte Charakterisierung der einzelnen Fachbereiche und deren Eingrenzung gegenüber anderen Fachbereichen in Unterkapitel 5.2 wiedergegeben werden. Zu erwähnen ist auch, dass bei Mehrfachnennungen und schwierig zu entscheidenden Zuordnung die Begriffe zuerst allen Kategorien mit denen sie wesentliche Berührungspunkte haben zugeordnet werden. Erst in einem folgenden Schritt wird entschieden welche Doppelnennungen vernachlässigt werden können, ohne relevante Information zu eliminieren. Als Beispiel können hier die Begriffe Lebensmittelproduktion und Nahrungsmittelproduktion angeführt werden. Bei der Extraktion der Informationen, die für die Erhebung der Chancen, Barrieren und Herausforderungen wesentlich sind, werden im Unterschied zur gerade beschriebenen Vorgehensweise der Identifikation der Fachbereiche, alle wesentlichen Informationen in Excel-Tabellen gesammelt. Dabei werden Informationen, durch die eine effiziente und nachhaltige Realisierung der künftigen Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung als möglich und vorteilhaft erscheint als Chancen verstanden. Genauso wie positive Folgewirkungen auf verschiedene Bereiche oder auch im Allgemeinen eine Chance darstellen. Mit Barrieren sind Umstände, Bedingungen, Vorkommnisse u.dgl. gemeint, die die Umsetzung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung nicht erlauben oder nur unter äußerst schwierigen Rahmenbedingungen möglich erscheinen lassen. Herausforderungen sind also Hürden, die bei der Wahl der Strategie zur Umsetzung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung überwunden werden müssen oder sollten. Sie stellen auch ein Mittelglied zwischen den Chancen und den Barrieren dar, da einige Chancen nur durch ausräumen der entsprechenden Barrieren umgesetzt werden können und das Ausräumen der Barriere stellt natürliche eine Herausforderung dar, ist aber nur in einzelnen Fällen möglich. Anschließend werden die ermittelten Chancen, Barrieren und Herausforderungen den vorher kategorisierten Fachbereichen und Disziplinen zugeordnet. Außerdem werden genannte Chancen, Barrieren und Herausforderungen anhand der Prozesskette des Klärschlammes kategorisiert und auf die einzelnen Prozessschritte bezogen. Die Ergebnisse dieser Vorgehensweise können in Kapitel 5 nachgeschlagen werden. Durch die letzte Kodierregel, die sich auf Themenschwerpunkte bezieht die die Klärschlammverwertung im Allgemeinen und Monoverbrennung im Besonderen betreffen, werden Informationen gesammelt, die nicht sofort einer anderen Kodierregel unterzogen werden können, jedoch aus Sicht des Verfassers dieser Masterarbeit wesentliche Informationen darstellen. Die so extrahierten

Informationen fließen in weiterer Folge entweder in die Beschreibung der Fachbereiche oder Prozessschritte ein, oder werden als Teil in das Kapitel 6 aufgenommen.

#### **4.3.1.4 Einbindung der Kategorien und Informationen in die Theorie**

Die nach Mayring (2008) abschließende Einbindung der extrahierten Kategorien, also der Ergebnisse der qualitativen Inhaltsanalyse der Experteninterviews, in die durch die Literaturrecherche erhobene Theorie der Klärschlammverwertung, im speziellen durch Monoverbrennung, erfolgt in Kapitel 5 und 6.

## 5. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden in Unterkapitel 5.1 die Ergebnisse zur FF1 dargelegt, wobei besondere Aufmerksamkeit auf den Stoffstrom und die Prozesskette des Klärschlammes gelegt wird, da die ausführliche Darlegung des aktuellen Stands und momentaner Entwicklungen der Klärschlammverwertung (FF1) in Kapitel 3 erfolgt. Am Anfang des Kapitels 5.1 erfolgt die detaillierte Beschreibung der Prozessschritte und die Ausführung und Erläuterung der Chancen, Barrieren und Herausforderungen sowie der Fachbereiche, die bei den einzelnen Prozessschritten ansetzen. Es folgt die Darstellung der Prozesskette und der jeweiligen Chancen, Barrieren und Herausforderungen. In Unterkapitel 5.2 werden die erhobenen, an Klärschlammmonoverbrennung beteiligten oder zu beteiligenden Fachbereiche vorgestellt, und deren Anknüpfungspunkte in Form von Chancen, Barrieren und Herausforderungen zur Thematik Klärschlammverwertung, sowie im spez. Klärschlammmonoverbrennung, dargelegt. Dadurch soll FF2 ausführlich beantwortet werden. Zusammenfassend soll sich ein möglichst vollständiges Bild der zukünftig anzustrebenden Strategie der Klärschlammverwertung, im Besonderen der Klärschlammmonoverbrennung, der daran zu beteiligenden Fachbereiche und der daraus sich ergebenden Chancen, Barrieren und Herausforderungen ergeben. Damit soll ein Beitrag zu einem zukünftig nachhaltigen, effizienten und risikoarmen Umgang mit Klärschlamm, dem Erfolgsprodukt aus der Abwasserreinigung in der Gesellschaft, geleistet werden.

Durch Abbildung 35 soll die Komplexität der Gestaltung und Umsetzung der Strategie, der zukünftigen Klärschlammbewirtschaftung, ersichtlich werden. Die Abbildung 35 kann auch als Ausblick und Zusammenfassung, der in den folgenden Unterkapiteln behandelten Ergebnisse dieser Masterarbeit angesehen werden. Dabei wird im innersten Kreis die Prozesskette bzw. der Stoffstrom des Klärschlammes dargestellt, und zwar so, wie sie bzw. er aus der Erarbeitung der Thematik im Laufe dieser Masterarbeit am sinnvollsten erscheint und möglichst vollständig dargestellt werden kann. Im mittleren Kreis werden die einzelnen größeren Prozesse wiedergegeben, denen die einzelnen Prozessschritte der Prozesskette bzw. des Stoffstroms zugeordnet werden können. Schließlich werden im äußersten Kreis die, durch diese Masterarbeit eruierten und bestimmten Fachbereiche dargestellt, wobei deren Anordnung um die Prozesse herum willkürlich erfolgt, da die Abbildung 35 nur schematisch aufzeigen soll, wie interdisziplinär und komplex die Materie der zukünftigen Klärschlammbewirtschaftung ist und dass eben verschiedenste Fachbereiche gemeinsam an bestimmten Prozessschritten einen Beitrag zur Optimierung leisten können. Genauso soll auch ersichtlich werden, dass die Prozesskette zwar in einzelne größere Prozesse unterteilt werden kann, dass jedoch nur eine integrale Betrachtung des Stoffstroms des Klärschlammes über die gesamte Prozesskette hinweg eine sinnvolle und tragfähige Lösung der zukünftigen Klärschlammbewirtschaftung ermöglicht. Detailliertere Informationen und ausführlichere Beschreibungen der dargestellten Prozesskette bzw. des Stoffstroms, der Prozesse und der verschiedenen Fachbereiche folgen in den nächsten Unterkapiteln 5.1 und 5.2.

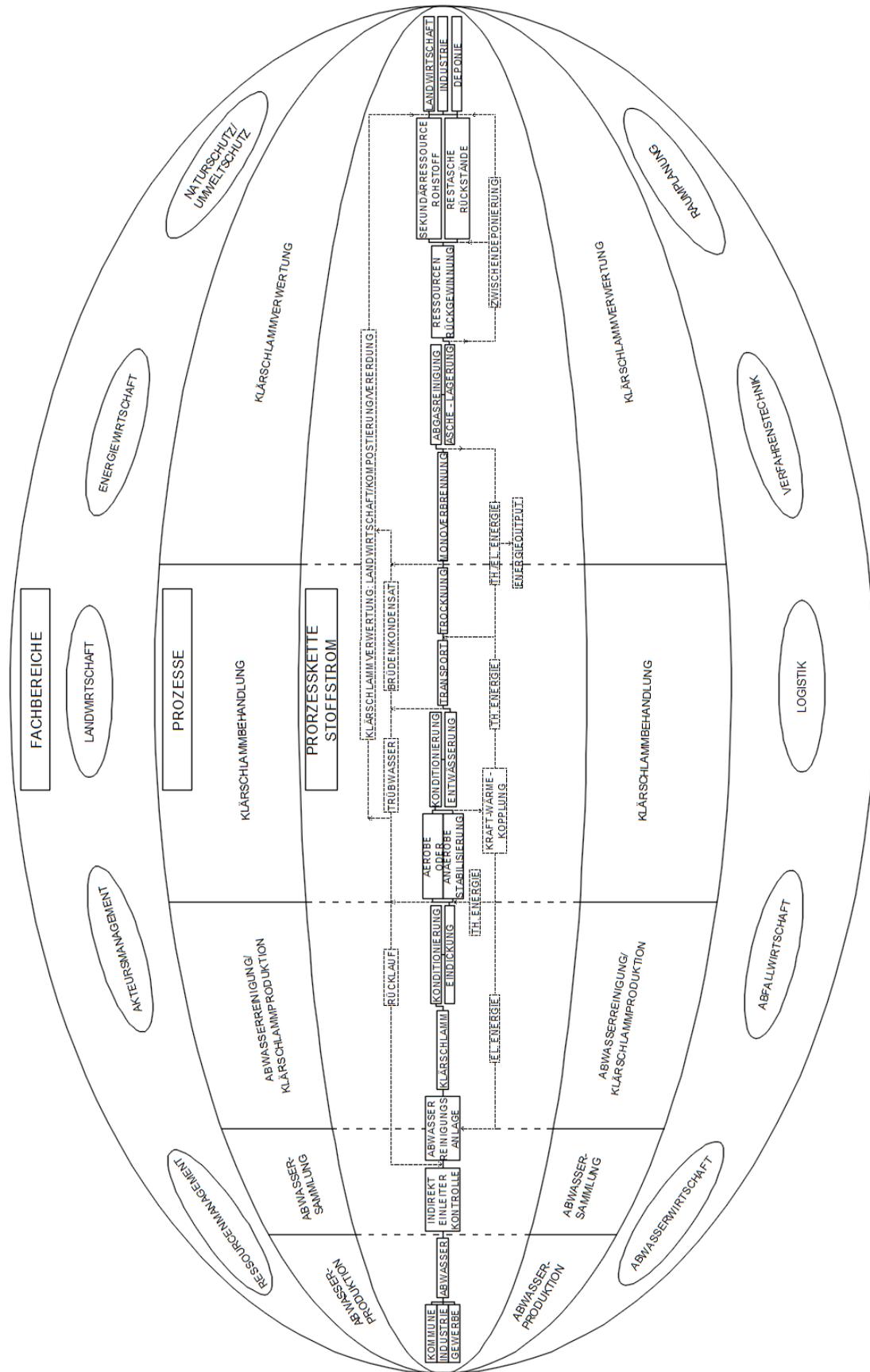


Abbildung 35: Prozesskette/Stoffstrom, Prozesse und Fachbereiche der Klärschlammbewirtschaftung (Eigene Darstellung).

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit werden Experteninterviews als Methode der Datenerhebung und eine qualitative Inhaltsanalyse zur Auswertung der erhobenen Daten durchgeführt. Die ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise und der angewandten Methodik ist in Kapitel 4 wiedergegeben. Nachfolgendes Kapitel kann also im Großen und Ganzen als eine Zusammenfassung der Aussagen der Experten während der Interviews aufgefasst werden. Die wichtigsten Aussagen sollen, dem entsprechenden Experten gerecht zu werden, zitiert werden. Auch Informationen, die aus anderen Quellen wie den Experteninterviews stammen, werden wie üblich angeführt.

Wie in der folgenden Tabelle 22, die einen Überblick über die befragten Experten und deren spez. Fachkenntnisse gibt, ersichtlich, werden 11 Experten, die ca. zehn verschiedenen Fachbereichen zuordenbar sind, befragt. Bei der Auswahl der Experten wurde versucht, alle möglichen Fachbereiche und Disziplinen, die an Klärschlammverwertung sowie an Klärschlammmonoverbrennung beteiligt sind oder sein sollten, abzudecken. Welche Fachbereiche dabei als wesentlich zu betrachten sind, kann als zusätzliches Ergebnis der Literaturrecherche, zur Beantwortung der FF1, angesehen werden. Zunächst konnte ein Experte aus dem Fachbereich Abwasserwirtschaft, aufgrund eines kollegialen Verhältnisses zum Verfasser dieser Masterarbeit, für ein Experteninterview gewonnen werden. Wie in Unterkapitel 4.2.1 erwähnt, wird anhand diesem Experten auch der erste Interviewleitfaden, die Stichpunktsammlung in Anhang B, getestet, um davon ausgehend den eigentlichen Interviewleitfaden, in Anhang C wiedergegeben, zu erstellen. In weiterer Folge diente der Expertenpool des BOKU-Energieclusters als Grundlage für die Auswahl der Interviewpartner. Zunächst wurden alle Institutionen bzw. Personen, die aufgrund ihres Wirkungsbereiches und nach Ansicht des Verfassers dieser Masterarbeit mit dem Thema Klärschlammverwertung oder Aspekten desselben in Bezug gesetzt werden können ausgewählt und anschließend, wie in Unterkapitel 4.2.1 beschrieben, kontaktiert. Die Identifikation der wesentlichen Fachbereiche/Institute und zu befragenden Personen konnte ausgehend von theoretischen Vorüberlegungen, in Anlehnung an die Ergebnisse der Literaturrecherche, durchgeführt werden. Durch Empfehlungen der Interviewpartner für weitere wichtige und relevant zu befragende Experten, konnten weitere Interviewpartner kontaktiert werden. So konnte der Experte aus dem Fachbereich Düngemittelindustrie aufgrund von Empfehlungen des Experten aus dem Bereich Verfahrenstechnik kontaktiert und interviewt werden. Jedoch waren nicht alle ausgewählten und kontaktierten Experten für ein Gespräch bereit und daher ergibt sich das Bild der effektiv befragten Experten wie in nachfolgender Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Liste der Experten, die im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit zum Thema Klärschlammmonoverbrennung befragt wurden sowie Auflistung deren Fachbereiche und der Befragungstermine (Eigene Darstellung).

Nr.	Datum	Abk. Zitation	Fachbereich des Experten	Charakterisierung der Fachkenntnisse des Experten
1	28.02.2018	EXAW1	Abwasserwirtschaft	ARA-Betreiber
2	25.05.2018	EXAW2	Abwasserwirtschaft	Abwasserreinigung, Gewässerreinigung, Gewässerschutz, Siedlungswasserbau, Abwassertechnik
3	29.05.2018	EXVW1	Verkehrswesen	Verkehrsplanung, Verkehrsmodellierung, Verkehrswirkungen, Systemanalysen, Inter- und Multimodalität, Alternative Antriebe, Verkehrskonzepte
4	01.06.2018	EXUBT1	Umweltbiotechnologie	Abwasserreinigung, Mikrobiologie, Umweltforschung, Ökotechnik, Umweltschutz, Umwelttechnologie
5	04.06.2018	EXRP1	Raumplanung	Umweltschutz, Umwelttechnologie, Raumordnung, Landschaftsplanung, Nachhaltigkeit, Alternativenenergien, Umweltprüfungen
6	05.06.2018	EXVT1	Verfahrens- und Energietechnik	Brennstofftechnologie, Verbrennungstechnik, Allgemeine Verfahrenstechnik, Erneuerbare Energie, Energieträger, Rohstoffe, Wirbelschichttechnik, Energieverfahrenstechnik
7	07.06.2018	EXUWRP1	Umwelt- und Ressourcenpolitik	Politologie, EU-Integration, Politikwissenschaften, Umweltsoziologie, Politikfeldanalyse, Umwelt- und Energiepolitik, Partizipative Demokratie, Stakeholderbeteiligung, Inter- und Transdisziplinarität
8	13.06.2018	EXNH1	Nachhaltigkeit	Umweltforschung, Pflanzenschutz, Biologischer Landbau, Agrarökologie, Nachhaltige Entwicklung, Nachhaltiges Wirtschaften, Tiefenpsychologie, P-Hausahl im ökologischen Landbau, Ökobilanzierung, Umweltpsychologie
9	20.06.2018	EXAF1	Abfallwirtschaft	Abfalltechnologie, Schadstoffemission, Altlastsanierung, Umweltschutz, Technischer Umweltschutz, Nanomaterialien, Entsorgungstechnik, Organische Substanz
10	22.06.2018	EXDÜ1	Düngemittelindustrie	Vertriebsleiter in der Düngemittelproduktion
11	03.07.2018	EXBO1	Bodenbewirtschaftung	Erdwissenschaften, Chemie, Ökotoxikologie, Pflanzenökologie, Recycling, Nachhaltige Technologien, Pflanzenernährung, Bodenkunde, Nachwachsende Rohstoffe, Nachhaltige Landwirtschaft, Bodenökologie, Bodenbelastung, Bodenschutz, Schwermetalle in Böden, Bioverfügbarkeit von Schadstoffen, Bodenmanagement, Phosphor

Mit den in Tabelle 22 angeführten Experten wurde im Schnitt ein einstündiges Gespräch geführt um noch weitere Fachbereiche, die an Klärschlammverwertung und –monoverbrennung beteiligt gehören und den sich aus ihrer Sicht ergebenden Chancen, Barrieren und Herausforderungen zu eruieren.

## 5.1 Stoffstrom und Prozesskette des Klärschlamm

In Abbildung 36 werden die einzelnen Prozesse der Prozesskette bzw. des Stoffstroms des Klärschlamm ersichtlich und Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die sich dabei ergeben, werden hervorgehoben. Dabei wird in Anlehnung an Abbildung 35, im inneren Kreis der Darstellung, die Prozesskette bzw. der Stoffstrom des Klärschlamm und im mittleren Kreis die einzelnen größeren Prozesse dargestellt. Im Unterschied zu Abbildung 35 werden im äußeren Kreis Chancen, Barrieren und Herausforderungen in Bezug auf die einzelnen Prozesse und



Mit der Auflistung in folgender Tabelle 23 wird versucht ein möglichst vollständiges Bild des Stoffstroms und der Prozesskette des Klärschlammes zu geben und stellt damit ein Teilergebnis der FF1 dar. Dabei soll der Entstehungsort des Klärschlammes nicht erst auf der ARA verortet werden, sondern dort wo das Abwasser, also auch die gelösten und festen Inhaltsstoffe, die sich später im Klärschlamm wiederfinden, anfallen. Im Weiteren wird versucht die Prozesskette aus Entstehung/Anfall, Behandlung, Verwertung und Entsorgung des Klärschlammes in Prozessschritte zu kategorisieren. Die Unterteilung des Stoffstroms Klärschlamm in einzelne Prozessschritte erfolgt nach bestehender Infrastruktur, nach Informationen in der Literatur sowie aus eigenen Überlegungen, um ähnliche Vorgänge in einheitliche Bereiche zusammenzufassen.

Tabelle 23: Prozesskette der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung (Eigene Darstellung).

Prozesskette der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung		
Nr.	Prozess	Prozessschritt/Beschreibung
1	ABWASSERPRODUKTION	Kommunen/Industrie/Gewerbe Vermeidung des Schadstoffeintrags
2	ABWASSERSAMMLUNG	Indirekteinleiterkontrollen
3	ABWASSERREINIGUNG KLÄRSCHLAMMPRODUKTION	Mechanisch-physikalische Reinigung (Rechen, Sandfang, Vorklärung)
		Biologische Reinigung (Belebung, Phosphorfällung)
		Nachklärung (Abzug Überschussschlamm)
4	KLÄRSCHLAMMBEHANDLUNG	Stabilisierung
		Entwässerung (inkl. Eindickung und Konditionierung)
		Transport
5	KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG	Trocknung (inkl. evtl. Transport)
		Monoverbrennung
		Abgasreinigung
		Asche - Lagerung - Rückstände
		Ressourcenrückgewinnung
		Wiederverwertung Landwirtschaft/Industrie

Ein Ziel dabei ist es, die sich ergebenden Chancen, Barrieren und Herausforderungen sowie die ermittelten Fachbereiche den einzelnen Prozessschritten, in strukturierter Form, zuordnen zu können und somit in zeitlicher und räumlicher Auflösung das Potenzial der zukünftigen Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung darzustellen.

### 5.1.1 Abwasserproduktion

In nachfolgender Tabelle 24 werden die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die den kommunalen, industriellen und gewerblichen Abwasseranfall, in Bezug auf die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung betreffen, aufgelistet.

Tabelle 24: Prozess 1 Abwasserproduktion – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Porzessschritt	1 ABWASSERPRODUKTION
Chancen	Bewusstsein, Sekundärressourcen
Barrieren	Unwissenheit, Abwassergebühren
Herausforderungen	Information, Vermeidung des Schadstoffeintrags

Hervorzuheben ist, dass die Vermeidung des Schadstoffeintrags ins Abwasser und damit auch in den Klärschlamm vor allem durch Bewusstseinsbildung bei den Abwasserproduzenten zu erreichen ist (EXNH1, 2018). Denn wertvolle Sekundärressourcen, die über das Abwasser in den Klärschlamm gelangen, können wohl nur wirtschaftlich und nachhaltig genutzt werden, wenn die Schadstoffbelastung so gering wie möglich gehalten wird (EXNH1, 2018).

Deshalb stellt Unwissenheit und Unachtsamkeit der Abwasserproduzenten, bei dem was sie ins Abwassersystem einleiten, eine große Barriere für die nachfolgende Klärschlammverwertung dar. Genauso wie auch der Oberflächenabfluss, gelangt er in die Kanalisation und somit in das Abwassersystem, eine wesentliche Barriere darstellt, da er u.U. erheblich zur Schadstoffbelastung des Abwassers, z.B. Schwermetallbelastung, beitragen kann. Ebenso können die Abwassergebühren als Barriere angesehen werden, wenn durch sie die Klärschlammverwertung finanziert werden soll, da sie aus Sicht der Gebührenzahler, der Bürger, möglichst gering sein sollen ((EXAW1, 2018) und (EXAW2, 2018)).

Die größte Herausforderung, für die Optimierung dieses Prozessschrittes, stellt also die umfassende Informationsvermittlung zwischen verschiedenen Akteuren dar, um unnötigen Schadstoffeintrag ins Abwasser zu vermeiden.

### 5.1.2 Abwassersammlung

Indirekteinleiterkontrollen sollen gewährleisten, dass unerwünschte, unerlaubte und die Abwasserreinigung gefährdende Stoffe aus dem Abwassersystem ferngehalten werden ((EXAW2, 2018) und (EXUBT1, 2018)). Dabei ergeben sich für die Klärschlammverwertung einige wesentliche Punkte, in nachfolgender Tabelle 25 aufgelistet.

Tabelle 25: Prozessschritt 2 Abwassersammlung – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Porzessschritt	2 ABWASSERSAMMLUNG
Chancen	Umweltschutz
Barrieren	Aufmerksamkeit, Nachverfolgbarkeit
Herausforderungen	Indirekteinleiterkontrollen - Argument höhere Klärschlamm Entsorgungskosten

Über strengere Kontrollen der Abwassereinleitung soll vermieden werden, dass unerwünschte und schädliche Stoffe ins Abwassersystem gelangen. Dabei sollte jedoch auch der Eintrag von Schadstoffen über den Oberflächenabfluss, also z.B. Straßenentwässerung, berücksichtigt werden. Dies kann auch als Anlass gesehen werden eine gesellschaftliche Diskussion über den Umweltschutz durch Abwasserentsorgung und Klärschlammverwertung in der Bevölkerung anzuregen, bei der jeder individuell durch sein Konsum- und „Entsorgungs“-verhalten einen Beitrag leisten kann ((EXAW2, 2018) und (EXNH1, 2018)). So ist auch die Wirtschaft, das Gewerbe und die Industrie aufgefordert sich in diese Diskussion einzubringen und potenzielle Schadstoffe schon am Anfang eines Produktzyklus zu vermeiden, so könnte z.B. bei vielen

alltäglichen Gebrauchsgegenständen wie Dachrinnen oder Dachabdeckungen die Metallverwendung durch nachhaltigere Stoffe wie Holz oder dergleichen ersetzt werden (EXNH1, 2018).

Eine Barriere hierbei ist die Aufmerksamkeit, die Endverbraucher bei ihrem „Entsorgungsverhalten“ an den Tag legen, genauso aber auch wie Wirtschaftstreibende achtsam sein sollten, bei dem was sie in den Abwasserkanal einleiten ((EXAW2, 2018) und (EXNH1, 2018)). Denn die Nachverfolgung von Schadstoffen, die in eine ARA gelangen, dort aber nicht eintreffen sollten, stellt sich meist als recht schwierig dar. Kann jedoch der Verursacher identifiziert werden, so muss er u.a. die zusätzlichen Kosten der Klärschlamm Entsorgung, die durch die Schadstoffe entstehen, tragen.

Dieses Argument, verwendet als Abschreckung, kann wahrscheinlich in Zukunft nicht mehr verwendet werden, da die Klärschlamm Entsorgung in Monoverbrennungsanlagen, wenn vollständig oxidiert wird, die meisten Schadstoffe eliminiert. Dadurch könnten Indirekteinleiterkontrollen zahlenmäßig abnehmen und somit eine Herausforderung für die ARA darstellen, da sie vermehrt mit unerwünschten Stoffen umgehen muss (EXAW2, 2018). Dieser Umstand könnte neue Regulative nötig machen oder durch solche abgemildert werden (EXRP1, 2018).

### 5.1.3 Abwasserreinigung und Klärschlammproduktion

Die Abwasserreinigung, die hauptsächlich auf kommunalen ARA erfolgt, gliedert sich zumeist in drei Schritte. 1. die mechanisch-physikalische Reinigung, mit Rechen, Sandfang und Vorklärung, bei der durch die Vorklärung Primärschlamm erzeugt wird, der anschließend dem Prozess der Klärschlammbehandlung zugeführt wird; 2. die biologische Reinigung, wozu die durch Mikroorganismen durchgeführte Reinigung und die tertiäre Stufe der biologischen oder chemischen Phosphorelimination gezählt wird. In dieser Stufe werden die meisten org. Abwasserinhaltsstoffe in die Form überführt, in der sie anschließend im Sekundär-, Tertiär- und Überschussschlamm gebunden sind. 3. die Nachklärung, bei der der angefallene Schlamm abgezogen wird und schließlich gemeinsam mit dem Primärschlamm den weiteren Prozessen zugeführt wird. Nachfolgende Tabelle 26 soll die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die bei dem Prozess Abwasserreinigung und Klärschlammproduktion in Bezug auf die Klärschlammbehandlung und –verwertung entstehen, aufzeigen.

Tabelle 26: Prozessschritt 3 Abwasserreinigung und Klärschlammproduktion – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Porzessschritt	3 ABWASSERREINIGUNG & KLÄRSCHLAMMPRODUKTION
Chancen	Ressource-Recovery-Facility, Energieautarkie - Energieauskoppelung (Elektrisch/Thermisch/Chemisch)
Barrieren	Bestehende Infrastruktur
Herausforderungen	Erstellung von Ressourcen-Plan, Verfahrensoptimierung, Schadstoffsenke vs. Ressourcenquelle

ARA haben einen enormen Bedarf an Energie, vor allem für die Reinigung des Abwassers aber auch für die Behandlung von Klärschlamm. Jedoch beinhaltet das Abwasser auch ein beträchtliches Energiepotenzial, das genutzt werden kann und soll. Es bietet sich daher an die ARA in regionale Energiezellen umzuwandeln und sie dadurch in die Energieversorgung, durch Energiegewinnung über KWK und Auskoppelung von Wärme und/oder Strom, zu integrieren (EXRP1, 2018). In den letzten 30 Jahren konnte die Qualität des Klärschlamm enorm verbessert

werden, daraus ergibt sich, dass der Einsatz von Produkten aus der Klärschlammverwertung leichter möglich ist, da die Qualität derselben von der Qualität des Klärschlammes abhängt (EXBO1, 2018). Eine weitere Chance für die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung und die dadurch mögliche energetische Nutzung bietet sich dadurch, dass getrockneter Klärschlamm einen Heizwert im Bereich von Braunkohle aufweist (EXRP1, 2018).

Als Barriere für die später im Prozess ansetzende Ressourcenrückgewinnung wie z.B. Phosphorrecycling, kann angesehen werden, dass häufig auf ARA, der im Abwasser enthaltene Phosphor, durch den Einsatz von Metall-Fällungsmitteln in der dritten Reinigungsstufe, fest gebunden an Metallkomplexe ausgefällt und in den Klärschlamm überführt wird (EXVT1, 2018). Aus diesen Metallkomplexen lässt sich der Phosphor anschließend nur unter erhöhtem Aufwand extrahieren.

Eine wesentliche Herausforderung stellt für ARA die weiter voranzutreibende Energieoptimierung der eingesetzten Verfahren dar und auch das Management von evtl. Energieüberschüssen (EXRP1, 2018). D.h. die Ermöglichung von Energieüberschüssen in Kaskaden, evtl. in Kooperation mit der Industrie, zu nutzen (EXRP1, 2018). Da aber die Klärschlammzusammensetzung und dessen Inhaltsstoffe räumlich und zeitlich sehr unterschiedlich sind, stellt die stoffliche Verwertung zur Wiederverwendung in der Landwirtschaft oder der Düngemittelproduktion eine nicht unwesentliche technologische Herausforderung dar ((EXAW1, 2018), (EXAF1, 2018), (EXBO1, 2018), (EXDÜ11, 2018), (EXNH1, 2018), (EXUBT1, 2018) und (EXVT1, 2018)).

### 5.1.4 Klärschlammbehandlung

Die Klärschlammbehandlung kann grob in die Stabilisierung, Eindickung und Entwässerung des Klärschlammes unterteilt werden. Nicht zu vernachlässigen ist dabei die Konditionierung, der der Klärschlamm vor den einzelnen Schritten unterzogen wird. Genauso wie auch in diesen Prozess ein evtl. Transport von entwässertem Klärschlamm fällt. Tabelle 27 listet die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen der Klärschlammbehandlung aus Sicht der Klärschlammverwertung auf.

Tabelle 27: Prozessschritt 4 Klärschlammbehandlung – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Porzessschritt	4 KLÄRSCHLAMMBEHANDLUNG
Chancen	Erhöhung der brennbaren Inhaltsstoffe (Primärschlammanfall steigern - org. Substanz), Entwässerbarkeit steigern, Volumenreduktion, TS-Gehalt und Heizwert erhöhen, Intermodaler Transport, Standortwahl - dezentral vs. Zentral
Barrieren	Händelbarkeit, Geruchsemissionen, Fäulnis, Konkurrenz um org. Substanz (Kohlenstoff), Rückbelastung ARA (Trübwasser - Nährstoffe), Dezentralität des Abwassersystems - Entfernungen, Bestehende Infrastruktur
Herausforderungen	Nährstoffgehalte (Veränderung der Menge, Konzentration und Form), Vermeidung von Schadstoffeintrag (Konditionierungsmittel - Polymere), effiziente Entwässerungstechnologie, Verkehrs- und Emissionsvermeidung

## **Stabilisierung und Hygienisierung**

Durch die Faulung, also die anaerobe Fermentation, kann der Klärschlamm ausreichend stabilisiert und hygienisiert werden. Genauso kann durch die Faulung das große energetische Potenzial, das in Form chemischer Energie in der org. Substanz des Klärschlammes steckt, teilweise genutzt werden sowie als Vorbehandlung für ein später in der Prozesskette erfolgendes thermochemisches Verfahren die Entwässerbarkeit des Klärschlammes und damit den Heizwert steigern (EXUBT1, 2018).

Eine Herausforderung aus entwicklungstechnischer Sicht stellt die Möglichkeit, die Biogasproduktion mit der Herstellung von Wasserstoff zu koppeln, dar, wodurch in Zukunft Energie in Form von Wasserstoff auf ARA gespeichert werden könnte (EXUBT1, 2018).

## **Eindickung, Konditionierung und Entwässerung**

Die, durch die Entwässerung erreichte Volumenreduktion sollte im Verhältnis zu den dafür eingesetzten Mitteln, Energie und Ressourcen stehen und auch auf die nachfolgende Prozesskette abgestimmt werden. Muss der Klärschlamm transportiert werden, sollte der Wassergehalt möglichst gering sein und um dies zu erreichen stehen effiziente Entwässerungstechnologien wie Zentrifugen u.dgl. zur Verfügung. ((EXAW2, 2018), (EXNH1, 2018), (EXRP1, 2018), (EXUBT1, 2018), (EXUWRP1, 2018) und (EXVW1, 2018))

## **Transport**

Transport von Klärschlamm sollte in einer Ökobilanzierung unbedingt berücksichtigt werden, nicht nur im Hinblick auf die Umweltwirkungen und Emissionen, die dieser verursacht, sondern auch in Hinsicht auf die Wirkungen auf den Verkehr, Zähigkeit und Flüssigkeit, Anzahl der Verkehrstoten usw., im Allgemeinen, die er induziert ((EXAW2, 2018), (EXNH1, 2018), (EXRP1, 2018), (EXUWRP1, 2018) und (EXVW1, 2018)).

### **5.1.5 Klärschlammverwertung**

Die Prozessschritte, die in diesem Unterkapitel abgehandelt und im Folgenden kurz erläutert werden, sind die Klärschlamm-trocknung, Klärschlamm-monoverbrennung, die Abgasreinigung, Management von Restaschen und Rückständen und die Ressourcenrückgewinnung sowie deren landwirtschaftliche und/oder industrielle Verwertung. Tabelle 28 fasst die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen für den Prozess der Klärschlammverwertung zusammen.

Die Trocknung von Klärschlamm ist ein sehr energieintensiver Vorgang, da im Klärschlamm viel Wasser gebunden ist. Deshalb sollte eine Trocknung, wenn nötig, unbedingt im Energiekonzept der ARA sowie der gesamten Prozesskette berücksichtigt werden. Es sollte festgestellt werden, inwieweit sich eine Trocknung für kleinere und mittlere ARA, von energetischer Sicht und in Anbetracht der Emissionen, rechnet, im Vergleich zum Abtransport an größere Anlagen. ((EXAW1, 2018), (EXAW2, 2018), (EXNH1, 2018), (EXRP1, 2018), (EXUBT1, 2018), (EXUWRP1, 2018), (EXVT1, 2018) und (EXVW1, 2018))

Unter Verbrennung von Klärschlamm wird normalerweise die vollständige Oxidation der im Klärschlamm enthaltenen org. Substanz verstanden, es sollte jedoch, wie auch an anderer Stelle schon erwähnt, in Betracht gezogen werden auch alternative thermochemische Verfahren, die keine vollständige Oxidation der org. Substanz erreichen, einzusetzen ((EXAF1, 2018) (EXAW2, 2018), (EXBO1, 2018), (EXDÜ1, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Monoverbrennungsanlagen werden, was die räumliche Standortwahl betrifft, sehr zentral gelegen sein, da sich dadurch für die ARA, als dezentrale Verkehrsquellen, eher kurze Wege ergeben

((EXBO1, 2018) und (EXVW1, 2018)). Die Kapazität dieser Monoverbrennungsanlagen kann sehr groß sein, d.h. u.U. könnte eine Anlage das gesamte Bundesgebiet abdecken (EXBO1, 2018). Oder in einem Bereich der Brennstoffwärmeleistung von ca. 20 MW liegen, um durch ein effizientes Dampfkraftwerk über KWK, d.h. Wärmeauskoppelung, Strom zu produzieren oder den Energieüberschuss evtl. durch Power-to-X Technologien zu speichern (EXVT1, 2018).

Die Abgasreinigung kann mit verfügbaren technischen Verfahren sehr weitreichend, zur Einhaltung hoher Umweltschutzstandards, durchgeführt werden ((EXNH1, 2018) und (EXVT1, 2018)). So hat z.B. China seit diesem Jahr strengere Auflagen und Grenzwerte für die Abgasreinigung als die EU (EXVT1, 2018).

Die bei der Monoverbrennung anfallenden Restaschen und Rückstände, wie z.B. Filterstaub, müssen einer Entsorgung zugeführt werden, wenn sie nicht weiter stofflich verwertet werden können wie z.B. in der Zementproduktion oder der Metallverarbeitung, die ihren Eigenschaften entsprechend als sicher eingestuft werden kann, d.h. keine Schadstoffe in die Umwelt gelangen können (EXAF1, 2018).

Durch die Monoverbrennung von Klärschlamm soll eine Ressourcenrückgewinnung bestimmter Stoffe, die eine Kreislaufwirtschaft unterstützen, ermöglicht werden. Dazu soll durch den Prozess der Klärschlammverwertung sichergestellt werden, dass der Klärschlamm durch die Monoverbrennung so aufbereitet wird, dass die Klärschlammasche anschließend einer weitergehenden stofflichen Verwertung zugeführt werden kann, um Stoffe wie vor allem Phosphor zu extrahieren und wieder dem Wirtschaftskreislauf zuführen zu können. D.h. dass die Stoffe, die durch die Klärschlammverwertung gewonnen werden können, in der Landwirtschaft z.B. als Düngemittel oder auch in der Industrie z.B. als Komponente zur Düngemittelproduktion zum Einsatz kommen sollen.

Tabelle 28: Prozessschritt 5 Klärschlammverwertung – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Porzessschritt	5 KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG
Chancen	Alt. Technologien (HTC), TS-Gehalt, Heizwert, Energieproduktion, Entsorgungssicherheit, Asche, Umweltschutz, Rohstoffdeponie für zukünftige Verwertung, Energieeffizienz Düngemittelproduktion, Versorgungssicherheit, Rohstoff für Düngemittelindustrie, Nährstoffkreisläufe, Sichere Schadstoffsinken, Verwendung in Industrie - Zementproduktion und/oder Metallverarbeitung(recycling), Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit
Barrieren	Rückbelastung der ARA (Kondensat), Geruchsemissionen, Energieintensiv, Emissionen, Investitionskosten, Grenzwerte - Schadstoffe, Ressourcenverbrauch, Ascheerweichung, Transport, Schadstoffe, Flächenverbrauch, Rohstoffpreis, Schadstoffe, Geeignete Deponien, Konzentrationen, Umweltschutz - Vermeidung von Risiko für Mensch und Umwelt
Herausforderungen	Energiekreislauf, Standort (dezentral), Verfahrenswahl, Ressourcen, Schadstoffe, Energieeffizienz, Eignung für die Weiterverwertung, Wirtschaftlicher Betrieb, Geeignete Form - Händelbarkeit, Kompaktier-Komprimierbarkeit, Lagerung, Standardisierung, Aufschluss - Charakterisierung, Entsorgung hoch konzentrierter Abfallströme, Stabilisierung, Auswaschbarkeit, Klärschlamm als Sekundärressource und nicht Abfall

### Trocknung

Die Trocknung von Klärschlamm ermöglicht es den Klärschlamm zu lagern sowie zu transportieren (EXRP1, 2018). Dadurch kann die räumliche Unabhängigkeit von Energiesenken, z.B. für Monoverbrennungsanlagen zur Energieproduktion, erreicht werden (EXRP1, 2018). Durch alternative Technologien wie der HTC lassen sich u.U. auch dezentrale kleinere Lösungen für die Trocknung des Klärschlamm finden, sodass angepasst an die Dezentralität des Abwassersystems auf kleineren bis mittleren ARA der Klärschlamm wirtschaftlich getrocknet, d.h. zu Hydro-Kohle oder Bio-Kohle verarbeitet werden kann. Dadurch müssen weniger große Mengen zu den zentraleren Monoverbrennungsanlagen transportiert werden ((EXAW2, 2018), (EXBO1, 2018), (EXNH1, 2018), (EXRP1, 2018), (EXUBT1, 2018), (EXVT1, 2018) und (EXVW1, 2018)). Die HTC kann nicht nur als Alternative zur Trocknung verstanden werden, sondern auch als alternative Vorbehandlung, durch die mit weniger Energiebedarf die Entwässerbarkeit des Klärschlamm verbessert werden kann, d.h. mit Zentrifugen lässt sich im Anschluss an HTC ein TS-Gehalt von bis zu 60% erreichen (EXVT1, 2018). Dadurch, dass bei der HTC Kohlenstoff umgesetzt wird, d.h. exotherme Reaktionen ablaufen, lässt sich nach anfänglicher Energiezufuhr unter günstigen Betriebsbedingungen evtl. Wärme auskoppeln, d.h. Energie gewinnen. Jedoch muss festgestellt werden, dass die HTC durch die Kohlenstoffumsetzung in Konkurrenz zur Biogas-Produktion durch Faulung und auch zur effizienten Monoverbrennung steht, da diese Verfahren umso ergiebiger sind je mehr Kohlenstoff im Klärschlamm enthalten ist. Die Faulung von Klärschlamm, also die Gewinnung von Methangas, ist umso effizienter umso mehr Kohlenstoff im Ausgangsprodukt enthalten ist und auch die autotherme Monoverbrennung kann nur durch ausreichende Kohlenstoffzufuhr ermöglicht werden. Wobei festgestellt werden kann, dass durch die HTC der Heizwert der produzierten Hydro-Kohle höher als der des Klärschlamm

ist, was für die Verbrennung wieder von Vorteil ist. Als Barriere sowie auch als Herausforderung für die Implementierung von HTC kann angesehen werden, dass derzeit keine großtechnischen Anlagen betrieben werden, u.a. auch deshalb nicht, weil noch keine kontinuierliche Beschickung möglich ist (EXVT1, 2018).

Die Trocknung kann vom energetischen Standpunkt, z.B. Energieeffizienz, aus als ein limitierender Faktor betrachtet werden (EXRP1, 2018). Bei der Trocknung von Klärschlamm entstehen Geruchsemissionen wie z.B. Methanausgasungen, die die Möglichkeit der einsetzbaren Verfahren erheblich einschränken können (EXRP1, 2018). Solare Trocknung z.B. muss wohl in eingehausten Hallen stattfinden, um Geruchsbelästigungen für Anrainer und Arbeitnehmer zu verhindern und dadurch können erhebliche Investitionskosten entstehen, die den Einsatz der solaren Trocknung im Vergleich zu anderen Technologien benachteiligen. Eine Barriere für die Umsetzung der alternativen Technologie HTC stellt die Qualitätsprüfung dar, denn es bedarf einer komplizierten und aufwendigen Analytik sowie technisch sehr gut ausgebildetem Personal. Vor allem der Umgang mit einem Druckreaktor, die Garantie eines sicheren Betriebs, die bessere Reaktorgestaltung sowie der momentane Entwicklungsstand der Technologie bedingen die Umsetzung auf eher größeren ARA. Genauso kann der Abwasseranfall durch HTC als evtl. Barriere angesehen werden, da u.U. polyaromatisierte Kohlenwasserstoffe und org. Säuren darin enthalten sein können, genauso wie ca. 30-50% des Phosphors darin gelöst sind, was für den Betrieb der ARA problematisch sein kann. Da das anfallende Abwasser aber auf jeden Fall zu reinigen ist, sollte der Standort der HTC wohl direkt auf der ARA sein. Außerdem entstehen in geringen Mengen auch Ausgasungen wie Methan und Kohlenstoffdioxid, was u.U. eine Reinigung der "Abgase" erforderlich macht. Sollte jedoch die Anlage auf der ARA sein und sollte dort auch eine Monoverbrennung errichtet werden, könnten diese in der Verbrennung evtl. als Sekundärluft eingespeist werden (EXVT1, 2018). Auch für konventionelle Trocknung ist zu bedenken, dass dadurch enorme Mengen an Kondensat anfallen, die in der ARA behandelt werden müssen und evtl. eine starke Belastung für den ordentlichen Betrieb der Abwasserreinigung darstellen können (EXUBT1, 2018).

Die Trocknung des Klärschlammes stellt einen sehr energieintensiven Prozess dar und optimale verfahrenstechnische Lösungen dafür zu finden, um energieeffizientes Trocknen und eine positive Energiebilanz des gesamten Prozesses der Klärschlammverwertung zu ermöglichen, ist eine große Herausforderung (EXRP1, 2018). Wenn ausreichend Flächen vorhanden sind, kann die dezentrale solare Trocknung als geeignetes Verfahren eingesetzt werden (EXRP1, 2018). Die räumliche Anordnung von Trocknungsanlagen sollte optimal an die Standorte der ARA, die Logistik und auch an die Standorte der Monoverbrennungsanlagen angepasst werden (EXRP1, 2018).

### **Monoverbrennung**

Die Monoverbrennung bietet die Chance eine sichere Entsorgung des Klärschlammes, bei möglicher Energie- und Ressourcenrückgewinnung, z.B. Phosphor und Kalium, zu garantieren (EXAF1, 2018). Sowie durch die Verbrennung von Klärschlamm, wozu die Technologie der Wirbelschicht am besten geeignet und erprobt ist sowie am häufigsten angewendet wird, eine Verringerung des Volumens erreicht werden kann, wodurch weniger Klärschlamm entsorgt werden muss (EXVT1, 2018). Werden die Monoverbrennungsanlagen an zentralen Standorten errichtet, d.h. um den Klärschlamm der großen ARA zu verwerten, können größere Dimensionen realisiert werden, die sich effizienter und wirtschaftlich betreiben lassen (EXVT1, 2018). Aus alternativen thermochemischen Verfahren, z.B. der HTC, der Pyrolyse oder der Vergasung lassen sich Produkte wie Hydro-Char oder Bio-Char generieren, die die im Klärschlamm

enthaltenen Nährstoffe in eine gering wasserlösliche Form überführen und in der Interaktion mit Pflanzen als Senke gut nachgeliefert werden können ((EXBO1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Deshalb eignen sie sich gut für den Einsatz in der Landwirtschaft oder in der Düngemittelproduktion. Durch den Erhalt des Kohlenstoffs, in Produkten aus alternativen thermochemischen Verfahren und deren Verwendung in der Landwirtschaft, kann der Kohlenstoff im Boden gespeichert werden (EXBO1, 2018). Dadurch lässt sich sozusagen ein Ad-On in der Gesamtbilanz der Klärschlammverwertung generieren, da durch die Kohlenstofffixierung ein Beitrag zum Kampf gegen den Klimawandel geleistet wird (EXBO1, 2018). Ebenso bieten alternative thermochemische Verfahren die Möglichkeit, die Klärschlammverwertung dezentraler zu realisieren und dabei durch regional ausgerichtete kleinere Anlagen eine nachhaltigere Wirtschaftsweise in der Region zu erlauben, genauso wie partizipative Beteiligung an der Umsetzung von solchen Anlagen besser zu gewährleisten ((EXAW2, 2018), (EXBO1, 2018), (EXDÜ11, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Die Monoverbrennung von Klärschlamm mit Hilfe von Wirbelschichtöfen bietet die Chance den Klärschlamm nur bis zu einem TS-Gehalt von ca. 45% entwässern zu müssen, da diese Technologie für höhere Wassergehalte geeignet ist (EXAW1, 2018). Dadurch kann u.U. einiges an Energie eingespart werden, da nicht die gesamte Klärschlammmenge getrocknet werden muss und ein Gemisch aus getrocknetem und entwässertem Klärschlamm eingesetzt werden kann (EXAW1, 2018). Genauso könnten die durch HTC möglichen TS-Gehalte ausreichend sein. Wichtige Parameter für die Planung und Umsetzung einer Strategie zur Klärschlammverwertung sind vor allem das Potenzial zur externen Energieabgabe und die Energieeffizienz der Phosphorrückgewinnung (BÄTTIG, et al., 2011). Da im BAWP 2017 die Verbrennung von Klärschlamm als die am besten geeignetste Technologie zur Klärschlammverwertung betrachtet wird, kommen alternative thermochemische Verfahren nicht in Frage, da mit dem Begriff Verbrennung die vollständige Oxidation der org. Substanz im Klärschlamm gemeint ist und somit alle Verfahren, die die org. Substanz nicht vollständig oxidieren ausgeschlossen sind (EXBO1, 2018). Durch die Zerstörung der org. Substanz, durch die vollständige Oxidation, wird die Schließung von Nährstoffkreisläufen verhindert, da auch die Nährstoffe, z.B. Kohlen- und Stickstoff, mit dem Abgas in die Atmosphäre emittiert werden ((EXAF1, 2018), (EXBO1, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXVT1, 2018)). An dieser Stelle soll festgehalten werden, dass die vollständige Oxidation der org. Substanz dichotome Auswirkungen erzeugt, da sie die eben erwähnte Barriere darstellt aber gleichzeitig auch eine der wesentlichsten Chancen für die Sicherheit bezüglich Vermeidung von Schadstoffaustrag bedeutet. Es wird nämlich davon ausgegangen, dass durch die vollständige Oxidation der org. Substanz alle org. Schadstoffe, die im Klärschlamm enthalten sind, mineralisiert und dadurch eliminiert werden ((EXAF1, 2018) und (EXUBT1, 2018)). An dieser Stelle soll auch erwähnt werden, dass für thermochemische Verfahren, die bei niedrigeren Temperaturen, als zur vollständigen Oxidation nötig, ablaufen nicht einwandfrei geklärt ist, ob nicht erst durch die unvollständige Oxidation neue Schadstoffkomponenten entstehen (EXUBT1, 2018). Eine wesentliche Barriere für die effiziente und nachhaltige Gestaltung der Monoverbrennung von Klärschlamm sind die Schadstoffgehalte der erzeugten Asche, der daraus erzeugten Düngemittel, der Abgase und Emissionen ((EXBO1, 2018), (EXDÜ11, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Für die Nutzung und evtl. Auskoppelung von Wärme aus dem Verbrennungsprozess gilt, dass dadurch keine Verschlechterung der Emissionen also der Abgase herbeigeführt wird (EXNH1, 2018). D.h. eine Barriere für die Wärmenutzung stellt deren Beeinträchtigung der Abgasreinigung dar und inwieweit durch Wärmeauskoppelung, also Temperaturabsenkung des Abgasstroms, Schadstoffe erst erzeugt werden.

Eine Herausforderung ist die Umsetzung von energieeffizienten Technologien zur thermochemischen Behandlung von Klärschlamm. Genauso wie die Standortwahl für Monoverbrennungsanlagen, die wahrscheinlich im Einzugsgebiet von bis zu 15 ARA liegen wird, also mittlere Großstädte oder evtl. ARA größer 50.000 EW für die Umsetzung in Frage kommen (EXRP1, 2018). Bei der Standortwahl ist außerdem die Erreichbarkeit der Anlagen, also die Logistik und im speziellen der Transport von Klärschlamm und –aschen, ausschlaggebend (EXRP1, 2018). Denn wenn Klärschlamm gebündelt werden kann, vor den einzelnen Prozessschritten Trocknung, Monoverbrennung und Ressourcenrückgewinnung, kann auch die Effizienz des nachfolgenden Schrittes gesteigert werden (EXRP1, 2018). Daher kann auch die Errichtung einer Monoverbrennungsanlage pro Bundesland oder Gruppe von Bundesländern logistische Vorteile bringen (EXVW1, 2018). Auf jeden Fall sollte bei der Standortwahl die später durchzuführende Ressourcenrückgewinnung, in diesem Fall Phosphorrückgewinnung, mitberücksichtigt werden (EXAW2, 2018). Für Betreiber sollte die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Betriebs gewährleistet werden können (EXVT1, 2018). Für die Planung von z.B. Monoverbrennungsanlagen ist in vielen Fällen der Beschluss durch einen Gemeinderat ausreichend, im Sinne von Top-down-Planung, auch wenn für die Umsetzung und Genehmigung dann evtl. ein UVP-Verfahren durchgeführt werden muss (EXUWRP1, 2018). Doch gleichzeitig soziale, gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen kann als nicht unwesentliche Herausforderung betrachtet werden. Der parallele oder kombinierte Einsatz von verschiedenen Technologien oder Verfahren zur thermochemischen Behandlung von Klärschlamm, sowie auch der Einsatz der einzelnen Technologien für sich, muss sich der Herausforderung stellen, Bedingungen wie effizientes Recycling ermöglichen, Kohlenstoff-Nährstoff-Erhalt erlauben und Schadstoffbelastung vermeiden, zu erfüllen (EXBO1, 2018). Nährstoffrückgewinnung aus Klärschlammaschen, wie z.B. Phosphorrückgewinnung, stellt ein sehr aufwendiges und energieintensives Verfahren dar, da die Nährstoffe in der Asche in einer sehr festen Matrix gebunden sind und unter enormem Aufwand und Einsatz von Chemikalien extrahiert werden müssen (EXBO1, 2018). Dies stellt eine der größten technologischen Herausforderungen für die Klärschlammverwertung dar. Deshalb sollten alle vorhandenen Technologien einer Prüfung unterzogen werden, um herauszufinden ob nicht ein anderes Verfahren/Technologie existiert oder weiterentwickelt werden kann, durch das mit geringerem Aufwand Endprodukte erzeugt werden können, deren Schadstoffgehalte in heute schon tolerierbaren Formen, Mengen und Konzentrationen vorliegen oder leicht überführt werden können ((EXAW2, 2018), (EXBO1, 2018) und (EXVT1, 2018)).

### **Abgasreinigung**

Die Festsetzung der einzuhaltenden Grenzwerte bei der Klärschlammmonoverbrennung hängt also wesentlich von gesellschaftspolitischen Entscheidungen ab ((EXVT1, 2018) und (EXBO1, 2018)). Für die Abgasreinigung stehen verschiedenste Verfahren und Technologien zur Verfügung, die u.a. auch in der Müllverbrennung eingesetzt werden und somit zu den BAT der EU gehören (EXUBT1, 2018).

Einschränkend ist natürlich, dass je vollständiger das Abgas gereinigt wird umso mehr Energie und Ressourcen verbraucht werden (EXNH1, 2018). D.h. auch, dass die Abgasreinigung aus technologischer Sicht sehr umfassend sein kann, jedoch von wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Ambitionen, die Bereitschaft höhere Kosten in Kauf zu nehmen, abhängig ist (EXVT1, 2018).

Die Emissionen Geruch, Lärm, Rauch und Abgas, evtl. auch durch den Transport verursacht, in einem akzeptierbaren Rahmen zu halten, stellt durchaus eine wesentliche Herausforderung an

das Akteursmanagement sowie auch an die Verfahrenstechnik dar. Da die Abgasreinigung ein technisch komplizierter Prozess ist, der bei nur geringsten Änderungen oder Störungen zu Umweltbeeinträchtigungen oder Nichteinhaltung der gesetzlich erlaubten Grenzwerte führen kann, ist die Garantie eines ordentlichen Betriebs eine große Herausforderung (EXUBT1, 2018). Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist ein ordentlicher Betrieb und ordentliche Wartungen sowie die garantierte Grenzwerteinhaltung auf größeren Anlagen einfacher zu erreichen (EXUBT1, 2018).

### **Management von Aschen und Rückständen**

Eine Chance ergibt sich dadurch, wenn vor der Umsetzung der Klärschlammverwertung das Ziel und der Zweck der Aschenutzung, d.h. der Nachnutzung geklärt ist, die Strategie der Klärschlammverwertung gezielt darauf ausgerichtet werden kann, genauso wie die Verträglichkeit der Nutzung, ob die Nutzung in der Fläche verteilt stattfinden kann, berücksichtigt werden kann (EXRP1, 2018). Restaschen und Filterstäube können nur durch aufwendige physikalisch-chemische Aufbereitungsverfahren oder Tage deponiert werden (EXAF1, 2018). Dies stellt auch für die Option der Zwischenlagerung von Klärschlammaschen auf Monodeponien, für die spätere Ressourcenrückgewinnung, eine technologische, wirtschaftliche wie soziale Herausforderung dar (EXAF1, 2018). Denn es müssen geeignete und große Flächen bereitgestellt werden, die anderen Nutzungsarten entzogen werden, sowie die Handhabung des staubförmigen Produkts Asche schwierig ist und evtl. gefährlich für Arbeitnehmer ((EXAF1, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXRP1, 2018)).

Da die Nährstoffe in der Klärschlammasche häufig in einer Form gebunden sind, in der sie für die Pflanze schlecht verfügbar sind, d.h. sehr schwer aufgenommen werden können, ist eine Weiterverarbeitung in den meisten Fällen notwendig um sie in der Landwirtschaft oder der Düngemittelproduktion einsetzen zu können (EXBO1, 2018). Sollte angestrebt werden die Klärschlammaschen einer Monodeponie zuzuführen, um erst in einem späteren Moment Ressourcenrückgewinnung zu betreiben, muss festgestellt werden, dass für die Standortwahl für die Monoverbrennungsanlagen die Standorte der ARA ausfallen, denn sie sind meist in der Nähe von Fließgewässern und dadurch kann kein ausreichender Hochwasserschutz nach Deponiestandards erreicht werden (EXRP1, 2018).

Eine Herausforderung besteht darin zu klären, ob die Asche gelagert, d.h. monodeponiert werden soll und wann sie einer Ressourcenrückgewinnung zugeführt werden soll/kann (EXRP1, 2018).

### **Ressourcenrückgewinnung**

Neben der möglichen Einnahmequelle durch die Sekundärressource Phosphor, könnte bei der Klärschlammverwertung auch momentan schon ein Mehrwert erzeugt werden, wenn die Verwertungsanlagen und einzelnen Prozessschritte aufeinander abgestimmt, optimiert und energieeffizienter gestaltet würden und dadurch Energie gewonnen wird, die zum einen die Energiekosten der Anlagen selbst mindern würde oder evtl. auch zu netto Einnahmen führen könnte, wenn Energie abgegeben werden kann. Zu beachten ist auch, dass die Kosten der Ressourcenrückgewinnung im Ganzen gemindert werden könnten, wenn nicht nur eine Ressource, Phosphor, recycelt wird, sondern gleichzeitig auch andere wertvolle Ressourcen generiert werden. D.h. es sollte eine umfassendere Wertschöpfungskette etabliert werden, um so die Kosten auf die einzelnen erzeugten Produkte verteilen zu können und in Summe mehr Einnahmen zu generieren und Kosten zu senken (EXDÜ1, 2018).

Es sollte darauf geachtet werden, dass Nährstoffe und Mikronährstoffe in der Klärschlammasche, bei direktem Einsatz in der Landwirtschaft, oder im Düngemittel bei indirektem Einsatz, in einer Form gebunden sind, sodass sie von der Pflanze leicht aufgenommen werden können, schwer

auswaschbar sind und leicht nachlieferbar, d.h. von der festen in die flüssige Bodenphase wechseln können (EXBO1, 2018).

## 5.2 An Klärschlammverwertung beteiligte Fachbereiche und die sich aus ihnen ergebenden Chancen, Barrieren und Herausforderungen

Aus den Gesprächen mit den Experten ergeben sich viele verschiedene Fachbereiche, die an Klärschlammverwertung und –monoverbrennung beteiligt sind oder sein sollten. Die genannten Fachbereiche können in 10 Fachbereichs-Kategorien, die in nachfolgender Tabelle 29 wiedergegeben sind, zusammengefasst werden. Die Abgrenzung der einzelnen Fachbereiche ist nicht als “scharf und strikt” zu verstehen, da sich natürlicherweise Überschneidungen ergeben, aber um die Komplexität des “Gebiets” der Klärschlammverwertung und –monoverbrennung zu fassen, werden die Relationen und Interaktionen, die sich zwischen den einzelnen Fachbereichen ergeben, versucht im Nachfolgenden zu beschreiben.

Tabelle 29: Geordnete Kategorien der Fachbereiche (Eigene Darstellung).

Nr.	Kategorie/Fachbereich	Nr.	Kategorie/Fachbereich
1	RESSOURCENMANAGEMENT	6	VERFAHRENSTECHNIK
2	AKTEURSMANAGEMENT	7	ABWASSERWIRTSCHAFT
3	LANDWIRTSCHAFT	8	ABFALLWIRTSCHAFT
4	ENERGIEWIRTSCHAFT	9	LOGISTIK
5	NATURSCHUTZ/ UMWELTSCHUTZ	10	RAUMPLANUNG

Die Anordnung der einzelnen Fachbereiche in vorstehender Tabelle 29 erfolgt willkürlich und nach keiner besonderen Gewichtung. Damit soll explizit darauf hingewiesen werden, dass es sich aus gesamtheitlicher, gesellschaftlicher Perspektive um gleichrangige und gleichwichtige Fachbereiche handelt, die auch in Bezug auf die Klärschlammverwertung und Monoverbrennung durch keine Bevorzugung charakterisiert werden können, da die Klärschlammverwertung und Monoverbrennung als integraler Prozess in der Gesellschaft angesehen werden soll. Jedoch ergeben sich aus den einzelnen Fachbereichen sehr unterschiedliche Chancen, Barrieren und Herausforderungen in Bezug auf eine nachhaltige Klärschlammverwertung, die für die Umsetzung der Klärschlammverwertung in Monoverbrennungsanlagen unterschiedlich wichtig sind. Diesem Punkt wird im Folgenden Rechnung getragen.

Nachstehende Tabelle 30 soll die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen der Monoverbrennung von Klärschlamm vorab zusammenfassend darstellen.

Tabelle 30: Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die sich für die Monoverbrennung von Klärschlamm ergeben (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	Monoverbrennung von Klärschlamm
Chancen	Nachhaltigkeit --> Energie- und Ressourcengewinnung
Barrieren	Umweltschutz, wirtschaftlicher Betrieb
Herausforderungen	Entsorgungssicherheit

Wie ersichtlich stellt die größte Chance die Energie und Ressourcengewinnung, d.h. die energetische und stoffliche Nutzung des Klärschlamm dar ((EXAF1, 2018), (EXAW2, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Denn dadurch kann ein Mehrwert aus dem Klärschlamm

generiert werden, der unterschiedlichsten Akteuren, wie z.B. ARA-Betreibern, Gemeinden, Landwirten, Bürgern usw. zugutekommt.

Eine wesentliche Barriere ist der Umweltschutz, in dem Sinne, dass negative Auswirkungen auf die Umwelt, Natur und Mensch unbedingt vermieden werden sollen und dadurch sich Einschränkungen für bestimmte Verfahren oder Strategien der Klärschlammverwertung ergeben, z.B. die landwirtschaftliche Direktausbringung von Klärschlamm soll vermieden werden oder die Reinigung von Abgasen aus der Verbrennung soll sehr gründlich durchgeführt werden und kann u.U. einen wirtschaftlichen Betrieb der Monoverbrennungsanlage gefährden ( (EXAF1, 2018), (EXAW1, 2018), (EXBO1, 2018), (EXNH1, 2018), (EXRP1, 2018), (EXUBT1, 2018), (EXUWRP1, 2018) und (EXVT1, 2018)).

Also die Herausforderung besteht darin, unter weitestgehender und umfassender Nutzung des Klärschlammes, die Entsorgungssicherheit für denselben in der Zukunft zu garantieren ((EXAF1, 2018) und (EXAW1, 2018)). Daraus ergeben sich technologische, wirtschaftliche und soziale Herausforderungen, die in einem gemeinsamen Spannungsfeld gemeistert werden sollen und können. Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen bezogen auf die einzelnen identifizierten Fachbereiche werden vorab, also vor der detaillierten Beschreibung der einzelnen Fachbereiche im Folgenden, in Abbildung 37, zusammengefasst. Dabei wird in Abbildung 37, in Anlehnung an Abbildung 35, im inneren Kreis die Prozesskette bzw. der Stoffstrom des Klärschlammes und im äußeren Kreis die einzelnen Fachbereiche wiedergegeben. Im Unterschied zur Abbildung 37 werden im mittleren Kreis die, aus Sicht des Verfassers vorliegender Masterarbeit, wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen, abgekürzt mit den Anfangsbuchstaben C, B und H, aus der Perspektive der einzelnen Fachbereiche in Bezug auf den gesamten Prozess der Klärschlammbewirtschaftung wiedergegeben. Die Erläuterung und Beschreibung der einzelnen Fachbereiche und der aus deren Perspektive sich ergebenden Chancen, Barrieren und Herausforderungen in Bezug auf die Klärschlammbewirtschaftung folgt in diesem Unterkapitel nach Abbildung 37.



Thema Klärschlammverwertung, im speziellen durch Monoverbrennung, in verschiedene Cluster zusammengefügt werden können, über die die Erstellung der Strategie zur zukünftigen Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung erfolgen sollte. Jedoch kann im Rahmen dieser Masterarbeit auf die Vorteilhaftigkeit und aussichtsreiche Vernetzung der Fachbereiche, evtl. auch im Sinne einer Sensitivitätsanalyse nach Vester (2005) für die effiziente und von allen beteiligten Akteuren akzeptierte Umsetzung der Klärschlammverwertung nur mit Abbildung 38 hingewiesen werden.

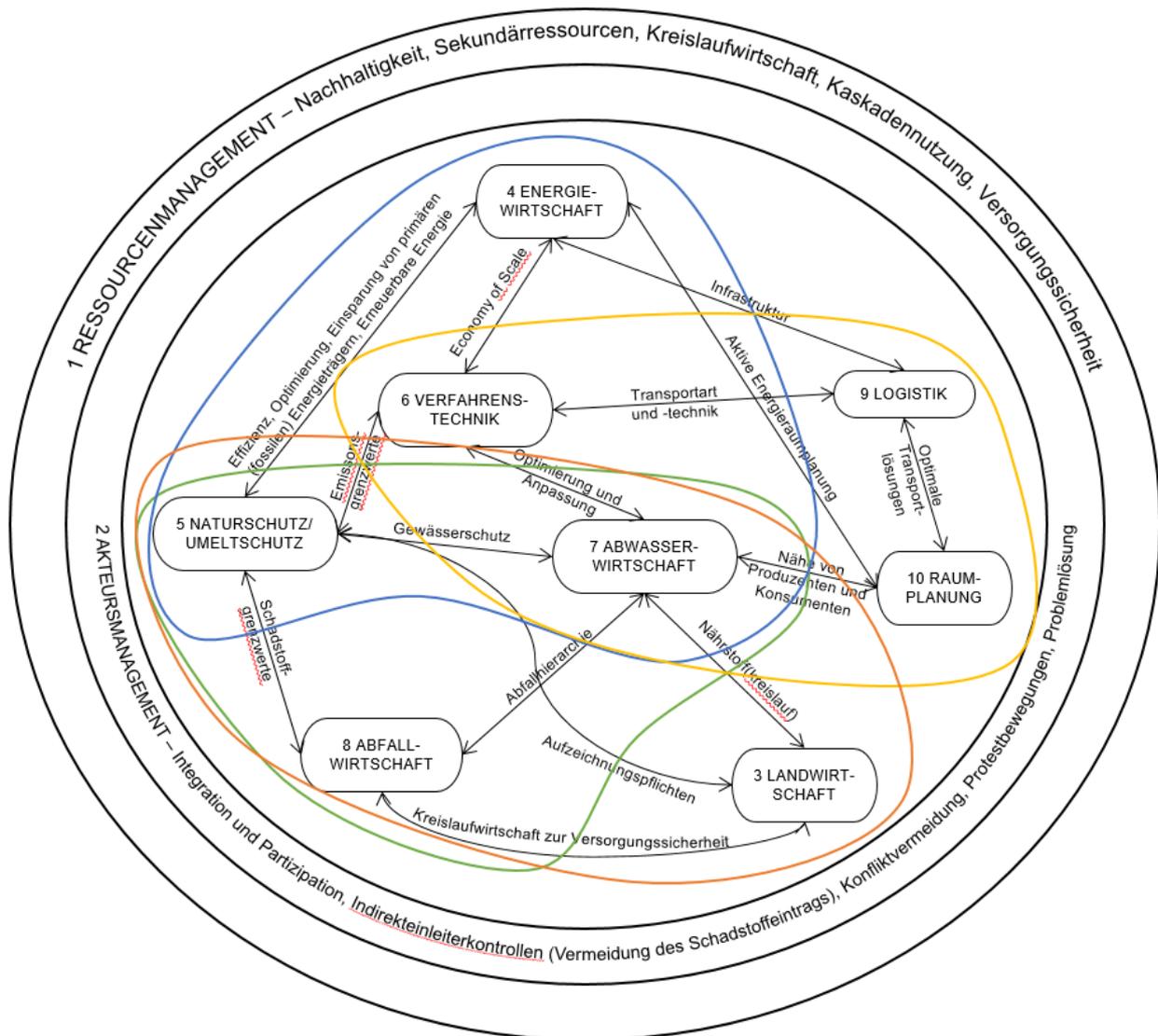


Abbildung 38: Darstellung der Fachbereichs-Cluster und deren Verbindungen (Eigene Darstellung).

Nun folgt die Beschreibung der einzelnen Fachbereiche, deren Charakterisierung in Kategorien, und der sich aus den einzelnen Bereichen ergebenden größten Chancen, Barrieren und Herausforderungen.

### 5.2.1 Ressourcenmanagement

Klärschlamm als Schadstoffsenke menschlicher Ausscheidungen enthält neben potenziellen, für Mensch und Umwelt gefährlichen Stoffen, auch durchaus wertvolle Stoffe und Elemente, die als Sekundärressourcen, durch Ressourcenrecycling und –verwertung wiedergewonnen, genutzt werden können und sollen ((EXAF1, 2018), (EXAW1, 2018), (EXBO1, 2018), (EXDÜ1, 2018)

und (EXVT1, 2018)). Nur eine umfassende Betrachtung und Aufnahme, die über zeitliche und räumliche Grenzen hinweg, die Verfügbarkeit, den Bedarf und den Einsatz von verschiedensten Ressourcen feststellt und aneinander anpasst, kann einen nachhaltigen und gerechten Umgang mit knappen Ressourcen ermöglichen ((EXAW2, 2018), (EXBO1, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXRP1, 2018)). So sind die unterschiedlichsten Sekundärressourcen, die aus dem Klärschlamm gewonnen werden können, nur von Nutzen, wenn Abnehmer für die jeweiligen Stoffe vorhanden sind, d.h. ihre Gewinnung in ein räumliches und zeitliches Ressourcenmanagement integriert ist ((EXUBT1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Viele Akteure und Stakeholder aus verschiedensten Fachbereichen befassen sich mit der Thematik "Ressourcen" (Nutzung, Bereitstellung, Gewinnung, Recycling usw.), jedoch sollte, aus Sicht des Verfassers der vorliegenden Arbeit, ein Fachbereich Ressourcenmanagement, die Integration und Zusammenarbeit dieser Akteure und Stakeholder ermöglichen sowie darüber hinausgehend sollten zentrale Stellen eingerichtet werden, z.B. öffentliche Ämter auf lokaler, regionaler, staatlicher sowie internationaler Ebene, die sich konkret mit dem Ressourcenmanagement befassen, also z.B. den räumlich sowie zeitlich unterschiedlichen Bedarf und die Verfügbarkeiten an Ressourcen erheben, die Verteilung und den Einsatz derselben regeln und steuern um einen nachhaltigen Umgang mit knappen Ressourcen aus integraler Sicht zu ermöglichen (EXAW2, 2018).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 31 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 31: 1 Ressourcenmanagement – Chancen, Barrieren, Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	1 RESSOURCENMANAGEMENT
Chancen	Stoffliche und energetische Nutzung von Sekundärressourcen, Schließung von Nährstoffkreisläufen über Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung, Schonung von Primärressourcen, Versorgungssicherheit
Barrieren	Preise für Sekundärressourcen, Evtl. kein wirtschaftlicher Betrieb des Recyclingverfahrens möglich, Räumliche Verteilung
Herausforderungen	Schadstoffbelastung gering halten, Schadstoffaustrag in die Umwelt vermeiden, Standardisierung der Produkte aus der Klärschlammverwertung, Wertschöpfung

Als Chance ergibt sich, dass Klärschlamm als Quelle für Sekundärressourcen stofflicher wie energetischer Art genutzt werden kann (EXAF1, 2018). Durch die stoffliche Verwertung von Klärschlamm können Sekundärressourcen generiert werden wie z.B. Phosphorprodukte zur Düngemittelproduktion, die evtl. auch einen finanziellen Gewinn für den Klärschlammverwerter darstellen ((EXAW1, 2018) und (EXDÜI1, 2018)). Dadurch ergibt sich die Möglichkeit die regionale Wirtschaft, vor allem Land- und Lebensmittelwirtschaft zu stärken indem die Unabhängigkeit von Rohstoffimporten, wie z.B. Rohphosphat aus eher konfliktreichen Staaten, erhöht wird ((EXAW1, 2018), (EXBO1, 2018), (EXDÜI1, 2018), (EXNH1, 2018), (EXRP1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Genauso wie die Versorgung mit lebensnotwendigen Stoffen, Phosphorvorkommen sind begrenzt und neigen sich dem Ende zu (EXNH1, 2018), gewährleistet werden kann (EXAW1, 2018). Dabei können Stoffe und Elemente wie Phosphor, Kohlenstoff, Stickstoff, Silizium, Erdalkali- und Alkalimetalle z.B. Natrium, Kalium, Calcium, oder auch Magnesium, sowie andere Metalle durch Elutions- und Extraktionsprozessen einer stofflichen Verwertung zugeführt werden um u.U. auch einen Beitrag zur Schließung von Nährstoffkreisläufen zu leisten, auch indem eine Rückführung der Nährstoffe von der Stadt aufs

Land ermöglicht wird ((EXAF1, 2018), (EXBO1, 2018), (EXDÜ11, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Gleichzeitig kann damit die Versorgungssicherheit und Resilienz (EXRP1, 2018) in Bezug auf problematische oder seltene Stoffe, sogenannte „kritische Rohstoffe“ (KRÜGER & ADAM, 2014, S. 42), die von hoher ökonomischer Bedeutung sind, gesteigert werden. So sind z.B. Cadmiumbelastungen der Produkte aus der Klärschlammverwertung oft nicht so hoch wie die zunehmende Cadmiumbelastung von Rock-Phosphaten (EXBO1, 2018). Daraus ergibt sich die Chance, die knappe Ressource Phosphor, hauptsächlich gewonnen aus Phosphatmineralien zu ersetzen und dabei sogar die Qualität der Düngemittel zu verbessern und ein möglicher zukünftiger Versorgungsengpass verhindert werden ((EXAW1, 2018), (EXDÜ11, 2018) und (EXNH1, 2018)). Es kann auch ein wesentlicher Beitrag zur Schonung von Primärressourcen geleistet werden, da zum einen Elemente wie z.B. Phosphor nicht mehr nur aus Phosphorlagerstätten gewonnen werden müssen und zum einen Stoffe wie Erdöl und –gas, also fossile Treibstoffe zu einem bestimmten Teil ersetzt werden können ((EXDÜ11, 2018) und (EXVT1, 2018)). Für eine energetische Verwertung, die kaskadisch erfolgen kann (EXRP1, 2018), d.h. von der energetisch hochwertigsten Form “elektrische Energie”, bis zu niederen energetischen Formen wie Niedertemperatur-Wärme, ist die gebundene chemische Energie im Klärschlamm, vor allem der gebundene org. Kohlenstoff, interessant (EXVT1, 2018). Jedoch sollte der Heizwert hoch genug für eine autotherme Verbrennung sein, d.h. der Wassergehalt sollte möglichst niedrig sein und der Gehalt an org. Verbindungen möglichst hoch ((EXAW1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Wenn durch die Klärschlammverwertung Produkte, die entweder heizwertreich sind oder als Rohstoffe für Produktionsprozesse verwendet werden können, dann sollten sich Synergien mit der Metall- und Zementindustrie oder der Düngemittelindustrie resp. ergeben ((EXVT1, 2018), (EXDÜ11, 2018) und (EXAF1, 2018)). D.h. konkret, dass Produkte wie Bio-Kohle, Syngas oder auch Bio-Öle evtl. in der Schwerindustrie Verwendung finden können. Klärschlammaschen können einer Aufbereitung unterzogen werden um anschließend in Produktions- und Industrieprozessen eingesetzt zu werden, evtl. auch als metallhaltige Rohstoffe ((EXAW1, 2018) und (EXAF1, 2018)). Produkte die einen hohen Gehalt an Nährstoffen wie Phosphor oder Mikronährstoffen wie Zink usw. aufweisen sollten möglichst in einer solchen Form anfallen, in der sie von Düngemittelproduzenten verwendet werden können ((EXBO1, 2018) und (EXDÜ11, 2018)). Es bietet sich die Chance, dass Produkte aus der Klärschlammverwertung, in derselben Region wo sie anfallen (EXNH1, 2018), als Komponenten für die Formulierung von Düngemitteln eingesetzt und somit industriell hochskalierbare Produkte erzeugt werden (EXBO1, 2018). Dadurch kann ein Beitrag zur Schließung der Nährstoffkreisläufe geleistet werden, die regionale Wirtschaft und Landwirtschaft gestärkt und die Düngemittelproduktion nachhaltiger und energieeffizienter gestaltet werden ((EXBO1, 2018), (EXDÜ11, 2018) und (EXNH1, 2018)). Ebenso können dadurch sehr große Transportstrecken, Überseetransport von Rohstoffen, und somit negative Umweltwirkungen und evtl. auch unberücksichtigte Externalitäten, wie unmenschliche Arbeitsverhältnisse und Umweltverschmutzungen in der Rohstoffgewinnung, vermieden werden (EXDÜ11, 2018). Diese negativen Effekte können so nicht nur über den Rohstoffpreis berücksichtigt und vermieden werden (EXDÜ11, 2018). Daraus ergibt sich eine weitere Chance für die Klärschlammverwertung und zwar können dadurch die Kosten für die Klärschlamm Entsorgung gesenkt werden, da die Produkte aus der Klärschlammverwertung, gegen Bezahlung, als Wertstoffe in der Düngemittelindustrie eingesetzt werden können (EXDÜ11, 2018). Staatliche oder öffentliche Förderungen als Anreize zur Entwicklung und Implementierung von Technologien zur Klärschlammverwertung und Nährstoffrückgewinnung bieten die Chance, die Industrie zu motivieren umweltrelevante Maßnahmen zu ergreifen und umzusetzen und sie für ihren Beitrag zur Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung dadurch zu belohnen ((EXDÜ11, 2018) und (EXVT1, 2018)).

Manche Stoffe im Klärschlamm die evtl. interessant zu nutzen wären, können derzeit nicht recycelt werden, da die Stoffe in zu geringen Mengen oder Konzentrationen enthalten oder die Recyclingverfahren zu aufwendig sind, als dass ein wirtschaftlicher Betrieb möglich wäre (EXAW1, 2018). Dies kann für manche Stoffe, wie z.B. bestimmte Metalle, momentan als unüberwindbare Barriere angesehen werden, da noch nicht einmal ansatzweise wirtschaftliche Recyclingverfahren zur Verfügung stehen (EXAW1, 2018) (s.a. (DEHOUST, et al., 2016) und (BUNGE, 2016)). Für andere Stoffe wie z.B. Phosphor kann damit gerechnet werden, dass in nächster Zukunft wirtschaftliche Recyclingverfahren zur Verfügung stehen werden (EXVT1, 2018). Doch auch um Phosphorrückgewinnungsanlage, die Klärschlammaschen recyceln, wirtschaftlich betreiben zu können, ist eine min. Menge an Klärschlamm, ca. 15.000 t/a TS, nötig, d.h. in der Praxis, dass nur auf größeren ARA solche Rückgewinnungsanlagen errichtet werden sollten, oder sogar unabhängig von ARA auf anderen Standorten wie z.B. Düngemittelproduktionsstätten (EXAW1, 2018). Als Barriere für Phosphorrückgewinnungsverfahren, die den Phosphor aus der wässrigen Phase ausfällen, kann angeführt werden, dass dafür sehr große Becken nötig sind, d.h. relativ hohe Investitionen für ARA darstellen sowie, dass diese Verfahren in Konkurrenz zu Phosphorrecyclingverfahren, die Klärschlammasche verwerten, stehen (EXVT1, 2018). Derzeit stellen niedrige Weltmarktpreise für Rohstoffe, z.B. Rohphosphat, jedoch eine unüberwindbar scheinende Barriere für den wirtschaftlichen Betrieb von Recyclinganlagen, Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen dar ((EXAW1, 2018) und (EXUBT1, 2018)). Jedoch sollte im Sinne der Nachhaltigkeit und auch der Versorgungssicherheit in Bezug auf Lebensmittel, bedacht werden, dass die Phosphorpreise auf dem Weltmarkt steigen werden, wenn in den nächsten Jahrzehnten die Vorkommen langsam ausgeschöpft sein werden (EXNH1, 2018). Eine Barriere ist die räumliche Verteilung, zum einen die Dezentralität des Abwassersystems und zum einen die Schwerpunktlage der Industrie. Dadurch können erhebliche Transport- oder Logistikprobleme entstehen ((EXRP1, 2018) und (EXVW1, 2018)). Düngemittelproduktionsstätten z.B. liegen häufig an größeren Gewässern, da die Rohstoffe per Schiff angeliefert werden (EXDÜ11, 2018). ARA liegen auch an Gewässern, jedoch die meisten an nicht schiffbaren. Eine weitere Barriere für die Verwendung von Produkten aus der Klärschlammverwertung in der Industrie, im Besonderen in der Düngemittelindustrie, besteht darin, dass Klärschlamm vom Gesetzgeber als Abfall definiert wird und somit von Düngemittelproduzenten nicht eingesetzt werden darf, außer sie sind als Abfallverwerter zertifiziert (EXDÜ11, 2018).

Eine technologische wie wirtschaftliche Herausforderung ist es, zu garantieren, dass die stofflichen Sekundärressourcen die aus Klärschlamm gewonnen werden, so wenig wie möglich mit Schadstoffen belastet sind ((EXAF1, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXUBT1, 2018)). Es gibt dafür grundsätzlich mehrere Lösungswege, zwei davon sind zum einen, dass die Schadstoffe (oder nur die Wertstoffe) möglichst vollständig extrahiert werden und zum anderen, dass durch den Einsatz von geringen Mengen von Produkten aus der Klärschlammverwertung in der Düngemittelproduktion eine tolerierbare Verdünnung der Schadstoffe erreicht wird (EXDÜ11, 2018). Für die Phosphorrückgewinnung gibt es schon geeignete, effiziente und relativ einfache Recyclingtechnologien. Diese extrahieren aber den Phosphor nicht aus der Asche, sondern gewinnen über Fällungsreaktionen aus dem Abwasser, dem flüssigen Klär- oder Faulschlamm direkt in der Landwirtschaft einsetzbare Produkte wie z.B. Struvit ((EXDÜ11, 2018) und (EXBO1, 2018)). In diesen Produkten ist der Phosphor in einer für Pflanzen leicht verfügbaren Form gebunden (EXBO1, 2018). Eine große Herausforderung stellt die Standardisierung der Produkte aus der Klärschlammverwertung dar. Nur standardisierte Produkte können von der Düngemittelindustrie verwendet werden (EXDÜ11, 2018). Da aber Klärschlamm sehr

unterschiedliche Inhaltsstoffe sowie Eigenschaften aufweist, von welchen manche, für die Düngemittelproduktion wichtige z.B. die Notwendigkeit des Einsatzes von Bindemitteln, Granulier-, Komprimier- und Kompaktierbarkeit, noch nicht untersucht wurden, liegt es vor allem an der technischen, d.h. verfahrenstechnischen Umsetzung diese Herausforderung zu meistern ((EXBO1, 2018) und (EXDÜ1, 2018)). Eine weitere Herausforderung für den Einsatz von Produkten aus der Klärschlammverwertung in der Düngemittelindustrie, stellt die Schaffung und Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen, auch in Bezug auf die Schadstoffthematik, dar (EXDÜ1, 2018). Denn der End-of-Waste-Status der Klärschlammasche und der daraus gewonnenen Produkte und die Deklaration derselben als Wert-, Rohstoffe oder Nebenprodukte stellt eine Voraussetzung sowie ein KO-Kriterium für den Einsatz in der Düngemittelindustrie dar (EXDÜ1, 2018). Genauso sollte auch geklärt sein wie sich die Produkte verhalten und wie sie eingesetzt werden können, d.h. ihre Lagerfähigkeit, Lagerart, Hygroskopie sollten bestimmt werden, auch um den Arbeitnehmerschutz gewährleisten zu können (EXDÜ1, 2018).

### 5.2.2 Akteursmanagement

An der Erstellung der Strategie für die zukünftige Klärschlammverwertung und im speziellen an der Umsetzung derselben als Monoverbrennung von Klärschlamm sollten verschiedenste Akteure und Stakeholder beteiligt werden. Welche Stakeholder und Akteure relevant sind, in welcher Verbindung sie zueinanderstehen und wie sie am effektivsten integriert werden können, sollte durch eine umfassende Akteurs- und Stakeholderanalyse ermittelt werden ((EXAW2, 2018) und (EXRP1, 2018)). Außerdem sollte es ermöglicht werden, dass auch Entscheidungsträger auf lokaler Ebene und "einfache" Bürger an wichtigen Entscheidungsprozessen partizipieren können (EXUWRP1, 2018). Zu den wichtigsten Akteuren, die u.U. ein natürliches Interesse an Klärschlamm, den enthaltenen stofflichen sowie energetischen Ressourcen haben, gehören Interessenverbände und -träger wie z.B. Recyclingbetriebe, Klärschlammverwerter und –entsorger, Abwasserverbände und ARA-Betreiber, landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Betriebe, Errichter- und Betreibergesellschaften von Verwertungs-, Verbrennungs- und Entsorgungsanlagen ((EXAF1, 2018), (EXAW1, 2018), (EXAW2, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Weitere Akteure sowie Stakeholder sind Verbraucher, Abnehmer und Konsumenten von Sekundärressourcen oder Energie aus Klärschlamm wie z.B. Düngemittelproduzenten und Energieversorger ((EXAW2, 2018) und (EXRP1, 2018)). Maßgeblich sind alle, öffentlichen sowie politischen Entscheidungsträger, die an der Erstellung der Strategie der zukünftigen Klärschlammverwertung und an der Umsetzung von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen beteiligt sind (EXAW1, 2018). Dazu gehören öffentliche Institutionen auf allen räumlichen Ebenen, z.B. Bürgermeister auf Gemeindeebene, Regierungen auf Landesebene, Umweltminister auf Staatsebene, Entscheidungsträger auf zwischenstaatlicher Ebene wie z.B. auf EU-Ebene und Beamte auf allen Ebenen in verschiedensten Ämtern, z.B. Ämter für Energie, Naturschutz, Raumplanung, Produktzulassungen und viele mehr (EXUWRP1, 2018). Politische Entscheidungsträger sollten Rückgrat und die nötige Verantwortung an den Tag legen und zu ihren Entscheidungen stehen ((EXAW2, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Wichtig für eine erfolgreiche und zufriedenstellende Umsetzung von Klärschlammverwertung durch Monoverbrennungsanlagen ist es möglichst frühzeitig am Umsetzungsprozess Akteure und Stakeholder wie Umweltschutzorganisationen, Experten, d.h. Wissenschaftler, Technologen, Planer, Bodenschützer, Ökonomen, Gewässerschützer, Ökologen, Partizipationsexperten, Landwirte usw. und Bürger in zentralen Rollen wie als Konsumenten von Nahrungsmitteln, Produzenten von Abfall und Klärschlamm, Nachbarn, Protestbewegungen, Arbeitnehmer/Mitarbeiter usw. zu beteiligen ((EXAW2, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Auch die

Industrie ist für die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung in Bezug auf die energetische sowie stoffliche Nutzung der generierten Produkte wesentlich (EXRP1, 2018). Die Industrie ist auch deshalb wichtig, da bei der Verwertung von Klärschlamm durch Monoverbrennung Mittel eingesetzt werden müssen, z.B. für die Abgasreinigung, die aus anderen Industriezweigen stammen (EXAW1, 2018). In diesem Sinne ist die Industrie mit der Klärschlammverwertung verknüpft. Ähnlich der Abwasserreinigung, bei der für die Fällung von Phosphor, als tertiärer Reinigungsstufe, unter anderem Chemikalien eingesetzt werden, sollten die eingesetzten Materialien, die aus der Industrie stammen nicht unnötig mit Schadstoffen, die sich dann im Klärschlamm wiederfinden, belastet sein (EXUBT1, 2018). Düngemittelproduzenten, als potenzielle Abnehmer der Produkte aus der Klärschlammverwertung sollten frühzeitig in den Umsetzungsprozess der Klärschlammverwertung eingebunden werden, um Anforderungen derselben an die Produkte berücksichtigen zu können (EXDÜI1, 2018). Andere Industriezweige, wie z.B. die Zementindustrie, seltener auch die Metallindustrie, die heute schon Klärschlamm in ihren Anlagen mitverwerten, sollten berücksichtigt werden, da sie in Zukunft auf Ersatz des Brennstoffs Klärschlamm angewiesen sind. Genauso sollten sie berücksichtigt werden, da sie evtl. auch als Abnehmer für Produkte aus der Klärschlammverwertung in Frage kommen, z.B. die Metallindustrie für Metallrecycling aus Klärschlammaschen, die Zementindustrie für den Einsatz von Klärschlammaschen als „Zementersatz“ oder Zuschlagstoff und im Allgemeinen als Abnehmer für heizwertreiche Produkte aus der Klärschlammverwertung ((EXAW1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Die Wissenschaft ist für die Erstellung der Strategie der zukünftigen Klärschlammverwertung ein ganz wesentlicher Akteur. Sie kann Entscheidendes für die optimale und nachhaltige Umsetzung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung beitragen, indem sie hilft zu klären wie und inwieweit Schadstoffe eliminiert oder unschädlich gemacht werden können, ob und wie die Produkte aus der Klärschlammverwertung in der Düngemittelindustrie und Landwirtschaft einsetzbar sind, ohne Schäden zu verursachen ((EXBO1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Außerdem spielt die Wissenschaft im Allgemeinen eine wichtige Rolle bei der Vermittlung von Informationen an Bürger, Stakeholder und Akteure ((EXAW2, 2018) und (EXUWRP1, 2018)), genauso wie als Vermittlerin und Bindeglied zwischen den einzelnen Fachbereichen (EXUWRP1, 2018). Einen wichtigen Bereich des Akteursmanagements stellt sicherlich das Akzeptanzmanagement, mit seinem Ziel die Zufriedenheit der Menschen zu sichern und zu ermöglichen, dar ((EXUWRP1, 2018) und (EXNH1, 2018)). Dabei können monetäre Distributionen helfen, viel wichtiger ist es jedoch auf prozeduraler Ebene, also über den Prozess der Partizipation, für Information, Transparenz, z.B. auch über den politischen Auftrag, auch über die Interessenträger und Beteiligung an Entscheidungsprozessen, zu sorgen (EXUWRP1, 2018). Jedoch soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass Bürgerbeteiligung kein Muss ist und dass Top-down-Planung mit Beteiligung auch durchaus sinnvoll und erfolgreich sein kann (EXUWRP1, 2018).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 32 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 32: 2 Akteursmanagement – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	2 AKTEURSMANAGEMENT
Chancen	Integration und Partizipation aller wesentlichen Akteure und Stakeholder, Schadstoffbelastung des Klärschlammes senken, nachhaltige und energieeffiziente Klärschlammverwertung
Barrieren	Unwille, fehlende Kompromissbereitschaft oder Unkenntnis bei einigen Akteuren und Stakeholdern
Herausforderungen	Erfolgreiche Information, Kommunikation und Diskussion der/zwischen den Akteure/n und Stakeholder/n ermöglichen, Technikfolgenabschätzung

Die Integration und Partizipation aller wesentlichen Akteure und Stakeholder, auf verschiedenen räumlichen Ebenen, kann als Chance angesehen werden. Sie soll ermöglichen, dass die zukünftige Klärschlammverwertung und -entsorgung allen zugutekommt und evtl. Risiken und Schäden vermeidet oder so gering wie möglich hält und in der Gesellschaft breite Akzeptanz findet. Für Partizipationsprozesse, verschiedenster Methodik wie z.B. einer Planungszelle, um soziale Akzeptanz von Monoverbrennungsanlagen in der Bevölkerung zu finden, sind technische, soziale und prozedurale Faktoren wichtig sowie, dass sie von einem unabhängigen Organisator wie z.B. einem Partizipationsexperten geführt und von einem unabhängigen Finanzier wie der öffentlichen Hand unterstützt werden (EXUWRP1, 2018). Zu den technischen Faktoren, die vor dem Partizipationsprozess definiert werden sollten, zählen das Ziel und der Zweck der Monoverbrennung, die Größe und die Höhe der Anlage, die zu erwartenden Emissionen, das induzierte Verkehrsaufkommen und die Transportart des Klärschlammes, der Klärschlammaschen sowie sonstiger Stoffe ((EXAF1, 2018), (EXNH1, 2018), (EXRP1, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Als sozialer Faktor kann die kulturelle Prägung der lokalen Bevölkerung oder des Gebiets in der Umgebung der zu errichtenden Monoverbrennung angesehen werden (EXUWRP1, 2018). Prozedurale Faktoren sind im Wesentlichen die drei Stufen der Information, Konsultation und Mitbestimmung (EXUWRP1, 2018). Wichtig ist auch den richtigen Zeitpunkt für die Beteiligung der Öffentlichkeit zu wählen. Als Chance kann gesehen werden, dass wenn ein gerechter Prozess ermöglicht wird, das Ergebnis mit sehr viel höherer Wahrscheinlichkeit als gerecht empfunden wird (EXUWRP1, 2018). Durch die Einbindung von sehr unterschiedlichen Akteuren und Stakeholdern kann die "Problematik" Klärschlammverwertung sehr umfassend betrachtet und innovativ gelöst werden (EXNH1, 2018). Als Beispiel kann angeführt werden, dass sich die energetische Nutzung von Klärschlamm zur Versorgung von Haushalten mit Niedertemperatur-Wärme über Fernwärmenetze nur lohnt, wenn die potenziellen Energieabnehmer in unmittelbarer Nähe zur Klärschlammverwertung, in diesem Fall, zur Monoverbrennungsanlage sind (EXRP1, 2018). Dies stellt aber eben auch einen Nutzungskonflikt zwischen der nötigen Nähe von Verbrauchern und dem Schutz derselben vor Emissionen dar (EXRP1, 2018). Aus dem genannten Beispiel soll hervorgehen, dass Akteure und Stakeholder wie Klärschlammverwerter, Bürger und Raumplaner nur gemeinsam eine sinnvolle Lösung finden können. Ein weiteres Beispiel ist, dass die Herstellung von Produkten durch die Klärschlammverwertung, die in der Düngemittelproduktion eingesetzt werden sollen, am besten erfolgt, wenn von Anfang an die Wünsche und Anforderungen der Düngemittelproduzenten an die entsprechenden "Klärschlammprodukte" berücksichtigt werden (EXDÜ1, 2018). Genauso wie die Akzeptanz für den Einsatz von Klärschlamm aus der Region, als Rohstoff in derselben Region, zur Generierung von qualitativ hochwertigen Produkten, wie Düngemitteln, höher ist als gegenüber nicht

regionalen Produkten und dass dabei evtl. auch höhere Kosten in Kauf genommen werden (EXDÜ11, 2018). Als Chance kann auch angesehen werden, die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung und deren Ziel der Generierung von Produkten für den Einsatz in der Landwirtschaft oder Düngemittelproduktion, als Anlass zu nehmen, um den wirtschaftlichen Einsatz von potenziellen Schadstoffen wie z.B. bestimmte Schwermetalle wie Zink, die über das Abwasser in den Klärschlamm gelangen, zu vermeiden und somit erfolgreich aus dem Abwasser fernzuhalten und den Einsatz der Produkte aus der Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft zu ermöglichen und garantieren (EXNH1, 2018). Die Kooperation mit Wirtschaft und Gewerbe, evtl. auch Industrie, bei der Umsetzung der Klärschlammverwertung bietet die Chance, bestimmte Stoffe, die im Klärschlamm als Schadstoffe wieder zu finden sind, grundsätzlich im Wirtschaftskreislauf zu vermeiden und durch weniger schädliche Stoffe zu ersetzen, wie es z.B. mit FCKW's geschehen ist (EXNH1, 2018). Durch Forschung und Entwicklung kann die Wissenschaft ganz wesentlich zur Umsetzung einer integralen, nachhaltigen und energieeffizienten Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung beitragen (EXBO1, 2018). Die Wissenschaft kann helfen Probleme, die momentan bestehen, wie z.B. die ungeklärte Schadstoffthematik, d.h. mit welchen thermochemischen Verfahren kann mit den geringsten Kosten der größte Nutzen, stoffliche und energetische Verwertung, generiert werden ohne die Schadstoffe in eine Form zu überführen, in der sie in die Umwelt gelangen können und dort zu Problemen, z.B. Luft-, Boden-, Gewässerverschmutzung, führen, zu lösen ((EXBO1, 2018) und (EXUBT1, 2018)). Die Wissenschaft kann alternative thermochemische Verfahren, wie z.B. HTC, Pyrolyse, Vergasung weiterentwickeln, die helfen können die Nährstoffkreisläufe von Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor zu schließen, nicht unnötig viel THG-Emissionen zu verursachen und auch andere relevante Stoffe, wie z.B. Mikronährstoffe oder kritische Metalle, zu recyceln und wiederzuverwenden (EXBO1, 2018).

Als Barriere kann angesehen werden, dass momentan der Unwille, die fehlende Kompromissbereitschaft oder die Unkenntnis seitens des Gesetzgebers, mancher Landwirte sowie von manchen Lebensmittelhändlern, es nicht, oder nur sehr begrenzt, ermöglicht Klärschlamm oder Produkte aus der Klärschlammverwertung in der Düngemittelproduktion, Landwirtschaft oder Lebensmittelproduktion einzusetzen ((EXAW1, 2018), (EXAW2, 2018) und (EXDÜ11, 2018)). Letztendlich müssen nämlich die zuständigen Behörden und Ämter eine richtungsweisende Entscheidung über die in Zukunft umzusetzende Klärschlammverwertung treffen (EXAW1, 2018). Eine nicht unwesentliche Barriere stellt die Kommunikation dar. Kommunikation zwischen Teilbereichen der Wissenschaft, zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sowie zwischen Wissenschaft und Gesellschaft im Allgemeinen (EXUWRP1, 2018). Nur die Vermittlung von Informationen, die der Wissenschaft zur Verfügung stehen, an alle beteiligten Stakeholder und Akteure sowie an Bürger im Allgemeinen ermöglicht eine faktenbasierte, emotionslose und nicht von Sorgen getriebene Diskussion über die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung ((EXAW2, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Dabei sollte beachtet werden wie Informationsvermittlung und auch Partizipationsprozesse "geframed" werden, denn die Akteure, Stakeholder, Beteiligten und Betroffenen leben in unterschiedlichsten Kontexten d.h., dass die persönliche Grundeinstellung von Menschen oft nicht faktisch oder wissenschaftlich fundiert ist, die, wenn möglich, zu berücksichtigen sind (EXUWRP1, 2018). Irrationale Motivationen oder Entscheidungen stellen sicherlich eine Barriere für konfliktfreie Partizipationsprozesse dar, können aber nicht verhindert werden und müssen deswegen unbedingt berücksichtigt werden (EXVW1, 2018).

Das Akteursmanagement sollte sich der Herausforderung stellen, Akteure und Stakeholder, im Besonderen Bürger und Landwirte umfassend zu informieren, ihnen Raum für ausgiebige,

möglichst emotionslose und wissenschafts-fakten-basierte Diskussionen zu bieten sowie mögliche Missverständnisse vermeiden helfen (EXUWRP1, 2018). Ein wichtiges Ziel dabei sollte sein, die Wahrnehmung, Sorgen und Ängste einzelner Beteiligter ernst zu nehmen und zu berücksichtigen, denn nur so können Konflikte im Nexus Wissenschaft, Politik, Gesellschaft vorgebeugt und gelöst werden (EXUWRP1, 2018). Genau in diesem Nexus sollten auch mögliche Szenarien und daraus abgeleiteter Folgen erstellt und diskutiert werden (EXRP1, 2018). Genauso sollte die Kommunikation zwischen den einzelnen Akteuren und Stakeholdern gefördert und gestärkt werden. So sind z.B. ARA-Betreiber und Klärschlammverwerter wie z.B. Müllverbrennungsanlagen oftmals über Verträge aneinandergebunden, die nur die von den Klärschlammverwertern abzunehmende Menge an Klärschlamm garantieren aber den TS-Gehalt des Klärschlammes dabei vernachlässigen (EXUBT1, 2018). So sollte eine lösungsorientierte betriebsübergreifende Zusammenarbeit angestrebt werden. Denn bevor Bürger und andere Akteure informiert und in einen Entscheidungsprozess integriert werden können, müssen und sollten das Ziel, der Zweck und die Mittel der Klärschlammverwertung und –entsorgung durch Experten und direkt beteiligte Akteure und Stakeholder geklärt werden, um evtl. auch sog. Entscheidungsfindungs-Tools wie z.B. auch LCAs zu entwickeln, mit deren Hilfe die Prozesse berechnet, dargestellt und somit die Akteure überzeugt werden können ((EXAF1, 2018), (EXAW2, 2018) und (EXRP1, 2018)). D.h. auch dass die ARA-Betreiber ein mögliches Konzept zur Klärschlamm Entsorgung ausarbeiten und vorlegen sollten (EXAW1, 2018). Die Informationsvermittlung stellt auch deshalb eine Herausforderung dar, da sie z.B. nicht unbedingt eine zentrale Rolle in der Wissenschaft einnimmt. Natürlich steht die Generierung von Information im Vordergrund, aber es sollte dennoch weiterhin daran gearbeitet werden auch die Vermittlung der generierten Informationen, nicht nur an „verwandte Fachkreise“, sondern auch an die Bevölkerung im Allgemeinen, als wesentliche Aufgabe der Wissenschaft zu etablieren (EXAW2, 2018). Als weitere Herausforderung kann auch der Prozess „Technikfolgenabschätzung“ angeführt werden (EXNH1, 2018). D.h. zunächst im Bereich der Wissenschaft die sich ergebenden Vor- und Nachteile ohne Werturteile und auf abstrakterer Ebene zu erheben, darzustellen und zu kommunizieren. Durch Technikfolgenabschätzung soll eine umfassende Prognose über Entwicklungen, durch neue Technologien verursacht, erstellt werden. Dabei sollten nicht nur wissenschaftliche und technische, sondern vor allem auch wirtschaftliche und soziale sowie Umweltaspekte im Vordergrund stehen (EXNH1, 2018). D.h. ganz wesentlich ist es die drei, ökologische, ökonomische und soziale, Dimensionen der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen (EXNH1, 2018). Die Technikfolgenabschätzung stellt einen Versuch dar potenzielle Folgewirkungen und gesellschaftliche Ablehnung möglichst frühzeitig zu erkennen und zu bedenken. Daraus lassen sich u.U. negative Folgewirkungen vermeiden oder Gegenmaßnahmen entwickeln. Hilfreich dabei ist auch in möglichst frühen Phasen der Technologieentwicklung zu investieren um unbeabsichtigte Folgewirkungen zu vermeiden (EXBO1, 2018). Für die gesellschaftliche Akzeptanz der Technikfolgenabschätzung und auch Implementierung von Technologien ist Transparenz, Information und Kooperation ausschlaggebend (EXNH1, 2018). Auch an Partizipationsprozesse stellt sich die Herausforderung prozedurale sowie distributionale, räumliche Gerechtigkeit zu verwirklichen (EXUWRP1, 2018). Unter prozeduraler Gerechtigkeit wird dabei die Ermöglichung von transparenten Verfahren und von umfassender Information, für alle Beteiligten und Interessierten zugänglich, sowie die Einrichtung von Foren zur Beteiligung verstanden (EXUWRP1, 2018). Distributionale räumliche Gerechtigkeit heißt nicht nur Streuung von monetären Gewinnen, sondern bedeutet auch, dass den Beteiligten und Betroffenen ein Mitspracherecht bei der Standortwahl, bei der Entscheidung über die grundsätzliche Sinnhaftigkeit der Umsetzung von

Monoverbrennungsanlagen, bei der Wahl der Transportart und der Transportstrecke, sowie bei der Organisation selbst der Monoverbrennungsanlage eingeräumt wird (EXUWRP1, 2018).

### 5.2.3 Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist ein wesentlicher Fachbereich, der bei der Klärschlammverwertung berücksichtigt werden sollte, da viele Sekundärressourcen, die durch die Klärschlammverwertung generiert werden, schlussendlich in der Landwirtschaft zum Einsatz kommen sollen ((EXAW2, 2018) und (EXDÜ11, 2018)). Dabei wird unter Landwirtschaft vor allem die konventionell arbeitende Landwirtschaft verstanden, da sie ca. 80% der gesamten in Österreich praktizierten Landwirtschaft ausmacht und biologische Landwirtschaft daher nicht in Frage kommt, da ihr Bedarf viel zu gering ist und sie im allgemeinen auch andere Ziele verfolgt als konventionelle Dünger zu verwenden (EXNH1, 2018). Es ist wahrscheinlich, dass in Zukunft Klärschlamm, wegen der Belastung mit organischen Spurenstoffen, nicht mehr direkt in der Landwirtschaft eingesetzt werden darf und deshalb sollte von Anfang an bei der Umsetzung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung die Landwirtschaft mit einbezogen werden, um Produkte zu generieren, die in der Landwirtschaft einfach und sicher eingesetzt werden können (EXAW1, 2018). Dabei ist es wesentlich zu bedenken, dass die Landwirtschaft im Allgemeinen die Funktion der Lebensmittelproduktion erfüllt und somit bestimmten und strengen gesetzlichen Auflagen unterliegt ((EXAW2, 2018) und (EXDÜ11, 2018)). Genauso sollte berücksichtigt werden, dass die Landwirtschaft über große Teile ein sehr traditionsgeprägter Bereich ist und somit innovative und effiziente Neuerung mit entsprechend umfassender Information und wenn möglich über sogenannte Beratungsstellen erfolgen sollten (EXUWRP1, 2018).

Die Lebensmittelwirtschaft stellt einen Bereich dar, der für die Klärschlammverwertung und die Nutzung von Produkten aus der Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft und damit für die Lebensmittelerzeugung, Bedingungen und Anforderungen stellt, die sehr spezifisch sind und schwer zu erreichen sind. So z.B., dass garantiert werden kann, dass durch die Nutzung von Produkten aus der Klärschlammverwertung sich keine Schadstoffe in den landwirtschaftlichen Flächen anreichern, von den Pflanzen aufgenommen werden und somit in den Nahrungsmittelkreislauf gelangen und eine Gefahr für den Menschen darstellen (EXBO1, 2018).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 33 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 33: 3 Landwirtschaft – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	3 LANDWIRTSCHAFT
Chancen	Einsatz von Klärschlamm-Produkten, Bodenschutz, Bodenstabilisierung, Lebensmittelproduktion stärken
Barrieren	Keine landwirtschaftliche Direktverwertung von Klärschlamm, Unkenntnis, Sorgen und Angst, Schadstoffkonzentrationen und -mengen, Zerstörung der org. Substanz
Herausforderungen	Schadstoffkonzentration und -mengen, Inhaltsstoffe, strenge Aufzeichnungspflichten, Information

Die direkte Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft stellt zwar die langfristig beste Option dar, wird aber aufgrund der damit erfolgenden Schadstoffausbringung, in Zukunft nicht mehr möglich sein, außer evtl. für kleinere Kommunen, die qualitativ hochwertigen Klärschlamm produzieren ((EXAW2, 2018) und (EXUBT1, 2018)). Der direkte Einsatz von Produkten aus der

Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft oder der indirekte Einsatz derselben über die Düngemittelproduktion kann einen wesentlichen Beitrag zum Schutz des Bodens und der Umwelt, durch den damit erzielten Nährstoffhalt und die mögliche Bodenstabilisierung gegenüber Erosion leisten (EXAW2, 2018). Dies kann als große Chance der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung angesehen werden und als wichtiger Beitrag zum Ausbau der Kreislaufführung von Nährstoffen auf den landwirtschaftlichen Flächen, sowie zum Entgegenwirken des org. Substanzverlustes durch Einsatz des Klärschlammes als Humusbildner (EXAW2, 2018). Wobei jedoch beachtet werden sollte, dass die Klärschlamm mengen alleine nicht für eine vollständige Versorgung der landwirtschaftlichen Flächen mit org. Substanz ausreichen (EXUBT1, 2018). Durch den Einsatz von Produkten aus der Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft könnten u.U. auch hochkonzentrierte Mikronährstoff-Dünger ersetzt werden, da im Klärschlamm viele Mikronährstoffe wie z.B. Zink, Kupfer, Nickel, Mangan, Eisen usw. enthalten sind (EXBO1, 2018). Der Einsatz von Produkten aus der Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft zur Lebensmittelproduktion und damit die Schließung von Nährstoffkreisläufen, stellt eine große Chance für die Gesellschaft dar (EXNH1, 2018). Damit kann nämlich die regionale Landwirtschaft und Lebensmittelproduktion unabhängiger von globalen Rohstoffmärkten gestaltet und damit die Versorgungssicherheit mit Lebensmitteln aufrechterhalten werden ((EXNH1, 2018) und (EXRP1, 2018)).

Es sollte beachtet werden, dass die genannten Chancen für den direkten Einsatz in der Landwirtschaft nur gelten, wenn durch die thermochemische Klärschlammverwertung keine vollständige Oxidation und somit vollständige Zerstörung der org. Substanz durchgeführt wird (EXBO1, 2018). Eine weitere Barriere ergibt sich durch die momentane Entwicklung der Gesetze bezüglich Klärschlammverwertung, die eindeutig in eine Richtung weist, durch die in Zukunft keine landwirtschaftliche Direktverwertung von Klärschlamm mehr möglich sein wird, da mit nicht aufbereiteten Klärschlamm auch potenziell endokrin wirksame Substanzen ausgebracht werden sowie eine homogene und bedarfsgerechte Ausbringung von Nährstoffen im Klärschlamm wegen seiner unterschiedlichen Zusammensetzung nicht möglich ist (EXUBT1, 2018). Dies stellt eindeutig auch eine Barriere für den Einsatz von Produkten aus der Klärschlammverwertung, die zu hohe Schadstoffkonzentrationen und -mengen aufweisen, in der Landwirtschaft dar (EXDÜ1, 2018). Die Ausbringung von potenziellen bekannten oder unbekanntem Schadstoffen mit Produkten aus der Klärschlammverwertung wird als ein nicht einzuschätzendes Risiko betrachtet (EXUBT1, 2018). Die Produktvermarktung durch Lebensmittelhändlern stellt eine schwer zu überwindende Barriere dar, denn im Fokus des Händlers steht natürlich der erfolgreiche Verkauf seiner Produkte. Um herauszufinden welche Wünsche Konsumenten haben werden Befragungen durchgeführt und diese verstärken die Sorgen bei Konsumenten bezüglich des Einsatzes von Produkten aus der Klärschlammverwertung (EXAW2, 2018). Dadurch wird Druck auf die Lebensmittelerzeuger, in diesem Fall die Landwirte, und auf die politischen Entscheidungsträger, z.B. Gesetzgeber, ausgeübt um den Klärschlamm in der Lebensmittelproduktion, der Landwirtschaft, nicht einsetzen zu dürfen (EXAW2, 2018). Um diese oftmals unbegründeten Sorgen, die auf Unwissenheit seitens der Lebensmittelhändler, Konsumentenbefragter aber auch der Konsumenten selbst, vorzubeugen, sollte von Anfang an beim Akteursmanagement auf umfassende und faktenbasierte Information aller Beteiligten aber vor allem der Endkonsumenten, der Bürger gesetzt werden (EXUWRP1, 2018). Dabei könnte die Informationsvermittlung evtl. bewusst als zeitnahes Marketing, um das Produkt Klärschlamm und/oder Phosphordünger richtig zu präsentieren, gestaltet werden (EXAW2, 2018).

Die Herausforderung für den landwirtschaftlichen Einsatz ist deshalb, dass Schadstoffkonzentrationen und -mengen in Produkten aus der Klärschlammverwertung genauso

wie die Inhaltsstoffe der Produkte bekannt sein müssen ((EXBO1, 2018) und (EXDÜ11, 2018)). Natürlich vor allem um den Austrag von Schadstoffen in die Umwelt zu vermeiden aber auch weil die Landwirtschaft strengen Aufzeichnungspflichten unterliegt und daher nur Produkte verwenden kann, von denen genau bekannt ist wie sie sich zusammensetzen und welche Wirkungen sie entfalten (EXDÜ11, 2018). Neben der Aufzeichnungspflicht ist auch zu erwähnen, dass die Landwirtschaft in ihrem Alltagsbetrieb sehr viel genauer und präziser wird, d.h. z.B. in Zukunft werden die Bodenuntersuchungen zunehmen um den Bedarf an bestimmten Nährstoffen und den Mengen-Einsatz an Düngemitteln für die Produktion sehr viel exakter bestimmen zu können (EXDÜ11, 2018). Darum sollten Konzentrationen und Mengen der Inhaltsstoffe sowie die genaue Zusammensetzung der Produkte aus der Klärschlammverwertung bekannt sein. Versucht werden sollte eine Bilanzierung der Schadstoffe, die auf die landwirtschaftlichen Flächen gelangen um herauszufinden wie und von wo sie stammen, denn daraus könnte sich ergeben, dass andere Quellen als der Klärschlamm viel größere Bedeutung für die Vermeidung des Schadstoffaustrags haben (EXAW2, 2018). Z.B. konnte festgestellt werden, dass viele Schwermetalle u.a. aus der Atmosphäre über den Niederschlag auf landwirtschaftliche Flächen gelangen (EXAW2, 2018). Ein weiterer Punkt ist, dass durch die gesetzlich reglementierte konzentrierte Ausbringung von Klärschlamm oder evtl. Produkten aus der Klärschlammverwertung auf wenigen landwirtschaftlichen Flächen, die Schadstoffe wie z.B. Schwermetalle in diesen Böden angereichert und aufkonzentriert werden (EXBO1, 2018). Daraus ergibt sich die Herausforderung eine nach besten Umweltstandards durchgeführte Ausbringung der Produkte aus der Klärschlammverwertung auf möglichst vielen landwirtschaftlichen Flächen, um Mengen und Konzentrationen von Schadstoffe die auf einzelnen landwirtschaftliche Flächen gelangen, zu mindern (EXBO1, 2018). Eine Herausforderung für die Klärschlammverwertung aus Sicht der Lebensmittelwirtschaft wird es sein, den Austrag von Schadstoffen zu vermeiden, sodass evtl. für den Menschen gefährliche Stoffe nicht in den Nahrungsmittelkreislauf gelangen.

### **5.2.4 Energiewirtschaft**

Dadurch, dass im Klärschlamm chemische Energie in Form von org. Substanz u.a. gebunden ist, lässt sich durch Verbrennung des Klärschlamm Energie gewinnen (EXAW1, 2018). Jedoch ist der Prozess der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung sehr energieintensiv und nur, wenn alle Prozessschritte gut aufeinander abgestimmt sind, lässt sich ein Energieüberschuss generieren (EXAW1, 2018). Die Energiewirtschaft im Sinne der Energieversorgung, der Energieproduktion, des Energiebedarfs, der Energieeffizienz, der Energieinfrastruktur und der Energiebilanzierung sollte von Anfang an integraler Teil der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung sein, um vorhandene Synergien nutzen zu können (EXRP1, 2018). Wichtig ist auch, dass sogenannte Energieberatungsstellen umfassende Information bezüglich des Bedarfs, der Gewinnung, der Optimierung und der Effizienz der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung erhalten und an betreffende Akteure und Stakeholder weiterleiten können (EXAW2, 2018).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 34 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 34: 4 Energiewirtschaft – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	4 ENERGIEWIRTSCHAFT
Chancen	Energiegewinnung, -auskoppelung und -speicherung, Herstellung heizwertreicher Produkte, Steigerung der Energieeffizienz, Versorgungssicherheit
Barrieren	Trocknung sehr energieintensiv, bestehende Energieinfrastruktur
Herausforderungen	Energiemanagement, Economy of Scale - zentral vs. dezentral,

Durch Klärschlammverwertung in Monoverbrennungsanlagen lässt sich Energie gewinnen, evtl. auskoppeln und speichern, womit auch die Versorgungssicherheit in Bezug auf Energie gesteigert werden kann ((EXRP1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Die Verbrennung ist eine exotherme Reaktion, bei der in Abhängigkeit vom Wassergehalt und dem Gehalt an org. Substanz unterschiedlich viel Energie in Form von Wärme frei wird (EXVT1, 2018). Die Wärme lässt sich über den Abgasstrom auskoppeln entweder über Wärmetauscher oder in Kombination mit WKK-Verfahren wie z.B. Dampfkessel und Dampfturbinen ((EXAW1, 2018) und (EXVT1, 2018)). In beiden Fällen wird ein Großteil der auskoppelbaren Energie intern für den Prozess der Klärschlammverwertung, vor allem Klärschlamm-trocknung, verwendet werden oder, sollte die Monoverbrennungsanlage am Standort der ARA errichtet werden, kann die Energie auch für die Abwasserreinigung genutzt werden (EXAW1, 2018). Für niederwertige Energie wie Nieder-Temperatur-Wärme gibt es im Prozess selbst jedoch wenig Verwendungsmöglichkeiten, deshalb könnte diese Energieform für externe Verbraucher zur Verfügung gestellt werden, wenn die nötige Infrastruktur vorhanden ist, d.h. Fernwärmenetze existieren oder wirtschaftlich errichtet werden können und genügend Abnehmer in unmittelbarer Nähe vorhanden sind ((EXAW1, 2018), (EXRP1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Thermochemische Verfahren, die den Klärschlamm nicht vollständig oxidieren, generieren heizwertreiche Produkte wie Bio-Kohlen, die als Energiespeicher dienen können und bei Bedarf umgesetzt werden können (EXVT1, 2018). Genauso gibt es die Möglichkeit durch thermochemische Verfahren Energieträger wie Wasserstoff, Syngas und Bio-Diesel zu erzeugen. Im Weiteren stellt die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung und anschließender Ressourcenrückgewinnung eine Chance dar, die Herstellung von Düngemitteln energieeffizienter zu machen, da dadurch extrem große Transportstrecken vermieden werden können und auch die Verfahren selbst vom energetischen Standpunkt besser abschneiden werden als die konventionelle Rohstoffproduktion für die Düngemittelindustrie (EXDÜI1, 2018).

Als Barriere für die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung kann der hohe Wassergehalt des Klärschlamm angesehen werden, denn muss der Klärschlamm transportiert werden, so wird vor allem Wasser transportiert (EXRP1, 2018). Deshalb sollte nur, zumindest entwässerter Klärschlamm, im besten Fall getrockneter Klärschlamm transportiert werden (EXRP1, 2018). Die Entwässerung und vor allem die Trocknung stellen aber sehr energieintensive Verfahren dar. Die dazu nötige Energie muss vor Ort zur Verfügung gestellt werden und da nicht auf allen ARA eine Monoverbrennung, mit Möglichkeit zur internen Kreislaufführung der Energie errichtet werden wird, werden diese ARA das Problem des Transports des wasserreichen Klärschlamm zu lösen haben (EXAW1, 2018). Wie schon erwähnt muss zur sinnvollen Energieauskoppelung die nötige Energieinfrastruktur vorhanden sein, d.h. für auszukoppelnden Wärme braucht es Fernwärmenetze und genügend Wärmeabnehmer genauso wie es für auszukoppelndes Syngas Aufbereitungsanlagen und Gasnetze braucht ((EXAW1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Auch wenn Bio-Diesel oder ähnliches

produziert wird, das im Allgemeinen unter dem Begriff Bio-Raffinerie zusammengefasst werden kann, braucht es die nötige Infrastruktur wie Lagermöglichkeiten und Aufbereitungsanlagen ((EXAW1, 2018) und (EXRP1, 2018)).

Eine große Herausforderung am gesamten Prozess der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung stellt das Energiemanagement dar. D.h. dass am richtigen Ort und zur richtigen Zeit die passende Energieform in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt werden kann (EXAW1, 2018). Genauso wie auch die Auskoppelung von Energie den zeit- und raumabhängigen Bedarf an der auszukoppelnden Energieform berücksichtigen muss (EXRP1, 2018). Dabei ist auch zu beachten, dass verschiedene Energieformen unterschiedliche Energiedichten aufweisen und damit sich unterschiedlich gut für den „Transport“ eignen (EXRP1, 2018). Eine energetische Herausforderung stellt wie schon erwähnt die wahrscheinlich räumlich eher zentralere Anordnung der Monoverbrennungsanlagen und die Dezentralität der ARA dar, da im Sinne der Steigerung der Energieeffizienz, der Ausweitung der Energieoptimierung und der Steigerung des Wirkungsgrads der Verbrennungsanlagen sowie auch der Trocknungsanlagen die sogenannte „Economy of Scale“ bestimmend ist ((EXRP1, 2018) und (EXVT1, 2018)). D.h. größere Anlagen können effizienter betrieben werden und damit auch größere Mengen an Energie auskoppeln (EXRP1, 2018).

### **5.2.5 Naturschutz und Umweltschutz**

Ein umfassender und integraler Umweltschutz, z.B. durch holistische Risikoanalysen, sollte bei der Umsetzung und dem Betrieb von Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung verfolgt und eingehalten werden (EXAW1, 2018). Wesentlich ist dabei die Ökologie, als allumfassendes System, zu betrachten und davon ausgehend ökologische und energetische Bilanzierungen zu erstellen, die alle Auswirkungen, Effekte und Rückkoppelungen berücksichtigen und um sinnvolle Grenzwerte für bestimmte Stoffe, die als Emissionen oder in erzeugten Produkten in die Umwelt gelangen, festzusetzen ((EXNH1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Da Klärschlamm als „Erfolgsprodukt“ bei der Abwasserreinigung anfällt (EXAW2, 2018), sollen, durch Klärschlammverwertung möglicherweise entstehende negative Rückwirkungen auf die Abwasserreinigung und somit die Beeinträchtigung des Gewässerschutzes, wie z.B. Rückbelastung durch hoch konzentriertes Kondensat aus der Schlamm-trocknung, oder Verbrennung vermieden werden (EXUBT1, 2018). Bei thermochemische Verfahren, wie der Monoverbrennung von Klärschlamm, entstehen Abgase, die mit Schadstoffen belastet sind, daher ist es enorm wichtig die Abgasreinigung mit den besten zur Verfügung stehenden Technologien durchzuführen, um den Luftschutz zu garantieren und negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu vermeiden, dabei sollte auch das vorherrschende Lokalklima, z.B. eine gegebene vorherrschende Windrichtung bei der Standortwahl berücksichtigt werden ((EXVT1, 2018) und (EXNH1, 2018)). Naturschutz im Allgemeinen und Bodenschutz im speziellen sind vor allem Teilbereiche, die integriert werden sollen, wenn es um die möglichen Verwendungspfade und –arten der Produkte aus der Klärschlammverwertung geht, wie z.B. die landwirtschaftliche Nutzung von Düngemittel aus Klärschlammaschen (EXBO1, 2018). Als ebenso wichtiger Teilbereich kann der Landschaftsschutz erwähnt werden, da durch die Errichtung von Verbrennungsanlagen das Landschaftsbild nachhaltig geprägt werden kann, auch zum Missfallen von Anrainern und/oder Naturschützern ((EXAW1, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Deshalb sollte möglichst früh das Akteursmanagement bemüht werden, um etwaige Folgen, wie die Entstehung von Konflikten in der Bevölkerung und Protestbewegungen zu vermeiden.

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 35 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 35: 5 Umweltschutz – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	5 NATURSCHUTZ/UMWELTSCHUTZ
Chancen	Schadstoffe in sichere Senken überführen
Barrieren	Akzeptanz von Verbrennungsanlagen in der Bevölkerung
Herausforderungen	Emissionsbegrenzung, Kreislaufwirtschaft - Trennung von Schadstoffen und Wertstoffen

Da aus Gründen des Umweltschutzes in Zukunft wahrscheinlich keine landwirtschaftliche Direktverwertung von Klärschlamm mehr möglich sein wird, ergibt sich durch die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung die Chance, Klärschlamm durch Verwertung so zu modifizieren, dass er wieder in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann (EXAW1, 2018). Die Schadstoffe möglichst vollständig von den Wertstoffen zu trennen und in verschiedenen Massenströmen unterschiedlichen Verwertungen oder der Entsorgung zuzuführen, stellt somit eine große Herausforderung dar (EXAF1, 2018). Die im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe, die durch kein Recyclingverfahren, d.h. stoffliche oder energetische Verwertung, nutzbar gemacht oder eliminiert werden können müssen unbedingt in sichere Senken überführt und aus dem Wirtschaftskreislauf ausgeführt werden (EXAF1, 2018). In der Praxis heißt das, dass abhängig von der effizienten Gestaltung der Recyclingverfahren unterschiedlich große Abfallmengen, mit Schadstoffen hoch angereichert, bei der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung, also Restaschen sowie Filteraschen aus der Abgasreinigung anfallen und einer Deponie zugeführt werden müssen (EXAF1, 2018). Da aber die Klärschlammengen um ca. 90 % reduziert werden können und weil durch die Verwertung die Wertstoffe vor der Deponierung möglichst vollständig abgetrennt werden, kann dies als Chance begriffen werden (EXAW1, 2018). Die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung bietet auch die Chance eine nachhaltigere Wirtschafts- und Lebensweise umzusetzen (EXNH1, 2018). Um das zu erreichen könnte u.a. in breiter Kooperation von Anlagenbetreibern und öffentlichen Ämtern Umweltbildung als Begleitmaßnahme vorgesehen werden um Bewusstsein und Sensibilität für umweltrelevante Themen zu fördern und gleichzeitig die gesellschaftliche Verdrängung von wichtigen Umwelthemen zu vermeiden (EXNH1, 2018).

Eine wesentliche Barriere ergibt sich dadurch, dass momentan keine ausreichenden Klärschlamm-Monoverbrennungskapazitäten in Österreich bestehen, deswegen werden in näherer Zukunft einige Anlagen errichtet werden müssen, wenn die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung umgesetzt werden soll. Dies kann u.U. zu einer Beeinträchtigung des Landschaftsbildes oder einem ungewollten Flächenverbrauch führen und auch Ängste bezüglich der Emissionen aus Verbrennungsanlagen in der Bevölkerung schüren ((EXRP1, 2018), (EXNH1, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Da dadurch die Akzeptanz in der Bevölkerung enorm sinkt, oder gar nicht mehr vorhanden ist, sollten durch das Akteursmanagement und Partizipationsstrategien möglichst frühzeitig evtl. Probleme erkannt und wenn möglich ausgeräumt werden. Auch deshalb, weil die Klärschlammverwertung eine Notwendigkeit darstellt und im Sinne der Nachhaltigkeit sollte die Klärschlammverwertung nicht als Übel begriffen werden, sondern als Chance eine Abfallart bestmöglich wiederzuverwenden, unter Einhaltung höchster Umweltschutzstandards, d.h. auch ohne Beeinträchtigung und Schaden für Anrainer und Nachbarn zu verursachen (EXRP1, 2018). Es sollte auch beachtet werden, dass der Standort für die Monoverbrennung grundsätzlich einfach zu erschließen sein sollte und dass die induzierten Verkehrsströme abseits von Wohngebieten geführt werden können (EXRP1, 2018). Eine weitere Barriere für die Monoverbrennung ergibt sich dadurch, dass die Restaschen oder Filterstäube, hochangereichert

mit Schwermetallen und anderen Schadstoffe, untertage deponiert werden müssen ((EXAF1, 2018) und (EXAW1, 2018)). Dafür geeignete, sichere und in der Bevölkerung akzeptierte Standorte zu finden, wird sehr schwer werden (EXNH1, 2018).

Da mit den Emissionen aus der Verbrennung von Klärschlamm möglicherweise Schadstoffe in die Umwelt gelangen können, sollte die Abgasreinigung auf höchstem technischem und wissenschaftlichem Niveau sein (EXNH1, 2018). Da eine hochwertige Abgasreinigung sehr energieintensiv ist und auch der Ressourcenverbrauch dazu sehr groß ist, stellt sie aus technologischer und verfahrenstechnischer Sicht eine Herausforderung dar, d.h. sie möglichst effizient und optimiert umzusetzen und einen sicheren Betrieb zu garantieren ((EXUBT1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Um eine Kreislaufwirtschaft, d.h. die Schließung von Nährstoffkreisläufen, durch die Nutzung von Produkten aus der Klärschlammverwertung voranzutreiben, muss sichergestellt werden, dass die Produkte nicht mit Schadstoffen belastet sind oder die Schadstoffe in einer Form gebunden sind, sodass sie nicht ausgewaschen oder mobilisiert werden können (EXAF1, 2018). Da es derzeit noch keine Standards für die Produkte aus der Klärschlammverwertung gibt, d.h. sehr unterschiedliche Produkte mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und Inhaltsstoffen entstehen, stellt die Charakterisierung eine Herausforderung dar, der unbedingt mit weiterer Forschung beizukommen versucht werden sollte ((EXBO1, 2018) und (EXDÜ1, 2018)). Genauso bedeutet die Erstellung einer Gesamtbilanz der Klärschlammverwertung eine Herausforderung dar, da verschiedenste Verfahren mit einbezogen werden müssen und die Prozesskette sehr umfangreich ist. Es sollte jedoch versucht werden bei der Bilanzierung Faktoren wie THG-Emissionen, Ressourcen- und Energieverbrauch oder –bedarf, d.h. auch den Energiefußabdruck der Einsatzstoffe einbeziehen (EXVT1, 2018), Schadstoffgehalt in den “Endprodukten”, Aufwand für die Endproduktaufbereitung und die Zusammensetzung und Form derselben, zu berücksichtigen. Vor allem THG-Emissionen, die durch den Transport zu einem limitierenden Faktor werden können (EXRP1, 2018), können über zur Verfügung stehende Methoden, wie dem Life-Cycle-Assesment (LCA), erhoben werden (EXVT1, 2018). Im Rahmen einer notwendigen UVP für Monoverbrennungsanlagen sollten, nicht wie, bisher Bürger vom Planungs- und Umsetzungsprozess ausgeschlossen werden sondern alle möglichen Interessensgruppen, Bürger und evtl. entstehende Protestbewegungen sinnvoll integriert werden (EXUWRP1, 2018).

### 5.2.6 Verfahrenstechnik

Die Verfahrenstechnik ist ein Fachbereich, der bei den meisten Prozessschritten der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung beteiligt ist. Im Allgemeinen ist die Verfahrenstechnik zu beteiligen da die Verfahren zur Klärschlammverwertung technische, teilweise sehr komplizierte, Prozesse, wie eben die Verbrennung und Abgasreinigung, darstellen (EXUBT1, 2018). Die Optimierung und Effizienzsteigerung dieser Vorgänge sowie die Anpassung einzelner Schritte aufeinander, z.B. die Trocknung an die Verbrennung und umgekehrt, ist vor allem durch die Anpassung der Verfahrenstechnik möglich (EXAW1, 2018). Durch Forschung und (Weiter)Entwicklung von Verfahren zur Klärschlammverwertung, z.B. der Herstellung von Bio-Kohlen, Syngas oder Produkten für die Bioraffinerie, können schlussendlich Produkte erzeugt werden, die die gewünschte Nutzung oder den angestrebten Verwendungszweck ermöglichen, z.B. den, in Bezug auf Schadstoffaustrag und Umweltbelastung, risikoarmen Einsatz der Produkte in der Düngemittelproduktion und/oder Landwirtschaft (EXBO1, 2018).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 36 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 36: 6 Verfahrenstechnik – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	6 VERFAHRENSTECHNIK
Chancen	Optimal angepasste und effiziente Technologien zur stofflichen und energetischen Verwertung von Klärschlamm
Barrieren	Monopolisierung von einem Verfahren zu Ungunsten anderer alternativer Verfahren
Herausforderungen	Entwicklungstechnisch junge Verfahren zur Marktreife bringen, Mitarbeiter Aus- und Weiterbildung

Der Einsatz von optimal angepassten und effizienten Technologien und Verfahren zur Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung bietet die Chance durch stoffliche und energetische Verwertung des Klärschlammes Sekundärressourcen oder Energie zu generieren (EXAW1, 2018). Dabei sollte unter gegebenen Umständen überprüft werden, ob nicht verschiedene Technologien und Verfahren parallel oder in Kombination eingesetzt werden können wie z.B. die HTC als Alternative zur konventionellen Trocknung (EXVT1, 2018) und in Kombination mit der anschließenden Monoverbrennung (EXBO1, 2018). Durch optimal angepasste Verfahrenstechnik können Produkte hergestellt werden, die als Rohstoffe in der Düngemittelindustrie oder direkt als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden können ((EXAW1, 2018) und (EXBO1, 2018)). Genauso kann durch effiziente Ausgestaltung der Verfahren und Anpassung an die Prozesskette und deren räumlichen, z.B. zentrale Verbrennung und dezentrale Trocknung, und zeitliche Charakteristika, saisonale Schwankung an Mengen und Konzentration der Inhaltsstoffe, Energie gewonnen, ausgekoppelt oder gespeichert werden (EXRP1, 2018). So könnte z.B. für große ARA die energetische Verwertung und für kleinere ländlichere ARA die stoffliche Verwertung im Vordergrund stehen (KACPRZAK, et al., 2017, S. 45). Durch alternative Technologie wie der HTC kann ein Großteil der Nährstoffe wie Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor in der produzierten Hydro-Kohle erhalten werden (EXVT1, 2018). Durch Modifikation des exothermen Prozesses der Karbonisierung unter Druck, durch den evtl. Energie gewonnen werden kann, kann die Verfügbarkeit der Nährstoffe in der Hydro-Kohle für Pflanzen erhöht werden (EXBO1, 2018). Die Mengen und Konzentrationen von org. Schadstoffen und Schwermetallen in solchen Hydro-Kohlen liegen oft unter den gesetzlichen Grenzwerten, die für die landwirtschaftliche Ausbringung gelten, genauso wie vielfach die Grenzwerte für Premium-Qualität für Bio-Kohlen der European-Bio-Char-Certification eingehalten werden können ((EXBO1, 2018) und (EXVT1, 2018)).

Wie derzeitige Entwicklungen zeigen wird vor allem die Verbrennung, d.h. vollständige Oxidation, des Klärschlammes, vor allem aus abfallwirtschaftlicher Sicht, bevorzugt, um die im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe zu eliminieren (EXBO1, 2018). Wird diesem Verfahren dadurch eine Monopolstellung eingeräumt, führt dies dazu, dass die Entwicklung und der Einsatz anderer alternativer Verfahren vernachlässigt werden (EXBO1, 2018). Dies stellt eine wesentliche Barriere dar, da dadurch die Möglichkeit des Einsatzes und der Entwicklung von alternativen Verfahren, wie z.B. der Hydrothermalen Karbonisierung, der Pyrolyse oder der Vergasung, in den nächsten Jahren bis Jahrzehnten verhindert wird (EXBO1, 2018). Auch die Kombination dieser alternativen Verfahren mit der Verbrennung und anderer Verfahren wird dadurch erschwert (EXBO1, 2018).

Eine Herausforderung ist deshalb, in Anbetracht der erwähnten Barriere, diese alternativen Verfahren wie z.B. HTC, Verkohlung, Pyrolyse und Vergasung sowie auch innovative Verbrennungstechnologien, wie z.B. kleinere dezentralere Anlagen, mit intensiver Forschung und

Entwicklungsbemühungen zur Marktreife zu bringen, um einen großtechnischen und wirtschaftlichen Einsatz zu erlauben ((EXBO1, 2018) und (EXDÜI1, 2018)). Pyrolyse und Vergasung erscheinen aus verfahrenstechnischer Sicht als durchaus mögliche Verfahren, da Klärschlamm eine hohe Ascheerweichungstemperatur aufweist und dadurch bei den nötigen Temperaturen zur Vergasung oder Pyrolyse, die unter denen der vollständigen Oxidation, Verbrennung liegen, stabil bleibt (EXVT1, 2018). Jedoch sind diese Verfahren wenig erprobt und machen eine Trocknung des Klärschlammes erforderlich, wofür die auskoppelbare Wärme aus den thermochemischen Prozessen verwendet werden kann (EXVT1, 2018). Denn mit der Verbrennung, d.h. vollständigen Oxidation, werden viele potenzielle wertvolle Inhaltsstoffe des Klärschlammes in eine Form überführt, z.B. als Gase, vor allem Kohlenstoff (Monoxid, Dioxid), in die Atmosphäre emittiert oder in der festen Matrix der Asche gebunden, Phosphor, Zink u.a. Mikronährstoffe, in der sie nur sehr schwer oder gar nicht mehr genutzt werden können ((EXAF1, 2018) und (EXBO1, 2018)). Bei der Anwendung komplizierter und aufwendiger Verfahren, stellt die Mitarbeiter Aus- und Weiterbildung auf solchen Anlagen eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar, da sie es sind, die einen stabilen und sicheren Betrieb garantieren müssen ((EXUBT1, 2018) und (EXVT1, 2018)).

### 5.2.7 Abwasserwirtschaft

Die Abwasserwirtschaft ist wohl der Fachbereich, der als der zentralste in der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung angesehen werden kann. Bei der Abwasserentsorgung fällt Klärschlamm als Erfolgsprodukt an, da die im Abwasser enthaltenen Schadstoffe erfolgreich in eine sichere Senke, den Klärschlamm, überführt werden (EXAW2, 2018). Es werden verschiedene Arten von Klärschlamm mit unterschiedlichen Charakteristika definiert, in Abhängigkeit wo im Prozess der Abwasserreinigung der Klärschlamm anfällt. Genauso kann auch der „Weg“ des Klärschlammes unterteilt werden in die Klärschlammbehandlung, Klärschlammverwertung und Klärschlamm Entsorgung, die evtl. von unterschiedlichen Akteuren ausgeführt und für unterschiedliche Akteure und Stakeholder unterschiedlich relevant und interessant sind. Ein wichtiger Aspekt in der Abwasserwirtschaft ist die Autarkie einer ARA in Bezug auf die Energieversorgung. Damit ist gemeint, dass die Abwasserreinigung ein sehr energieintensiver Vorgang ist und deshalb Bestrebungen, die zu Energieeinsparungen oder Energiegewinnung führen, sehr nützlich sind ((EXAW1, 2018) und (EXAW2, 2018)). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Abwasserreinigung und die, aus ihr folgenden Prozesse wie die Klärschlammverwertung, in regionale Energie- und Stoffkreisläufe integriert werden sollten ((EXAW2, 2018) und (EXRP1, 2018)).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 37 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 37: 7 Abwasserwirtschaft – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	7 ABWASSERWIRTSCHAFT
Chancen	Entsorgungssicherheit des Klärschlammes etablieren, ARA als Resource-Recovery-Facility
Barrieren	Abhängig von anderen Akteuren, Bestehende Infrastruktur, Kosten - Abwassergebühren
Herausforderungen	Klärschlammverwertung und Entsorgung umsetzen, räumlich dezentrales System, Zusammenarbeit - Klärschlammverbände

Für die Abwasserwirtschaft bietet sich durch die Umsetzung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung, die Chance, die nötige Entsorgungssicherheit in Bezug auf und den sichersten Entsorgungspfad für den Klärschlamm zu etablieren ((EXAF1, 2018) und (EXAW1, 2018)). Da die Klärschlammbehandlung, -verwertung und -entsorgung für ARA einen der größten Kostenpunkte ausmacht (EXAW2, 2018), können durch effiziente Verwertungsverfahren, Energie und/oder Sekundärressourcen generiert werden, die monetäre Einnahmen lukrieren helfen ((EXDÜ1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Auf jeden Fall sollte die Erstellung von Nutzwertanalysen helfen, die bestmögliche Option für die Klärschlammverwertung, die die Wirtschaftlichkeit mitbetrachtet, zu bestimmen (EXAW1, 2018).

Eine Barriere stellt dabei dar, dass, wenn die erzeugten energetischen oder stofflichen Produkte auf keinem Markt zu rentablen Preisen abgegeben werden können, die Betreiber der Klärschlammverwertung, in diesem Fall die ARA-Betreiber, auf den Kosten für die Verwertung „sitzen bleiben“ und die dadurch entstehenden Verluste, notgedrungen versuchen müssen durch Erhöhung der Abwassergebühren auszugleichen ((EXAW1, 2018) und (EXAW2, 2018)). Abwassergebühren können über dies hinaus eine wichtige Rolle als Grundlage für politische Entscheidungen spielen (EXAW2, 2018). Zu beachten ist auch, dass die Abwasserwirtschaft sehr stark von anderen Akteuren und Stakeholdern abhängig ist. Sie kann z.B. kaum, evtl. nur über Indirekteinleiter-Kontrollen oder Information und Aufklärung, beeinflussen welche Stoffe ins Abwasser gelangen (EXAW2, 2018), d.h. sie ist den Abwässern von privaten Haushalten mit potenziell gefährlichen Inhaltsstoffen wie z.B. Medikamentenrückstände oder hormonell wirksamer Stoffe, und von Industriebetrieben mit potenziell gefährlichen anorg. und org. Inhaltsstoffen wie z.B. Schwermetalle und polyaromatische-zyklische Kohlenwasserstoffe (PAC) sozusagen ausgeliefert ((EXNH1, 2018) und (EXUBT1, 2018)). Auch die bestehende Infrastruktur, wie z.B. Energieversorgungsnetze, kann eine Barriere für die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung darstellen, wenn z.B. generierte Energie nicht an Abnehmer abgegeben werden kann ((EXAW1, 2018), (EXRP1, 2018) und (EXVT1, 2018)).

Es sollte jedoch jedes zur Verfügung stehende Mittel genutzt werden, um Synergien zu nutzen, die den genannten Barrieren entgegenwirken. So kann angestrebt werden, die ARA nicht nur als Anlage zur Reinigung von Abwasser zu betrachten, sondern auch als „Ressource-Recovery-Facility“ (EXAW2, 2018) oder „regionale Energiezelle“ (EXRP1, 2018). Durch die Erweiterung des Ziels und des Zwecks der ARA (EXAW2, 2018), also ihrer Aufgabe und Funktion, kann sie einen besseren Stand in der Gesellschaft erreichen und evtl. auch zusätzliche Mittel für die neuen Aufgaben über staatliche Förderungen oder privatwirtschaftliche Kooperationen mit Recyclingbetrieben oder Ressourcenverwerter generieren. Also die Herausforderung, in den nächsten Jahren eine nachhaltige und effiziente Klärschlammverwertung zur stofflichen und energetischen Nutzung des Klärschlammes (EXAF1, 2018) und eine sichere Entsorgung der Rest- und Filteraschen umzusetzen ((EXAF1, 2018) und (EXAW1, 2018)), sollte in Zusammenarbeit mit vielen anderen Akteuren und Stakeholdern gemeinsam genommen und überwunden werden ((EXAW2, 2018), (EXDÜ1, 2018), (EXNH1, 2018), (EXRP1, 2018), (EXUBT1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Dabei sollte das räumlich dezentrale Abwassersystem als Vorteil begriffen werden, indem es einen Beitrag zur Vermeidung von unnötigen Transportstrecken, für die Verteilung von Ressourcen und Energie, leistet ((EXRP1, 2018) und (EXVW1, 2018)).

### 5.2.8 Abfallwirtschaft

Neben der Abwasserwirtschaft ist der Fachbereich der Abfallwirtschaft maßgeblich an der Erstellung der Strategie und der Umsetzung der zukünftigen Klärschlammverwertung im Besonderen durch Monoverbrennung beteiligt (EXAW2, 2018). Aus abfallwirtschaftlicher Sicht ist

die Verbrennung, d.h. vollständige Oxidation, die beste Variante zur Klärschlamm Entsorgung und zur Sicherstellung, dass keine Schadstoffe in die Umwelt gelangen ((EXAF1, 2018) und (EXUBT1, 2018)). Dabei können die Abfallverwertung und –entsorgung als wesentliche Teilbereiche aufgefasst werden, die einen erheblichen Beitrag zur nachhaltigen Nutzung von Primär- und Sekundärressourcen leisten (EXAW1, 2018). Wobei die weitgehende Vermeidung von THG-Emissionen ein wichtiges Ziel ist (EXNH1, 2018). Obwohl im BAWP 2017 (BMNT, 2017) die Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllverbrennungsanlagen ausgeschlossen wird, können evtl. doch einige Verbindungen realisiert werden. Z.B. könnten unter geeigneten Umständen Abfallarten, die einen erheblichen Anteil an Phosphor und ein geringes Ascheaufkommen aufweisen in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen mit verwertet werden (BMNT, 2017). Jedoch müssen dabei die gesetzlichen Bestimmungen für die einzelnen Abfallarten, sowie der Umstand, dass für eine in Frage kommende Abfallart, und zwar Tiermehl, schon ein Markt besteht, berücksichtigt werden (EXVT1, 2018). Aus verfahrenstechnischer Sicht sollten die Abfallarten auf jeden Fall ähnliche Eigenschaften haben um die gleichen Transportvorrichtungen, z.B. Förderbänder oder –schnecken, für die verschiedenen Abfallarten einsetzen zu können (EXAW1, 2018). Sowie, dass den Abnehmern der Produkte aus der Klärschlammverwertung ein standardisiertes und einheitliches Produkt übergeben wird (EXDÜ11, 2018). Neben der Müllverbrennung ist auch die Deponie ein wichtiger Bereich, da evtl. Deponieflächen nötig sind um die Restaschen aus der Monoverbrennung end zu lagern ((EXAF1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Oder auch um Zwischenprodukte solange zu lagern bis der wirtschaftliche Betrieb von Recyclingverfahren möglich ist (EXRP1, 2018). Dies soll z.B. in der Schweiz erfolgen, d.h. die Aschen aus der Verbrennung werden solange auf Monodeponien gelagert, bis die Phosphorrückgewinnung effizient und wirtschaftlich betrieben werden kann (BÄTTIG, et al., 2011, S. III).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 38 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 38: 8 Abfallwirtschaft – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	8 ABFALLWIRTSCHAFT
Chancen	Abfallhierarchie, Synergien mit Abwasserwirtschaft bezüglich energetischer und stofflicher Verwertung, Nutzung von Sekundär-Ressourcen
Barrieren	Klärschlamm als Abfall definiert, Schadstoffgrenzwerte
Herausforderungen	End-of-Waste Status für Produkte aus der Klärschlammverwertung, Schadstoff vs. Mikronährstoffe

Die Hierarchie der Abfallwirtschaft mit den Einzelzielen Vermeidung, Wiederverwendung, Recycling, Verwertung und Beseitigung (EU-PARL, 2008, S. Art. 4) sollte auch in Bezug auf die Klärschlammverwertung angewendet werden. Dabei können sich vor allem für die Einzelziele Synergien zwischen der Abfallwirtschaft und der Abwasserwirtschaft ergeben. So streben beide an, dass Schadstoffe nicht erst am Ende der Produktketten unschädlich gemacht werden, sondern schon am Anfang vermieden werden und somit auch nicht in das Abwasser und folglich in den Klärschlamm gelangen (EXNH1, 2018). Die stoffliche Verwertung von Klärschlamm oder –aschen muss oder kann nicht unbedingt auf dem Standort der ARA erfolgen, sondern kann auch an externe Recyclingbetriebe ausgelagert werden (EXAW1, 2018). Die Nutzung der im Klärschlamm enthaltenen Ressourcen ist das Ziel das beide Fachbereiche gemeinsam in Angriff nehmen sollten, da die Elimination der Schadstoffe nur eine Seite derselben Münze ist und dabei

wertvolle Stoffe unwiederbringlich verloren gehen, wie z.B. Kohlenstoff oder Stickstoff (EXAW2, 2018). Eine Chance der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung ergibt sich dadurch, dass ein Entsorgungspfad gewählt wird, auf dem der größte Teil des Klärschlammes behandelt wird, wodurch eine diffuse Verteilung der potenziellen Schadstoffe vermieden werden kann. Genauso ist es leichter evtl. nötige Gegenmaßnahmen für einen Entsorgungspfad zu finden als für mehrere verschiedene Entsorgungspfade oder –arten (EXUBT1, 2018).

Eine Barriere für die Nutzung von Produkten aus der Klärschlammverwertung stellt die Definition des Klärschlammes und der daraus gewonnenen Produkte als Abfall dar (EXDÜ1, 2018). Düngemittelhersteller z.B. dürfen keine Abfallprodukte verwenden, außer sie sind speziell für die Verwertung von Abfällen zertifiziert (EXDÜ1, 2018). Eine Barriere für die Nutzung von Klärschlamm und Produkten aus der Klärschlammverwertung stellt deren Verunreinigungs- und Schadstoffgehalt dar (EXUBT1, 2018). Große Mengen an org. und anorg. Schadstoffen gelangen durch Industriebetriebe ins Abwasser und somit in den Klärschlamm (EXUBT1, 2018). In häuslichem Abwasser finden sich u.a. hormonell wirksame Substanzen sowie Medikamentenrückstände, deren Mengen aber eher gering und somit auch das durch sie verursachte Risiko als eher gering eingeschätzt werden kann (EXUBT1, 2018). Dennoch sollte der Verbleib von sog. Mikroschadstoffen und evtl. im Klärschlamm enthaltener Nanopartikel geklärt werden ((EXAW2, 2018) und (EXUBT1, 2018)).

Deshalb bedeutet die Feststellung des End-of-Waste-Status für Produkte aus der Klärschlammverwertung eine nicht kleine Herausforderung, bei der die Abfallwirtschaft gemeinsam mit anderen Akteuren, z.B. der Abwasserwirtschaft und Stakeholdern, z.B. der Universitäten, einen Kompromiss suchen sollte ((EXBO1, 2018) und (EXDÜ1, 2018)). Vor allem sollte in die weitere Erforschung und Entwicklung von Produkten und Verfahren investiert werden um im Laufe der nächsten Jahre, mögliche bessere Alternativen, vor allem aus Sicht des Ressourcenmanagements, zur Klärschlammverwertung durch Verbrennung, zu erlangen ((EXAW2, 2018) und (EXBO1, 2018)). Aus abfallwirtschaftlicher Sicht sind die Schadstoffgrenzwerte natürlich so festgelegt, dass Gefahr für Mensch und Umwelt vermieden wird. Jedoch muss das nicht heißen, dass keine schadstoffarmen Produkte aus schadstoffreichen Ausgangsmaterialien hergestellt werden können, z.B. durch thermochemische Verfahren wie der Herstellung von Bio-Kohle als Alternative zur Verbrennung und vollständigen Oxidation (EXBO1, 2018). Genauso gelten bestimmte Stoffe in der Abfallwirtschaft als Schadstoff, die jedoch für die Landwirtschaft essentielle Wertstoffe darstellen (EXBO1, 2018). Dazu gehören sogenannte Mikronährstoffe wie z.B. Zink, die für das Pflanzenwachstum notwendig sind und heute in der Landwirtschaft durch hochkonzentrierte Düngemittel ausgebracht werden (EXBO1, 2018). Natürlich sind die Mengen und Konzentrationen, in denen diese Stoffe ausgebracht werden entscheidend, jedoch sollten sie bei einem nachhaltigen Ressourcenmanagement und Klärschlammrecycling berücksichtigt werden.

### 5.2.9 Logistik

Wie schon erwähnt stellt das Abwassersystem, d.h. die räumliche Verteilung der ARA, ein sehr dezentrales System dar ((EXAW2, 2018) und (EXVW1, 2018)). Klärschlamm fällt also großräumig und weit verteilt über die Fläche, in oft geringen Mengen an. Deshalb werden größere Mengen an Klärschlamm vom Entstehungsort, der ARA, zum Standort der Klärschlammverwertung transportiert werden müssen ((EXAW1, 2018), (EXAW2, 2018), (EXRP1, 2018) und (EXVT1, 2018)). Auch die Energieversorgung und –abgabe fällt in den Fachbereich der Logistik, d.h. in den Teilbereich der Infrastruktur (EXRP1, 2018). Der Teilbereich Infrastruktur soll nicht nur bestehende Transportinfrastruktur umfassen, sondern auch Energie- und

Ressourceninfrastruktur, die für eine effiziente und nachhaltige Klärschlammverwertung weichenstellend sind ((EXAW1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Der Verkehr und der Transport sind ebenso wichtige Teilbereiche, die durch Vermeidung von Verkehr und Entscheidung zwischen Bahn- vs. Straßen-Transport, als zentrale Themen für die Klärschlammverwertung angesehen werden können ((EXRP1, 2018) und (EXVW1, 2018)).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 39 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 39: 9 Logistik – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	9 LOGISTIK
Chancen	Vermeidung von Verkehr und THG-Emissionen
Barrieren	Bestehende Infrastruktur
Herausforderungen	Effiziente Lösung des Klärschlammtransports

Oberste Priorität und eine wesentliche Chance bei der Klärschlammverwertung in Monoverbrennungsanlagen ist es, Verkehr und damit THG-Emissionen zu vermeiden (EXVW1, 2018). Dies kann durch optimale Abstimmung der Transportmittel, LKW, Bahn und evtl. Schiff, gelingen. Transportiert werden müssen dabei manchmal recht kleine Mengen, die sehr weit über den Raum verteilt sind, was den Transport auf der Straße per LKW natürliche begünstigt (EXVW1, 2018). Da Klärschlamm aber durchaus gelagert werden kann, wenn er z.B. vorher getrocknet wird, ergibt sich die Möglichkeit des intermodalen Verkehrs, d.h. der Nutzung von Straße und Schiene für den Transport (EXRP1, 2018). Für die Ermöglichung des Schienentransports ist auch von Vorteil, wenn die Klärschlammengen auf dem Weg zur Monoverbrennungsanlage gebündelt werden können (EXVW1, 2018). Wichtig ist dabei, dass Klärschlamm zu möglichen Umschlagplätzen, von Straße auf Schiene und umgekehrt, gebracht werden kann, und die nötige Infrastruktur, Lagerflächen oder –behälter u.dgl. bereitgestellt werden können oder evtl. kurze Bahnstrecken kostengünstig umgerüstet oder neu errichtet werden können ((EXRP1, 2018) und (EXVW1, 2018)). Wenn Trocknung, Monoverbrennung und Ressourcenrückgewinnung auf wenigen Anlagen, in größeren Städten, betrieben wird, kann das durchaus ein Vorteil für den Schienentransport sein (EXRP1, 2018). Wobei der Transport per LKW als „First and last Mile“-Transport kaum vermieden werden kann (EXVW1, 2018).

Die bestehende Infrastruktur beeinflusst nicht nur den Transport und bedingt das Transportmittel des Klärschlammes zur Verwertungsanlage und der generierten Produkte aus der Klärschlammverwertung zu ihrem weiteren Verwendungsort, Düngemittelproduktion und/oder Landwirtschaft, sondern auch die Möglichkeit der Einspeisung von Energie in bestehende Infrastrukturnetze zur Versorgung von Energieabnehmern ((EXAW1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Zu beachten ist für den Transport von Klärschlamm und Produkten aus der Klärschlammverwertung, dass größere Schienenstrecken nicht mehr neu errichtet werden (EXVW1, 2018).

Aus dem genannten soll hervorgehen, dass eine effiziente Logistik in Bezug auf eine nachhaltige Klärschlammverwertung durchaus eine große Herausforderung darstellt, für dessen Umsetzung viele Akteure und Stakeholder wie z.B. Energieversorger und –lieferanten, Raumplaner usw. einbezogen werden sollten ((EXAW1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Es kann versucht werden das räumliche Klärschlammaufkommen in einer Art Gravitationsmodell zu erfassen, um dessen Schwerpunktlage zu bestimmen und dadurch die nötigen Transportstrecken und –mengen abzuschätzen und an die bestehende Infrastruktur anzupassen um die bestmögliche Lösung für

die Logistik zu erlangen (EXVW1, 2018). Denn auch für den Schienentransport ist eine hohe Zentralisierung der Transportquelle und des Transportziels, d.h. eine große Quelle und ein großes Ziel, wichtig (EXVW1, 2018). Sowie sich standardisierte Güter oder Produkte für den Schienentransport besser eignen (EXVW1, 2018).

### 5.2.10 Raumplanung

Der Fachbereich Raumplanung kann durch spezielle, d.h. fachbezogene Raumplanung und durch Ortsplanung günstige Bedingungen für die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung und der Integration derselben in den ländlichen und/oder urbanen Raum, schaffen ((EXRP1, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Energieraumplanung und „Ressourcenmapping“ sind dabei ganz wesentliche Aspekte und Themengebiete, die es zu berücksichtigen gilt ((EXAW2, 2018) und (EXRP1, 2018)).

Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen werden in nachstehender Tabelle 40 zusammengefasst und im Anschluss erklärt und diskutiert.

Tabelle 40: 10 Raumplanung – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).

Fachbereich Kategorie	10 RAUMPLANUNG
Chancen	Energieraumplanung, Ressourcenmapping
Barrieren	Bestehende Raumnutzung, Siedlungsgebiete und -entwicklung
Herausforderungen	Langfristig Nähe von Abnehmern und Produzenten von Energie sowie Sekundärressourcen ermöglichen

Für die Standortwahl von Monoverbrennungsanlagen ergibt sich die Chance, dass der Vorgang in die lokale und örtliche Raumplanung, evtl. auch lokale Energiestrategie (EXVT1, 2018), Eingang findet und auch in den räumlichen Entwicklungskonzepten berücksichtigt wird, sodass die neu zu errichtenden Monoverbrennungsanlagen bestens in die bestehende Infrastruktur eingebettet werden und den größtmöglichen Nutzen für die Region bringen ((EXRP1, 2018) und (EXUWRP1, 2018)). Zu beachten ist dabei auch, dass für schon industriell geprägte Gebiete die Sensibilität in der Bevölkerung viel geringer ist als für Grünflächen, Siedlungs-, Naherholungs- oder Naturschutzgebiete (EXUWRP1, 2018). Die Einbindung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung in eine aktive Energieraumplanung stellt eine wesentliche Chance dar, die effiziente Nutzung von Energie, die zeitlich saisonale, Winter/Sommer sowie Tag/Nacht, optimale Bereitstellung von der richtigen Energieform, Strom/Wärme/Gas, zu ermöglichen (EXRP1, 2018). Dabei sollten andere Energieversorger und ihr zeitliches wie räumliches Potenzial zur Energiebereitstellung berücksichtigt werden um unnötige Schwankungen oder sogar Energieengpässe zu vermeiden ((EXAW1, 2018) und (EXRP1, 2018)). Dies heißt auch die unterschiedlichen Potenziale von urbanem und ländlichem Raum zu nutzen und somit den „virtuellen“ Flächenverbrauch von verschiedensten Produktionsprozessen zu verbessern ((EXRP1, 2018) und (EXDÜI1, 2018)). Da durch Klärschlammverwertung, Produktion von Syngas oder heizwertreichen Produkten, Energie gespeichert werden kann, sollte die Umsetzung dieser Möglichkeiten unbedingt mit anderen Akteuren und Stakeholdern, Energieversorger, Raumplaner und Entscheidungsträger abgestimmt werden. Eine wichtige Chance ergibt sich auch durch ein sogenanntes „Ressourcenmapping“, durch welches festgestellt werden kann in welchem räumlichen Kontext Ressourcen verbraucht oder bereitgestellt werden, wo welcher Bedarf an welchen Ressourcen vorliegt und dazu kann die Klärschlammverwertung beitragen in dem, an den regionalen Bedarf an bestimmte Ressourcen angepasst, vor Ort diese Ressourcen durch

Klärschlammverwertung produziert werden (EXAW2, 2018). Natürlich vorausgesetzt die gewünschten Stoffe sind überhaupt im Klärschlamm enthalten und auch ohne unverhältnismäßige Kosten wiedergewinnbar (EXAW1, 2018).

Eine Barriere für Energieabgabe, vor allem in Form von Wärme aber auch Strom, durch Klärschlammverwertung in Monoverbrennungsanlagen, stellt natürlich die gewachsene Siedlungsstruktur und auch die räumliche Anordnung der ARA dar (EXRP1, 2018). Denn um eine sinnvolle Versorgung von Siedlungen mit Fernwärme zu ermöglichen müssen diese in unmittelbarer Nähe der Klärschlammverwertung, also der Monoverbrennungsanlage, die Wärme auskoppeln kann, liegen (EXVT1, 2018). D.h. bestehende Wärmenetze liegen vor allem in Städten und schränken dadurch die Standortwahl ein, wenn Niedertemperatur-Wärme ausgekoppelt werden soll (EXVT1, 2018). Eine weitere Barriere ergibt sich aus der Nutzungskonkurrenz um Flächen, da für die Errichtung von Klärschlammverwertungsanlagen oder Deponien Flächen anderen möglichen Nutzungen entzogen werden (EXRP1, 2018). Die Orts- und Raumplanung obliegt der Kompetenz der Gemeinde und diese ist vielfach überfordert, vor allem auch weil Klärschlammverwertung u.a. gemeindeübergreifende Themen sind und nur auf einer höheren räumlichen Ebene zu fassen sind (EXUWRP1, 2018).

Eine große Herausforderung, die sich aus Sicht der Raumplanung deshalb stellt, ist die räumliche Nähe von Abnehmern und Produzenten von Energie und Sekundärressourcen, also Siedlungen, Düngemittelproduktion, Landwirtschaft und Klärschlammverwertung resp. gezielt herbeizuführen (EXRP1, 2018). Die Standortwahl von Klärschlammverwertungsanlagen kann diese Aspekte berücksichtigen, sowie die Möglichkeit einer überregionalen, staatenübergreifenden Lösung für die Klärschlammverwertung zu prüfen und dadurch, wenn möglich Externalitäten wie THG-Emissionen vermeiden helfen ((EXNH1, 2018) und (EXVW1, 2018)). Für den Bund Österreich stellt sich die Herausforderung über das gesamte Bundesgebiet hinweg eine sinnvolle Lösung für die Klärschlammverwertung zu finden, dabei obliegt ihm die Möglichkeit eine einheitliche Strategie vorzugeben und für das gesamte Bundesgebiet eine Zonierung des Raumes zu erstellen um potenzielle Standorte für Monoverbrennungsanlagen zu bestimmen (EXUWRP1, 2018). Dies wäre für die Umsetzung von großem Vorteil, denn so könnten dann sofort die richtigen Gemeinden mit einbezogen werden (EXUWRP1, 2018). Eine weitere Herausforderung aus Sicht der Raumplanung stellt sich dadurch, dass die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung in raumplanerischen Maßnahmen nur sinnvoll berücksichtigt werden kann, wenn vorher das Ziel der Ascheentsorgung, Verwendungsart und -ort, und die Logistik, Transportmittel usw. geklärt sind (EXRP1, 2018).

## 6. Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Forschungsfragen FF1 und FF2, wie in Kapitel 2 formuliert, abschließend beantwortet. Grundlage dafür ist das Kapitel 5, weshalb im Folgenden, der besseren Übersichtlichkeit wegen, auf die Zitierung der einzelnen Experten verzichtet wird. Deren inhaltliche Aussagen können im Kapitel 5 nachgelesen werden. In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand und die Entwicklung der Klärschlammverwertung in Österreich zusammenfassend beschrieben und kurz auf eine mögliche zukünftige Prozesskette der Klärschlammverwertung eingegangen sowie die sich dabei ergebenden wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen angeführt. Im Weiteren werden die für Klärschlammverwertung als wichtig identifizierten Fachbereiche genannt und kurz beschrieben, wobei das Hauptaugenmerk auf den wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die sich aus den unterschiedlichen Perspektiven für die künftige Klärschlammverwertung ergeben, liegt. Damit soll ein Beitrag zur Strategie und Realisierung der zukünftigen Klärschlammbewirtschaftung durch Monoverbrennung und anschließender Ressourcenrückgewinnung geleistet werden.

### 6.1 Klärschlammbewirtschaftung als integraler Prozess

Wie aus dem BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 58) hervorgeht, fallen in Österreich im Jahr 2015 rd. 234.900 t TM an Klärschlamm an. Davon werden, wie in Abbildung 39 ersichtlich, rd. 19 % landwirtschaftlich verwertet, rd. 29 % einer sonstigen Behandlung wie MBA, Kompostierung oder Vererdung zugeführt und ca. 52 % thermisch behandelt.

Verwertung von insgesamt 234.900 t TM

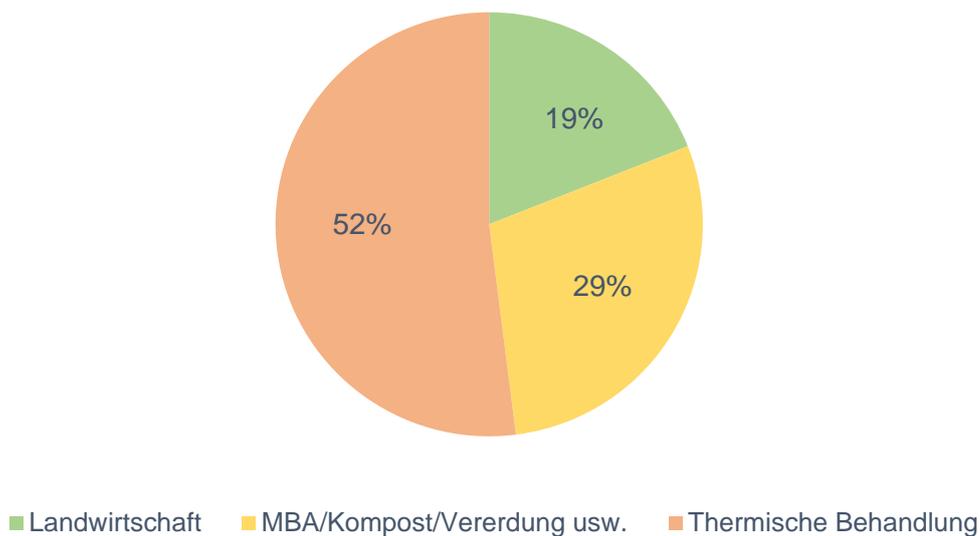


Abbildung 39: Verwertungsarten und -pfade des Klärschlammes in Österreich im Jahr 2015 laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 58) (Eigene Darstellung).

Die thermische Behandlung erfolgt hauptsächlich als Mitverbrennung des Klärschlammes in Müllverbrennungsanlagen. Die Kapazität für die Monoverbrennung von Klärschlamm kann für Österreich mit rd. 28 % angegeben werden, da der gesamte Klärschlamm aus dem Bundesland

Wien in den Wirbelschichtöfen 1-3 der Verbrennungsanlage Simmeringer Haide monoverbrannt wird. Um die Forderung des BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 261) bis zum Jahr 2030 65 – 85 % des in Österreich anfallenden Klärschlammes einer Monoverbrennung und anschließender Phosphorrückgewinnung zuzuführen, umzusetzen, müssen also für mindestens noch weitere 37 %, was rd. 86.913 t TM Klärschlamm ausmacht, Monoverbrennungskapazitäten in den nächsten Jahren errichtet werden. Genauso wie auch in den kommenden Jahren Anlagen zur effizienten und wirtschaftlichen Rückgewinnung des Phosphors aus Klärschlammaschen realisiert werden müssen, um mindestens 152.685 t/a TM Klärschlamm zur recyceln, da aktuell in Österreich keine solche Anlagen betrieben werden.

Um eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Klärschlamm (ÖWAV, 2014) zu ermöglichen, sollte die gesamte Prozesskette des Klärschlammes, wie in Abbildung 40 dargestellt, betrachtet und auch die Abwasserproduktion und –reinigung mit einbezogen werden.

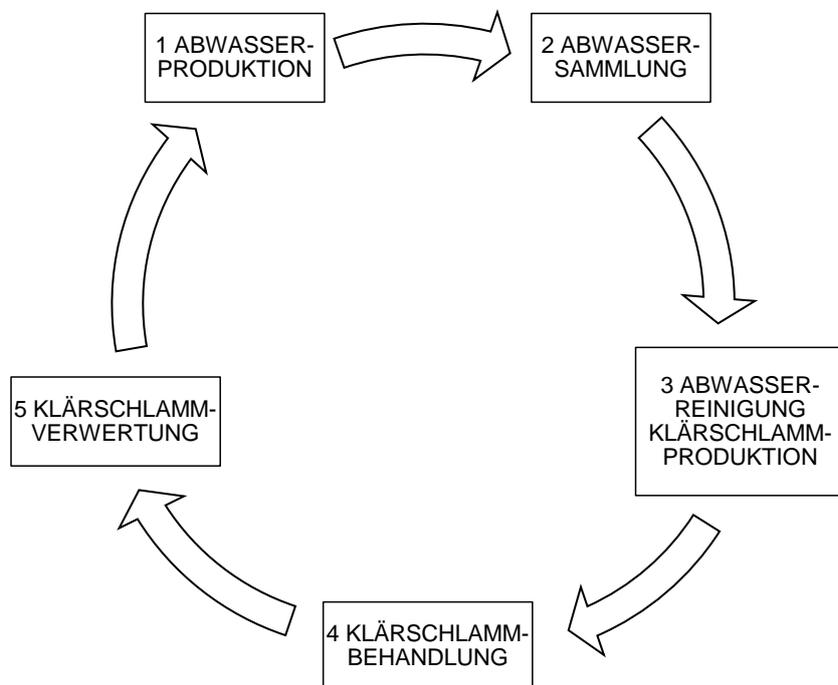


Abbildung 40: Prozesskette des Klärschlammes (Eigene Darstellung).

Die Prozesskette des Klärschlammes kann grob in fünf größere Prozesse unterteilt werden und zwar in 1. Abwasserproduktion, 2. Abwassersammlung, 3. Abwasserreinigung und Klärschlammproduktion, 4. Klärschlammbehandlung und 5. Klärschlammverwertung.

### Abwasserproduktion

Da Klärschlamm als Erfolgsprodukt der Abwasserreinigung anfällt und somit als Senke für die im Abwasser enthaltenen Schadstoffe dient, sollte die Abwasserproduktion in den Kommunen, bei der Industrie und im produzierenden Gewerbe berücksichtigt werden, um unnötigen Schadstoffeintrag ins Abwasser und somit in den Klärschlamm möglichst am Anfang der Prozesskette zu vermeiden. Denn dadurch kann erst eine effiziente Bewirtschaftung der (Sekundär)Ressourcen ermöglicht werden. Dazu sollte das Bewusstsein der Abwasserproduzenten dafür, welche Stoffe sie in das Kanalsystem einleiten, die u.U. hinderlich für die schlussendlich nachhaltige Verwertung des Klärschlammes sein können, durch

Informations- und Aufklärungskampagnen in Zusammenarbeit von ARA-Betreibern, öffentlichen Institutionen und Umweltschutzorganisationen gestärkt werden. Genauso sollte durch solche Informationskampagnen der Wert bestimmter Stoffe im Abwasser als nutzbare Sekundärressourcen betont werden.

### Abwassersammlung

Parallel und in Kombination zu Vermeidungsstrategien des Schadstoffeintrags bei der Abwasserproduktion, sollten im Rahmen des Prozesses der Abwassersammlung vermehrt Kontrollen der Abwassereinleitung in das Kanalsystem (Indirekteinleiterkontrollen) durchgeführt werden, um potenzielle Verursacher von unerlaubtem oder ungünstigem Schadstoffeintrag ins Abwasser zu identifizieren und zur Rechenschaft zu ziehen. Genauso wie auch dadurch die Aufmerksamkeit bei den Abwasserproduzenten erregt und evtl. eine öffentliche Diskussion zum Umweltschutz durch Abwasser- und Klärschlammbewirtschaftung angeregt werden kann. Durch Umdenken in der Öffentlichkeit und auch bei einzelnen spezifischen Akteuren und Stakeholdern, die im Bereich Abwasser- und Klärschlammbewirtschaftung tätig sind, sollte die Chance, die die Erstellung der Strategie zur künftigen Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung bietet, ergriffen werden, um weg von End-of-Pipe-Lösungen und hin zu integralen Lösungsansätzen zu gelangen.

### Abwasserreinigung und Klärschlammproduktion

Wird die ARA nicht als End-of-Pipe Lösung betrachtet, kann der Prozess der Abwasserreinigung und Klärschlammproduktion, als ein Prozess angesehen werden, durch den Klärschlamm zur Energie- und Ressourcenquelle wird. Dabei kann durch Verfahrensoptimierungen, z.B. energetischer und stofflicher Art und gesamtheitlicher Ressourcenbewirtschaftung, z.B. durch einen regionalen Ressourcen-Plan, die ARA der Zukunft als Ressource-Recovery-Facility oder regionale Energiezelle begriffen werden und einen wesentlichen Beitrag zur Stärkung der regionalen Wirtschaft, durch Energie- und Ressourcenbereitstellung, leisten. Um dies zu ermöglichen, muss jedoch bestehende Infrastruktur (ARA, Energie, Transport, Siedlungen etc.) berücksichtigt werden, denn durch Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energiequellen ergeben sich einige Herausforderungen, die auch bei der Energiebereitstellung durch ARA, oder Monoverbrennungsanlagen, berücksichtigt werden müssen. So kann angeführt werden, dass die Energiebereitstellung durch erneuerbare Quellen, wie z.B. Wind oder Sonne, zeitlichen Schwankungen unterliegt, die evtl. durch die ARA oder Monoverbrennungsanlage gepuffert werden können, jedoch nur, wenn in ausreichender Nähe zu jenen Anlagen Infrastruktur zur Abgabe oder Speicherung und überhaupt Abnehmer für Energie oder Ressourcen vorhanden sind.

### Klärschlammbehandlung

Ein wichtiger Schritt hin zur Bereitstellung von Klärschlamm als Energie- und/oder Ressourcenquelle ist der Prozess der Klärschlammbehandlung. Durch diesen Prozess werden die Weichen für die weitere Verwertung des Klärschlamms durch Stabilisierung, Entwässerung und Ermöglichung eines nachhaltigen und evtl. intermodalen Transports des behandelten Klärschlamms gelegt. Dabei sollte das Volumen des Klärschlamms möglichst weitgehend und effizient verringert, sowie durch Stabilisierung die hygienische Gefahr eliminiert werden, um den Klärschlamm sicher und platzsparend lagern und umweltschonend transportieren zu können. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die gewählte Behandlungsstrategie konsequenterweise die nachfolgende Art der Verwertung des Klärschlamms ermöglicht oder verhindert. So wirken sich z.B. bestimmte Behandlungsarten (Verminderung org. brennbarer

Substanz durch Faulung oder Einsatz von Polymeren bei der Entwässerung) u.U. nachteilig, sowie andere Behandlungsarten (höherer TS durch HTC und anschließender Entwässerung) positiv für die folgende Verwertung durch Monoverbrennung aus.

### Klärschlammverwertung

Schlussendlich soll der angefallene und behandelte Klärschlamm einer sinnvollen und nachhaltigen Klärschlammverwertung zugeführt werden. Dieser Prozess der Klärschlammverwertung bietet die meisten Chancen, Barrieren und Herausforderungen bei der Umsetzung der künftigen Klärschlammbewirtschaftung durch Monoverbrennung und anschließender Ressourcenrückgewinnung. Denn dabei muss nicht nur die günstigste Art (im Sinne der Umwelt) und das effizienteste Verfahren (im Sinne von Energie- und Ressourcenbereitstellung) zur thermischen Verwertung (Trocknung, Verbrennung, alternative Verfahren) des Klärschlammes gefunden und umgesetzt werden, sondern eben auch die dabei anfallenden End- und Nebenprodukte Berücksichtigung finden. Denn die Monoverbrennung von Klärschlamm erfordert eine nach besten technischen Standards errichtet und betriebene Abgasreinigung sowie einen gangbaren (aus Sicht der Gesellschaft und Umwelt) Entsorgungspfad für feste Rückstände aus der Verbrennung (Filterstäube und -asche), die keiner stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Ebenso muss die Eignung zur Weiterverwendung der Monoverbrennungaschen, als Sekundärressourcen z.B. in der Düngemittelindustrie oder direkt in der Landwirtschaft, gewährleistet werden können und auch die Energiebereitstellung, vor allem die Energieabgabe evtl. in einen kaskadischen Energiekreislauf, möglich sein.

### Ausblick der Monoverbrennung

Um all das Gesagte zu berücksichtigen, soll hier als Ausblick erwähnt werden, dass eine Technikfolgenabschätzung der Klärschlammmonoverbrennung und anschließender Ressourcenrückgewinnung von enormer Bedeutung für die Gesellschaft sein und einen wesentlichen Beitrag zur Verhinderung möglicher negativer Auswirkungen der Implementierung von Monoverbrennungsanlagen leisten kann. Dabei umfasst die Technikfolgenabschätzung im Besonderen die Berücksichtigung der ökonomischen und sozialen Dimension der Nachhaltigkeit und die Feststellung, ob durch die Implementierung eine Verbesserung für das Gemeinwohl erreicht werden kann. Genauso sollte der Zweck der Errichtung von Monoverbrennungsanlagen in der Aufwertung und einer Investition in die Region gesehen werden und das Ziel in der Ermöglichung eines guten Lebens. Dabei könnte die Klärschlammbewirtschaftung als Treiber hin zu einer nachhaltigeren Lebensweise angesehen werden und als Auslöser eines Paradigmenwechsels hin zu einer nachhaltigen Entwicklung und Wirtschaftsweise.

### Ausblick der Klärschlammbewirtschaftung

Die Klärschlammbewirtschaftung ist, wie aus vorher Angeführtem hervorgehen soll, eine sehr komplexe Prozesskette, bietet jedoch die Chance einer nachhaltigen Entwicklung, auch im Sinne der Erreichung der SDGs, im Umgang mit Abfällen, im Besonderen mit Klärschlamm. Um diese Chance zu ergreifen sollten verschiedenste Fachbereiche, die an Klärschlammbewirtschaftung teilhaben wie etwa die Abfall- oder Energiewirtschaft, integriert werden. Im nächsten Unterkapitel soll also auf jene wichtigen Fachbereiche eingegangen werden.

## 6.2 Unterschiedliche Perspektiven der Klärschlammbewirtschaftung

Aus integraler Sicht der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung können zehn zu berücksichtigende Fachbereiche identifiziert werden. An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass die Abgrenzung der verschiedenen Fachbereiche dem Wissen und Bewusstsein des Verfassers dieser Masterarbeit entspricht, genauso wie damit nur ein aktueller Ist-Stand repräsentiert wird. Durch weitere Untersuchungen können sicherlich, in dieser Masterarbeit unberücksichtigt gebliebene Fachbereiche oder Aspekte in den integralen Prozess der Klärschlammbewirtschaftung eingearbeitet werden, so sollte z.B. eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Energiebilanzierung der gesamten Prozesskette gesondert angestellt werden sowie auch eine integrale Betrachtung der Möglichkeiten hinsichtlich staatlicher oder privatwirtschaftlicher Förderungen der nachhaltigen Klärschlammbewirtschaftung. Genauso ist es ein Anliegen des Verfassers dieser Masterarbeit an dieser Stelle zu erwähnen, dass aus seiner Sicht eine Sensitivitätsanalyse nach Frederik Vester (2005) von großem Vorteil für die Umsetzung der künftigen Klärschlammbewirtschaftung sein kann, da durch eine solche es möglich wird, das komplexe System Klärschlammbewirtschaftung gesamtheitlich zu betrachten und wesentliche positive und/oder negative Rückkoppelungen hervorzuarbeiten.

Von Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung betroffene Fachbereiche sind also:

- 1) Ressourcenmanagement
- 2) Akteursmanagement
- 3) Landwirtschaft
- 4) Energiewirtschaft
- 5) Naturschutz und Umweltschutz
- 6) Verfahrenstechnik
- 7) Abwasserwirtschaft
- 8) Abfallwirtschaft
- 9) Logistik
- 10) Raumplanung

Abschließend werden nun aus Sicht des Verfassers dieser Masterarbeit wesentliche Chancen, Barrieren und Herausforderungen der Strategie und Umsetzung der künftigen Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung, aus der Perspektive der verschiedenen Fachbereiche, in Ergänzung zu Kapitel 5.2 und wichtige Aspekte als Ausblick angeführt. In folgender Tabelle 41 sind wesentliche Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die im Folgenden kurz erläutert werden, aus Sicht der einzelnen Fachbereiche aufgelistet.

Tabelle 41: Wesentliche Chancen, Barrieren und Herausforderungen aus der Perspektive der einzelnen Fachbereiche (Eigene Darstellung).

Fachbereich	Chance	Barriere	Herausforderung
RESSOURCEN-MANAGEMENT	Generierung von Sekundärressourcen und Schonung von Primärressourcen	Wirtschaftliche Recyclingverfahren und räumliche Verteilung der Ressourcen und des Bedarfs	Integrale Betrachtung der Ressourcenbewirtschaftung Ressourcen-Plan
AKTEURS-MANAGEMENT	Integration und Partizipation	Unwissen und Unkenntnis sowie fehlende Kompromissbereitschaft	Information, Kommunikation und Diskussion
LANDWIRTSCHAFT	Nährstoffkreisläufe schließen und Nahrungsmittelversorgung garantieren	Ausbringung von Schadstoffen	Einsatz von Klärschlamm(produkten - Düngemittel) ermöglichen
ENERGIEWIRTSCHAFT	Energiegewinnung, -auskoppelung und -speicherung sowie die Versorgungssicherheit erhöhen	Bestehende Energieinfrastruktur	Energiemanagement
NATURSCHUTZ/ UMWELTSCHUTZ	Entsorgungssicherheit	Akzeptanz von Verbrennungsanlagen	Schadstoffmanagement und Emissionsbegrenzung
VERFAHRENS-TECHNIK	Optimale und effiziente Technologien/Verfahren bereitstellen	Monopolisierung eines Verfahrens	Weiterentwicklung junger Technologien/Verfahren
ABWASSERWIRTSCHAFT	Entsorgungssicherheit, ARA als Ressource-Recovery-Facility oder regionale Energiezelle	Bestehende Abwasserinfrastruktur, Kosten und Abwassergebühren	Nachhaltige Klärschlamm-bewirtschaftung etablieren evtl. durch Schaffung von Klärschlammverbänden
ABFALLWIRTSCHAFT	Klärschlamm als Ressource, Abfallhierarchie anwenden	Klärschlamm als Abfall, Schadstoffgrenzwerte	End-of-Waste Status, effizientes Schadstoffmanagement für risikoarmes Wertstoffrecyclen
LOGISTIK	Vermeidung von Verkehr und THG-Emissionen	Bestehende Transportinfrastruktur	Effiziente Logistik für die gesamte Klärschlamm-Prozesskette
RAUMPLANUNG	Energieraumplanung und Ressourcenmapping	Bestehende Raum- und Siedlungsstruktur	Standortfindung, Langfristige und nachhaltige Entwicklungskonzepte

Im Sinne eines umfassenden Ressourcen-Plans, ähnlich der Wasserrahmenrichtlinie für den Gewässerschutz, soll die zukünftige Klärschlammverwertung in Monoverbrennungsanlagen genutzt werden, um Klärschlamm als Ressource, stofflicher wie auch energetischer Art, zu nutzen und ARA als Ressource-Recovery-Facility zu sehen und im regionalen Kontext zu verwenden. Die Umsetzung eines solchen Ressourcen-Plans kann evtl. durch Einbindung des Ressourcen-Plans in UVP-Verfahren erfolgen, sollte jedoch gleichzeitig eine umfassende Bürgerbeteiligung garantieren und sich auch an der Abfallhierarchie der Abfallwirtschaft orientieren. In einem solchen Ressourcen-Plan stehen natürlich Recycling und Verwertung der Ressourcen im Vordergrund, jedoch geht es auch im Sinne der Nachhaltigkeit darum, unnötigen Verbrauch von primären Ressourcen zu vermeiden, sowie primäre Ressourcen durch sekundäre Ressourcen, zumindest teilweise, zu ersetzen. Solch eine integrale Betrachtung der Ressourcenbewirtschaftung setzt aber voraus, dass wirtschaftliche Recyclingverfahren zur Verfügung stehen und umgesetzt werden können, sodass auch die räumliche Verteilung der Ressourcen optimal genutzt und der regional sowie zeitlich unterschiedliche Bedarf an bestimmten Ressourcen berücksichtigt werden kann. Der stofflichen Verwertung von speziellen Abfallfraktionen kann entgegenstehen, dass unter bestimmten Umständen alternative Behandlungsverfahren günstiger sind, auch deshalb besteht die Herausforderung darin, hochwertige Sekundärrohstoffe anzubieten, die mit den Preisen und den Qualitäten von Primärrohstoffen mithalten können (UBA, 2016, S. 236). Eine weitere Barriere für die Ressourcenbewirtschaftung stellt die Definition des Klärschlamm als Abfall dar, denn dadurch werden mögliche Nutzungen von vornherein unterbunden, wie z.B., dass nur zertifizierte Abfallverwerter Klärschlamm weiterverwerten können. Diesem Umstand sollte durch die Definition des End-of-Waste-Status der Klärschlammmasche, oder auch ähnlicher Produkte aus der Klärschlammverwertung wie z.B. Bio- oder Hydrokohlen, Rechnung getragen werden. So

kann hier als Ausblick angeführt werden, dass Klärschlamm auf die positive Abfallliste gesetzt wurde und somit die Herstellung von Abfallprodukten aus schadstofffreiem Klärschlamm wie z.B. Dünger erleichtert wird (KACPRZAK, et al., 2017, S. 40).

Eine überregionale Ressourcenbewirtschaftung erfordert ein funktionierendes Akteursmanagement, sodass alle relevanten Akteure und Stakeholder über Branchen- und Fachbereichsgrenzen hinweg in den Entscheidungs-, Planungs- und Umsetzungsprozess der Klärschlammbewirtschaftung integriert werden. Auch die Möglichkeit der Partizipation von einzelnen Bürgern oder gesellschaftlichen Gruppen an Entscheidungsprozessen stellt einen wichtigen Punkt, auch für die Akzeptanz von Monoverbrennungsanlagen, dar. Um eine gerechte Entscheidung in Sachen Klärschlammverwertung treffen zu können, sollte es allen betroffenen und interessierten Bürgern ermöglicht werden die wesentlichen Vorgänge wahrnehmen zu können, d.h. dass Visualisierungen der Konzepte und Projekte mit technischen Hilfsmitteln sehr große Wirkungen erzeugen und dabei den Entscheidungsprozess erleichtern können. Aber nicht nur Visualisierungen sondern auch Kenntnis, d.h. Bereitstellung von Information über die Prozessketten, die Energieerzeugung, den Ressourcenverbrauch und die Technisierung der Prozesse kann helfen das Bewusstsein von und die Verantwortung für die Klärschlammverwertung zu stärken. Information, Kommunikation und Diskussion aller Akteure, Stakeholder, Interessengruppen und der Gesellschaft im Ganzen über die relevanten Vorgänge stellen wesentliche Prozesse dar, die erst eine erfolgreiche, zielgerichtete und möglichst konfliktfreie Umsetzung der nachhaltigen zukünftigen Klärschlammbewirtschaftung ermöglichen. Denn dadurch sollen Unwissen und Unkenntnis, die in manchen Fällen zu faktisch unbegründeten und irrationalen Sorgen und Ängsten führen, ausgeräumt werden und somit die Kompromissbereitschaft für die für den Großteil der Beteiligten zufriedenstellenden Lösungen erhöhen. Neben einem integralen Ressourcenmanagement und einem gelingenden Akteursmanagement kann durch eine nachhaltige Klärschlammbewirtschaftung und z.B. der Herstellung von Düngemitteln aus Klärschlamm ein wichtiger Beitrag zur Schließung von Nährstoffkreisläufen geleistet werden. Denn die Produkte, die durch die Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung generiert werden, sollen vordergründig in der Landwirtschaft zum Einsatz kommen, sofern damit keine Schadstoffe in die Umwelt gelangen, oder zumindest in nicht tolerierbaren Mengen und Konzentrationen. Durch die Versorgung der Landwirtschaft mit essenziellen Nährstoffen wie Phosphor kann die Nahrungsmittelversorgung gesichert und nachhaltiger gestaltet werden. Dazu muss aber der Klärschlamm durch die Verwertung in eine Form gebracht werden, sodass die in ihm enthaltenen Nährstoffe auch tatsächlich zur Verfügung stehen und gleichzeitig eben keine Schadstoffe ausgebracht werden. Denn auch aus Sicht des Umweltschutzes ist die Entsorgungssicherheit, die durch die Verbrennung von Klärschlamm erreicht werden kann, essenziell um nachteilige Umweltbelastungen zu vermeiden. Dafür kann neben dem erwähnten Ressourcenmanagement auch ein Schadstoffmanagement eingeführt werden, durch das ein Großteil relevanter Schadstoffe, vor allem bekannte schädliche Stoffe, erfasst und deren „Lebenszyklus oder –pfad“ erhoben wird, um zu gewährleisten, dass sie in sichere Senken überführt werden. Sowie können, unumgängliche Emissionen, wenn nicht vermieden so doch möglichst gering gehalten werden und unter tolerierbaren festgelegten Grenzwerten bleiben, um dadurch ein nahezu risikoarmes Wertstoffrecyclen des Klärschlammes oder Produkten aus der Klärschlammverwertung durchzuführen.

Neben der stofflichen Verwertung stellt der Klärschlamm auch eine wichtige energetische Ressource dar, die auf dem Weg der ARA hin zu autarken regionalen Energiezellen möglichst vollständig genutzt werden soll. Z.B. durch die Verbrennung des Klärschlammes in Kombination zur stofflichen Verwertung, wobei durch die Verbrennung des org. Materials (vor allem

Kohlenstoff) im Klärschlamm, Wärme ausgekoppelt werden kann. Dabei kann diese Wärme über KWK zur Stromproduktion genutzt werden, denn der Einsatz von hocheffizienten KWK-Technologien, wodurch Primärenergie eingespart und CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden können, wird verstärkt durch das KWK-Gesetz 2008 gefördert (BMWFJ & BMLFUW, 2010, S. 86). Die auskoppelbare Wärme kann aber neben der Stromproduktion auch direkt an Verbraucher über z.B. Fernwärmenetze abgegeben werden, sollten solche in unmittelbarer Umgebung vorhanden sein. Darüber hinaus kann durch thermochemische Prozesse und der Nutzbarmachung der chemisch gebundenen Energie im Klärschlamm Energie evtl. gespeichert werden, wenn z.B. heizwertreiche Produkte durch HTC, Pyrolyse oder Vergasung des Klärschlammes hergestellt oder synthetische Gase (Syngas, Methangas, Wasserstoff) erzeugt werden. Solche Produkte können nämlich leicht transportiert und an anderer Stelle oder zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden. Dafür müssen sie (vor allem Syngas) aber einer erforderlichen Aufbereitung unterzogen werden. Um die effiziente energetische Nutzung der Ressource Klärschlamm zu ermöglichen, müssen an die Prozesskette Klärschlamm angepasste und optimierte sowie energetisch effiziente Technologien oder Verfahren durch entsprechende Anbieter bereitgestellt und dann auch eingesetzt werden. So ist aus verfahrenstechnischer Sicht die Weiterentwicklung von relativ jungen Technologien und Verfahren zur thermochemischen Verwertung von Klärschlamm sowie auch von Recyclingverfahren eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Dabei können sich Entwicklungen, wie z.B. die momentan favorisierte Monopolstellung der Verbrennung, also vollständigen Oxidation des Klärschlammes, in Zukunft als nachteilig erweisen, da dadurch die Weiterentwicklung und Erforschung von alternativen Verfahren gehemmt und deren paralleler Einsatz in Kombination zur Verbrennung sehr erschwert wird. Dies kann auch deshalb von Nachteil sein, da durch alternative Verfahren zur Verbrennung bestimmte Stoffe, die durch die Verbrennung zerstört werden, jedoch für die Wirtschaft, im speziellen die Landwirtschaft von Bedeutung sein könnten, erhalten und weiterverwertet werden können.

Durch die Einbindung der Klärschlammbewirtschaftung, also auch der ARA und der Energiebereitstellung durch Klärschlammmonoverbrennung in regionale Energiekonzepte kann u.U. ein Beitrag zur Versorgungssicherheit in Bezug auf Energie geleistet werden. Durch ein regionales und überregionales Energiemanagement, das auch die bestehende Energieinfrastruktur, die in bestimmten Fällen sicherlich als Barriere gesehen werden kann, berücksichtigt, können regionale und zeitliche Unterschiede in der Energieversorgung sowie im Energiebedarf erfasst werden. Dadurch sollten regionale Energiekonzepte zur Festlegung von Fern- und Nahwärme(kälte)-Versorgungsgebieten erstellt werden, um (Ab/Fern)Wärme, durch die Monoverbrennung von Klärschlamm gewonnen, effizient zu nutzen (BMWFJ & BMLFUW, 2010, S. 88). Auch bei der Planung von Energieversorgungssystemen sollte bedacht werden, dass unterschiedliche Energieformen wesentlich verschiedene Verluste während dem Transport aufweisen, so kann bei einem 1%igen Verlust von Energie, Gas 250 km, Hochspannung-Elektrizität 100 km, Mittelspannung-Elektrizität 17 km und Wärme weniger als 1 km befördert werden (STOEGLEHNER, et al., 2016, S. 26). Deshalb sollten bei der Planung und Errichtung von Monoverbrennungsanlagen Energie- und Klimakonzepte erstellt werden, die unter anderem in regionale energetische Raumordnungskonzepte eingebunden sind (BMWFJ & BMLFUW, 2010, S. 62). Denn die Nutzung und der Ausbau von Einzelanlagen, die aufgrund von hocheffizienten KWK-Technologien Wärme und Strom produzieren, müssen nachfrageorientiert und regional optimiert umgesetzt werden, sodass sie zu einer erhöhten Versorgungssicherheit bezüglich Energie beitragen können (BMWFJ & BMLFUW, 2010, S. 84-85).

Um eine nachhaltige Klärschlammbewirtschaftung zu etablieren, die die bestehende Abwasserinfrastruktur berücksichtigt und ARA dadurch entlastet, dass sie für Entsorgungssicherheit in Bezug auf den Klärschlamm sorgt, sowie unter Umständen zu Einnahmen durch Energieabgabe oder Ressourcengenerierung führt und somit auch unnötige Kosten oder Erhöhung der Abwassergebühren vermeidet, könnte die Schaffung von „Klärschlammverbänden“ von Vorteil sein. Diese könnten sich gezielt um die Klärschlammverwertung kümmern und eine Plattform für den Austausch zwischen den beteiligten Akteuren und Stakeholder darstellen, um auch logistische Probleme in Bezug auf den Transport von Klärschlamm oder auch Produkten aus der Klärschlammverwertung optimal zu lösen. Denn die Vermeidung von Verkehr und somit von THG-Emissionen sollte oberste Priorität bei der Umsetzung der zukünftigen Klärschlammbewirtschaftung, im Besonderen durch Monoverbrennung, haben. Dabei stellt natürlich die bestehende Transportinfrastruktur eine mögliche Barriere dar. Dennoch sollte durch integrale Betrachtung der gesamten Prozesskette und Optimierung aller Prozessschritte und dazu eingesetzter Verfahren und Technologien eine effiziente Logistik geplant und dazu auch intermodaler Transport eingesetzt werden. Sowie auch die Raumplanung Wichtiges zur Umsetzung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung beitragen kann. So sollte bei der Planung von Monoverbrennungsanlagen unbedingt die bestehende Raum- und Siedlungsstruktur berücksichtigt werden um die Nähe von Abnehmern für Energie und/oder Klärschlammprodukten zu garantieren. D.h. durch Konzepte wie der Energieraumplanung und dem Ressourcenmapping sollten langfristige und nachhaltige Entwicklungskonzepte geplant werden, in die auch die Klärschlammverwertung integriert wird. So sollte dadurch die Standortfindung für Monoverbrennungsanlagen, die keine geringe Herausforderung darstellt, zufriedenstellend gelöst werden können.

Wie aus Angeführtem hervorgehen soll, sind an der Klärschlammbewirtschaftung unterschiedlichste Fachbereiche beteiligt. Diese alle zu berücksichtigen sollte eine erfolgreiche und nachhaltige Klärschlammbewirtschaftung in der Zukunft ermöglichen. Da nur durch eine integrale Betrachtung das stoffliche sowie energetische Potenzial der Ressource Klärschlamm voll genutzt werden kann und dabei alle Interessensträger durch einen optimalen Kompromiss zufrieden gestellt werden können.

## 7. Zusammenfassung

Im österreichischen Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP) 2017 wird gefordert, dass bis zum Jahr 2030 65 – 85 % des in Österreich anfallenden kommunalen Klärschlammes einer Phosphorrückgewinnung zugeführt werden (BMNT, 2017). Dazu soll der Klärschlamm vorher in Monoverbrennungsanlagen thermisch verwertet und für die Rückgewinnung aufbereitet werden. Mit vorliegender Masterarbeit wird versucht einen Beitrag zur Diskussion dieses Ziels zu leisten und den alleinigen Weg über die Monovebrennung kritisch zu beleuchten, in dem auch Alternativen dazu angesprochen werden. Zum einen wird durch eine Literaturrecherche und Grundlagenerhebung der aktuelle Stand der Klärschlammbewirtschaftung, vor allem der Klärschlammverwertung erhoben und davon ausgehend aktuelle Entwicklungen hervorgehoben. Dabei kann festgestellt werden, dass momentan in Österreich schon über 50 % des kontinuierlich anfallenden kommunalen Klärschlammes vor allem in Müllverbrennungsanlagen einer thermischen Behandlung zugeführt werden und dass bereits 28 % durch die Monoverbrennungsanlage in Wien verwertet werden. Es kann betont werden, dass momentane Entwicklungen in der Klärschlammbewirtschaftung vor allem in Richtung energetischer Verwertung durch Monoverbrennung weisen, nicht nur in Österreich, sondern auch in Nachbarländern wie Deutschland, der Schweiz oder auch in der gesamten Europäischen Union (EU). Das hauptsächlich treibende Moment dabei ist die Rückgewinnung des Phosphors, also die stoffliche Verwertung des Klärschlammes, wozu eben die Monoverbrennung als beste Verwertungsstrategie erachtet wird. Vor allem in letzter Zeit konsolidierten Gesetzestexten, wissenschaftlichen Publikationen und Empfehlungen durch öffentliche Stellen ist zu entnehmen, dass in Zukunft aufgrund des Risikos des Schadstoffaustrags durch landwirtschaftliche Direktverwertung des Klärschlammes von dieser Art der Klärschlammverwertung Abstand genommen wird und eine Verwertungsart, wie die Verbrennung, durch die Schadstoffe größtenteils eliminiert werden können, bevorzugt wird. Dabei steht aber das Ziel der Rückgewinnung des Phosphors in Kontrast zur Verbrennung, da durch selbige andere ebenfalls wichtige Stoffe im Klärschlamm eliminiert und nicht mehr genutzt werden können. Durch einen Überblick über die Grundlagen, Voraussetzungen und möglichen Verfahren der thermochemischen Verwertung von Klärschlamm soll versucht werden die Monoverbrennung und die Eignung deren Endprodukte einzuordnen und auch alternative Verfahren zur thermochemischen Behandlung des Klärschlammes wie z.B. Hydrothermale Karbonisierung (HTC), Pyrolyse oder Vergasung, parallel oder in Kombination zur Monoverbrennung durch Wirbelschichtfeuerung, in Betracht zu ziehen. Auch das stoffliche und energetische Potenzial, das die Ressource Klärschlamm darstellt, wird hervorgehoben, im Besonderen durch Aufzeigen der Möglichkeiten die durch Monoverbrennung des Klärschlammes realisiert werden können.

Darüber hinaus wird mit der Grundlagenerhebung versucht, die gesamte Prozesskette des Klärschlammes, also von den Bedingungen der Entstehung bis zur Entsorgung des Klärschlammes, zu erfassen und gesamtheitlich zu betrachten. Genauso wie Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die sich aus momentaner Sicht ergeben aufzuzeigen und mögliche Ansatzpunkte zur Verbesserung der Qualität des Klärschlammes und seiner Eignung zur stofflichen wie energetischen Verwertung zu bestimmen. Dabei kann festgestellt werden, dass sich eine sinnvolle integrale Betrachtung der Prozesskette des Klärschlammes über fünf wesentliche Prozesse, wie in Abbildung 41 dargestellt, erstreckt.

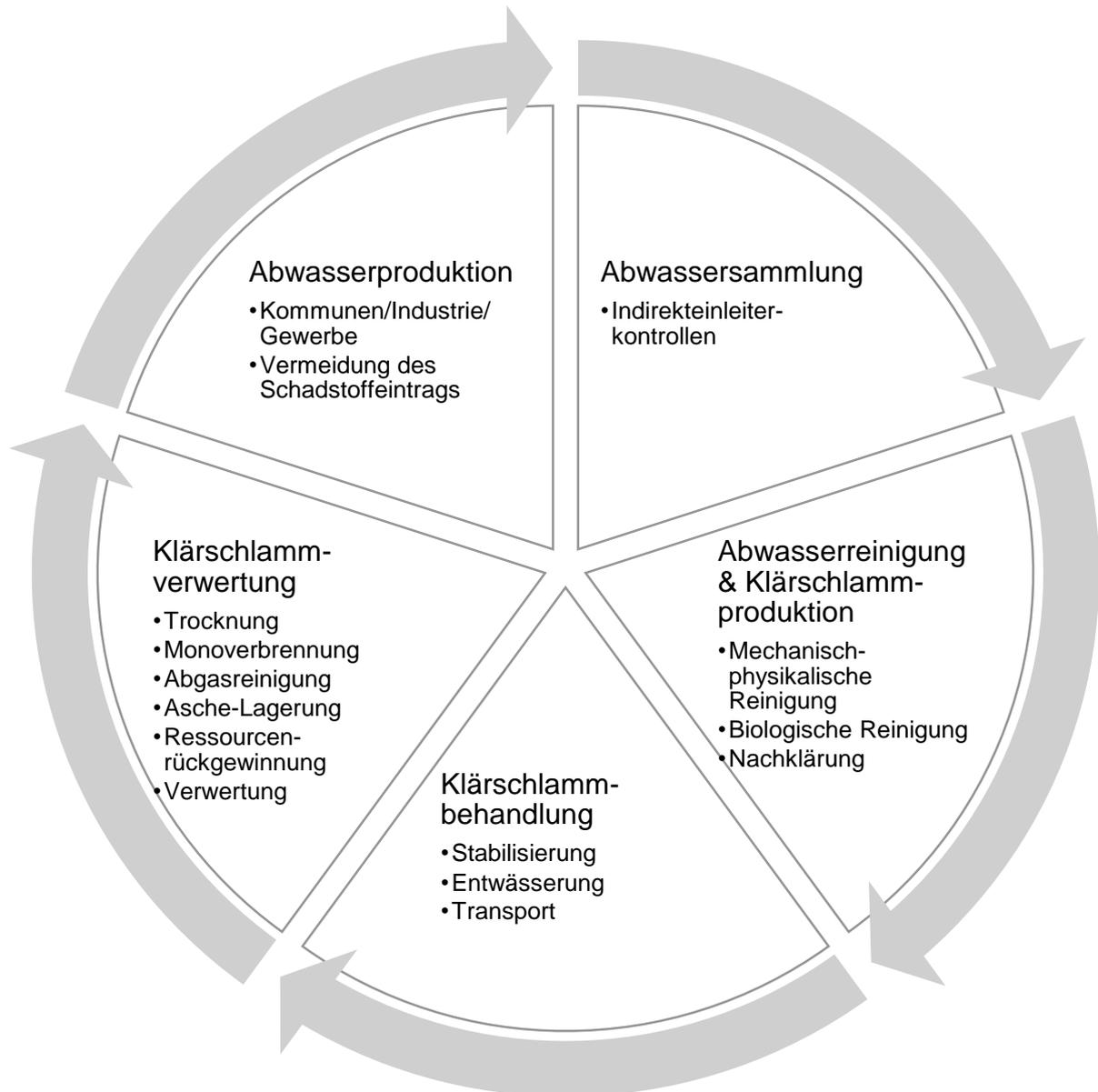


Abbildung 41: Prozesskette des Klärschlammes (Eigene Darstellung).

Denn schon bei der Entstehung des Abwassers, bei dessen Sammlung und Reinigung können weitreichende Vorkehrungen getroffen werden, um Ressourcen, wie z.B. Phosphor oder Energie, die aus dem Klärschlamm gewonnen werden soll, bestmöglich zu nutzen. So kann am Anfang der Prozesskette der Schadstoffeintrag ins Abwasser vermieden oder verringert werden, durch z.B. Kontrollen der Einleitung ins Kanalsystem oder Vermeidung von bestimmten Stoffen in der Abwasserreinigung, wie z.B. Metallsalzen oder ähnlichem. Denn die Schadstoffe, die am Ende im Klärschlamm enthalten sind und dessen Eignung zur Weiterverwertung mindern, stammen auch aus diesen Prozessen und könnten unter günstigen Umständen vermieden werden. Die Prozesse die im speziellen den Klärschlamm betreffen, also die Klärschlammproduktion, -behandlung und -verwertung sollten optimal aufeinander abgestimmt werden, um das gewünschte Endprodukt energieeffizient und ohne Verunreinigungen zu generieren. Dabei können Prozessschritte wie die Entwässerung oder Stabilisierung des Klärschlammes auf die weitergehende Verwertung wie Trocknung oder Verbrennung abgestimmt werden, um evtl. Konkurrenz um bestimmte Stoffe wie z.B. organischen Kohlenstoff zu vermeiden und den Klärschlamm für den Transport und die Weiterverwertung optimal aufzubereiten. Genauso sollte

auch die Verwertungsstrategie, die aus unterschiedlichen Prozessschritten wie z.B. der Trocknung, Verbrennung, Wertstoffrückgewinnung und Wiederverwertung in verschiedenen Wirtschaftszweigen besteht, sorgfältig ausgewählt werden. So kann die kosten- und energieeffiziente sowie nachhaltige Generierung der Endprodukte aus der Klärschlammverwertung wie z.B. Düngemittel für die Landwirtschaft, Sekundärressourcen für Düngemittelindustrie oder Metall verarbeitende Industrie oder heizwertreiche Produkte für die Energiewirtschaft, zu ermöglichen. Da die gesamte Prozesskette von den einzelnen Prozessschritten unterschiedlich stark beeinflusst wird, sollte von Anfang Wert daraufgelegt werden, das gewünschte Ziel der Klärschlammverwertung zu definieren und alle Prozesse darauf abzustimmen, um auch zeitliche und regional/lokal optimal angepasste Strategien, die die Dezentralität des Abwassersystems und die angestrebte Zentralität der Klärschlammverwertung vereinbaren, zu entwickeln und umzusetzen.

Neben dem aktuellen Stand und momentanen Entwicklungen in der Klärschlammbewirtschaftung und der Beschreibung der Prozesskette des Klärschlammes, liegt ein weiterer Hauptfokus dieser Masterarbeit auf der Erhebung verschiedenster Fachbereiche und Branchen, die für eine gelingende und nachhaltige Klärschlammverwertung in der Zukunft von grundlegender Bedeutung sind und deshalb in die Klärschlammbewirtschaftung integriert werden sollten. Dazu wurden Experteninterviews mit Experten aus unterschiedlichen Fachbereichen durchgeführt, um zum einen zu beteiligende Fachbereiche zu identifizieren und im weiteren Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die sich durch Integration und Beteiligung der verschiedenen Fachbereiche an der Klärschlammbewirtschaftung, im Besonderen der Verwertung durch Monoverbrennung, ergeben, zu bestimmen. In nachfolgender Abbildung 42 sind die, nach momentanem Wissensstand des Verfassers dieser Masterarbeit, identifizierten und ausgewählten Fachbereiche angeführt.

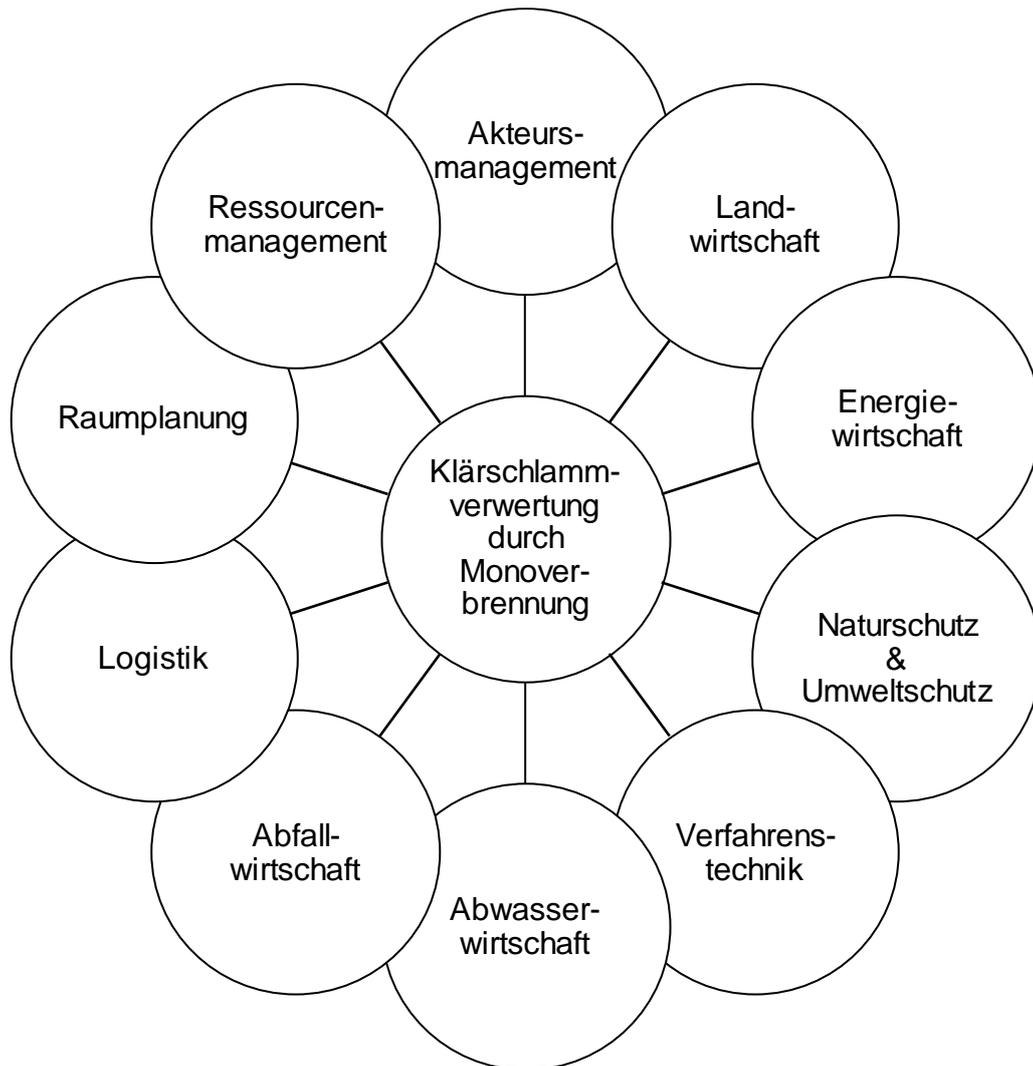


Abbildung 42: In Klärschlammbewirtschaftung zu integrierende Fachbereiche (Eigene Darstellung).

Als wohl wesentlichste Chance, die sich aus der Integration angeführter Fachbereiche ergibt, ist die nachhaltige stoffliche wie energetische Nutzung der Ressource Klärschlamm anzuführen. Dadurch können Produkte durch die Klärschlammverwertung generiert werden, die u.a. in der Landwirtschaft zum Einsatz kommen und dadurch helfen, Nährstoffkreisläufe zu schließen, ohne gefährliche Schadstoffe in die Umwelt gelangen zu lassen und somit ein effizientes, langfristiges und regional angepasstes Ressourcenmanagement, vor allem knapper und sehr wichtiger Ressourcen, zu ermöglichen. Doch ergeben sich für die Umsetzung der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung und anschließender Sekundärressourcenrückgewinnung zahlreiche Barrieren und große Herausforderungen. So sollte, wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, das optimale Verfahren zur Verwirklichung genannter Ziele bestimmt und umgesetzt werden. Dabei ergeben sich Herausforderungen wie z.B. die Standortfindung für zu errichtende Monoverbrennungsanlagen, die nur in Zusammenarbeit mit verschiedensten Fachbereichen und vor allem in engem Dialog mit allen Akteuren, Stakeholdern und Betroffenen, wozu auch Anrainer und Bürger im Allgemeinen gezählt werden sollen, gemeistert werden können. Denn nur so lassen sich Barrieren wie z.B. Nichtakzeptanz und Protest verhindern und in konstruktive Prozesse überführen.

Durch Beschreibung der gesamten Prozesskette des Klärschlammes und Identifikation verschiedenster, an der gesamten Klärschlammbewirtschaftung und

Klärschlammmonoverbrennung zu beteiligender Fachbereiche soll ersichtlich werden, dass die Erarbeitung der zukünftigen Strategie und Umsetzung einer langfristig tragfähigen und sinnvollen sowie nachhaltigen Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung, eine sehr komplexe Materie ist und wohl am besten gelingt, wenn alle Beteiligten von Anfang an gemeinsam nach der besten Lösung suchen. Denn durch Öffnung der Klärschlambewirtschaftung für Fachbereiche, die bisher nicht oder nur am Rande beteiligt waren, soll für die zukünftige Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung ein breiter gesellschaftlich akzeptierter Konsens gefunden werden, um das Endprodukt aus der Abwasserreinigung, die Ressource Klärschlamm, optimal zu nutzen und damit einen regionalen Mehrwert zu generieren, der hilft in Zukunft eine tragfähige und umweltschonende Lebensweise zu realisieren.

## 8. Literaturverzeichnis

- ABTEILUNG MSE-Z. (2016). *Klärschlammbehandlungskonzept der Münchner Stadtenwässerung Bedarfsplanung Stufe 1*. München: Münchner Stadtentwässerung. Von [https://www.ris-muenchen.de/RII/RII/ris\\_vorlagen\\_dokumente.jsp?risid=4033800](https://www.ris-muenchen.de/RII/RII/ris_vorlagen_dokumente.jsp?risid=4033800) am 12.04.2018 abgerufen
- AMANN, A., ZESSNER, M., & ZOBOLI, O. (15.-17. Oktober 2017). *Vortrag am 22. Dreiländertreffen der Abfallbranche: Klärschlamm und Phosphorrückgewinnung in Österreich*. Von VBSA: [http://vbsa.ch/wp-content/uploads/2017/10/12\\_Amann\\_TU-Wien.pdf](http://vbsa.ch/wp-content/uploads/2017/10/12_Amann_TU-Wien.pdf) am 22.02.2018 abgerufen
- ANGELUCCI, G. (Dezember 2017). *Unveröffentlichte Präsentation: Klärschlämme in Südtirol*. Von Autonome Provinz Bozen - Südtirol, Abteilung 29 - Landesagentur für Umwelt, Amt 29.6 - Amt für Abfallwirtschaft: Erhalten von Dr. Ing. Engl Konrad am 28.02.2018 abgerufen
- BÄTTIG, M., BÜSSER, S., FRISCHKNECHT, R., KLINGLER, G., KÜTTEL, P., & VON SCHULTHESS, R. (2011). *Vergleich verschiedener Entsorgungswege des Klärschlammes aus der Region Luzern mittels Multikriterienanalyse und Ökobilanzen*. Luzern: HOLINGER AG, ESU-services GmbH, ecoconcept AG im Auftrag des Schweizer UBA, Kantons Luzern, Recycling Entsorgung Abwasser Luzern.
- BAT-WI. (2017). *Draft: Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Waste Incineration (BAT-WI)*. EU: JOINT RESEARCH CENTRE (JRC). Von <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/> am 07.02.2018 abgerufen
- BAUKNECHT, D., BÜRGER, V., RITTER, D., VOGEL, M., LANGNIß, O., BRENNER, T., CHVANOVA, E., & GEIER, L. (2017). *Bestandsaufnahme und orientierende Bewertung dezentraler Energiemanagementsysteme*. Dessau-Roßlau: DEUTSCHES UBA. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bestandsaufnahme-orientierende-bewertung> am 14.03.2018 abgerufen
- BAUMBACH, G., HARTMANN, H., HÖFER, I., HOFBAUER, H., HÜLSMANN, T., KALTSCHMITT, M., LENZ, V., NEULING, U., NUSSBAUMER, T., OBERNBERGER, I., SCHULZE, A.-L., WILK, V., & WINTER, F. (2016). Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe. In M. KALTSCHMITT, H. HARTMANN, & H. HOFBAUER (Hrsg.), *Energie aus Biomasse* (S. 579-814). 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.
- BMLFUW, & BMWF. (2015). *RESSOURCENNUTZUNG IN ÖSTERREICH*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft. Von [https://www.bmnt.gv.at/umwelt/nachhaltigkeit/ressourceneffizienz/ressourcennutzung\\_daten\\_trends/ressourcenbericht15.html](https://www.bmnt.gv.at/umwelt/nachhaltigkeit/ressourceneffizienz/ressourcennutzung_daten_trends/ressourcenbericht15.html) am 21.03.2018 abgerufen
- BMLFUW, & BWFJ. (2010). *Verordnung des BMLFUW und des BMWFJ über die Verbrennung von Abfällen (AVV)*. Von RIS: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002239> am 29.07.2018 abgerufen

- BMNT. (2017). *BUNDES-ABFALLWIRTSCHAFTSPLAN 2017 TEIL 1*. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Sektion V (Abfallwirtschaft, Chemiepolitik und Umwelttechnologie). Von <https://www.bmnt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/bundes-abfallwirtschaftsplan/BAWP2017-Final.html> am 21.03.2018 abgerufen
- BMNT. (2018). *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2018*. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Von <https://www.bmnt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/bundes-abfallwirtschaftsplan/BAWP2017-Final.html> am 24.07.2018 abgerufen
- BMWFJ, & BMLFUW. (2010). *EnergieStrategie Österreich*. Wien: Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Von <https://www.bmdw.gv.at/EnergieUndBergbau/EnergiestrategieUndEnergiepolitik/Seiten/Energiestrategie.aspx> am 21.03.2018 abgerufen
- BMFWF, & BMLFUW. (2016). *GRÜNBUCH FÜR EINE INTEGRIERTE ENERGIE- UND KLIMASTRATEGIE*. Wien: Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Von <https://www.bmdw.gv.at/EnergieUndBergbau/EnergiestrategieUndEnergiepolitik/Seiten/Gruenbuch-fuer-eine-integrierte-Energie--und-Klimastrategie-.aspx> am 21.03.2018 abgerufen
- BUNGE, R. (2016). *Recovery of metals from waste incinerator bottom ash*. Rapperswil und Bern: UMTEC Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik, VBSA Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen. Von <https://www.umtec.ch/index.php?id=4668&L=0> am 12.06.2018 abgerufen
- CAO, Y., & PAWLOWSKI, A. (2013). Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: Evaluating energy and greenhouse gas emissions implications. *Bioresource Technology* 127, S. 81-91. Von <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412014976?via%3Dihub> abgerufen
- DEHOUST, G., KÜPPERS, P., BLEPP, M., JENSEIT, W., GOLDMANN, D., & BREITENSTEIN, B. (2016). *Überprüfung der Grenzwerte von Metallen in Abfällen, bei deren Überschreitung eine Verwertung mit Metallrückgewinnung der einfachen Abfallverwertung im Versatz oder auf Deponien vorgeht*. Dessau-Roßlau: DEUTSCHES UBA. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ueberpruefung-der-grenzwerte-von-metallen-in> am 07.02.2018 abgerufen
- DICHTL, N., & SCHMELZ, K.-G. (2015). Verfahrenstechnik zur Behandlung von Klärschlamm. In K.-H. ROSENWINKEL, H. KROISS, N. DICHTL, C.-F. SEYFRIED, & P. WEILAND (Hrsg.), *Anaerobtechnik* (S. 113-283). 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- DÜNNEBEIL, A. (n.a.). *Abhängigkeit der Schlammdichte vom Trockenstoffgehalt und Glühverlust*. Von PONDUS@Verfahrenstechnik GmbH: <http://www.pondus-verfahren.de/> am 14.03.2018 abgerufen
- DÜNNEBEIL, A. (n.a.). *Heizwert von Schlämmen*. Von PONDUS@Verfahrenstechnik GmbH: URL: <http://www.pondus-verfahren.de/tabellen1-spezwaerme-tr-gv.pdf> am 20.02.2018 abgerufen

- EGLE, L., LEUTGÖB, J., SCHWARZMÜLLER, E., & ROLLAND, C. (2018). *Entwurf: Umweltbericht zur Strategischen Umweltprüfung*. Wien: MA 48 - Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark. Von <https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/service/pdf/sup-umweltbericht-2018.pdf> am 02.07.2018 abgerufen
- EGLE, L., RECHBERGER, H., & ZESSNER, M. (2014). *Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Von <https://www.bmnt.gv.at/service/publikationen/wasser/Endbericht--Phosphorr-ckgewinnung-aus-dem-Abwasser.html> am 26.02.2018 abgerufen
- EIP-WATER. (Dezember 2017). *ARREAU Review EUROPEAN BEST PRACTICES ON RESOURCE RECOVERY FROM THE WATER CYCLE*. Von eip-water.eu ARREAU - Accelerating Resource Recovery from Water Cycle AG108: <https://www.eip-water.eu/ARREAU> am 24.02.2018 abgerufen
- EU. (12. Dezember 2015). *Übereinkommen von Paris (Deutsche Übersetzung)*. Von EUR-Lex: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:22016A1019(01)) am 26.02.2018 abgerufen
- EU-KOM. (3. März 2010). *MITTEILUNG DER KOMMISSION EUROPA 2020 Eine Strategie für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum*. Von EUR-Lex: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aem0028> am 28.02.2018 abgerufen
- EU-KOM. (27. März 2013). *GRÜNBUCH Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030*. Von EUR-Lex: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1519808286693&uri=CELEX:52013DC0169> am 28.02.2018 abgerufen
- EU-KOM. (2. Dezember 2015). *MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN Den Kreislauf schließen - Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft*. Von EUR-Lex: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1519808756654&uri=CELEX:52015DC0614> am 28.02.2018 abgerufen
- EU-KOM. (23. Februar 2017). *Vorschlag für eine RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung)*. Von EUR-Lex: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1519809101549&uri=CELEX:52016PC0767R\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1519809101549&uri=CELEX:52016PC0767R(01)) am 28.02.2018 abgerufen
- EU-PARL. (2008). *RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien*. Amtsblatt der Europäischen Union. Von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex%3A32008L0098> am 27.07.2018 abgerufen
- EU-PARL/RAT. (2000). *Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rats zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*. Von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32000L0060> am 29.07.2018 abgerufen

- EU-RAT. (1985/1997). *Richtlinie des Rates über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten*. Von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31997L0011:DE:HTML> am 29.07.2018 abgerufen
- EU-RAT. (1986). *Richtlinie des Rates über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft*. Von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31986L0278:DE:HTML> am 29.07.2018 abgerufen
- EU-RAT. (1991). *Richtlinie des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser*. Von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1396865828274&uri=CELEX:31991L0271> am 29.07.2018 abgerufen
- EU-RAT. (1991b). *Richtlinie des Rates zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen*. Von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1396865828274&uri=CELEX:31991L0271> am 29.07.2018 abgerufen
- EU-RAT. (2010). *Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Industrieemissionen (Neufassung - integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)*. Von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32010L0075> am 29.07.2018 abgerufen
- EXAF1. (20. Juni 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Abfallwirtschaft. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXAW1. (28. Februar 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Abwasserwirtschaft. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXAW2. (25. Mai 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Abwasserwirtschaft. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXBO1. (3. Juli 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Bodenbewirtschaftung. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXDÜ1. (22. Juni 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Düngemittelindustrie. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXNH1. (13. Juni 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Nachhaltigkeit. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXRP1. (4. Juni 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Raumplanung. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXUBT1. (1. Juni 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Umweltbiotechnologie. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXUWRP1. (7. Juni 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Umwelt- und Ressourcenpolitik. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXVT1. (5. Juni 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht der Verfahrenstechnik. (T. ZINGERLE, Interviewer)
- EXVW1. (29. Mai 2018). Experteninterview: Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung aus Sicht des Verkehrswesens. (T. ZINGERLE, Interviewer)

- FEHRENBACH, H., KÖPPEN, S., KAUERTZ, B., DETZEL, A., WELLENREUTHER, F., BREITMAYER, E., ESSEL, R., CARUS, M., KAY, S., WERN, B., BAUR, F., BIENGE, K., & VON GEIBLER, J. (2017). *BIOMASSEKASKADEN Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis*. Dessau-Roßlau: DEUTSCHES UBA. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biomassekaskaden-mehr-ressourceneffizienz-durch> am 21.03.2018 abgerufen
- FRANCK, J. (26. April 2017). *Vortrag bei der Veranstaltung: "Ressource Klärschlamm: Ansätze für zukunftsfähige Nutzungsstrategien": Monoklärschlammverbrennung: Verwertung oder doch nur Entsorgung?* Von born-ermel.eu: <https://born-ermel.eu/vortraege/vortraege-detailansicht/monoklaerschlammververbrennung-verwertung-oder-doch-nur-entsorgung.html> am 22.02.2018 abgerufen
- GERBER, H., SCHERER, J., SIEKMANN, K., & SEHN, W. (2010). *Neues Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung für kleinere Kläranlagen*. Von siekmann-ingenieure.de: [http://www.siekmann-ingenieure.de/files/10-03-18\\_skript.pdf](http://www.siekmann-ingenieure.de/files/10-03-18_skript.pdf) am 24.02.2018 abgerufen
- GLÄSER, J., & GRIT, L. (2010). *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse*. 4. Auflage. Wiesbaden: ©VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- GLATZER, A., & FRIEDRICH, M. (9. September 2015). *Vortrag bei 1. DWA - Netzwerktag Klärschlammnetzwerk Nord-Ost: Klärschlamm-Monoverbrennung - wirtschaftliche und technische Grenzen*. Von dwa-no.de: <https://www.dwa-no.de/de/> am 22.02.2018 abgerufen
- GLEIS, M. (2018). Thermische Abfallbehandlung. In P. KURTH, A. OEXLE, & M. FAULSTICH (Hrsg.), *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft* (S. 621-643). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- GW. (Januar 2017). *MARKET MAP Beating the burn rate for resource and energy recovery from sludge*. Von ostara.com: <http://ostara.com/project/global-water-intelligence-beating-burn-rate-resource-energy-recovery-sludge/> am 24.02.2018 abgerufen
- HAO, Z., YANG, B., & JAHNG, D. (2018). Combustion characteristics of biodried sewage sludge. *Waste Management* 72, S. 296-305. Von <https://www-1sciencedirect-1com-1000dbc9v0fa6.pisces.boku.ac.at/science/article/pii/S0956053X17308073?via%3Dihub> am 09.03.2018 abgerufen
- HERTLE, H., JENTSCH, A., EISENMANN, L., BRASCHE, J., BRÜCKNER, S., SCHMITT, C., SAGER, C., & SCHURIG, M. (2016). *Die Nutzung von Exergieströmen in kommunalen Strom-Wärme-Systemen zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Neutralität von Kommunen bis zum Jahr 2050*. Dessau-Roßlau: DEUTSCHES UBA. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-nutzung-von-exergiestromen-in-kommunalen-strom> am 21.03.2018 abgerufen
- INTECUS GmbH. (2016a). *Guidance for decision-making on sewage sludge management*. Dessau-Roßlau: DEUTSCHES UBA. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/guidance-for-decision-making-on-sewage-sludge> am 21.03.2018 abgerufen
- INTECUS GmbH. (2016b). *Technical Guide on the treatment and recycling techniques for sludge from municipal waste water treatment*. Dessau-Roßlau: DEUTSCHES UBA. Von

- <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/technical-guide-on-the-treatment-recycling-0> am 21.03.2018 abgerufen
- KABBE, C., & KRAUS, F. (2018). Phosphor - der Flaschenhals des Lebens. In P. KURTH, A. OEXLE, & M. FAULSTICH, *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft* (S. 691-709). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- KACPRZAK, M., NECZAJ, E., FIJALKOWSKI, K., GROBELAK, A., GROSSER, A., WORWAG, M., RORAT, A., BRATTEBO, H., ALMAS, A., & SINGH, B. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research* 156, S. 39-46. Von <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935117304322?via%3Dihub> am 24.06.2018 abgerufen
- KRETSCHMER, F. (2016b). Thermische Nutzung von Abwasser - Instrumente zur Verbreitung und mögliche Betreibermodelle. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, S. 173-183. Von <https://content.sciendo.com/view/journals/boku/67/3/article-p173.xml> am 29.01.2018 abgerufen
- KRETSCHMER, F., NEUGEBAUER, G., KOLLMANN, R., EDER, M., ZACH, F., ZOTTL, A., NARODOSLAWSKY, M., STOEGLER, G., & ERTL, T. (6. März 2016). Resource recovery from wastewater in Austria: wastewater treatment plants as regional energy cells. *Journal of Water Reuse and Desalination*, S. 421-429. Von <http://jwrd.iwaponline.com/content/6/3/421> am 21.03.2018 abgerufen
- KRÜGER, O., & ADAM, C. (2014). *Monitoring von Klärschlammmonverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik*. Dessau-Roßlau: DEUTSCHES UBA, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoring-von-klärschlammmonverbrennungsaschen> am 07.02.2018 abgerufen
- KÜGLER, I., ÖHLINGER, A., & WALTER, B. (2004). *DEZENTRALE KLÄRSCHLAMMVERBRENNUNG*. Wien: ÖSTERREICHISCHES UBA. Von [http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationsdetail/?pub\\_id=1524](http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationsdetail/?pub_id=1524) am 21.03.2018 abgerufen
- LfU BAYERN. (2018). *Thermische Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle und Klärschlamm*. Von Bayerisches Landesamt für Umwelt: [https://www.lfu.bayern.de/abfall/ueberwachung\\_aba/siedl\\_klaer/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/abfall/ueberwachung_aba/siedl_klaer/index.htm) am 12.06.2018 abgerufen
- LOMBARDI, L., NOCITA, C., BETTAZZI, E., FIBBI, E., & CARNEVALE, E. (2017). Environmental comparison of alternative treatments for sewage sludge: An Italian case study. *Waste Management*, S. 365-376. Von <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17306189?via%3Dihub> am 15.05.18 abgerufen
- LUHMANN, N. (1997). *Die Gesellschaft der Gesellschaft*. Erste Auflage. Frankfurt am Main: ©Suhrkamp Verlag.
- MAYRING, P. (2008). *Qualitative Inhaltsanalyse Grundlagen und Techniken*. 10. neu ausgestattete Auflage. Weinheim und Basel: Beltz Verlag.

- MONTAG, D., EVERDING, W., MALMS, S., PINNEKAMP, J., REINHARDT, J., FEHRENBACH, H., ARNOLD, U., TRIMBORN, M., GOLDBACH, H., KLETT, W., & LAMMERS, T. (2015). *Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz*. Dessau-Roßlau: DEUTSCHES UBA. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bewertung-konkreter-massnahmen-einer-weitergehenden> am 21.03.2018 abgerufen
- MUKE. (2017). *Abfallbilanz 2016 Ressourcen aus unserer kommunalen Kreislaufwirtschaft*. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Von <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/abfallbilanz-2016/> am 29.07.2018 abgerufen
- MÜLLER. (2017). *ORF-Interview bei OÖ-heute zum Thema "Umdenken bei Kläranlagen"*. Von MüllerUmwelttechnik: <http://www.mueller-umwelttechnik.at/index.php/de/2-uncategorised/198-oberoesterreich-heute-vom-2-11-2017-umdenken-bei-klaeranlagen> am 01.08.2018 abgerufen
- NIKODEM, A., STAUB, M., & HEQUET, L. (2018). Klärschlamm. In P. KURTH, A. OEXLE, & M. FAULSTICH, *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft* (S. 385-402). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- NOLTE, M., & HENSEL, C. (19. Januar 2017). *Vortrag bei 1. DWA - Netzwerktag Klärschlammnetzwerk Nord-Ost: Vergleich zentraler und dezentraler Ansätze zur thermischen Klärschlammverwertung*. Von [dwa-no.de: https://www.dwa-no.de/files/\\_media/content/PDFs/LV\\_Nord-Ost/Klaerschlammforum/2017\\_Netzwerktag\\_3\\_Berlin/2017\\_Hensel\\_Nolte\\_Vortrag.pdf](https://www.dwa-no.de/files/_media/content/PDFs/LV_Nord-Ost/Klaerschlammforum/2017_Netzwerktag_3_Berlin/2017_Hensel_Nolte_Vortrag.pdf) am 22.02.2018 abgerufen
- OLIVA, J., BERNHARDT, A., REISINGER, H., DOMENIG, M., & KRAMMER, H.-J. (2009). *Klärschlamm - Materialien zur Abfallwirtschaft*. Klagenfurt, Wien: ÖSTERREICHISCHES UBA. Von [http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationsdetail/?pub\\_id=1792](http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationsdetail/?pub_id=1792) am 21.03.2018 abgerufen
- ÖWAV. (2014). *ÖWAV-Positionspapier Klärschlamm als Ressource*. Wien: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Von <https://www.oewav.at/Page.aspx?target=196960&mode=form&app=134598&edit=0&current=293866&view=205658&predefQuery=-1> am 21.03.2018 abgerufen
- ÖWAV. (2016). *ÖWAV - ExpertInnenpapier Überlegungen und Vorschläge aus Sicht der Abfallwirtschaft zur Verbesserung der Ressourcenschonung und -effizienz*. Wien: ÖWAV. Von <https://www.oewav.at/Page.aspx?target=196960&mode=form&app=134598&edit=0&current=294006&view=205658&predefQuery=-1> am 21.03.2018 abgerufen
- ÖWAV. (2018). *ABFALLWIRTSCHAFT 2050*. Wien: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Von <https://www.oewav.at/Page.aspx?target=196960&mode=form&app=134598&edit=0&current=309158&view=205658&predefQuery=-1> am 21.03.2018 abgerufen
- PLANK, H. (Januar n.v.). *Unveröffentlichte Präsentation: Thermische Klärschlammverwertung*. Von S2E sludge2energy by Huber & WTE: Erhalten von Dr. Ing. Engl Konrad (ARA TOBL) am 28.02.2018 abgerufen

- PYREG®GmbH. (n.a.). *Das PYREG-Verfahren für Klärschlamm*. Von PYREG: <http://www.pyreg.de/klaerschlamm/> am 06.03.2018 abgerufen
- RAM, M., BOGDANOV, D., AGHAHOSSEINI, A., OYEWU, S., GULAGI, A., CHILD, M., BREYER, C., & FELL, H.-J. (2017). *Global Energy System based on 100 % Renewable Energy*. Lappeenranta, Berlin: Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group. Von <http://energywatchgroup.org/new-study-100-renewable-electricity-worldwide-feasible-cost-effective-existing-system> am 21.03.2018 abgerufen
- REMY, C., & STÜBER, J. (2015). *Weiterentwicklung des Klima- und Ressourceneffizienzpotentials durch HTC-Behandlung ausgewählter Berliner Klärschlämme - HTC-Berlin*. Berlin: KOMPETENZZENTRUM Wasser Berlin GmbH. Von <https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/abfall/klaerschlamm/energie.shtml> am 19.03.2018 abgerufen
- RULKENS, W. (2008). Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. *Energy & Fuels*, S. 9-15. Von <https://pubs-1acs-1org-100137b9v03de.pisces.boku.ac.at/doi/abs/10.1021/ef700267m> am 09.03.2018 abgerufen
- STANGL, W. (2017). *Der hermeneutische Zirkel*. Von [werner.stangl]s arbeitsblätter: <http://arbeitsblaetter.stangl-taller.at/ERZIEHUNGSWISSENSCHAFTGEIST/HermeneutikZirkel.shtml> am 14.07.2018 abgerufen
- STOEGLEHNER, G., & NARODOSLAWSKY, M. (2008). Implementing ecological footprinting in decision-making processes. *Land Use Policy* 25, S. 421-431. Von <https://www-1sciencedirect-1com-1000dbclf008c.pisces.boku.ac.at/science/article/pii/S0264837707000816> am 22.03.2018 abgerufen
- STOEGLEHNER, G., NEUGEBAUER, G., ERKER, S., & NARODOSLAWSKY, M. (2016). *Integrated Spatial and Energy Planning Supporting Climate Protection and the Energy Turn with Means of Spatial Planning*. Wien, Graz: SPRINGER BRIEFS IN APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY.
- STOEGLEHNER, G., NIEMETZ, N., & KETTL, K.-H. (2011). Spatial dimensions of sustainable energy systems: new visions for integrated spatial and energy planning. *Energy, Sustainability and Society*, S. 1:2. Von <https://energysustainsoc.springeropen.com/articles/10.1186/2192-0567-1-2> am 18.06.2018 abgerufen
- STÖGLEHNER, G., ERKER, S., & NEUGEBAUER, G. (2014). *Energieraumplanung. Ergebnispapier der ExpertInnen*. Wien: Geschäftsstelle der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Von <https://www.oerok.gv.at/raum-region/oesterreichisches-raumentwicklungskonzept/oerek-2011/oerek-partnerschaften/abgeschlossene-partnerschaften/energieraumplanung.html> am 21.03.2018 abgerufen
- SYED-HASSAN, S., WANG, Y., HU, S., SU, S., & XIANG, J. (2017). Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamental, challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, S. 888-913. Von <https://www->

1sciencedirect-1com-  
1000dbc9v10e8.pisces.boku.ac.at/science/article/pii/S1364032117309036?via%3Dihub  
am 09.03.2018 abgerufen

TECZAN, M. (2013). *KLÄRSCHLAMMENTSORGUNG IN DER SCHWEIZ*. Bern: SCHWEIZER  
BUNDESAMT FÜR UMWELT BAFU. Von  
[https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/biogene-  
abfaelle/abfallarten/klaerschlam.html](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/biogene-abfaelle/abfallarten/klaerschlam.html) AM 29.07.2018 abgerufen

UBA. (2016). *Elfter Umweltkontrollbericht. Umweltsituation in Österreich*. Wien:  
ÖSTERREICHISCHES UBA. Von  
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/umweltkontrollbericht/ukb/?L=>  
am 21.03.2018 abgerufen

UN-General Assembly. (25. September 2015). *A/RES/70/1 Transforming our world: the 2030  
Agenda for Sustainable Development*. Von [sustainabledevelopment.un.org](https://sustainabledevelopment.un.org):  
<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> am 06.03.2018  
abgerufen

VESTER, F. (2005). *Die Kunst vernetzt zu denken Ideen und Werkzeuge für einen neuen  
Umgang mit Komplexität*. 5. Auflage der 2002 aktualisierten und erweiterten Ausgabe.  
München: Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG.

WÄLTI, C., & ALMEIDA, J. (2016). *Ent-Sorgen? Abfall in der Schweiz illustriert*. Bern:  
SCHWEIZER UBA. Von  
[https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/publikationen-  
studien/publikationen/entsorgen.html](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/publikationen-studien/publikationen/entsorgen.html) am 12.06.2018 abgerufen

## 9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fraktionen aus der kommunalen Abwasserbehandlung gemäß Europäischem Abfallkatalog (EAK), ONR 1921 und ÖNORM S 2100 (OLIVA, et al., 2009, S. 12).....	6
Tabelle 2: Zuordnung wichtiger Kennwerte zu den Schlammarten (BAHRS, 1997. zit. bei (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 122)). .....	8
Tabelle 3: Median-Werte der Klärschlamm-Parameter zusammengefasst nach EW60-Werte der entsprechenden Abwasserreinigungsanlagen von 1998 - 2002 (KÜGLER, et al., 2004, S. 75). .	9
Tabelle 4: Konzentration ausgewählter org. Schadstoffe in den Klärschlämmen der EU (FÜRHACKER & BURSCH, 2007. zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 21)). .....	10
Tabelle 5: Kosten der Behandlung ohne Entwässerung in Österreich (OLIVA, et al., 2009, S. 52). .....	16
Tabelle 6: Aufkommen und Behandlung der kommunalen Klärschlämme (BMNT, 2017, S. 58). .....	17
Tabelle 7: Thermische Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle (BMNT, 2017, S. 97).....	18
Tabelle 8: Wesentliche Abfallarten und zugehörige Massen der in thermischen Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle eingesetzten Abfälle (BMNT, 2017, S. 98).....	18
Tabelle 9: Wesentliche Abfallarten und zugehörige Massen der in thermischen Behandlungsanlagen (ohne Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle) eingesetzten Abfälle (BMNT, 2017, S. 99). .....	19
Tabelle 10: Qualitätsrelevante Eigenschaften der Hauptelemente biogener Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 580). .....	28
Tabelle 11: Qualitätsrelevante Eigenschaften der Nebenelemente sowie der Spurenelemente biogener Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 581)...	28
Tabelle 12: Brennstofftechnische Eigenschaften biogener Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 581).....	29
Tabelle 13: Physikalisch-mechanische Eigenschaften biogener Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 581).....	29
Tabelle 14: Oxidationsreaktionen in Verbrennungsanlagen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 681). .....	39
Tabelle 15: Temperatur, Atmosphäre, Verweildauer und Produkte der einzelnen Prozesse der thermochemischen Umwandlung (BAUMBACH, et al., 2016, S. 694).....	43
Tabelle 16: Verfahren und Anbieter dezentraler Kleinanlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung (QUICKER, 2008, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 72)). .....	45
Tabelle 17: Prozessparameter von 4 ausgewählten Konzepten zur dezentralen Klärschlammmonoverbrennung (UMWELTBUNDESAMT, 2004, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 73)).....	45

Tabelle 18: Monoverbrennungsanlagen in Österreich (STUBENVOLL, 2002, UMWELTBUNDESAMT, 2007 und BAYER, 2007, zit. bei (OLIVA, et al., 2009, S. 74)).	46
Tabelle 19: Übersicht über die aktuellen Konzepte der Verbrennung von kommunalem Klärschlamm in dezentralen kleinen Verbrennungsanlagen (KÜGLER, et al., 2004, S. 2).	46
Tabelle 20: Energiebilanz einer HD-PAWA-THERM®-Anlage (UC PROZESSTECHNIK GMBH, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 48)).	49
Tabelle 21: Möglichkeiten der Stromproduktion (PYROMEX AG, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 41)).	51
Tabelle 22: Liste der Experten, die im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit zum Thema Klärschlammmonoverbrennung befragt wurden sowie Auflistung deren Fachbereiche und der Befragungstermine (Eigene Darstellung).	77
Tabelle 23: Prozesskette der Klärschlammverwertung durch Monoverbrennung (Eigene Darstellung).	79
Tabelle 24: Prozess 1 Abwasserproduktion – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	80
Tabelle 25: Prozessschritt 2 Abwassersammlung – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	80
Tabelle 26: Prozessschritt 3 Abwasserreinigung und Klärschlammproduktion – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	81
Tabelle 27: Prozessschritt 4 Klärschlammbehandlung – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	82
Tabelle 28: Prozessschritt 5 Klärschlammverwertung – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	85
Tabelle 29: Geordnete Kategorien der Fachbereiche (Eigene Darstellung).	90
Tabelle 30: Die wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen, die sich für die Monoverbrennung von Klärschlamm ergeben (Eigene Darstellung).	90
Tabelle 31: 1 Ressourcenmanagement – Chancen, Barrieren, Herausforderungen (Eigene Darstellung).	94
Tabelle 32: 2 Akteursmanagement – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	99
Tabelle 33: 3 Landwirtschaft – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	102
Tabelle 34: 4 Energiewirtschaft – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	105
Tabelle 35: 5 Umweltschutz – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	107
Tabelle 36: 6 Verfahrenstechnik – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	109
Tabelle 37: 7 Abwasserwirtschaft – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).	110

Tabelle 38: 8 Abfallwirtschaft – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).  
..... 112

Tabelle 39: 9 Logistik – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).... 114

Tabelle 40: 10 Raumplanung – Chancen, Barrieren und Herausforderungen (Eigene Darstellung).  
..... 115

Tabelle 41: Wesentliche Chancen, Barrieren und Herausforderungen aus der Perspektive der  
einzelnen Fachbereiche (Eigene Darstellung). ..... 122

## 10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Reststoffanfall auf einer Kläranlage in Abhängigkeit der Prozessstufen (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 115).....	6
Abbildung 2: Überblick über die möglichen Klärschlammverwertungspfade (INTECUS GmbH, 2016b, S. 5).....	11
Abbildung 3: Erreichte Abbaugrade für verschieden aufgeschlossene Faulschlämme bei anaerober Behandlung im submersen Betrieb (KOPP et al., 1997, zit. bei (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 175)). .....	12
Abbildung 4: Konventionelle Faulbehälter mit Betriebseinrichtungen (DICHTL & SCHMELZ, 2015, S. 131). .....	13
Abbildung 5: Thermische Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle im Jahr 2015 (BMNT, 2017, S. 98). .....	18
Abbildung 6: Thermische Behandlungsanlagen (ohne thermische Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle) (BMNT, 2017, S. 99). .....	19
Abbildung 7: Szenarien der Klärschlamm Entsorgung für Südtirol (ANGELUCCI, 2017).....	22
Abbildung 8: Klärschlammverwertungsrouten in 29 europäischen Staaten 2012 – 2015 (EurEau , 2016, EUROSTAT, 2016, und DESTATIS, 2016, zit. bei (KABBE & KRAUS, 2018, S. 693)). ..	22
Abbildung 9: Ablauf der thermochemischen Umwandlung in Luftatmosphäre (BAUMBACH, et al., 2016, S. 648).....	27
Abbildung 10: Differenz zwischen Heizwert und Brennwert bei unterschiedlichem Wassergehalt (BAUMBACH, et al., 2016, S. 610).....	30
Abbildung 11: Heizwert von Klärschlamm in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehalts (NOLTE & HENSEL, 2017). .....	31
Abbildung 12: Heizwert von Klärschlamm in Abhängigkeit des Aschegehalts und bezogen auf Referenz-Schlamm (PLANK, n.v.).....	32
Abbildung 13: Formation und Transformation der Asche(partikel) während der Verbrennung von Klärschlamm (SYED-HASSAN, et al., 2017, S. 903). .....	33
Abbildung 14: Wechselwirkungen zwischen den physikalischen – mechanischen Eigenschaften von biogenen Brennstoffen (BAUMBACH, et al., 2016, S. 620).....	34
Abbildung 15: Abhängigkeit der Schlammichte vom TS und GV (DÜNNEBEIL, n.a.) .....	35
Abbildung 16: Vereinfachtes kinetisches Schema der pyrolytischen Zersetzung von Biomasse (SHAFIZADEH & CHIN, 1977, zit. bei (BAUMBACH, et al., 2016, S. 664)). .....	37
Abbildung 17: Stufen der Biomassevergasung dargestellt an einem Biomassepartikel als eigenständiger Prozess (BAUMBACH, et al., 2016, S. 668). .....	38
Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Luftüberschusszahl und Energieinhalt des Produktgases (GOMEZ-BAREA & LECKNER, 2010, zit. bei (BAUMBACH, et al., 2016, S. 675)). .....	39

Abbildung 19: Detaillierte Abgrenzung der einzelnen Prozesse der thermochemischen Umwandlung (t Verweildauer, T Temperatur, WD Wasserdampf, <sup>a</sup> unter Normalbedingungen) (BAUMBACH, et al., 2016, S. 693).....	42
Abbildung 20: Schema des EcoDry-Verfahrens (ANDRITZ AG, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 29)).....	47
Abbildung 21: Prozessschema der Klärschlammmonoverbrennung BioCon™ Energy Recovery System (NIKODEM, et al., 2018, S. 401).....	47
Abbildung 22: Kalogeo Anlagenkonzept (TECON ENGINEERING GMBH, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 22)).....	48
Abbildung 23: Schema der Pyrobustor-Anlage für dezentrale Klärschlamm Entsorgung (EISENMANN, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 50)).....	49
Abbildung 24: Grundfließbild mit Massenbilanz (UC PROZESSTECHNIK GMBH, zit. bei (KÜGLER, et al., 2004, S. 47)).....	50
Abbildung 25: PYREG-Verfahren (PYREG®GmbH).....	51
Abbildung 26: Prozessschema der thermischen Oxidation Athos™ (NIKODEM, et al., 2018, S. 398).....	52
Abbildung 27: Investitionskosten von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen (16. DIALOG ABFALLWIRTSCHAFT, 2014, zit. bei (FRANCK, 2017)).....	53
Abbildung 28: Kostenvergleich von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen (GLATZER & FRIEDRICH, 2015).....	53
Abbildung 29: Kaskadennutzung von Biomasse nach Fehrenbach et al. (2017, S. 28) (Eigene Darstellung).....	60
Abbildung 30: Phosphorrückgewinnungspotenzial (AMANN, et al., 2017).....	61
Abbildung 31: Kosten der Phosphorrückgewinnung 1 – 5 €/EW*a (AMANN, et al., 2017).....	61
Abbildung 32: Visible Phosphorrückgewinnungs- und Recyclingverfahren und ihr Stand der Ausgereiftheit (KABBE et al., 2015, zit. bei (KABBE & KRAUS, 2018, S. 695)).....	62
Abbildung 33: Schema der methodischen Vorgehensweise während vorliegender Masterarbeit (Eigene Darstellung).....	63
Abbildung 34: Hermeneutischer Zirkel nach Stangl (2017) (Eigene Darstellung).....	65
Abbildung 35: Prozesskette/Stoffstrom, Prozesse und Fachbereiche der Klärschlammbewirtschaftung (Eigene Darstellung).....	75
Abbildung 36: Chancen, Barrieren und Herausforderungen bezogen auf die Prozesskette bzw. den Stoffstrom der Klärschlammbewirtschaftung (Eigene Darstellung).....	78
Abbildung 37: Fachbereiche und die jeweiligen wichtigsten Chancen, Barrieren und Herausforderungen in Zusammenhang mit der Prozesskette bzw. dem Stoffstrom des Klärschlammes (Eigene Darstellung).....	92
Abbildung 38: Darstellung der Fachbereichs-Cluster und deren Verbindungen (Eigene Darstellung).....	93
Abbildung 39: Verwertungsarten und –pfade des Klärschlammes in Österreich im Jahr 2015 laut BAWP 2017 (BMNT, 2017, S. 58) (Eigene Darstellung).....	117

Abbildung 40: Prozesskette des Klärschlammes (Eigene Darstellung)..... 118  
Abbildung 41: Prozesskette des Klärschlammes (Eigene Darstellung)..... 127  
Abbildung 42: In Klärschlammbewirtschaftung zu integrierende Fachbereiche (Eigene Darstellung)..... 129

## 11. Abkürzungsverzeichnis

THG	Treibhausgas
SDG	Sustainable-Development-Goal
EU	Europäische Union
ARA	Abwasserreinigungsanlage
EW	Einwohnerwert (meist in $EW_{60}$ als $BSB_5$ von 60 g/d)
$BSB_5$	Biologischer Sauerstoffbedarf (in fünf Tagen)
ÖWAV	Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
BAWP	Bundes-Abfallwirtschaftsplan
FF	Forschungsfrage
TM	Trockenmasse in kg
EAK	Europäischer Abfallkatalog
Anammox	Anaerobe Ammoniumoxidation
$CO_2$	Kohlenstoffdioxid
N	Stickstoff
org./anorg.	organisch/anorganische
Al	Aluminium
Fe	Eisen
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat
TR	Trockenrückstand in gew. %
GV	Glühverlust in gew. %
HW	Heizwert (oft in kJ/kg)
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
PCB	Polychlorierte Biphenyle

## Abkürzungsverzeichnis

PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
BHKW	Blockheizkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
TS	Trockensubstanz in % (eig. kg/m <sup>3</sup> )
kWh	Kilowattstunde
H <sub>2</sub> O	Wasser
CO <sub>2</sub> -äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlung
MA	Magistratsabteilung (der Stadt Wien)
AbfKlärV	Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Deutschland)
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
BAT	Best Available Technology
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
AVV	Abfallverbrennungsverordnung
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxid (Stickoxid)
K	Kalium
Na	Natrium
S	Schwefel
Cl	Chlor
HCl	Chlorwasserstoffsäure
SO <sub>x</sub>	Schwefeloxid
Pb	Blei
Zn	Zink
Si	Silizium

## Abkürzungsverzeichnis

---

Ca	Calcium
Mg	Magnesium
GR	Glührückstand in gew. %
HTC	Hydrothermale Karbonisierung
HF	Fluorwasserstoff
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
TVOC	Total Volatile Organic Carbon
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane
Hg	Quecksilber
w	Wassergehalt in gew. %
CO	Kohlenstoffmonoxid
NO	Stickstoffmonoxid
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
CH <sub>4</sub>	Methan
HTL	Hydrothermale Verflüssigung (eng. liquefaction)
SYNGAS	Synthetisches natürliches Gas
SNCR	Selektive nichtkatalytische Reduktion
OCR	Organic Rankine Cycle
CSB	Chemische Sauerstoffbedarf
LCA	Life-Cycle-Assesment
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung

## 12. Lebenslauf

### Zingerle Thomas

BSc der Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

geboren am 27. Februar 1990 in Sterzing (IT)

Italienischer Staatsbürger

Adresse: Gissbachstr. 45, 39031 Bruneck (IT)  
Gumpendorferstr. 95/10, 1060 Wien (Ö)



Tel.Nr.: +393489533268 (IT), +436508989262 (Ö)

### Ausbildung

seit Nov. 2014

#### **Universität für Bodenkultur Wien**

Masterstudium Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Masterarbeit am Institut für Siedlungswasserbau,  
Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz mit dem Titel  
„Integrale Betrachtung der Klärschlammverwertung durch  
Monoverbrennung“

Masterarbeit am Institut für Siedlungswasserbau,  
Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz zum Thema  
„Anaerobe Ammoniumoxidation (Anammox)“ (abgebrochen)

Okt. 2010 – Nov. 2014

#### **Universität für Bodenkultur Wien**

Bachelorstudium Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Bachelorarbeit am Institut für Siedlungswasserbau,  
Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz mit dem Titel  
„*Untersuchungen zur Optimierung der Prozesswasser-  
behandlung der Abwasserreinigungsanlage Tobl*“

Sept. 2009 – Juni 2010

#### **Università degli Studi di Padova**

Bachelorstudium Scienze politiche, relazioni internazionali e  
diritti umani (abgebrochen)

Juli 2009

#### **Realgymnasium Bruneck**

Matura abgeschlossen, naturwissenschaftlicher Zweig

## **Berufserfahrung**

- seit April 2017                    **SimplyGarden**, Wien,  
Tätigkeit im Bereich Garten- und Landschaftspflege
- Sept. – Okt. 2016                **Ara Pustertal AG**, Pflaurenz - St. Lorenzen  
Tätigkeit im Bereich Verfahrenstechnik
- Sept. – Okt. 2015                **Ara Pustertal AG**, Pflaurenz - St. Lorenzen  
Tätigkeit im Bereich Verfahrenstechnik
- Juli – Aug. 2015                 **BBT SE**, Innsbruck – Baubüro Zenzenhof, Baulos Tulfes-Pfons  
Praktikum im Bereich Baumanagement, Bauausführung und  
Bauüberwachung
- Juli – Okt. 2014                 **Ara Pustertal AG**, Pflaurenz - St. Lorenzen  
Tätigkeit im Bereich Verfahrenstechnik
- Juli – Okt. 2013                 **Ara Pustertal AG**, Pflaurenz - St. Lorenzen  
Tätigkeit im Bereich Verfahrenstechnik und Maschinenbau
- Juli – Okt. 2012                 **Ara Pustertal AG**, Pflaurenz - St. Lorenzen  
Tätigkeit im Bereich Verfahrenstechnik und Maschinenbau
- Juli – Okt. 2011                 **Ara Pustertal AG**, Pflaurenz - St. Lorenzen  
Tätigkeit im Bereich Verfahrenstechnik und Maschinenbau
- Juni – Okt.2010                 **UNIONBAU GmbH**, Sand in Taufers  
Hilfskraft im Bereich Hochbau (Maurer)
- Juli- Sept. 2009                 **Hotel GISSBACH**, St. Georgen – Bruneck  
Küchenhilfskraft
- Juli 2008                         **Allg. Krankenhaus**, Bruneck  
Freiwilliges Praktikum im Bereich Sportmedizin und  
Traumatologie
- Juli – Sept. 2007                 **Dr. Schär AG/SPA**, Burgstall – Meran  
Praktikum im Bereich Lebensmittelproduktion und – Marketing
- Juli. – Sept. 2006                **UNIONBAU GmbH**, Sand in Taufers  
Hilfskraft im Bereich Hochbau (Maurer)
- Juli. – Sept. 2005                **UNIONBAU GmbH**, Sand in Taufers  
Hilfskraft im Bereich Hochbau (Maurer)

### **Universitäre Projekte**

Aug. 2014                      **Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien**  
Gletscherpraktikum am Hohen Sonnblick (Salzburg)

### **Zusatzqualifikationen**

Ausbildungen                      Sprengbefugter in Österreich

### **Sprachen, EDV, Führerschein**

Deutsch                              Muttersprache

Italienisch                          Zweitsprache

Englisch                              Gute Kenntnisse

PC      MS Office (Word, Excel, Power Point), AutoCAD

Führerschein Klasse B

### **Hobbies und Interessen**

Bergsteigen, Wandern, Klettern, Skifahren, Tennis, Tischtennis

Garten- und Waldarbeit, Lesen

Politik, Geschichte, Philosophie, Umweltwissenschaften

### **13. Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich die Masterarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Weiters versichere ich, dass ich diese Masterarbeit weder im Inland noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

*Wien am 10.18.2018,*

*Thomas Zingerle,*

*Unterschrift*

## Anhang A

### **Standardisierte E-Mail zur Kontaktaufnahme mit den Experten**

„Betreff: BOKU-Energiecluster Masterarbeit zum Themenschwerpunkt "Die Kläranlage als regionale Energiezelle"“

Sehr geehrter Herr/Frau X,

Mein Name ist Thomas Zingerle und ich studiere Kulturtechnik und Wasserwirtschaft. Derzeit schreibe ich an meiner Masterarbeit mit dem (Arbeits-)Titel „Integrale Betrachtung der Klärschlammverwertung in Monoverbrennungsanlagen“. Die Masterarbeit wird im Rahmen des BOKU-Energiecluster-Themenschwerpunkts „Die Kläranlage als regionale Energiezelle“ durchgeführt und am Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz von Univ. Prof. DI Dr. Thomas Ertl und DI Dr. Florian Kretschmer betreut. Als Methode zur Informationsbeschaffung führe ich unter anderem Expertenbefragungen durch.

Aus meiner Sicht nimmt Ihr Fachbereich in Bezug auf die Klärschlammmonoverbrennung eine wichtige Rolle ein. Daher wäre ich über die Möglichkeit dankbar, das Thema im Rahmen eines persönlichen Gesprächs mit Ihnen zu erörtern. Im Anhang dieser Email finden Sie weitere Informationen zur Masterarbeit und zur geplanten Expertenbefragung. Für die Dauer des Gesprächs würde ich ca. eine Stunde veranschlagen.“

In Erwartung Ihrer positiven Rückmeldung inklusive möglicher Terminvorschläge verbleibe ich mit freundlichen Grüßen,

Thomas Zingerle

Genauso wird mit der Kontaktaufnahme per E-Mail eine Vorabinformation, über die vorliegende Masterarbeit sowie das beabsichtigte Interview, an die Experten gesendet. Diese Vorabinformation wird im Folgenden wiedergegeben.

### **Standardisierte Vorabinformation für die Experten per Anhang im E-Mail zur Kontaktaufnahme**

Hintergrund und Ziel der Masterarbeit

Den Hintergrund und die Veranlassung meiner Masterarbeit bildet der unlängst veröffentlichte Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, in dem unter anderem gefordert wird, dass bis zum Jahr 2030 65 bis 85 % des in Österreich anfallenden Klärschlammes einer Phosphorrückgewinnung zuzuführen sind. In diesem Zusammenhang werden die Monoverbrennung des Klärschlammes und die Rückgewinnung des Phosphors aus der dabei anfallenden Verbrennungssasche als vielversprechendste Technologie erachtet. Bisherige Entsorgungspfade wie beispielsweise die direkte landwirtschaftliche Verwertung oder die Kompostierung des Klärschlammes sollen künftige keine große Rolle mehr spielen.

Die bisherigen Diskussionen zu diesem künftigen Klärschlamm-Entsorgungspfad erscheinen sehr technologiezentriert. Um das Thema in einem breiteren Bild darstellen zu können, sollen in meiner Arbeit folgenden drei Forschungsfragen bearbeitet werden:

1. Aktueller Stand des Wissens und der Technik in Bezug auf die Klärschlamm-Monoverbrennung?
2. Welche Fachbereiche sind aus einer integralen Sichtweise von der Klärschlamm-Monoverbrennung betroffen?
3. Welche Chancen und Herausforderungen ergeben sich aus einer integralen Sichtweise in Bezug auf die Klärschlamm-Monoverbrennung?

### Hintergrund und Ziel der Expertenbefragungen

Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage erfolgt im Rahmen einer intensiven Literaturrecherche. Dabei ergeben sich idealerweise auch schon erste Hinweise hinsichtlich der Beantwortung der zweiten und dritten Fragen. Prinzipiell sollen die diesbezüglichen Informationen aber im Rahmen von Expertenbefragungen gesammelt werden.

Die Leitfragen, die im Rahmen der Experteninterviews gestellt werden sollen, sind die folgenden:

1. Ist dem Experten die Thematik Monoverbrennung von Klärschlamm bekannt und gibt es diesbezüglich bereits persönliche Erfahrungen?
2. Welche Chancen und Herausforderungen ergeben sich in Bezug auf die Klärschlamm-Monoverbrennung aus der fachlichen Sicht des Experten?
3. Welche Fachbereiche sind aus Sicht des Experten bei einer integralen Betrachtung der Klärschlamm-Monoverbrennung zu berücksichtigen?

## Anhang B

### Stichpunktsammlung als Leitfaden für das erste Experteninterview

1. Klärschlamm
  - Zukünftiger Anfall und Zusammensetzung
  - Erhöhung des Primärschlamm-Anfalls (für Faulung, oder Heizwert-Erhöhung)
2. Klärschlammverwertung
  - Transport (Entwässert, Getrocknet, wie weit?)
  - Faulung (Co-Fermentation, Gasausbeute vs. Heizwert)
  - Trocknung (TS? Verfahren, ab wann wirtschaftlich sinnvoll?)
  - Monoverbrennung (zentral vs. dezentral, also ab welcher ARA-Größe wirtschaftlich)
  - Entsorgung (zukünftige strengere Auflagen z.B. in Deutschland für Entsorgung wegen Phosphor und Cadmium)
3. Thermische Verwertung
  - Pyrolyse
  - Vergasung
  - Verbrennung/vollständige Oxidation (Ascheerwischung problematisch?)
  - Hydrothermale Verfahren (Karbonisierung, Verflüssigung) für nassen Schlamm
4. Stoffliche Verwertung
  - Spurenelemente/Metalle
  - Seltene Erden
  - Phosphor-Rückgewinnung
5. Abfallwirtschaft
  - Mitverwertung von phosphorhaltigen Abfällen z.B. Tiermehl
6. Energiereiche Endprodukte
  - Biogas (Methan)
  - Syngas
  - Dampf
  - Wasserstoff (Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Belebung)
  - Bio-Rohöl
  - Bio-Kohle
7. Einbindung in regionale Energiekonzepte
  - Einspeisung von Strom
  - Einspeisung von Wärme (Fernwärme)
  - Einspeisung von Gas
  - „Batterie“ – Speicherfunktion, z.B. Syngas, Methan, Wasserstoff, Wärme durch geeignete Wärmeträger
8. Technologien
  - Power-to-X (Gas, Wärme, Mobilität)
  - Intelligente Energiemanagementsysteme (Produktion von Energieform je nachdem wie groß die Nachfrage auf dem Energiemarkt für welche Energieträger ist)
  - Smart-Grid's
9. Einbindung in Siedlungskonzepte
  - Nähe zu Energieabnehmern
10. Nachhaltigkeit

- Sozial (Arbeitsplätze)
- Ressourcenschonung und -effizienz
- Standortsicherheit

11. Welche Fachbereiche beteiligt?

12. Welche Herausforderungen? Zukünftig?

## Anhang C

### Leitfaden und Stichpunktsammlung für die Experteninterviews

#### Leitfaden

1. Informierte Einwilligung und Genehmigung der Aufzeichnung des Gesprächs.
2. Ist Ihnen die Thematik Monoverbrennung von Klärschlamm bekannt? Haben Sie in Ihrer Disziplin Erfahrungen mit der Monoverbrennung von Klärschlamm gemacht?
3. Welche Chancen, Herausforderungen und/oder Erschwernisse sehen Sie für die Monoverbrennung von Klärschlamm?
4. Was denken Sie, welche Fachbereiche oder Disziplinen sind aus integraler Sicht an der Klärschlamm-Monoverbrennung beteiligt?
5. Wie schaut, Ihrer Meinung nach, der zukünftige Umgang mit Klärschlamm aus? In Anbetracht der Vorgaben des BAWP 2017 bis zum Jahr 2030 65-85% des Klärschlammes einer Phosphorrückgewinnung zu unterziehen?
6. Ländlicher/Urbaner (räumlicher) Kontext? Klärschlamm-Monoverbrennung im urbanen Bereich sinnvoll? Zentral/dezentral nur auf ländlichen Raum bezogen?
7. Was sollte, Ihrer persönlichen Meinung nach, im Umgang mit Klärschlamm und im Speziellen bei der Monoverbrennung von Klärschlamm beachtet werden?
8. Haben Sie Anregungen oder Kritik für mich, z.B. was ich, Ihrer Meinung nach, noch Fragen oder auf welche Aspekte ich noch eingehen sollte? Welche Themen sollte ich noch berücksichtigen?
9. Haben Sie Vorschläge für mich mit welchen Personen ich noch reden sollte?
10. Sollte Ihnen später noch was Wichtiges einfallen, oder wenn Sie Etwas genauer wissen möchten, können Sie mir gerne eine E-Mail schreiben, meine Adresse ist [thomas.zingerle@students.boku.ac.at](mailto:thomas.zingerle@students.boku.ac.at)!

#### Inhaltliche Schwerpunkte

- Klärschlamm
  - Zukünftiger Anfall und Zusammensetzung; Räumliche Verteilung;
  - Erhöhung des Primärschlammfalls
- Klärschlammbehandlung
  - Transport (Entwässert, Getrocknet, wie weit?), Standortwahl der Anlage;
  - Faulung (Co-Fermentation, Gasausbeute vs. Heizwert)
  - Trocknung (TS? Verfahren, ab wann wirtschaftlich sinnvoll?)
- Klärschlamm Entsorgung
  - Entsorgung (zukünftige strengere Auflagen z.B. in Deutschland für Entsorgung wegen Phosphor und Cadmium)
  - Entsorgung; Management betreffend Österreich, Mitteleuropa, Europa;
- Klärschlammverwertung
  - Monoverbrennung (zentraler vs. dezentraler Standort, ab welcher ARA-Größe wirtschaftlich, wo sind solche Zentren und wo sind sie sinnvoll, Knotenpunkte der Energieverteilungsnetze)
  - Landwirtschaft (Hygiene, Schadstoffe)
- Kläranlagenbetreiber
  - Risikoscheue Wirtschaftsweise
  - Betriebswirtschaftliche Aspekte z.B. Investitionen
- Gesetzeslage
  - Bestrebungen und Ziele

- Sinnvolle Raumkonzepte und Anreizsysteme
- Zukünftig zu erreichender Zustand
- Thermische Verwertung von Klärschlamm
  - Pyrolyse
  - Vergasung
  - Verbrennung/vollständige Oxidation (Ascheerwischung problematisch?)
  - Hydrothermale Verfahren (Karbonisierung, Verflüssigung) für nassen Schlamm
  - Verfahren (Bereitstellung von Energie in welcher Form, abhängig von Region und vorhandenem Verteilungsnetz)
- Stoffliche Verwertung von Klärschlamm
  - Spurenelemente/Metalle
  - Seltene Erden
  - Phosphor-Rückgewinnung
  - Regionaler Bedarf an Ressourcen
- Einbindung in regionale Energiekonzepte
  - Einspeisung von Strom
  - Einspeisung von Wärme (Fernwärme)
  - Einspeisung von Gas
  - „Batterie“ – Speicherfunktion, z.B. Syngas, Methan, Wasserstoff, Wärme durch geeignete Wärmeträger
  - Bereitstellung von verschiedenen Energieformen (Strom, Wärme, Fernwärme, Gas, Speicherung z.B. als Syngas, Methan, Wasserstoff und durch Wärmeträger)
- Technologien
  - Power-to-X (Gas, Wärme, Mobilität)
  - Intelligente Energiemanagementsysteme (Produktion von Energieform je nachdem wie groß die Nachfrage auf dem Energiemarkt für welche Energieträger ist)
  - Smart Grids
- Einbindung in Siedlungskonzepte/Raumkonzepte
  - ARA als regionales Energiekraftwerk und Rohstoffmine
  - Nähe zu Energieabnehmern
  - Siedlungs- und Industrieentwicklung
- Energie- und Ressourcenwirtschaft oder regionales Management
  - Aktive Energieraumplanung
  - Regionaler und zukünftiger Bedarf an Ressourcen und Energie
  - Planungsinstrumente
  - Kaskadennutzung
- Methodik
  - Sensitivitätsanalyse: Aktive (Energieressource), Kritische, Puffer und Passive Elemente;
  - Systemdefinition und -funktion
  - Vernetzungen und Rückkoppelungen
- Life Cycle Assessment
  - Flächenverbrauch und virtueller Verbrauch
  - Sinnhaftigkeit und Anwendbarkeit
  - Welche Rahmenbedingungen oder Betrachtungsgrenzen
- Nachhaltigkeit
  - Sozial (Arbeitsplätze)
  - Ressourcenschonung und -effizienz
  - Standortsicherheit