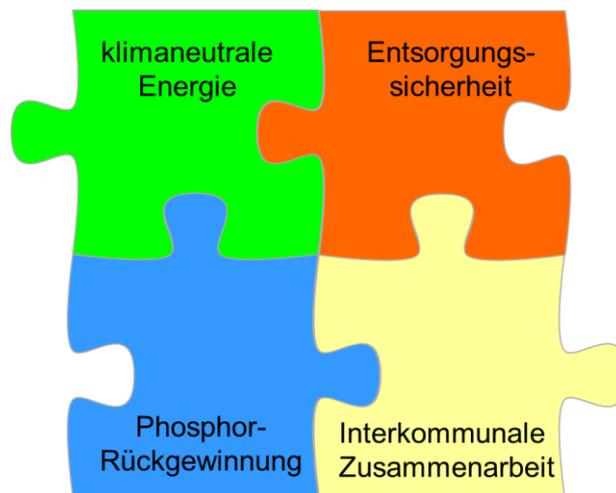


Machbarkeitsstudie

Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger und Phosphor-Ressource für Mittelhessen



Endbericht

**Gefördert mit Mitteln des Hessischen Ministeriums
für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz**

Fördermittelbescheid vom 15.12.2017, Geschäftszeichen I 1-003d 10
Bewilligungszeitraum: 15.12.2017 bis 30.11.2018

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Veranlassung und Ziele	10
2 Zusammenstellung und Konkretisierung der für die Studie notwendigen Basisdaten	14
2.1 <i>Abstimmung mit interessierten Kommunen und Verbänden, Chronologie der Netzwerktaetigkeit (Fragebogen, „Letter of Intent“)</i>	14
2.3 <i>Abfrage, Konkretisierung und Festlegung der zu behandelnden Klärschlamm-mengen für die weitere Planung</i>	16
2.4 <i>Abfrage, Konkretisierung und Bewertung der jeweiligen Klärschlammzusammensetzung in Bezug auf DüMV, AbfKlärV</i>	19
2.5 <i>Thermische Umsetzung des Klärschlammes aus dem Einzugsgebiet. Eigenschaften der virtuellen Klärschlamm-masche</i>	22
3 Klärschlamm-trocknung	24
3.1 <i>Bewertung verschiedener Technologien zur Klärschlamm-trocknung</i>	24
3.2 <i>Qualitative und quantitative Bewertung von identifizierten zentralen und dezentralen Standorten für Trocknungsanlagen, Bewertung der zur Verfügung stehenden Wärmemengen sowie des Temperaturniveaus</i>	27
3.2.1 <i>Zentrale Trocknung am Standort Gießen</i>	27
3.2.2 <i>Dezentrale Trocknungsstandorte</i>	28
3.3 <i>Richtpreisangebote für Anlagen zur Klärschlamm-trocknung (vorzugsweise Band-trocknung und Solar-unterstützte Trocknung)</i>	29
3.4 <i>Bewertung der Rückbelastung der Abwässer aus den Trocknungsanlagen bei den verschiedenen Trocknungstechnologien (Abwassermengen, Abwasserzu-sammensetzung)</i>	33
3.4.1 <i>Abwassermengen Rückbelastung</i>	33
3.4.3 <i>Abwasserzusammensetzung Rückbelastung</i>	35
3.4.4 <i>Rückbelastung bei Einleitung der Brüdenkondensate, CSB- und NH₄-N-Frachten</i>	36
4 Verfahren zur Thermischen Verwertung von Klärschlamm	37
4.1 <i>Übersicht</i>	37
4.2 <i>Wirbelschichtverfahren</i>	37
4.2.1 <i>Aufbau und Funktion</i>	38
4.2.2 <i>Zirkulierende und stationäre Wirbelschicht</i>	39

4.3	<i>2-stufiger thermochemischer Aufschluss nach dem EUPHORE®-Verfahren</i>	40
4.4	<i>Emissionen</i>	42
4.4.1	<i>Übersicht</i>	42
4.4.2	<i>Bewertung der Rückbelastung der Abwässer aus der Klärschlammverbrennung (Abwassermengen, Abwasserzusammensetzung)</i>	42
4.5	<i>Emissionsminderung</i>	43
4.5.1	<i>Emissionsminderung saurer Schadgase</i>	43
5	Phosphorrecycling aus Klärschlamm-Mono-Aschen	45
5.1	<i>Recherche und Dokumentation des Stands der Entwicklung und Technik bei verschiedenen P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammaschen</i>	45
5.2	<i>Bewertung der erforderlichen Qualität des getrockneten Klärschlamm für eine thermische Verwertung</i>	48
5.3	<i>Bewertung von P-Recyclingverfahren in Hinblick auf das Rückgewinnungspotential, die Pflanzenverfügbarkeit des P-Recyclats und Einsatzfähigkeit als Dünger bei den landwirtschaftlich vorhandenen Ausbringungs-Maschinen</i>	48
5.4	<i>Recherche zum Volatilisierungsverhalten von Nickel - Bewertung der Auswirkung auf die Aschequalität</i>	49
5.5	<i>Einholung von Richtpreisangeboten für Anlagen zum Phosphorrecycling aus Klärschlammaschen</i>	50
5.6	<i>Bewertung der Rückbelastung für das Klärwerk Gießen aus den Prozesswässern der P-Recyclingverfahren</i>	51
5.7	<i>Massenstromdiagramme sowie Aufstellungsvorschläge</i>	52
5.8	<i>Erarbeitung eines Kriterienkataloges zur Entlassung der P-Rückgewinnungsprodukte aus dem Abfallrecht</i>	53
5.9	<i>Erarbeitung eines Realisierungsvorschlages</i>	54
6	Logistik-Konzepte im Einzugsgebiet des Projektes	56
6.1	<i>Prüfung der aktuellen Eigenschaften (insbesondere der Entwässerungsgerad) der Klärschlämme in Bezug auf ggf. erforderliche oder sinnhafte Entwässerung oder Trocknung am Anfallort (Kläranlagen im Einzugsgebiet der Studie)</i>	56
6.2	<i>Erstellung eines Logistik-Konzeptes zur Einsammlung und Transport der Klärschlamm-mengen von externen Standorten zum Standort Gießen (zentrale Trocknung)</i>	56
6.3	<i>Erstellung eines Logistik-Konzeptes zur Einsammlung und Transport der Klärschlamm-mengen zu dezentralen Trocknungsanlagen und anschließend nach der Trocknung zum Standort Gießen, zentrale Klärschlammverbrennung mit Energienutzung und Phosphorrückgewinnung</i>	59

7	Gesamtkonzept	60
7.1	<i>Ziele des Klärschlammverwertungskonzeptes Mittelhessen</i>	60
7.2	<i>Entwässerung der zu behandelnden Klärschlämme</i>	60
7.3	<i>Transport der Klärschlämme</i>	61
7.4	<i>Vortrocknung des Klärschlammes vor anschließender thermischer Verwertung</i>	62
7.5	<i>Standorte zur Realisierung der Klärschlammbehandlung (Trocknung und Verbrennung) sowie der Phosphor-Rückgewinnung</i>	62
7.6	<i>Thermische Verwertung zur Nutzung im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen</i>	62
7.7	<i>Mögliche Szenarien für das Klärschlammkonzept Mittelhessen unter Einbeziehung einer Wirbelschichtverbrennung</i>	65
7.7.1	<i>Szenario 1: Zentrale Trocknung als Vorschaltanlage vor der Wirbelschichtverbrennung</i>	65
7.7.2	<i>Szenario 2: Zentrale Trocknung unter Nutzung von Abfallwärme aus dem Fernwärmenetz als getrennte Anlage vor der Wirbelschichtverbrennung</i>	67
7.7.3	<i>Szenario 3: Dezentrale Trocknung</i>	70
7.8	<i>Mögliche Szenarien für das Klärschlammkonzept Mittelhessen unter Einbeziehung eines 2-stufigen thermochemischen Aufschlussverfahrens nach dem EUPHORE®-Verfahren</i>	77
7.8.1	<i>Szenario 4: Zentrale EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) am Standort Gießen inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats</i>	77
7.8.2	<i>Szenario 5: Zentrale Niedertemperaturtrocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats</i>	78
8	Erarbeitung eines Realisierungsvorschlags	82
8.1	<i>Kriterien zur Auswahl des Verfahrens der Klärschlammbehandlung durch Trocknung und Verbrennung</i>	82
8.1.1	<i>Kriterium Kostenvergleich</i>	83
8.1.2	<i>Kriterium CO₂-Emission</i>	86
8.2	<i>Kriterien zur Auswahl des Verfahrens der Phosphor-Rückgewinnung</i>	90
8.3	<i>Empfehlung für die Ableitung eines Realisierungsvorschlags</i>	91
9	Sonstiges	93
9.1	<i>Mögliche rechtliche Modelle zur gemeinsamen Klärschlammverwertung</i>	93
9.1.1	<i>Gründung eines Zweckverbandes</i>	93
9.1.2	<i>MWB, SWG sowie die anderen abwasserreinigungs- und klärschlammuntersorgungspflichtigen Körperschaften gründen eine gemeinsame Gesellschaft</i>	95

9.1.3	Interkommunale Zusammenarbeit als interkommunale Vereinbarung (Kooperationsvereinbarung) zwischen MWB und den anderen abwasserreinigungs- und klärschlammensorgungspflichtigen Einrichtungen.	96
10	Literatur	99
11	Anhang	101
11.1	<i>Fragebogen Anlagensteckbrief</i>	101
11.2	<i>Fragebogen Dezentrale Klärschlamm lager und Trocknung</i>	111
11.3	<i>Letter of Intent 1</i>	115
11.4	<i>Letter of Intent 2</i>	115

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Übersicht über die Kläranlagen mit grafischer Darstellung der Klärschlamm- mengen (umgerechnet auf 25 % TS) nach Unterzeichnung des LOI 2, Stand Ende 2018	18
Abb. 2-2:	Standorte von Kläranlagen mit Nassschlamm entsorgung in der Landwirtschaft (insgesamt ca. 21.153 t/a mit i.M. ca. 4,0 % TS, nach Unterzeichnung des LOI 2, Stand Ende 2018)	18
Abb. 2-3:	Schwermetallgehalte der virtuellen Klärschlammmasche aus der Region Mittelhessen im Vergleich zu marokkanischem Rohphosphat anhand von An- bzw. Abreicherungs-faktoren	23
Abb. 3-1:	Erforderliche Bauflächen für Bandtrockner sowie Solartrockner in Abhängigkeit des Durchsatzes.	30
Abb. 3-2:	Investitionen für Solartrocknern sowie Bandtrockner	31
Abb. 3-3:	Jahreskosten der Klärschlamm-trocknung bei verschiedenen Trocknungstechnologien sowie Jahresdurchsätzen.	32
Abb. 3-4:	Spezifische Kosten der Klärschlamm-trocknung bei verschiedenen Trocknungstechnologien sowie Jahresdurchsätzen.	33
Abb. 4-1:	Thermische Verfahren der Klärschlamm-behandlung, Darstellung in Anlehnung an (Franck, J., Schröder, L., 2015, S. 463)	37
Abb. 4-2:	Kraftwirkung am Feststoffpartikel (Thomé-Kozmiensky, K. J., 2013, S. 4)	38
Abb. 4-3:	Stationäre (links) und zirkulierende Wirbelschicht-feuerung (rechts) (Thomé-Kozmiensky, K.J., 2013, S. 14)	40
Abb. 4-4:	EUPHORE-Verfahren als Vorschaltanlage vor einer Müllverbrennungsanlage (Klose, 2018)	41
Abb. 4-5:	Einteilung der Verfahren zur Minderung saurer Schadgase (Löschau, 2014, S. 233)	44
Abb. 5-1:	Fließbild des pontes pabuli-Verfahrens	51
Abb. 5-2:	Massenstromdiagramm des pontes pabuli-Verfahrens bei Aufschluss mit H ₂ SO ₄	52
Abb. 5-3:	Bemessung der Input- und Outputqualität bei der Erzeugung des P-Rezyklates im Rahmen der Entlassung aus dem Abfallrecht	54
Abb. 7-1:	Abhängigkeit des Heizwertes von Klärschlamm vom TR-Gehalt sowie Glühverlust (oTR-Gehalt), PONDUS Verfahrenstechnik GmbH, 2017 Bsp. bei 45 % TR und einem organischen Anteil von 53,6 % oTR ergibt sich ein Heizwert von ca. 4.200 kJ/kg Schlamm	63
Abb. 7-2:	Abhängigkeit des Heizwertes von Klärschlamm vom TR-Gehalt sowie Asche- gehalt (mTR-Gehalt), Meyer, U., 1997 Bsp. bei 45 % TR und einem organischen Anteil von 53,6 % oTR (entspr. 46,4 % mTR entspr. Aschegehalt) ergibt sich ein Heizwert von ca. 4.200 kJ/kg Schlamm	64
Abb. 7-3:	Szenario 1: Zentrale Hochtemperatur-Trocknung als Vorschaltanlage am Standort Gießen vor der Wirbelschichtverbrennung, Verfahrens-Blockbild und Massenströme	66
Abb. 7-4:	Szenario 1: Zentrale Hochtemperatur-Trocknung als Vorschaltanlage am Standort Gießen vor der Wirbelschichtverbrennung	67
Abb. 7-5:	Szenario 2: Zentrale Niedertemperatur-Trocknung mit Nutzung von thermischer Energie aus dem Rücklauf des Fernwärmenetzes mit einer Temperatur von ca. 60 °C sowie Abwärme aus der Klärschlammverbrennung am Standort Gießen vor der Wirbelschichtverbrennung	70

Abb. 7-6:	Szenario 3: Dezentrale Standorte von Niedertemperatur-Trocknungsanlagen mit Nutzung von Abwärme, Einzugsgebiet der jeweiligen Standorte	72
Abb. 7-7:	Szenario 3: Dezentrale Niedertemperatur-Trocknung mit Nutzung von Abwärme, Transport des getrockneten Klärschlammes (70 % TR) zur zentralen Anlage (Standort Gießen), Vermischung mit entwässertem Schlamm (25 % TR) und anschließender Trocknung mit Abwärme aus der Klärschlammverbrennung am Standort Gießen vor der Wirbelschichtverbrennung	74
Abb. 7-8:	Szenario 4: Zentrale EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) am Standort Gießen inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats	78
Abb. 7-9:	Szenario 5: Zentrale Niedertemperaturtrocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats	80

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Zusammenstellung der Termine zur Information und Abstimmung mit Genehmigungsbehörden, interessierten Kommunen und Verbänden, 2018	15
Tab. 2-2:	Angeschlossene Einwohnerwerte sowie Verteilung der Kläranlagen nach Größenklassen nach Fragebogen der THM (Steckbrief) sowie erster und zweiter Absichtserklärung (LOI 1 und LOI 2)	17
Tab. 2-3:	Angeschlossene Einwohnerwerte sowie Klärschlammengen als Originalsubstanz (OS) sowie Trockensubstanz (TS), Summen der in den einzelnen Landkreisen interessierten Kläranlagen, nach Fragebogen der THM (Steckbrief) sowie erster und zweiter Absichtserklärung (LOI 1 und LOI 2) (Mittelwerte der Angaben aus 2014 bis 2016; Stand der Erhebung Ende 2018)	17
Tab. 2-4:	Klärschlammengen (Summen), umgerechnet einheitlich auf 25 % TS sowie Aufteilung in derzeitiger Entsorgung als Nassschlamm bzw. entwässerter Schlamm, nach Landkreisen, nach zweiter Absichtserklärung (LOI 2) (Stand Ende 2018)	17
Tab. 2-5:	Anforderungen an Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost auf oder in den Boden gemäß AbfKlärV, 2017, und DüMV, 2017	20
Tab. 2-6:	Schwermetallgehalte (mg/kg) der virtuellen Mischasche aus Klärschlämmen der Region. Die mit * markierten Werte wurden in einer veraschten Probe des Klärschlammes der Kläranlage Gießen bestimmt	22
Tab. 3-1:	Zusammenstellung von grundsätzlichen Bewertungskriterien zum Einsatz von Klärschlamm-trocknungs-Technologien	24
Tab. 3-2:	Zusammenstellung von grundsätzlichen Anlagendaten verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien (Geyer, J., 2013), http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_eaa/2013_EaA_927_948_Geyer.pdf	24
Tab. 3-3:	Zusammenstellung von grundsätzlichen Anlagendaten verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien (Geyer, J., 2013), http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_eaa/2013_EaA_927_948_Geyer.pdf	25
Tab. 3-4:	Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen verschiedener Trocknungs-technologien (DWA Merkblatt M 379, Entwurf 2019)	26
Tab. 3-5:	Zusammenstellung verschiedener Analysen-Werte von Brüdenkondensaten aus der Klärschlamm-trocknung	35
Tab. 4-1:	Wirk- und Reaktionsprinzipien zur Abscheidung von Schadstoffen in der Abgasreinigung, [Fink, M. 2019, Darstellung in Anlehnung an: [Löschau, 2014, S. 93]]	43
Tab. 5-1:	Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm (KS) und Klärschlammasche (KSA) (Adam, 2018), Teil 1	46
Tab. 5-1:	Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm (KS) und Klärschlammasche (KSA) (Adam, 2018), Teil 2	47
Tab. 5-2:	Kriterienkatalog für die Entlassung des P-Rezyklats aus dem Abfallrecht	53
Tab. 7-1:	Mögliche Standorte für dezentrale Trocknungsanlagen mit theoretischer Kapazität (Potential) sowie möglichem Durchsatz (Input und Output) anhand der nach LOI 2 im direkten Einzugsgebiet der Standorte verfügbaren Klärschlämme	71
Tab. 7-2:	CSB-Rückbelastungen aus Brüdenkondensaten an den verschiedenen Trocknerstandorten des Szenarios 3	73

Tab. 7-3:	NH ₄ -N-Rückbelastungen aus Brüdenkondensaten an den verschiedenen Trocknerstandorten des Szenarios 3	73
Tab. 7-4:	Zusammenstellung der Investitionen für die dezentralen Trocknungsanlagen für das Szenario 3	75
Tab. 7-5:	Zusammenstellung der Jahreskosten für die dezentralen Trocknungsanlagen für das Szenario 3	76
Tab. 8-1:	Kostenvergleich der in Kap. 7.6 und 7.7 erläuterten Szenarien (inkl. Transport)	85
Tab. 8-2:	Kostenvergleich der in Kap. 5.5 Szenarien zur Phosphor-Rückgewinnung; (Szenario P1 beinhaltet den Transport der Asche zum Standort Infraserb Höchst, die variablen Betriebskosten in Szenario P3 beinhalten die Erlöse aus dem Düngemittel)	85
Tab. 8-3:	CO ₂ -Bilanz des Szenarios 1 Zentrale Hochtemperatur-Trocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor der Verbrennung (siehe Kap. 7.6)	88
Tab. 8-4:	CO ₂ -Bilanz des Szenarios 2 Zentrale Niedertemperatur-Trocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor der Verbrennung (siehe Kap. 7.6)	88
Tab. 8-5:	CO ₂ -Bilanz des Szenarios 3 Dezentrale Trocknung an verschiedenen Standorten unter Nutzung von Abfallwärme, Mischung mit entwässertem Schlamm vor der Verbrennung (siehe Kap. 7.6)	88
Tab. 8-6:	CO ₂ -Bilanz des Szenarios 4 Zentrale EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) am Standort Gießen inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats (siehe Kap. 7.7)	89
Tab. 8-7:	CO ₂ -Bilanz des Szenarios 5 Zentrale Niedertemperaturtrocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats (siehe Kap. 7.7)	89

1 Veranlassung und Ziele

Mit der im Oktober 2017 in Kraft getretenen Novelle der AbfKlärV sowie den Änderungen in der Düngegesetzgebung hat sich die Verwertung von Klärschlamm drastisch geändert. In absehbarer Zeit endet für viele Kläranlagen die Möglichkeit der landwirtschaftliche Klärschlamm-Verwertung und die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm ist zu erfüllen. Weiterhin bedingt die Reduzierung des Stickstoffeintrages in landwirtschaftlich genutzte Flächen eine unmittelbare Konkurrenz zwischen landwirtschaftlich verwertbaren Klärschlämmen und anderen Nährstoffträgern wie Gülle, Festmist oder flüssigen Gärresten. Für viele Kläranlagen, besonders im ländlichen Raum, existiert gegenwärtig keine gesicherte und zukunftsfähige Klärschlammverwertungsmöglichkeit.

Vor diesem Hintergrund wurde die vorliegende Machbarkeitsstudie erarbeitet, welche die Verwertung kommunaler Klärschlämme als Phosphor-Ressource und klimaneutraler Energieträger für die Region Mittelhessen im Focus hat. Es wurde eine Projektgruppe mit dem Ziel der Entwicklung einer nachhaltigen, gesetzeskonformen Klärschlammentsorgung in Mittelhessen ins Leben gerufen. Das Projekt verfolgt das Ziel, durch die Zusammenarbeit von abwasserbeseitigungspflichtigen Gebietskörperschaften eine dauerhafte Entsorgungssicherheit für die regionalen Klärschlämme durch CO₂-neutrale energetische Nutzung und nachgelagerte Phosphorrückgewinnung zu erreichen. Die Machbarkeitsstudie dient der Entwicklung eines zukunftssicheren kommunalen Konzeptes für die Klärschlammverwertung der Region Mittelhessen im Rahmen der Ressourcenschutz-Strategie des Landes Hessen und leistet einen Beitrag zur Daseinsvorsorge im Bereich der Klärschlammentsorgung. Der Ressourcenschutz umfasst dabei den Schutz des Bodens und des Grundwassers sowie die effiziente Rückgewinnung von Phosphor und den Ausbau der regenerativen Energieversorgung. Dazu sind regionale Wertschöpfungsketten und Stoffkreisläufe zu entwickeln.

Ziele des mittelhessischen Klärschlammverwertungskonzeptes sind also vorrangig

- eine hohe Entsorgungssicherheit für die beteiligten Kläranlagenbetreiber,
- stabile marktgerechte Entsorgungspreise für die beteiligten Kläranlagenbetreiber,
- eine weitgehende thermische Verwertung des organischen Anteils der Klärschlämme im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen,
- eine weitestgehende Phosphorrückgewinnung,
- eine Rückführung des Phosphor-Rezyklats in die regionale Landwirtschaft,
- eine insgesamt möglichst geringe CO₂-Emission, auch unter Berücksichtigung von Transportaufwendungen.

Für eine weitgehende thermische Verwertung sowie Phosphor-Rückgewinnung ist eine zentrale Verbrennungs- und -Rückgewinnungsanlage aus der Asche am Standort Gießen mit Anbindung an das Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen obligatorisch. Dezentrale Verbrennungsanlagen sowie auch dezentrale Phosphor-Rückgewinnungsanlagen aus der Asche sind aufgrund ihrer Anlagengröße deutlich unwirtschaftlicher als eine zentrale Anlage und werden daher nicht weiter betrachtet.

Desweiteren werden Verfahren der Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Schlammwasser oder Klärschlamm nicht berücksichtigt, da diese Verfahren das übergeordnete Ziel der Initiatoren des mittelhessischen Klärschlammprojekts einer weitestgehenden Phosphor-Rückgewinnung mit Rückgewinnungsquoten > 80 % nicht gewährleisten können (siehe auch Tab. 5-1).

Mit Datum 22.02.2018 beauftragten die Mittelhessischen Wasserbetriebe der Stadt Gießen MWB die TransMIT GmbH mit der Erstellung einer Machbarkeitsstudie zur energetischen und stofflichen Verwertung von kommunalem Klärschlamm in der Region Mittelhessen.

Projektleiter der TransMIT GmbH sind Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen und Prof. Dr. rer. nat. Harald Weigand.

Der Schlussbericht wird hiermit vorgelegt.

Der Auftrag beinhaltet folgende Arbeitspakete:

1. Zusammenstellen und Konkretisierung der für die Studie notwendigen Basisdaten

- Abfrage, Konkretisierung und Festlegung der zu behandelnden Klärschlammengen für die weitere Anlagenplanung (im jahreszeitlichen Verlauf)
- Abfrage, Konkretisierung und Bewertung der jeweiligen Klärschlammzusammensetzung in Bezug auf DüMV, AbfklärV
- Weitere Abstimmung mit interessierten Kommunen und Verbänden, die sich mittels Letter of Intent (LOI, Erstellung durch MWB / SWG) an dem Gesamt-Projekt gemeinsam mit MWB / SWG beteiligen wollen

2. Klärschlamm Trocknung

- Qualitative und quantitative Bewertung von identifizierten zentralen und dezentralen Standorten für Trocknungsanlagen (Standorte sowie Energieangebot werden durch den AG identifiziert)
- Bewertung verschiedener Standorte für die Trocknungsanlagen in Hinblick auf Größe, Erreichbarkeit, Kosten, Infrastruktur, Entfernung zu anschließender Phosphorrückgewinnung (Standortfindung ist nicht Bestandteil des Angebots; Termine an externen Standorten werden gesondert berechnet)
- Bewertung der für die Trocknung erforderlichen sowie an den jeweiligen Standorten zur Verfügung stehenden Wärmemengen sowie des Temperaturniveaus (im jahreszeitlichen Verlauf) in Hinblick auf den zu erreichenden Trockenrückstand (Angaben zu Wärmemengen und Temperaturniveau (im jahreszeitlichen Verlauf) werden vom AG bereitgestellt)
- Einholung von belastbaren Richtpreisangeboten für Anlagen zur Klärschlamm Trocknung (vorzugsweise Bandtrocknung und Solar-unterstützte Trocknung)
- Bewertung der Rückbelastung der Abwässer aus den Trocknungsanlagen bei den verschiedenen Trocknungstechnologien (Abwassermengen, Abwasserzusammensetzung)
- Bewertung der dezentralen Trocknung und der dafür notwendigen Klärschlammtransporte im Hinblick auf Kosten und Emissionen (siehe auch Punkt Logistik)
- Ausarbeitung von Massenstrom-Diagrammen sowie Aufstellungsvorschlägen
- Durchführung eines Wirtschaftlichkeitsvergleichs zwischen dezentralem und zentralem Trocknungskonzept nach den LAWA-Leitlinien zur Kostenvergleichsrechnung

- Erarbeitung eines Realisierungsvorschlags

3. Phosphorreycling aus Klärschlamm-Mono-Aschen

- Recherche und Dokumentation des Stands der Entwicklung und Technik bei verschiedenen P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammaschen
- Bewertung der erforderlichen Qualität des getrockneten Klärschlammes für eine thermische Verwertung
- Bewertung verschiedener P-Recyclingverfahren in Hinblick auf das Rückgewinnungspotential, die Pflanzenverfügbarkeit des P-Recyclats und Einsatzfähigkeit als Dünger bei den landwirtschaftlich vorhandenen Ausbringungs-Maschinen
- Recherche zum Volatilisierungsverhalten von Nickel - Bewertung der Auswirkung auf die Aschequalität
- Einholung von belastbaren Richtpreisangeboten für Anlagen zum Phosphorreycling aus Klärschlammaschen
- Bewertung der Rückbelastung für das Klärwerk Gießen aus den Prozesswässern der P-Recyclingverfahren
- Ausarbeiten von Massenstromdiagrammen sowie Aufstellungsvorschläge
- Durchführung eines Wirtschaftlichkeitsvergleiches nach den LAWA-Leitlinien zur Kostenvergleichsrechnung
- Erarbeitung eines Kriterienkataloges zur Entlassung der P-Rückgewinnungsprodukte aus dem Abfallrecht
- Erarbeitung eines Realisierungsvorschlages

4. Logistik-Konzepte im Einzugsgebiet des Projektes

- Prüfung der aktuellen Eigenschaften (insbesondere der Entwässerungsgerad) der Klärschlämme in Bezug auf ggf. erforderliche oder sinnhafte Entwässerung oder Trocknung am Anfallort (Kläranlagen im Einzugsgebiet der Studie)
- Erstellung eines Logistik-Konzeptes zur Einsammlung und Transport der Klärschlamm-mengen von externen Standorten zum Standort Gießen (zentrale Trocknung)
- Erstellung eines Logistik-Konzeptes zur Einsammlung und Transport der Klärschlamm-mengen zu dezentralen Trocknungsanlagen und anschließend nach der Trocknung zum Standort Gießen, zentrale Klärschlammverbrennung mit Energienutzung und Phosphorrückgewinnung
- Ausarbeitung von Logistikkonzepten

5. Sonstiges

- Mit-Organisation und Teilnahme an regelmäßigen Projekttreffen (ca. alle 6 Wochen) bis zur Vorlage der Machbarkeitsstudie beim HMUKLV
- Zuarbeit zu juristischer Fachberatung in Hinblick auf die Erarbeitung von Kooperationsverträgen zwischen SWG / MWB sowie benachbarten Kommunen und Verbänden
- Erstellung eines Zwischenberichts
- Erstellung eines Endberichts als Baustein der gesamten bei dem HMUKLV vorzulegenden Machbarkeitsstudie
- Zusammenstellung der verschiedenen Bausteine für die dem HMUKLV vorzulegende Machbarkeitsstudie, Abstimmung und Vorbereitung für einen dem HMUKLV vorzulegenden Abschlussbericht
- Vorstellung der Ergebnisse im Rahmen einer Gremiensitzung
- Vorstellungen von Zwischen- und Endergebnissen im Rahmen eines Seminars / einer Tagung (Reisekosten werden gesondert in Rechnung gestellt) zur Erfüllung der Anforderung aus dem Fördermittelbescheid des HMUKLV, die Übertragbarkeit auf andere Regionen und Projekte zu ermöglichen
- Erstellung von Veröffentlichungen in deutschsprachigen Fachzeitschriften zur Erfüllung der Anforderung aus dem Fördermittelbescheid des HMUKLV, die Übertragbarkeit auf andere Regionen und Projekte zu ermöglichen
- Redaktionelle Endbearbeitung und das Zusammenfügen der verschiedenen Bausteine

2 Zusammenstellung und Konkretisierung der für die Studie notwendigen Basisdaten

2.1 Abstimmung mit interessierten Kommunen und Verbänden, Chronologie der Netzwerktätigkeit (Fragebogen, „Letter of Intent“)

Seit Erst-Information über das geplante Konzept „Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger und Phosphor-Ressource für Mittelhessen in den Medien besteht seitens der Betreiber kommunaler Kläranlagen in der Region großes Interesse an dem Vorhaben. Folgende Punkte waren und sind von besonderem Interesse:

- Technische Umsetzung
- zukünftige Entsorgungskosten, Kostensicherheit, mittel- und langfristige -entwicklung
- langfristige Entsorgungssicherheit
- Vertragssicherheit, Gestaltung des Kooperationsvertrages
- Vergaberechtliche Implikationen
- Vorgehen und gemeinsame Klärschlammverwertung bis zur Inbetriebnahme der geplanten Klärschlammverbrennungs- und Phosphor-Rückgewinnungsanlage (sog. „Vorschaltphase“)

Von einigen interessierten Kommunen wurden sehr detaillierte und spezifische Fragen aufgeworfen, z.B.

- Wie soll zukünftig mit der Verwertung von Nassschlamm umgegangen werden?
- Wie werden Schlammwässer aus der Schlammentwässerung entsorgt?
- Muss auf jeder Kläranlage, die derzeit den Schlamm als Nassschlamm entsorgt, eine Entwässerungsanlage gebaut werden?
- Kann Schlamm aus einer Klärschlammvererdungsanlage angenommen werden?
- Wer betreibt ggf. zu errichtende dezentrale Trocknungsanlagen?

Technische Daten wie Klärschlamm-mengen, -zusammensetzung, potentielle Standorte für dezentrale Trocknungsanlagen wurden im Rahmen eines Fragebogens von interessierten Betreibern abgefragt und ausgewertet (siehe Kap. 2.2 und 2.4).

Im Laufe des Jahres 2018 wurden zu verschiedenen Terminen die interessierten Kommunen und Betreiber sowie auch die Genehmigungsbehörden (Untere Wasserbehörden der beteiligten Landkreise, Obere Wasserbehörde der Regierungspräsidien) über die Entwicklung des Projektes informiert. Fragen wurden intensiv diskutiert.

Insbesondere zu Fragen der Gestaltung des Kooperationsvertrages, der mittel- und langfristigen Kostenentwicklung sowie der Kostensicherheit wurden intensive Erläuterungen erbracht und Diskussionen geführt.

Die nachstehende Tab. 2-1 zeigt eine Aufstellung der in 2018 durchgeführten Informationsveranstaltungen für Genehmigungsbehörden, interessierte Kommunen und Verbände.

Tab. 2-1: Zusammenstellung der Termine zur Information und Abstimmung mit Genehmigungsbehörden, interessierten Kommunen und Verbänden, 2018

Projekt "Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger und Phosphor - Ressource für Mittelhessen"

Datum	Veranstaltung	Teilnehmer
14-täglich	K6-Runde: regelmäßiges Treffen von MWB, THM und SWG	i.d.R. MWB: Abel, Herbert, Becker SWG: Funk, Fink, Schmitt, Weber, THM: Prof. Theilen, Prof. Weigand
20.02.2018	Informationsveranstaltung, Kongresshalle Gießen	K6-Runde, Genehmigungsbehörden, Bürgermeister, Lol-Zeichner
23.02.2008	Feedbackgespräch	K6-Runde
20.04.2018	Vorbesprechung K6-Runde/Dr.Ax	K6-Runde, Dr. Ax (Rechtsanwalt)
07.05.2018	Bürgermeisterdienstversammlung Vogelsbergkreis, Alsfeld	Abel, Theilen
29.05.2018	Gespräch Rechtsmodell Vorstände SWG, Betriebsleitung MWB	Funk, Schmidt, Abel
08.06.2018	Vorbesprechung f. Infoveranstaltung	K6-Runde
12.06.2018	Informationsveranstaltung, Kongresshalle Gießen	K6-Runde, Genehmigungsbehörden, Bürgermeister, Lol-Zeichner
13.06.2018	Nachbesprechung	K6-Runde
20.06.2018	Präsentation Klärschlammprojekt Gemeinde Fernwald	Funk
26.06.2018	Betriebskommission Stadtwerke Alsfeld, Erläuterung Konzept und Vertragsentwurf	Funk, Becker, Dr. Ax
03.07.2018	Entwurfsbesprechung Kooperationsvereinbarung/Dr. Ax	Fink, Dr. Ax
13.07.2018	Externe Besprechung, mögl. Zwischenlagerung Klärschlamm/Deponie Aßlar	Fink, Abel Hr.Dworaczek (LDK)
27.08.2018	Präsentation Klärschlammprojekt, Allendorf / Lda.	Fink, Abel
28.08.2018	Informationsveranstaltung, Bürgerhaus Kleinlinden	K6-Runde, Genehmigungsbehörden, Bürgermeister, Lol-Zeichner
11.09.2018	Besichtigung einer Klärschlammverbrennungsanlage, Graz	Fink
07.11.2018	Informationsveranstaltung Präsentation Klärschlammprojekt, für Bürgermeister/Bgh Kleinlinden	K6-Runde, Genehmigungsbehörden, Bürgermeister, Lol-Zeichner
27.11.2018	Termin HSGB (Hessischer Städte- und Gemeindebund), Besprechung Kooperationsvertrag	Abel, Dr. Weber (SWG), Dr. Ax

2.3 Abfrage, Konkretisierung und Festlegung der zu behandelnden Klärschlamm-mengen für die weitere Planung

Mittels Fragebögen wurde bei allen Kläranlagenbetreibern im Umkreis von zunächst 30 bis 50 km um Gießen das Interesse an einer regionalen Kooperation zur gemeinsamen energetischen und stofflichen Klärschlammverwertung mit dem Schwerpunkt der energetischen Nutzung im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen und der Rückgewinnung des in den Schlämmen enthaltenen Phosphors abgefragt.

Der Schwerpunkt der Abfrage lag in den Landkreisen Gießen, Marburg-Biedenkopf, Vogelsbergkreis, Wetteraukreis und Lahn-Dill-Kreis. Die Abfrage erstreckte sich bewusst nicht nur auf die Kläranlagen > 50.000 EW, die nach AbfKlärV 2017 zukünftig zur Phosphor-Rückgewinnung verpflichtet sind, sondern wurde an alle Kläranlagenbetreiber versandt. Diese Entscheidung berücksichtigte, dass von verschiedenen Kläranlagenbetreibern aus der Region bekannt war, dass aufgrund von Flächenknappheit bzw. auch aufgrund von Schadstoffgehalten Probleme (Stichwort geogene Nickelbelastung) mit der Entsorgung von Klärschlämmen bestanden und bestehen. Diese waren und sind unabhängig von der Größe der Kläranlage bzw. der Klärschlammmenge. Aufgrund der Abfrage meldeten sich zudem weitere interessierte Kläranlagenbetreiber auch aus anderen Landkreisen.

Der Fragebogen ist dem Bericht als Anhang 11.1 angehängt.

Den interessierten Kläranlagenbetreibern wurde anschließend durch die Stadtwerke Gießen AG ein Entwurf einer ersten Absichtserklärung („Letter of Intent“ LOI 1) übersandt, um eine Konkretisierung der zu behandelnden Klärschlamm-mengen zu erreichen. Diese Absichtserklärung wurde auf einer Informationsveranstaltung am 20.02.2018 vorgestellt und diskutiert.

Um die interessierten Betreiber auch weiter zu binden und die vorhandenen Daten als belastbare Basisdaten für die weitere Planung der technischen Anlagen zu fixieren, wurde auf einer zweiten Informationsveranstaltung am 12.06.2018 eine zweite Absichtserklärung (LOI 2) vorgestellt, die den Interessenten anschließend zugesandt wurde.

In der zweiten Jahreshälfte 2018 wurde ein Kooperationsvertrag zur gemeinsamen regionalen Klärschlammverwertung in Mittelhessen entworfen. Dieser Entwurf des Kooperationsvertrags ist vertraulich und kann dem Bericht nicht als Anlage beigefügt werden. In 2019 sollen Verträge zwischen den Mittelhessischen Wasserbetrieben MWB und den einzelnen Kommunen und Betreibern abgeschlossen werden, um die weitere technische und ökonomische Projektierung des Projekts zu ermöglichen.

In der nachstehenden Tab. 2-3 sind - zusammengefasst nach Landkreisen - die Klärschlamm-mengen auf der Basis der Angaben der Jahre 2014 bis 2016 nach der Fragebogenaktion sowie nach den Rückmeldungen der ersten und der zweiten konkretisierten Absichtserklärung (LOI 1 und LOI 2) aufgeführt. Die Lage der einzelnen Kläranlagen in der erweiterten Region Mittelhessen zeigt die Abb. 2-1. Eine nach Landkreisen aufgeschlüsselte Darstellung der Klärschlamm-daten gibt die Tab 2-3 wieder.

Die Kläranlagen repräsentieren eine Anschlussgröße von ca. 1.200.000 EW. Die Angaben der einzelnen Betreiber bzw. Kläranlagen werden in dieser Ausarbeitung nicht im Detail veröffentlicht, da mit den Betreibern eine vertrauliche Behandlung der zur Verfügung gestellten Daten vereinbart wurde.

Tab. 2-2: Angeschlossene Einwohnerwerte sowie Verteilung der Kläranlagen nach Größenklassen nach Fragebogen der THM (Steckbrief) sowie erster und zweiter Absichtserklärung (LOI 1 und LOI 2)

Größenklassen	Angeschlossene Einwohnerwerte			Anzahl der Anlagen		
	Steckbrief	LOI 1	LOI 2	Steckbrief	LOI 1	LOI 2
1	5.081	5.025	5.025	11	8	8
2	39.877	30.350	30.350	17	11	11
3	55.884	49.296	60.096	10	8	9
4	501.621	558.621	550.121	17	21	21
5	561.500	561.500	561.500	3	3	3
Summe	1.163.963	1.204.792	1.207.092	58	51	52

Tab. 2-3: Angeschlossene Einwohnerwerte sowie Klärschlammengen als Originalsubstanz (OS) sowie Trockensubstanz (TS), Summen der in den einzelnen Landkreisen interessierten Kläranlagen, nach Fragebogen der THM (Steckbrief) sowie erster und zweiter Absichtserklärung (LOI 1 und LOI 2) (Mittelwerte der Angaben aus 2014 bis 2016; Stand der Erhebung Ende 2018)

Kreis	Angeschlossene Einwohnerwerte			KS-Menge OS Originalsubstanz			KS-Menge TS Trockensubstanz		
	EW			t/a			t/a		
	Steckbrief	LOI 1	LOI 2	Steckbrief	LOI 1	LOI 2	Steckbrief	LOI 1	LOI 2
Wetterau	130.349	143.652	143.652	14.667	12.944	12.944	2.620	2.938	2.938
Gießen	483.603	486.742	480.742	27.188	27.867	27.555	5.690	5.779	5.701
Lahn-Dill	88.690	161.000	189.300	8.205	12.053	14.045	1.503	2.465	2.933
Marburg-Biedenkopf	179.731	179.731	179.731	15.032	15.032	15.032	2.393	2.393	2.393
Vogelsbergkreis	26.053	73.980	53.980	5.177	6.791	6.791	364	763	763
Fulda	135.000	135.000	135.000	10.000	10.000	10.000	2.580	2.580	2.580
Main-Taunus-Kreis	850	0	0	543	0	0	44	0	0
Rheingau-Taunus	52.000	0	0	1.662	0	0	411	0	0
Hochtaunus	67.687	24.687	24.687	4.207	2.320	2.320	1.122	617	617
Summe	1.163.963	1.204.792	1.207.092	86.680	87.007	88.687	16.727	17.535	17.925

Tab. 2-4: Klärschlammengen (Summen), umgerechnet einheitlich auf 25 % TS, sowie Aufteilung in derzeitiger Entsorgung als Nassschlamm bzw. entwässertes Schlamm, nach Landkreisen, nach zweiter Absichtserklärung (LOI 2) (Stand Ende 2018)

Kreis	KS-Menge 25% TS	KS-Menge OS Originalsubstanz		KS-Menge TS Trockensubstanz	
	t/a	t/a		t/a	
	25% TS	nass	entwässert	nass	entwässert
Wetterau	12.029	2.387	10.557	56	2.882
Gießen	22.765	4.714	22.841	112	5.589
Lahn-Dill	11.732	1.000	13.045	31	2.902
Marburg-Biedenkopf	9.570	8.089	6.942	329	2.064
Vogelsbergkreis	3.378	4.963	2.210	306	538
Fulda	10.320	0	10.000	0	2.580
Main-Taunus-Kreis	0	0	0	0	0
Rheingau-Taunus	0	0	0	0	0
Hochtaunus	2.765	0	2.320	0	617
Summe	72.559	21.153	67.916	833	17.173

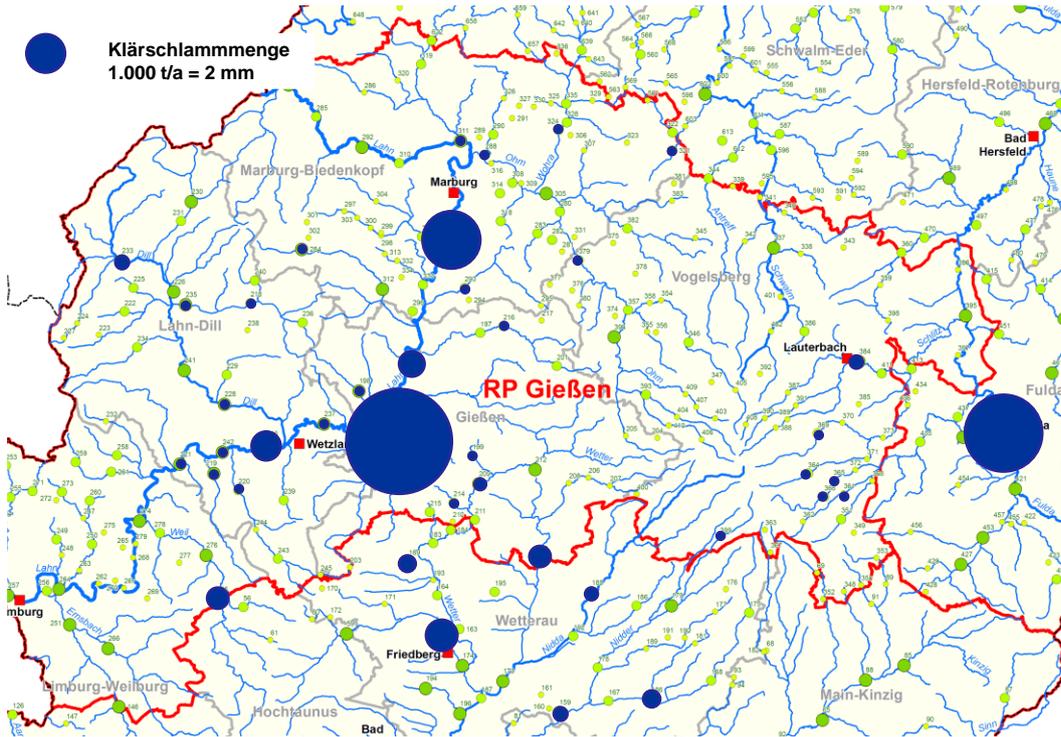


Abb. 2-1: Übersicht über die Kläranlagen mit grafischer Darstellung der Klärschlamm-mengen (umgerechnet auf 25 % TS) nach Unterzeichnung des LOI 2, Stand Ende 2018

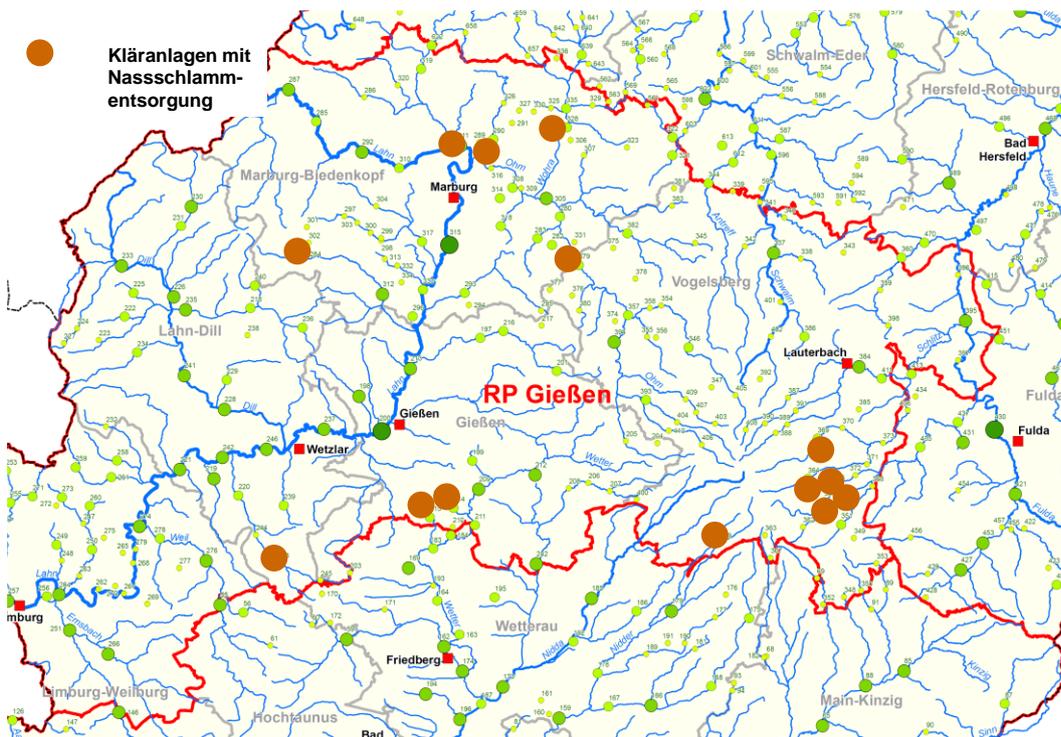


Abb. 2-2: Standorte von Kläranlagen mit Nassschlamm-entsorgung in der Landwirtschaft (insgesamt ca. 21.153 t/a mit i.M. ca. 4,0 % TS, nach Unterzeichnung des LOI 2, Stand Ende 2018)

Von den 88.687 t/a Originalsubstanz werden derzeit ca. 21.153 t/a als Nassschlamm mit im Mittel ca. 3,9 % TS landwirtschaftlich verwertet (siehe Abb. 2-2). 67.916 t/a werden als entwässerter Schlamm mit i.M. ca. 25,3 % TS entsorgt. Zahlen der einzelnen Landkreise sind der Tab. 2-4 zu entnehmen. Aufgrund des aktuell sehr volatilen Klärschlamm Entsorgungs-Marktes werden diese Mengen sowohl landwirtschaftlich als auch thermisch verwertet, mit steigender Tendenz in Richtung thermische Verwertung. Wenn alle Schlämme einheitlich auf 25 % TS entwässert werden würden, ergäbe sich die thermisch und stofflich zu verwertende Klärschlammmenge zu ca. 72.559 t/a (siehe Tab. 2-4).

Aufgrund der in den letzten Monaten der Bearbeitung der Studie fortgeführten Diskussion in der Region konnten weitere Klärschlamm mengen ermittelt werden, die ggf. für das geplante regionale Klärschlammkonzept Mittelhessen zur Verfügung stehen könnten:

- aus dem Wetteraukreis über die Wetterau Abfallwirtschaft (Eigenbetrieb des Wetteraukreises) bzw. die Wetterauer Entsorgungsanlagen GmbH WEAG (Eigengesellschaft des Wetteraukreises), Humus- und Erdenwerk mit Vergärungsanlage Standort Ilbenstadt:
ca. 20.000 t/a mit 25 % TS, getrocknet auf ca. 70 % TS entsprechend ca. 7.140 t/a
- aus dem Lahn-Dill-Kreis über die Abfallwirtschaft Lahn-Dill (Eigenbetrieb des Lahn-Dill-Kreises), zukünftiger Standort Vergärungsanlage Oberscheld:
ca. 10.000 t/a mit 25 % TS, getrocknet auf ca. 70 % TS entsprechend ca. 3.570 t/a

Diese Mengen sowie die Einbindung der Wetterauer Abfallwirtschaft und der Abfallwirtschaft Lahn-Dill müssen in weiteren Gesprächen im Verlauf des Jahres 2019 konkretisiert werden und vertraglich gebunden werden. Es ist vor allem zu konkretisieren, ob in den o.g. Mengen bereits Klärschlamm mengen von Anlagen enthalten sind, die bereits einen LOI 2 gezeichnet haben und daher bereits in den Mengen gemäß Tab. 2-3 und Tab. 2-4 enthalten sind.

2.4 Abfrage, Konkretisierung und Bewertung der jeweiligen Klärschlammzusammensetzung in Bezug auf DüMV, AbfKlärV

Gemäß § 8, Abs. 1, der AbfKlärV, 2017, ist die „Auf- oder Einbringung des Klärschlammes auf oder in den Boden nur zulässig, wenn die Untersuchungen nach § 5 Absatz 1 und 2 ergeben, dass die Grenzwerte nach Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 4 der Düngemittelverordnung sowie die zusätzlichen Grenzwerte nach Anlage 1 nicht überschritten werden. Für das Schwermetall Kupfer gilt als Grenzwert der zulässige Höchstgehalt nach Anlage 1 Abschnitt 4.1 Nummer 4.1.1 Spalte 6 Absatz 2 der Düngemittelverordnung.“ Die entsprechenden Grenzwerte der AbfKlärV und der DüMV sind in der nachfolgenden

Tab. 2-5 zusammengestellt.

Im Rahmen der Abfrage bei interessierten Kläranlagenbetreibern wurden auch die Ergebnisse der Klärschlammanalysen abgefragt und mit den Anforderungen an die Verwertung von Klärschlamm auf oder in den Böden gem. der AbfklärV und der DüMV von 2017 verglichen. Die detaillierten Ergebnisse sind den Autoren bekannt; aufgrund der Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Betreibern der Kläranlagen sind diese hier nicht veröffentlicht. Von einigen Anlagen wurden bisher keine Analysen zur Verfügung gestellt.

Tab. 2-5: Anforderungen an Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost auf oder in den Boden gemäß AbfKlärV, 2017, und DüMV, 2017

		AbfKlärV v. 27.09.2017	DüMV v. 26.5.2017	
		gem. Anlage 1 (zu § 8 Absatz 1)	gem. Anlage 2 Tabelle 1.4 Spalte 4	
			Kennzeichnung	Grenzwert
Arsen	mg / kg TS		20	40
Blei	mg / kg TS		100	150
Cadmium	mg / kg TS		1	1,5
Chrom	mg / kg TS		300	
Chrom (VI)	mg / kg TS		1,2	2,0
Kupfer	mg / kg TS			0,09 % bezogen auf TM und Zink 0,5 % bezogen auf TM
Nickel	mg / kg TS		40	80
Quecksilber	mg / kg TS		0,5	1,0
Thallium	mg / kg TS		0,5	1,0
Zink	mg / kg TS	4000		
PFT	mg / kg TS		0,05	0,1
AOX	mg / kg TS	400		
PCB je Kongener	mg / kg TS	0,1		
Benzo(a)pyren	mg / kg TS	1		
Σ Dioxine und dl-PCB	ng / kg TS			30

Zusammengefasst ergaben sich folgende Werte für die verschiedenen Schadstoffe (siehe

Tab. 2-5):

Arsen:	keine Überschreitungen
Blei:	eine Überschreitung des Wertes zur Kennzeichnungspflicht (100 mg/kg)
Cadmium:	mehrere Überschreitungen des Wertes zur Kennzeichnungspflicht (1,0 mg/kg) zwei Überschreitungen des Grenzwertes (1,5 mg/kg)
Chrom (VI):	nur sehr wenige Analysen vorhanden, alle unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze, die aber z.T. bei 2,0 mg/kg lag (geringer als Grenzwert, höher als Kennzeichnungspflicht)
Chrom:	keine Überschreitungen des Wertes zur Kennzeichnungspflicht (300 mg/kg)
Kupfer:	keine Überschreitungen; Maximal-Werte bei ca. 600 mg/kg TM entsprechend ca. 0,06 %
Nickel:	mehrere Überschreitungen des Wertes zur Kennzeichnungspflicht (40 mg/kg)
Quecksilber:	mehrere Überschreitungen des Wertes zur Kennzeichnungspflicht (0,5 mg/kg)
Thallium:	nur wenige Analysen, eine Überschreitung des Grenzwertes (1,0 mg/kg)
Zink:	keine Überschreitungen des Grenzwertes gem. AbfKlärV (4.000 mg/kg)
AOX:	keine Überschreitungen des Grenzwertes gem. AbfKlärV (400 mg/kg)
Σ Dioxine und dl-PCB	eine Überschreitung des Grenzwertes gem. AbfKlärV (30 ng/kg)
Σ PFT	keine Überschreitungen des Grenzwertes gem. AbfKlärV (1,0 mg/kg) sehr wenige Messwerte

2.5 Thermische Umsetzung des Klärschlammes aus dem Einzugsgebiet. Eigenschaften der virtuellen Klärschlammmasche

Um die Eigenschaften der aus der Monoverbrennung der Klärschlämme aus der Region resultierenden Asche beurteilen zu können, wurde deren Zusammensetzung rechnerisch ermittelt. Ausgangspunkt bildeten die durch die Anlagenbetreiber zur Verfügung gestellten Klärschlamm- und Jahrestonnage, die jede Anlage in die Verbrennung einspeisen würde. Anhand des Glühverlustes wurde für jede Anlage die Aschemenge nach vollständiger Mineralisation und deren Elementgehalte ermittelt. Der Asche-Massenstrom jeder einzelnen Kläranlage diente als Gewichtungsfaktor für die Ermittlung der Elementarzusammensetzung der virtuellen Mischasche aus der Region.

Berechnung des Gewichtungsfaktors

$$f_i = \frac{(1 - GV_i) \cdot \dot{M}_i^{KS}}{\sum_{i=1}^n (1 - GV_i) \cdot \dot{M}_i^{KS}}$$

- f_i = Gewichtungsfaktor Ascheanteil der Anlage i
 GV = Glühverlust des Klärschlammes der Anlage i
 \dot{M}_i^{KS} = Massenstrom trockener Klärschlamm der Anlage i

Berechnung des Elementgehalts in der Asche der Anlagen

$$E_i^{Asche} = (1 - GV_i)^{-1} \cdot E_i^{KS}$$

- E_i^{Asche} = Elementgehalt in der Asche der Anlage i
 E_i^{KS} = Elementgehalt im Klärschlamm der Anlage i

Berechnung des Elementgehalts in der Asche der Region Mittelhessen

$$E_{Region}^{Asche} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot E_i^{Asche}$$

Tab. 2-6: Schwermetallgehalte (mg/kg) der virtuellen Mischasche aus Klärschlämmen der Region. Die mit * markierten Werte wurden in einer veraschten Probe des Klärschlammes der Kläranlage Gießen bestimmt

As	Cd	Cr	Cu	Hg
4,39	1,95	112	522	1,04
Ni	Pb	V*	Zn	U*
76,5	81,2	88,0	2140	1,05

Die in Tabelle 2-6 dargestellten Schwermetallgehalte sind relevant für die Weiterverarbeitung der Asche zu einem Düngemittel denn sie bestimmen, ob im fertigen Produkt die Grenzwerte der Düngemittelverordnung eingehalten werden. Anzumerken ist, dass es sich bei der Berechnung

der Ascheeigenschaften um eine worst-case Abschätzung handelt, da davon ausgegangen wurde, dass das sämtliche Elemente in der Asche verbleiben und keine Volatilisierungsverluste auftreten. Insbesondere für Quecksilber dürften in der realen Asche die Gehalte deutlich niedriger ausfallen.

In Abbildung 2-3 sind die Schwermetallgehalte der virtuellen Mischasche denjenigen in marokkanischem Rohphosphat gegenübergestellt. Dieser Vergleich wurde gewählt, weil der überwiegende Anteil der in Deutschland eingesetzten P-Düngemittel auf Rohphosphaten des afrikanischen Phosphatgürtels basiert. Die Länge der Balken gibt an, um welchen Faktor die Gehalte in der Asche gegenüber dem Rohphosphat angereichert (weiße Balken in positiver Richtung) bzw. abgereichert sind (blaue Balken in negative Richtung). In Summe sind die beiden Materialien sehr vergleichbar. Auch hinsichtlich des gewichteten mittleren P_2O_5 -Gehaltes der virtuellen Asche von 12,7 % erscheint diese geeignet, mittelgradiges Rohphosphat bei der Düngemittelproduktion zu ersetzen.

Geht man davon aus, dass die Asche bei der Düngemittelproduktion ca. im Verhältnis 1:1 mit Chemikalien versetzt werden würde, so ergäbe sich bei keinem der ausgeführten Parameter eine Überschreitung der Grenzwerte gem. Anlage 2 Tabelle 1.4 der Düngemittelverordnung. Dies gilt auch für den Parameter Nickel, der in einigen Klärschlämmen aus dem Einzugsgebiet geogene Auffälligkeiten aufweist. Kupfer und Zink sind nicht reglementiert, da sie als Mikronähstoffe gelten.

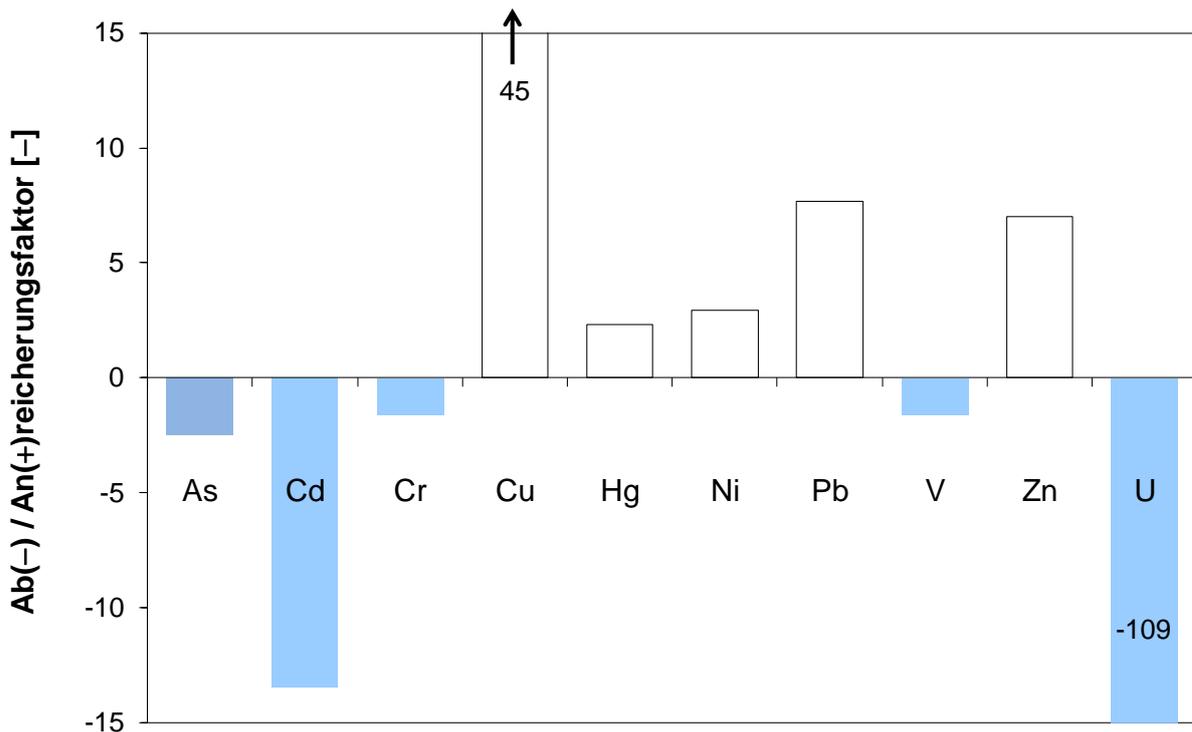


Abb. 2-3: Schwermetallgehalte der virtuellen Klärschlammasche aus der Region Mittelhessen im Vergleich zu marokkanischem Rohphosphat anhand von An- bzw. Abreicherungsfaktoren

3 Klärschlamm-trocknung

3.1 Bewertung verschiedener Technologien zur Klärschlamm-trocknung

Umfangreiche Angaben zu verschiedenen Trocknungstechnologien sind dem ATV-DVWK-Merkblatt M 379 „Klärschlamm-trocknung (ATV-DVWK, 2004) sowie dem derzeit im Entwurf vorliegenden DWA-Merkblatt M 379 „Klärschlamm-trocknung“ zu entnehmen (DWA, 2019). Auf eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Technologien wird daher in diesem Rahmen verzichtet. Die Tab. 3-1 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien sowie eine grundsätzliche Bewertung anhand einiger wesentlicher Kriterien. Die hier mit + und – bewerteten Kriterien müssen in einer konkretisierten Studie genauer bewertet werden.

Tab. 3-1: Zusammenstellung von grundsätzlichen Bewertungskriterien zum Einsatz von Klärschlamm-trocknungs-Technologien

	Trommel-trockner	Wirbelschicht-trockner	Scheiben-trockner / Dünnschicht-trockner	Band-trockner	Solartrockner	
					ohne Abwärme	mit Abwärme
Investitionen	-	-	+	+	++	+
el. Energiebedarf	o	o	o	o	++	+
Wartung/ Verschleiß	-	-	+	+	++	++
Erforderliches Wärmeniveau	-- (Abgas)	O (Th.-Öl 300 °C)	O (150-300 °C)	+	+++	++ (55-90°C)
Platzbedarf	+	+	++	o	---	-(-)
Abluftbehandlung	--	-	-	+-	++	+
Stäube	-	--	--	+	++	+

Tab. 3-2: Zusammenstellung von grundsätzlichen Anlagendaten verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien (Geyer, J., 2013), http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_eaa/2013_EaA_927_948_Geyer.pdf

Parameter	Einheit	konventionelle Trocknung	Band-trocknung	Niedertemperatur-/ Solartrocknung
Schlamm-durchsatz	tTS/a	> 2.500	1.000 – 2.500 (20.000)	200 – 500
Wasser- verdampfung	t/h	Trommeltr.: 3 – 11 Scheibentr.: < 6 Dünnschichttr.: < 4 Wirbelschichttr.: 1 – 11	0,5 – 2 mit Trockengut- rückführung bis 10	Kaltlufttr.: 0,3 – 1 Solartrockner:
Endproduktfeuchte	% TS	> 90	70 – 90	50 – 70 (90)
Trocknungstemperatur	°C	> 85	60 – 70	10 – 40
Energie: thermisch	kWh/t _{H2O}	750 – 950	750 – 950	0
elektrisch	kWh/t _{H2O}	60 – 100	60 – 100	30
Abluft	m ³ /h	Kontakttr.: 100 – 200 Konvektionstr. 5.000	5.000 – 80.000	> 100.000

Tab. 3-3: Zusammenstellung von grundsätzlichen Anlagendaten verschiedener Klärschlamm-trocknungs-Technologien (Geyer, J., 2013), http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_eaa/2013_EaA_927_948_Geyer.pdf

	Scheibentrockner	Trommeltrockner	Dünnschichtrockner	Wirbelschichtrockner	Bandrockner	Solartrockner
Beheizung	Erd-, Faulgas, Heizdampf < 11 bar, Abgase > 160 °C	Erd-, Faulgas, Abgase > 350 °C	Erd-, Faulgas, Heizdampf < 11 bar, Abgase > 160 °C	Erd-, Faulgas, Heizdampf > 5 bar, Abgase > 160 °C	Erd-, Faulgas Heizdampf, Abgase, Warmwasser	Sonnenstrahlung ggf. Warmwasser für Fußbodenheizung
Wärmeträger	Heizdampf < 11 bar, Thermoöl	Abgas 350 – 600 °C	Heizdampf < 11 bar, Thermoöl	Heizdampf 6 – 40 bar Thermoöl 130 – 250 °C	Luft < 130 °C	Sonnenstrahlung, Luft, Warmwasser
mögliche Wasserverdampfungsleistung	1.000 – 6.000 kg/h	1.000 – 11.000 kg/h	1.000 – 4.000 kg/h	1.000 – 11.000 kg/h	500 – 10.000 kg/h	
Trocknungstemperatur	110 °C	90 °C	110 °C	85/115 °C	60 – 70 °C	< 40 °C
Energieverbrauch • thermisch • elektrisch	850 kWh/tH ₂ O 60 kWh/tH ₂ O	850 kWh/tH ₂ O 60 kWh/tH ₂ O	850 kWh/tH ₂ O 60 kWh/tH ₂ O	810 kWh/tH ₂ O 70 kWh/tH ₂ O	950 kWh/tH ₂ O 85 kWh/tH ₂ O	0 kWh/tH ₂ O 30 kWh/tH ₂ O
Abgasmenge	200 m ³ /h	3.000 – 5.000 m ³ /h	200 m ³ /h	150 m ³ /h	5.000 – 80.000 m ³ /h	groß
Schlammeyntrag • Teiltrocknung < 85 % TS • Volltrocknung > 85 % TS	Direkteintrag < 45 % TS Trockengut- Rückführung	nein Trockengut- Rückführung	Direkteintrag < 45 % TS mit nachgeschalteter Trocknungsstufe	nein Direkteintrag oder TG-Rückführung	Direkteintrag über Matrizen oder TG-Rückführung	mittels Wendeinrich- tungen < 70 % TS möglich bei sehr langen Trocknungszeiten
Endprodukt- qualität	> 90 % TS, hoher Staubanteil	Granulat 2 – 4 mm, > 90 % TS	nur teiltrocknet	Granulat 1 – 4 mm > 90 % TS	Spaghetti 75 – 85 % TS Granulat: 90 % TS	50 – 70 % TS

Tab. 3-4: Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen verschiedener Trocknungstechnologien (DWA Merkblatt M 379, Entwurf 2019)

Typ	Vorteile	Nachteile
Bandrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Probleme m. Leimphase - Geringer Verschleiß - Produktqualität gut einstellbar - Abwärme im Nieder- und Mitteltemperaturbereich bis 150 °C gut nutzbar - Geringer Staubanteil im Prozess und im Trockengranulat 	<ul style="list-style-type: none"> - Größerer Grundflächenbedarf als Kontakttrocknung - Strukturierung des entwässerten Schlammes notwendig - Im Vergleich zu Kontakttrocknern höhere Abluftmengen (z.B. bei Kondensationsrockner ~ 4.000 m³/h)
Dünnschichtrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Robustes Verfahren - Keine Probleme m. Leimphase - Unproblematisches An- und Abfahrverhalten durch kleine Schlammmasse im Trockner - Gut geeignet für Teiltrocknung 	<ul style="list-style-type: none"> - Volltrocknung energetisch ungünstig - erfordert in der Regel eine zweite Trocknungsstufe - Verschleißanfälligkeit bei Volltrocknung
Schneckenrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Einfach im Aufbau - Kleiner Grundflächenbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeträgertemperaturen > 200 °C erforderlich - Gefahr von örtlichen Überhitzungen (Geruch, Pyrolyseprodukte im Kondensat)
Scheibentrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Kompakte Bauweise - Gut geeignet für Teiltrocknung 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei Volltrocknung: <ul style="list-style-type: none"> o Rückmischungserfordernis o Probleme bei hohem Faseranteil o Staubbildung o verschleißanfällig - Teiltrocknung nur bis Leimphase
Paddeltrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Kompakte Bauweise - Gut geeignet für Teiltrocknung 	<ul style="list-style-type: none"> - Probleme bei hohem Faseranteil - Hoher Staubbildung - Verschleißanfällig bei Volltrocknung
Trommelrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Robustes Verfahren - Gut geeignet für große Wasserverdampfungsleistungen - Einstellbare Produktqualität 	<ul style="list-style-type: none"> - Inertisierung notwendig - Rückmischungserfordernis - In der Regel Primärenergie notwendig
Wirbelschichtrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Keine bewegten Teile - Geringer Verschleiß - Keine Probleme m. Leimphase - Gleichmäßige Produktstruktur 	<ul style="list-style-type: none"> - Druckverlust der Wirbelschicht bedingt erhöhten Stromverbrauch - Inertisierung notwendig
Solar-/Hallentrockner	<ul style="list-style-type: none"> - Spezif. geringe Energiekosten - Einfache Verfahrenstechnik - Abwärmenutzung auf niedrigem Temperaturniveau - Gutmütiges Betriebsverhalten - Keine zeitkritischen Betriebszustände, diskontinuierlicher Betrieb möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Flächenbedarf groß - Wasserverdunstung witterungsabhängig - Lange Trocknungszeiten bei rein solarer Trocknung - Saisonalität - Ungleichmäßige Struktur und Feuchtigkeit des Produkts

Deklariertes Ziel war es eine Klärschlamm-trocknung vor der Verbrennung möglichst mit nicht anderweitig nutzbarer Abfallwärme von z.B. Blockheizkraftwerken oder auch aus dem Rücklauf der Fernwärmeversorgung durchzuführen. Daher werden nachfolgend in Betrachtung potenzieller Trocknungsstandorte ausschließlich Bandtrockner sowie Solartrockner (mit und ohne Abwärmeunterstützung) betrachtet.

Lediglich für das nachfolgende beschriebene Szenario 1 „Zentrale Trocknung als Vorschaltanlage vor der Wirbelschichtverbrennung“ (siehe Kap. 7.7) werden Scheiben- oder Dünnschichttrockner eingesetzt, die mit der Hochtemperaturwärme der Verbrennungsanlage (Abgas) versorgt werden. Das für diese Trocknungstechnologie erforderliche Temperaturniveau reduziert aber die Wärmeebenutzung im Fernwärmenetz der Stadtwerke. Auf eine thermodynamische Berechnung des Wärmebedarfs wird an dieser Stelle verzichtet. Statt dessen wurde folgender spezifischer Wärmebedarf für die Trocknungstechnologien angesetzt:

- abwärmegestützter Solartrockner abhängig von zur Verfügung stehender Fläche
- Bandtrockner (mit 65 °C und 4-fachem Trocknungsluft-Durchlauf) ca. 930 kWh/ t WV
- Dünnschicht- oder Scheibentrockner (mit ca. 120 °C) ca. 850 kWh/ t WV

3.2 Qualitative und quantitative Bewertung von identifizierten zentralen und dezentralen Standorten für Trocknungsanlagen, Bewertung der zur Verfügung stehenden Wärmemengen sowie des Temperaturniveaus

Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf Klärschlamm-mengen, die rechnerisch einheitlich auf 25 % TS ermittelt wurden. Dies bedeutet, dass Klärschlämme im Fall der Anlagen mit aktueller Nassschlamm-trennung dort zunächst entwässert werden müssten. Dieser Grundsatz wird entsprechend vertraglich fixiert.

3.2.1 Zentrale Trocknung am Standort Gießen

Für einen zentralen Trocknungsstandort, an dem die gesamte Klärschlamm-menge mit ca. 70.000 bis 75.000 t/a von ca. 25 % TS auf ca. 45 % TS als Eingangs-TS für eine nachgeschaltete Wirbelschichtverbrennung vorgetrocknet werden soll, wurden seitens der Stadtwerke Gießen AG folgendes Abwärmeangebot definiert:

- Rücklauf Fernwärme, 150 m³/h, 60-65 °C, abzukühlen auf 40-45 °C (Delta-T = 20 °C)
 - Wärmeangebot ca. 3.400 kW_{th},
 - Trocknungstechnologie: abwärmegestützte solare Trocknung:
Trocknungskapazität ca. 75.000 t KS/a von 25 % TR auf 45 % TR
erforderliche Fläche: Halle ca. 22.575 m², Gesamt-Fläche ca. 30.500 m²
 - Trocknungstechnologie: Bandtrockner:
Trocknungskapazität ca. 72.500 t KS/a von 25 % TR auf 45 % TR
erforderliche Fläche: Halle ca. 4.000 m², Gesamt-Fläche ca. 6.300 m²)

Diese Abwärme kann an verschiedenen Stellen aus dem Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen bereitgestellt werden. Als bevorzugter Standort gilt nach derzeitigem Diskussionsstand die TREA (Thermische Reststoffbehandlungs- und Energieverwertungsanlage) der SWG. Dieser Standort ist ein zentraler Punkt für die Versorgung des Fernwärmenetzes der Stadtwerke Gießen. Hier kann jahreszeitunabhängig die o.g. Abwärme aus dem Fernwärmenetz bereitgestellt werden.

3.2.2 Dezentrale Trocknungsstandorte

Um dezentrale Standorte für Klärschlamm-trocknungsanlagen in der Region Mittelhessen zu finden, wurde im Rahmen der oben erläuterten Fragebogenaktion eine Abfrage unter den interessierten Kommunen durchgeführt. Der Fragebogen zu dezentralen Trocknungsstandorten ist dem Bericht als Anhang 11.2 angehängt. Abgefragt wurden u.a. zur Verfügung stehende Flächen sowie Abwärme aus Produktionsbetrieben, Kläranlagen (Faulungsanlagen) oder Biogasanlagen (landwirtschaftliche Biogasanlagen bzw. Bioabfallvergärungsanlagen).

Danach bestehen aus folgenden Kommunen bzw. von folgenden Betreibern Interesse sowie Potentiale für Standorte für eine dezentrale Trocknung:

- Energie & Versorgung Butzbach GmbH, Kläranlage Butzbach,
 - Wärmeangebot 150 kW_{th} Klärgasnutzung BHKW, Kühlwasser ca. 80/50 °C,
 - Fläche ca. 6.000 m²
 - Trocknungstechnologie: abwärme gestützte solare Trocknung:
Trocknungskapazität ca. 5.000 t KS/a von 25 % TR auf 70 % TR
 - Trocknungstechnologie: Bandtrockner:
Trocknungskapazität ca. 2.000 t KS/a von 25 % TR auf 70 % TR)
- Gemeinde Grebenhain, Standort Kläranlage Vaitshain
 - Fläche ca. 5.000 m², keine Abwärme
 - Trocknungstechnologie: solare Trocknung:
Trocknungskapazität ca. 2.500 t KS/a von 25 % TR auf 70 % TR
- Abfallwirtschaft Lahn-Dill, Standort Oberscheld (Dillenburg),
 - Wärmeangebot aus BHKW der Vergärungsanlage (Kühlwasser ca. 85/60 °C),
 - Trocknungstechnologie noch nicht konkretisiert
 - Trocknungskapazität nach Angaben der Abfallwirtschaft des Lahn-Dill-Kreises ca. 10.000 t KS/a von 25 % TR auf 70 % TR
- WEAG - Wetterauer Entsorgungsanlagen GmbH, Humus- und Erdenwerk mit Vergärungsanlage Standort Ilbenstadt,
 - Wärmeangebot ca. 750 kW, BHKW der Vergärungsanlage (Kühlwasser 85/60 °C),
 - Trocknungstechnologie noch nicht konkretisiert
 - Trocknungskapazität nach Angaben der WEAG - Wetterauer Entsorgungsanlagen GmbH, ca. 20.000 t KS/a von 25 % TR auf 70 % TR
- Weso-Aurorahütte GmbH, Standort Gladenbach (s. Abb. 3-1),
 - Wärmeangebot stark schwankend, an 2.500 h/a mit einem Wärmeangebot zwischen ca. 500 und ca. 2.000 kW, Abwärmequelle: Rekuperator des Kupolofens, VL / RL am Rückkühlwerk ca. 90 / 80 °C
 - zur Verfügung stehende Fläche: ca. 50 * 200 m = 10.000 m²
 - Trocknungstechnologie noch nicht konkretisiert

Ein weiterer zunächst konkretisierter Standort an der Biogasanlage Wölfersheim-Berstadt mit einem Abwärmeangebot von 210 kW_{th} aus den BHKW der Biogasanlage (Kühlwasser ca. 90/70 °C) konnte nicht weiter betrachtet werden, da die noch zu bebauende Fläche selbst für die Trocknung mittels Bandtrockner mit einer entsprechenden Leistung nicht ausreicht. Weitere Flächen

stehen an dem Standort aufgrund der Einschränkungen des Bebauungsplanes nicht zur Verfügung.

Weitere Standorte für dezentrale Trocknungsanlagen könnten sein:

- Fa. Bosch Thermotechnik GmbH / Buderus, Lollar (Gießerei)
- Fa. Fritz Winter, Stadtallendorf (Gießerei)

Zu diesen Standorten konnten im Rahmen der Bearbeitung der Studie keine konkreten zur Verfügung stehenden Wärmemengen bzw. Standorte ermittelt werden.

Weitere Standorte wurden im Rahmen der Abfragen unter den interessierten Kommunen nicht identifiziert. Auch konnten konkretere Angaben zum jeweilige Energieangebot (Wärmemengen, Jahreszeitlicher Verlauf) im Rahmen der Machbarkeitsstudie nicht erhoben werden.

Insbesondere bei Einsatz abwärmeunterstützter Solar-Trocknungsanlagen ist die zur Verfügung stehende Fläche von besonderer Bedeutung. Die oben gemachten Angaben zu den einzelnen Standorten stellen nur eine erste Abschätzung dar. Im Rahmen weiterer Planungen müssten diese Daten weiter konkretisiert werden, um die Kosten (Investitions- und Betriebskosten) weiter abzusichern.

Die Trocknungsstandorte sowie die Einzugsgebiete der Trocknungsanlagen mit den Standorten der dorthin liefernden Kläranlagen sind in der Abb. 7-6 dargestellt.

3.3 Richtpreisangebote für Anlagen zur Klärschlamm-trocknung (vorzugsweise Bandtrocknung und Solar-unterstützte Trocknung)

Da bisher keine endgültige verbindliche Festlegung der Partnerkommunen mit den zugehörigen Klärschlamm-mengen erfolgen konnte, wurden Richtpreisangebote für Trocknungsanlagen nach den Systemen der Bandtrocknung sowie der abwärme-gestützten Solartrocknung eingeholt.

Die Angebote wurden erstellt für verschiedene Durchsatzmengen, um Szenarien der zentralen und der dezentralen Trocknung darstellen zu können. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Klärschlamm-Input einen TR-Gehalt von 25 % aufweist und das Trocknungsziel bei ca. 45 bzw. 70 % TR liegt. Bei weiter fortschreitender Planung des gesamten Projekts müssen die Input-Daten und damit die Angebote konkretisiert werden. Folgende Angebote wurden berücksichtigt:

- abwärme-gestützte Solartrocknungsanlagen:
THERMO-SYSTEM Industrie- & Trocknungstechnik GmbH
Röntgenstraße 14/1
D-73730 Esslingen
- Bandtrocknungsanlagen
HUBER SE
Industriepark Erasbach A1
D-92334 Berching

Bei der Betrachtung der Kosten wurden folgende Anteile abgeschätzt:

- Stahlhalle in der erforderlichen Größe
- Erd- und Betonbauarbeiten
- Aufwendungen für Schlammannahme

- Verfahrenstechnik (M+E)
- Abluftführung und Abluftbehandlung
- Klärschlammstilo für den getrockneten Klärschlamm
- erforderliche Fläche zum Bau der Trocknungsanlage (50 €/m²)
- Sicherheit und Planung: zzgl. 25 %

Von erheblicher Bedeutung ist die erforderliche Fläche, die im Projektgebiet in erreichbarer Nähe zum Abwärmeangebot bereitgestellt werden müsste (s. Abb. 3-1). Die Abb. 3-2 dargestellten Kosten zeigen, dass die beiden betrachteten Trocknungsvarianten vergleichbare Investitionen aufweisen.

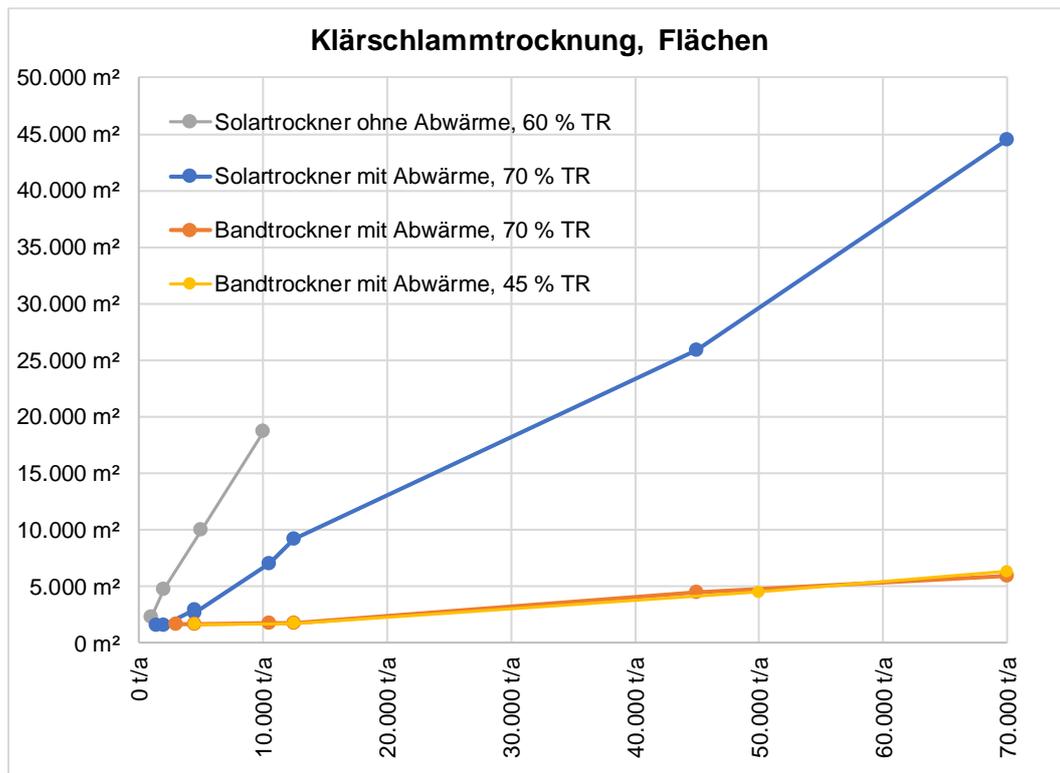


Abb. 3-1: Erforderliche Bauflächen für Bandrockner sowie Solartrockner in Abhängigkeit des Durchsatzes.

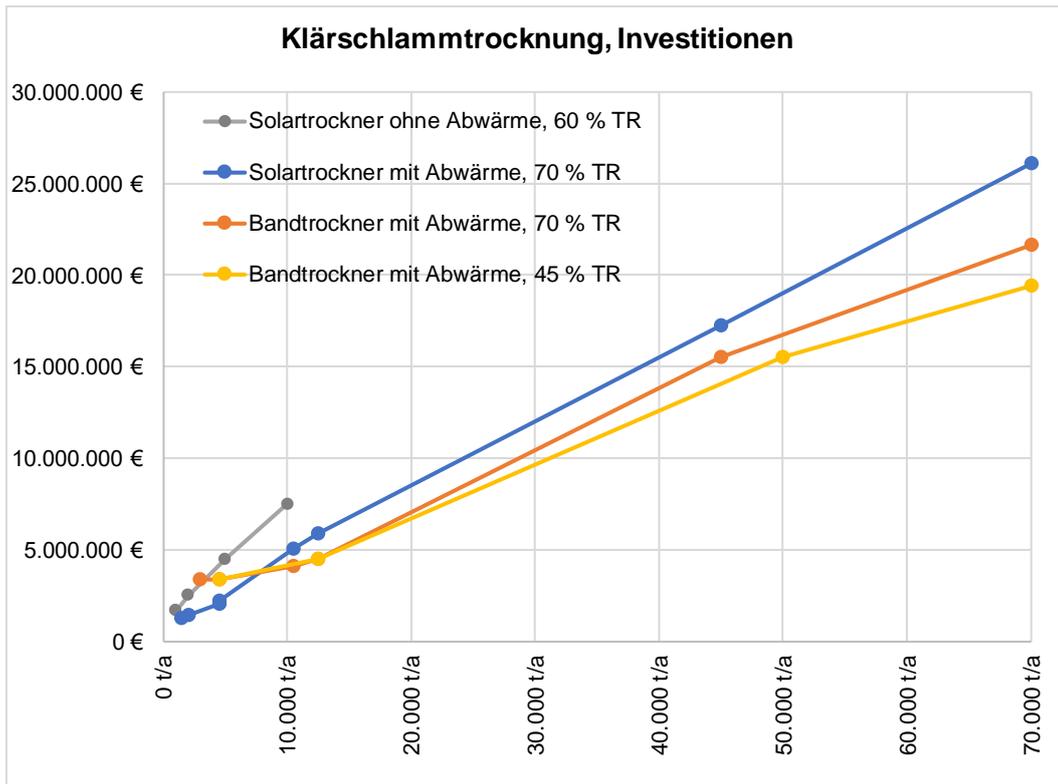


Abb. 3-2: Investitionen für Solartrocknern sowie Bandrockner

Zum genauen Kostenvergleich sowie zur Ermittlung der Jahreskosten und der spezifischen Kosten (€/t) wurden folgende spezifische Kostenansätze verwendet:

Kapitalkosten:

- Zinsen 2 %/a
- Nutzungsdauer einheitlich: 15 Jahre, Annuitätenfaktor $a = 0,07783$
- spezifischer Grundstückspreis 50 €/m²

Feste Betriebskosten

- Reparatur / Wartung / Unterhalt: 2 % des Invest. M+E /a
- Personalkosten: 50 €/h

Variable Betriebskosten

- Elektr. Energie: 0,20 €/kWh
- Therm. Energie: 0,00 €/kWh für 60/65 °C

Die Jahreskosten wurden über eine statische Kostenberechnung mit den oben genannten Ansätzen als Summe aus Kapitalkosten, festen und variablen Betriebskosten ermittelt.

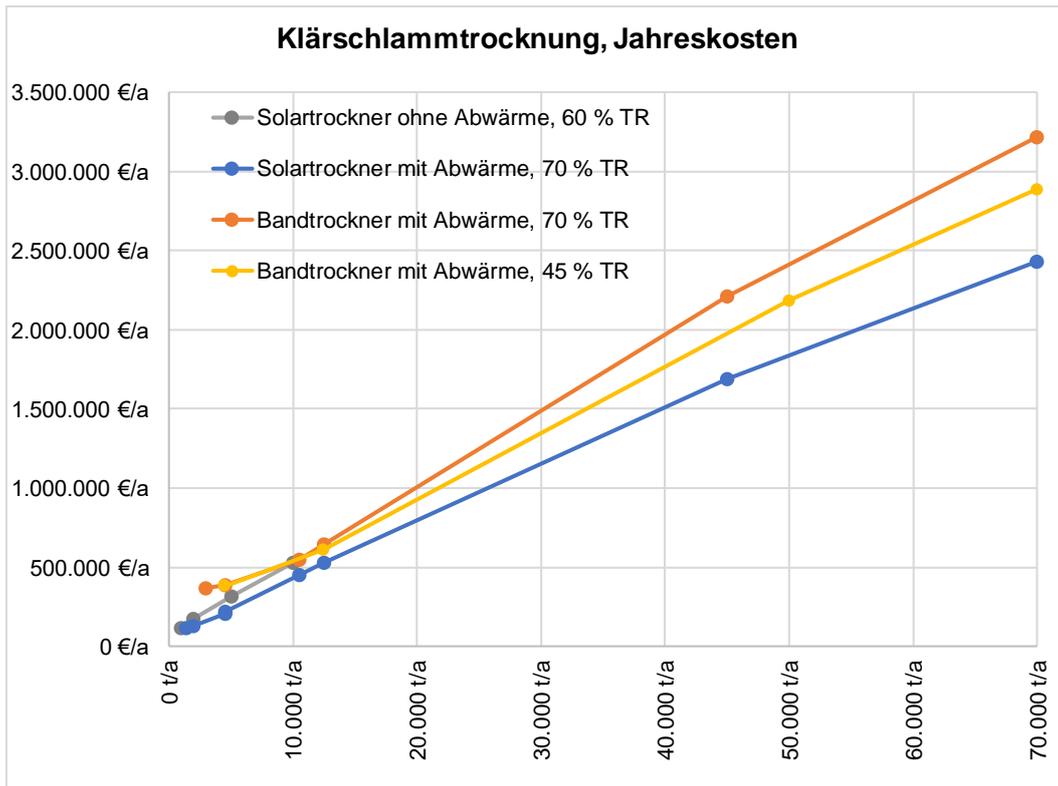


Abb. 3-3: Jahreskosten der Klärschlamm-trocknung bei verschiedenen Trocknungstechnologien sowie Jahresdurchsätzen.

Als Quotient aus Jahreskosten und zu verarbeitender Klärschlamm-menge ergeben sich daraus die spezifischen Kosten für die Klärschlamm-trocknung (siehe Abb. 3-4).

Diese Kostenschätzung zeigt, dass Solartrockner mit Abwärmeunterstützung grundsätzlich kostengünstiger sind als Bandrockner. Es muss aber bedacht werden, dass der Flächenbedarf insbesondere bei großen zu verarbeitenden Klärschlamm-mengen erheblich größer ist. Desweiteren ist festzustellen, dass Trocknungsanlagen mit einem Durchsatz von weniger als 10.000 t/a nur zu spezifisch sehr hohen Kosten (€/a) zu betreiben sind. Die den Abb. 3-1 bis Abb. 3-4 zugrundeliegenden Angaben und Ansätze müssen bei Konkretisierung des Vorhabens ausdetailliert werden, um die tatsächlich zu trocknende KS-Menge zu berücksichtigen.

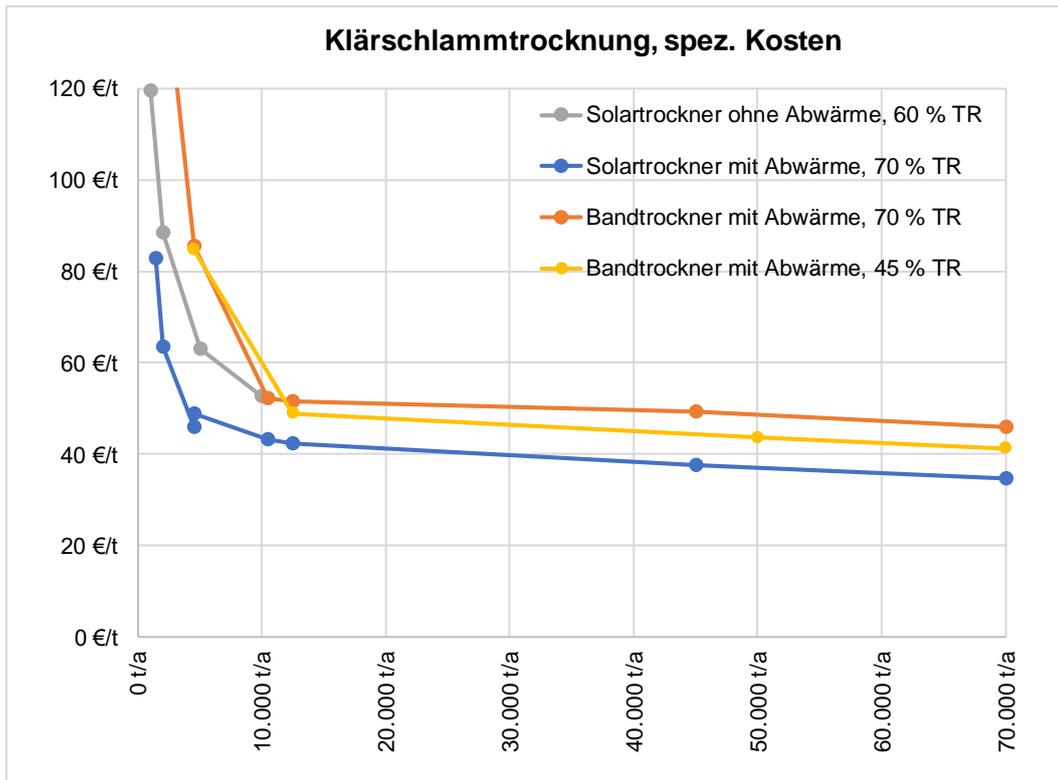


Abb. 3-4: Spezifische Kosten der Klärschlamm-trocknung bei verschiedenen Trocknungs-technologien sowie Jahresdurchsätzen.

3.4 Bewertung der Rückbelastung der Abwässer aus den Trocknungsanlagen bei den verschiedenen Trocknungstechnologien (Abwassermengen, Abwasserzusammensetzung)

3.4.1 Abwassermengen Rückbelastung

Je nach Trocknungstechnologie muss von unterschiedlichen Abwassermengen und auch unterschiedlicher Abwasserzusammensetzung ausgegangen werden. Grundsätzlich muss zunächst davon ausgegangen werden, dass das gesamte in der Klärschlamm-trocknung zu verdampfende Wasser als Brüden anfällt, je nach Abluftbehandlungstechnologie kondensiert wird und dann als Abwasser anfällt.

Die bei der Klärschlamm-trocknung anfallende Abwassermenge ist abhängig von

- dem Input-TR-Gehalt des Schlammes in der Zuführung zur Trocknung sowie dem zu erzielenden Output-TR-Gehalt
- der Kondensation der Brüden in der Abluftbehandlung
- der Abluftbehandlungstechnik

Je nach Grad der Vorentwässerung bzw. der Vortrocknung (Input-TR-Gehalt) und dem zu erreichenden Trocknungsgrad werden folgende Wassermengen verdampft :

1. bei Trocknung der gesamten Klärschlammmenge von 25 % TR auf 40 % TR
OS: 72.557 t/a, Wasserverdampfung: $72.557 * (1 - 0,25/0,40) = 27.209 \text{ m}^3/\text{a} = 74,5 \text{ m}^3/\text{d}$
2. bei Trocknung der gesamten Klärschlammmenge von 25 % TR auf 45 % TR
OS: 72.557 t/a, Wasserverdampfung: $72.557 * (1 - 0,25/0,45) = 32.248 \text{ m}^3/\text{a} = 88,4 \text{ m}^3/\text{d}$
3. bei Trocknung einer Teil-Klärschlammmenge von 25 % TR auf 70 % TR (dezentrales Szenario Nr. 3, siehe Kap.7.7.3)
OS: 30.979 t/a, Wasserverdampfung: $30.979 * (1 - 0,25/0,70) = 19.915 \text{ m}^3/\text{a} = 54,5 \text{ m}^3/\text{d}$

Ein Teil des verdampften Wassers wird als Wasserdampf nach der Abluftbehandlung in die Atmosphäre entlassen, fällt also nicht als Abwasser an. Dies gilt insbesondere bei Niedertemperatur-Konvektionstrocknern, bei denen z.T. keine Kondensation des Wasserdampfes erfolgt. Dies ist z.B. bei Solartrocknern der Fall, bei denen die Feuchtigkeit mit einem großen erwärmten Luftstrom aus dem Trocknungssystem ausgetragen wird.

Je nach Ausführung und Konstruktion ist dies auch bei Bandtrocknern der Fall. Hier werden Systeme mit Kondensationsbetrieb und entsprechendem Abwasseranfall und mit Abluftbetrieb mit nur geringen Abwassermengen angeboten. So soll die Anlage der Fa. Sludge2Energy in Halle-Lochau mit einer geplanten Durchsatzmenge von ca. 10.700 t TS/a, bei der ein Bandtrockner der Fa. Huber eingesetzt werden soll „Quasi-abwasserfrei“ betrieben werden (Wiesgickl, 2019). Die mit dem Wasserdampf beladene Abluft des Trockners wird der Zuluft zur Wirbelschicht-Verbrennungsanlage zugeführt, so dass in diesem Fall auch die Abluftbehandlung entfallen kann.

Die Fa. Thermo-System GmbH, Anbieter von Solar-Trocknern und abwärmegestützten Solartrocknern, gibt als zu behandelnde Brüdenmenge (Abwassermenge aus der Abluftbehandlung) ca. 10 % der verdampften Wassermenge an. Demnach gehen ca. 90 % als Wasserdampf nach der Abluftbehandlung an die Atmosphäre.

Insbesondere bei den Verfahren der Kontakttrocknung müssen die aus der Trocknung ausgetragenen Brüden kondensiert werden. In den Brüden ist ein Großteil der für die Trocknung eingesetzten thermischen Energie enthalten. Sie lässt sich durch verschiedene Verfahren der Wärmerückgewinnung relativ einfach nutzen, wenn entsprechender Bedarf für Niedertemperatur-Wärme vorhanden ist. Dies kann z.B. zur Vorwärmung des flüssigen Schlammes vor der Entwässerung sinnvoll sein, um die mechanische Entwässerung zu optimieren.

Die genaue Konstruktion und Technologie des Trockners erfolgt nach Festlegung des zu realisierenden Gesamt-Szenarios sowie im Rahmen der weiteren Planungsschritte.

Für die weitere Betrachtung der Szenarien wird von folgenden Abwassermengen / Mengen an Brüdenkondensaten ausgegangen, die weiterbehandelt werden müssen:

- Kontakttrockner: 100 % der Wasserverdampfung (vollständige Kondensation der Brüden)
- Bandtrockner: 100 % der Wasserverdampfung (vollständige Kondensation der Brüden)
- abwärmegestützter Solartrockner: 10 % der Wasserverdampfung

3.4.3 Abwasserzusammensetzung Rückbelastung

Die Zusammensetzung der Brüden hängt dabei von folgenden Faktoren ab:

- Schlammzusammensetzung (kommunale und industrielle Anteile)
- Schlammbehandlung (ohne oder mit Faulung: bei Klärschlämmen, die in einer Faulung behandelt wurden, erfolgt durch den anaeroben Abbau in der Faulung ein teilweiser Aufschluss der Zellmasse und damit eine Freisetzung insbesondere von Ammoniak / Ammonium und auch von organischen Verbindungen)
- Trocknungstemperatur (je höher die Trocknungstemperatur ist, desto höher sind die Ammonium-Konzentrationen im Kondensat)
- Staubanteile (Trocknungstechnologie, bei Kontaktrocknern (Dünnschichtrockner, Scheibentrockner) ist der Staubaustrag und damit der Staubeintrag in das Kondensat höher; damit einher geht in der Regel auch ein Anstieg des CSB)
- Abluftbehandlung

Zur Abluftbehandlung wird in der Regel eine saure Wäsche (Einsatz z.B. von Schwefelsäure, Bindung des Ammoniaks zu Ammoniumsulfat-Lösung (ASL)), eine kombinierte saure und alkalische Wäsche und ggf. noch Nachbehandlung in einem Biofilter realisiert. In einzelnen Fällen (bei aerob stabilisierten Schlämmen) wird bei Solartrocknern auch ausschließlich ein Biofilter eingesetzt. Die Ammonium-Sulfat-Lösung kann ggf. in der Landwirtschaft verwertet werden.

In der nachfolgende Tab. 3-5 sind verschiedene CSB- und NH₄-N-Analysen-Werte von Brüdenkondensaten aus der Klärschlamm-trocknung zusammengestellt. Die Tab. dokumentiert einen sehr großen Wertebereich, so dass allgemein gültige Aussagen zur Rückbelastung durch die Brüden nicht machbar sind.

Tab. 3-5: Zusammenstellung verschiedener Analysen-Werte von Brüdenkondensaten aus der Klärschlamm-trocknung

Konzentrationen Brüdenkondensate Trocknung				
Anlage	Trockner	Quelle	CSB	NH ₄ -N
			mg/l	mg/l
Backnang	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	2.376	80
Backnang	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	1.333	649
Backnang	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	411	360
Backnang	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	930	200
Straubing	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	5.765	1.008
Straubing	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	9.647	3.110
Nova Gorica	Bandrockner	Fa. Huber, 2018	4.050	k.A.
Bereich	Bandrockner	Fa. Wehrle, 2019	2.090-7.520	39-3.000
Italien	Bandrockner	Fa. Wehrle, 2019	3.100	2.070
Moerdijk, NL	Scheibentrockner	Sijstermans, SNB, 2019	1.800-7.000	700-3.000
Bereich	keine Spezifikation	DWA-M 379 (Entwurf), 2019	300-9.000	300-1.500
Minimum			300	39
Maximum			9.647	3.110
Mittelwert			3.452	1.068

Das Einleiten eines ungereinigten Brüdenkondensats in ein Kanalnetz führt zu sehr starken, inakzeptablen Geruchsbelästigungen. Es sind daher folgende Varianten möglich:

1. direkte Einleitung in die Kläranlage (ohne lange Wege im Kanalnetz)
2. Transport der Brüdenkondensate per Tankwagen zur Kläranlage
3. Vorbehandlung der Brüdenkondensate am Standort der Trocknungsanlage

3.4.4 Rückbelastung bei Einleitung der Brüdenkondensate, CSB- und NH₄-N-Frachten

In einem Szenario, in dem die Brüden aus der Trocknung der gesamten Klärschlammmenge aus dem Einzugsgebiet von 25 % TR auf 45 % TR erfolgt wären ca. 32.248 m³/a entsprechend 88,4 m³/d zu bewältigen. Aus der o.g. CSB- und NH₄-N-Konzentrationen ergibt sich folgende CSB- und NH₄-N-Fracht, die als Rückbelastung vom Klärwerk behandelt werden muss:

- CSB: (120 g CSB/EW*d)
Mittelwert: $88,4 \text{ m}^3/\text{d} * 3.452 \text{ g/m}^3 = 305.157 \text{ g CSB/d}$ entspr. 2.540 EW_{CSB}
Maximum: $88,4 \text{ m}^3/\text{d} * 9.647 \text{ g/m}^3 = 852.795 \text{ g CSB/d}$ entspr. 7.107 EW_{CSB}
- NH₄-N: (10 g NH₄-N/EW*d bzw. 11 g TKN/EW*d)
Mittelwert: $88,4 \text{ m}^3/\text{d} * 1.068 \text{ g/m}^3 = 94.411 \text{ g NH}_4\text{-N/d}$ entspr. 9.441 EW_N
Maximum: $88,4 \text{ m}^3/\text{d} * 3.110 \text{ g/m}^3 = 274.924 \text{ g NH}_4\text{-N/d}$ entspr. 27.492 EW_N

Aufgrund des CSB/N-Verhältnisses von ca. 3,1:1 verschlechtert sich bei einer Einleitung der Brüdenkondensate in den Zulauf zur Kläranlage das Nährstoffverhältnis, welches für eine weitgehende Stickstoffelimination (insbesondere für die Denitrifikation) bei ca. 6-7:1 liegen sollte.

4 Verfahren zur Thermischen Verwertung von Klärschlamm

4.1 Übersicht

Bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm wird die Verbrennungsweise in Mono- und Mitverbrennung unterschieden. Die Mitverbrennung wird unter anderem in Kohlekraftwerken, Zementwerken sowie Abfallverbrennungsanlagen angewendet.

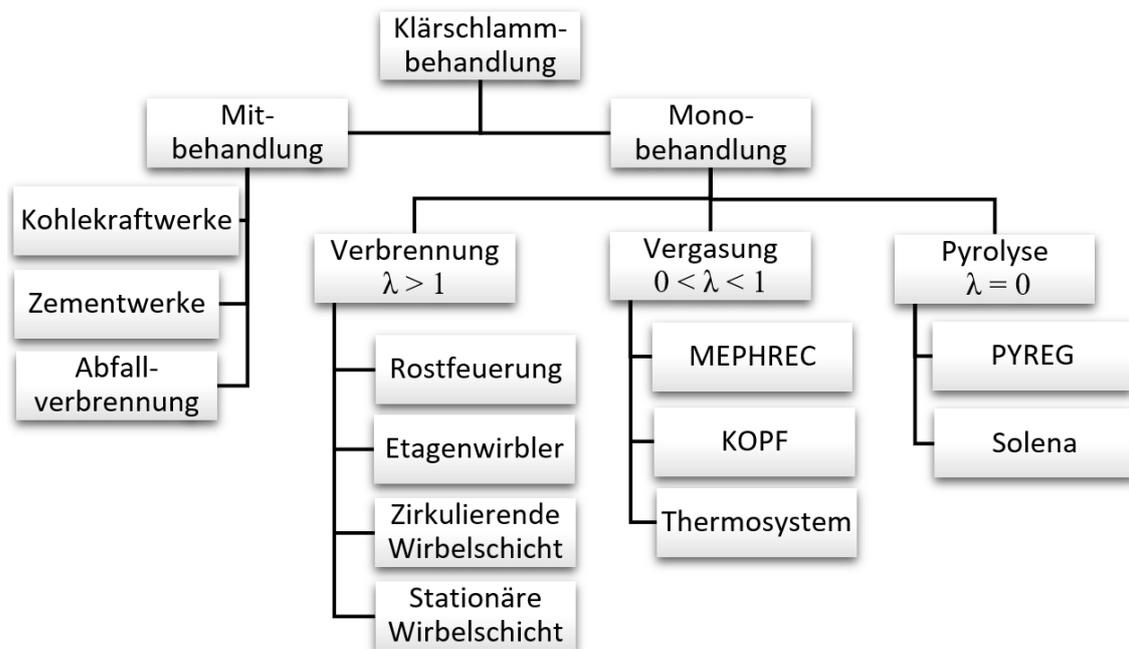


Abb. 4-1: Thermische Verfahren der Klärschlammbehandlung, Darstellung in Anlehnung an (Franck, J., Schröder, L., 2015, S. 463)

In der Monobehandlung unterteilen sich die Verfahren in Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung, wobei der entscheidende charakteristische Unterschied in dem Luftverhältnis liegt und mit der Luftüberschusszahl λ (Lambda) beschrieben wird. Die Pyrolyse läuft, im Gegensatz zur Vergasung und Verbrennung, unter Sauerstoffentzug ($\lambda = 0$) ab. Bei der Vergasung liegt der Bereich zwischen dem Sauerstoffentzug und dem stöchiometrischen Luftbedarf ($0 < \lambda < 1$).

Bei der Verbrennung wird mehr Sauerstoff zur Verfügung gestellt ($\lambda > 1$), als zur stöchiometrisch vollständigen Oxidation der Brennstoffe notwendig ist.

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist die stationäre Wirbelschichtfeuerung. Etwa 73 % der in Betrieb befindlichen Anlagen nutzen dieses Verfahren. Auf weitere thermische Verfahrenswege, wie z. B. die Rostfeuerung oder Vergasung, wird aufgrund der geringen technischen Anwendung und Bedeutung in Deutschland nicht weiter eingegangen.

4.2 Wirbelschichtverfahren

In der heutigen Verfahrenstechnik reicht der Einsatz der Wirbelschicht-Technologien der von der Kohlefeuerung bis hin zu Trocknungsverfahren und Kaffeeröstungen (Bittermann, P., 2013). Der

erste europäische Wirbelschichtofen zur Schlammverbrennung von Raffinerieschlamm ging 1964 in Betrieb.

4.2.1 Aufbau und Funktion

Der Aufbau dieser Verfahrenstechnik ähnelt meist einer zylindrischen oder konisch-zylindrisch stehenden Brennkammer. Um die Wirbelschicht auszubilden und das Schüttgut zu fluidisieren sind am Boden des Reaktors eine große Anzahl von Lufteintrittsdüsen angebracht. (Vater, W., 1996). Mit steigender Anströmgeschwindigkeit lockert sich die Schüttung zunehmend, bis sich diese im Kräftegleichgewicht zwischen Auftriebskraft und Schwerkraft befindet. Wird die Anströmgeschwindigkeit weiter erhöht, expandiert die Schüttung bis sich eine statische Wirbelschicht ($F_T = F_W$) einstellt. Wird der Luftstrom weiter erhöht und der Austragspunkt überschritten, werden die Feststoffpartikel in Abhängigkeit von ihrer Größe und Masse aus dem Reaktor getragen (Thomé-Kozmiensky, K. J., 2013).

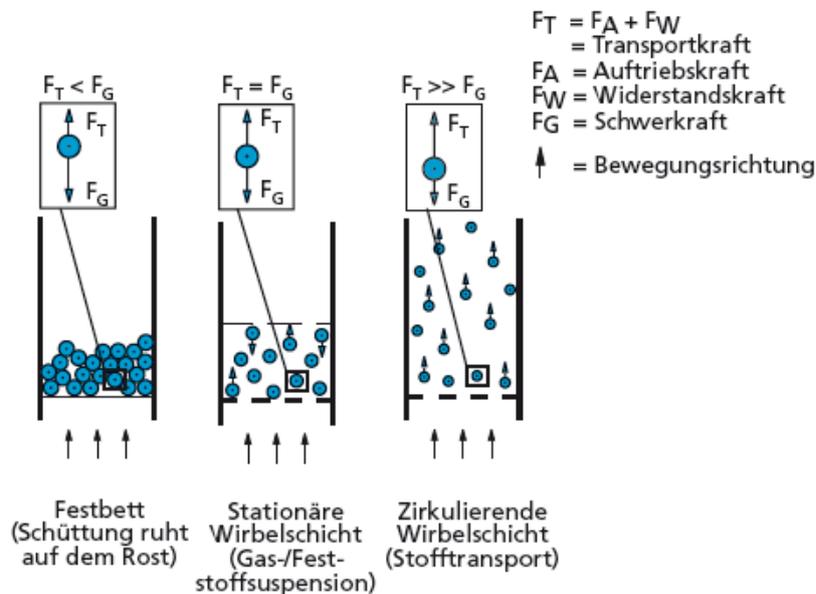


Abb. 4-2: Kraftwirkung am Feststoffpartikel (Thomé-Kozmiensky, K. J., 2013, S. 4)

Der Übergang vom Fest- zum Wirbelbett wird als Wirbelpunkt bezeichnet. Das Wirbelbett ist die technische Voraussetzung für das Wirbelschichtverfahren. Beim Anfahren der Wirbelschicht ist eine externe Vorwärmung des Bettmaterials notwendig bevor die Brennstoffzufuhr gestartet wird. Über die Zufuhr der Primärluft werden die Feststoffe dreidimensional bewegt und damit in horizontaler und vertikaler Richtung vermischt. Die energetische Umsetzung des Brennstoffes findet in einem inerten Sand-Asche-Gemisch in einem Temperaturbereich von 850 bis hin zu 950 °C in der Brennkammer statt. Die Verbrennungstemperatur muss unterhalb des Ascheschmelzpunktes liegen, damit die Asche nicht schmilzt oder versintert. Die Regulierung der Verbrennungstemperatur geschieht durch den eingebrachten Luft- und Brennstoffmassenstrom. Das Wirbelbett besteht aus einer 70 bis 100 cm hohen Sandschicht mit einer Körnung von 0,2 bis 4 mm, die durch Einblasen der Verbrennungsluft in Schwebe gehalten wird.

Das Wirbelbettmaterial nimmt die frei werdende Verbrennungswärme auf, wodurch eine homogene Temperaturverteilung im gesamten Wirbelbett erreicht wird. Dies gilt als besonderer Vorteil der Wirbelschichtverbrennung gegenüber der Rost- und Staubfeuerung. Die Wirbelbettmasse

wirkt als beweglicher Wärmespeicher und gleicht Schwankungen bei der Brennstoffqualität hinsichtlich Heizwert, Schadstoff- und Wassergehalt aus. (Thomé-Kozmiensky, K., 2013, Ispen, C., 2016)

Die Auslegung und rechnerische Unterteilung einer Wirbelschicht hängt von verschiedenen Parametern ab:

- Strömungsgeschwindigkeit in der Wirbelschicht,
- Abmessung, Form und Dichte der Partikel sowie
- Dichte und kinematische Viskosität des Gases.

Diese verschiedenen Kenngrößen lassen sich durch unterschiedliche dimensionslose Kennzahlen zusammenfassen. Zur Einordnung der Strömungszustände eines Gas-Feststoff-Gemisches können die Kennzahlen grafisch in einem Reh-Diagramm dargestellt und dem jeweiligen System zugeordnet werden.

4.2.2 Zirkulierende und stationäre Wirbelschicht

Im Betriebsbereich einer zirkulierenden Wirbelschicht liegt die Strömungsgeschwindigkeit üblicherweise zwischen 5 und 6 m/s. Im Gegensatz zur stationären Wirbelschicht wird über die Steigerung der Anströmgeschwindigkeit im Reaktor der noch teils unverbrannte Brennstoff inkl. dem Bettmaterial ausgetragen. Bei der nachfolgenden Abbildung rechts dargestellten zirkulierenden Wirbelschicht muss das mitgerissene Bettmaterial in die Wirbelschicht zurückgeführt werden. Dieses geschieht über einen so genannten Rückführzyklon. In diesem System sind zudem keine Schichtoberflächen mehr erkennbar. Vielmehr nimmt die Beladung der Feststoffe von unten nach oben ab. Trotz der kompakten Bauweise befindet sich die zirkulierende Wirbelschicht am Ende der thermischen Leistungsskala und kommt aus wirtschaftlichen Gründen erst ab einer Feuerungswärmeleistung von 50 MW_{th} zum Einsatz. (Thomé-Kozmiensky, K.J., 2013; Hartmann, H. et. al., 2016, S. 115 – 184)

Der Reaktorraum über dem Wirbelbett wird als Freiraum bezeichnet. In diesen kann bei Bedarf zusätzliche Sekundärluft zur Sicherstellung der vollständigen Oxidation des Brennstoffes sowie zur Regelung der Temperatur eingebracht werden. Die bei der Verbrennung entstehende Asche wird über das Rauchgas aus dem Reaktor ausgetragen und in späteren Prozessschritten abgetrennt. (Thomé-Kozmiensky, K.J., 2013)

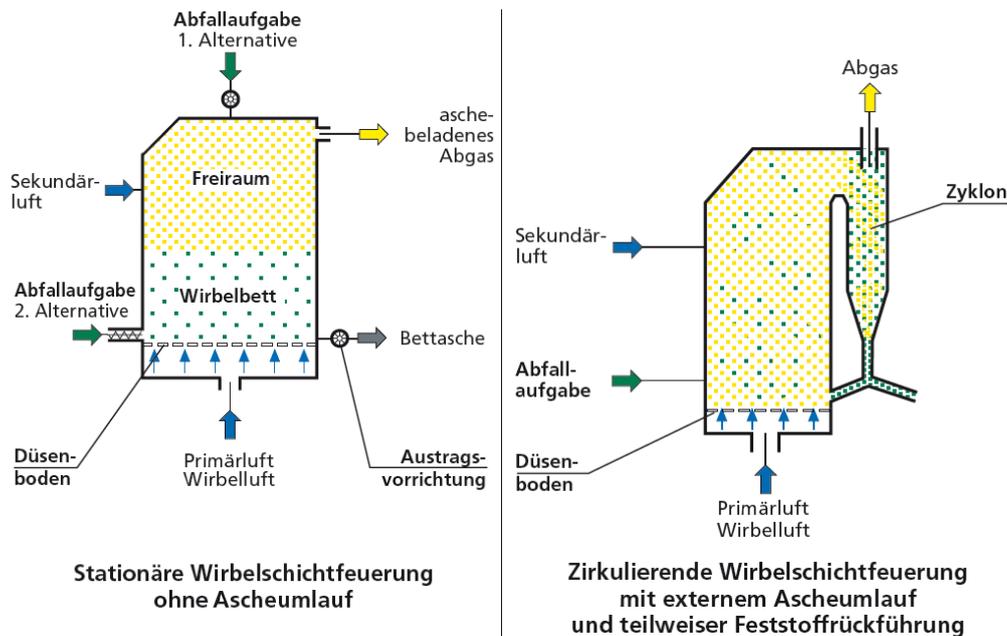


Abb. 4-3: Stationäre (links) und zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (rechts) (Thomé-Kozmiensky, K.J., 2013, S. 14)

4.3 2-stufiger thermochemischer Aufschluss nach dem EUPHORE®-Verfahren

Alternativ zur oben vorgestellten Wirbelschicht-Verbrennung wird hier noch ein thermochemisches 2-stufiges Aufschlussverfahren betrachtet, in dem einerseits der thermische Energiegehalt des eingesetzten Klärschlamm genutzt werden kann, andererseits das im Klärschlamm enthaltene Phosphat in eine besser pflanzenverfügbare Form gebracht wird und zudem noch durch Zugabe von Additiven eine Schwermetallentfrachtung erfolgt.

Das EuPhoRe®-Verfahren ist ein 2-stufiger thermochemischer Behandlungsprozess für Klärschlämme und andere Biomassen (Wirtschaftsdünger, Gärreste, ggf. Komposte). Damit können neben thermischer Energie insbesondere Phosphate mit höherer Reinheit und guter Pflanzenverfügbarkeit bereitgestellt werden.

Die thermochemischen Prozesse zur Klärschlammbehandlung lassen sich vorzugsweise innerhalb eines Drehrohrreaktors abbilden. Der erste thermische Behandlungsschritt ist die Erhitzung des Klärschlamm und die Entgasung der flüchtigen Bestandteile unter reduzierenden Bedingungen bei Temperaturen zwischen 650 und 750 °C. Unter diesen Bedingungen werden leicht- bis mittelflüchtige Schwermetalle in Gegenwart von Salzen in die Gasphase überführt.

In der unmittelbar folgenden oxidativen Nachverbrennung des entstandenen fixen Kohlenstoffs setzt sich die Volatilisierung auch schwerer flüchtiger Metalle bei Temperaturen zwischen 900 und 1.000 °C fort. Als Vorbehandlungsschritt werden Additive in Form von Alkali- und/oder Erdalkalisalzen (z.B. Magnesiumchlorid $MgCl_2$) dem Klärschlamm zugegeben. Dadurch kann die Effizienz des Schwermetallaustrags derart gesteigert und abgesichert werden, dass ein breites Schlammspektrum zur Phosphor-Rückgewinnung und Nutzung herangezogen werden kann. Die Schwermetalle werden schließlich in der Gasreinigung aus dem Abgasstrom entfernt und bilden den einzigen verbleibenden bisher nicht verwertbaren Rest.

Ein weiterer Effekt der Additivierung ist nach Aussage der EUPHORE-GmbH die signifikante Erhöhung des in Zitronensäure löslichen Phosphates. Dies ist auf den alkalischen Charakter der Asche nach der Schlammbehandlung mit z.B. Magnesiumchlorid zurückzuführen. Gleichzeitig führt die Verwendung von Magnesiumsalzen zu einer Anreicherung dieses wichtigen Makronährstoffs in der Asche.

Das mittels EuPhoRe®-Verfahren aus Klärschlamm erzeugte Ascheprodukt ist Ausgangsstoff zur Herstellung von Einzel- und Mehrnährstoffdüngern, wobei bereits nach der Feinvermahlung und Staubbinding ein mineralischer P-Dünger vorliegt.

Das Verfahren lässt sich als autarkes System betreiben, wobei die gemäß BImSchG erforderlichen Rauchgasreinigungsanlagen vergleichsweise zu einer Wirbelschichtverbrennungsanlage realisiert werden müssen.

Sofern bereits am Standort eine Feuerungsanlage mit entsprechender Rauchgasreinigung vorhanden ist – z.B. eine Müllverbrennungsanlage oder EBS-Verbrennungsanlage-, kann die EUPHORE-Anlage in der Regel an dieses Rauchgasreinigungs-System und auch an die Wärmeauskoppelung angeschlossen werden. Die Anlage fungiert dann als Vorschaltanlage mit entsprechend positiven Auswirkungen auf die Investitions- und Betriebskosten. Bei diesen Vorschaltanlagen wird die EUPHORE-Anlage mit einem Teilstrom des Rauchgases aus dem Kraftwerk im Gegenstrom zum Klärschlamm beheizt. Das Abgas könnte in dieser Konstellation in den Abgasstrom der Feuerungsanlage gegeben und dort mitbehandelt werden (Abb. 4-4).

Am Standort Gießen ist es aber nach derzeitigem Diskussionsstand nicht möglich, die thermische Klärschlammverwertung an die bereits vorhandene sog. „Thermische Reststoffbehandlungs- und Energieverwertungsanlage TREA“ anzukoppeln und dort die bereits vorhandenen technischen Einrichtungen zur Rauchgasreinigung und zur Wärmeauskopplung mit nutzen zu können. Eine autarke Anlage ist daher obligatorisch.

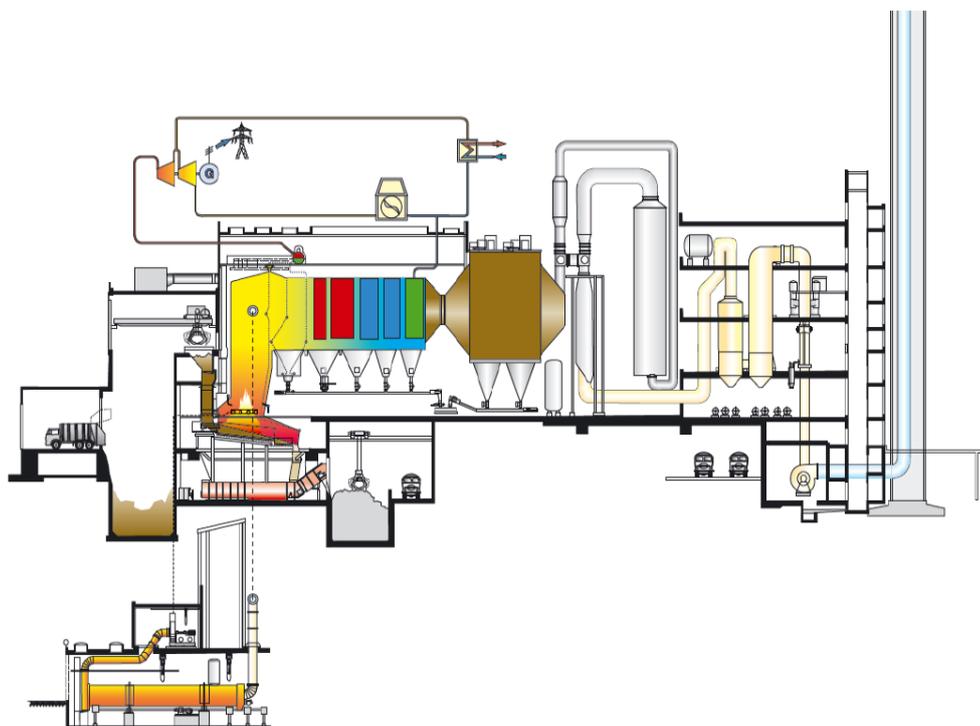


Abb. 4-4: EUPHORE-Verfahren als Vorschaltanlage vor einer Müllverbrennungsanlage (Klose, 2018)

4.4 Emissionen

4.4.1 Übersicht

Gelangen feste, flüssige oder gasförmige Stoffe in die Luft, wird dadurch ihre natürliche Zusammensetzung verändert und es wird von Luftverunreinigung gesprochen. Zum Schutz vor Luftverunreinigungen wurde am 15.03.1974 in Deutschland das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) bzw. die darauf aufbauenden Bundes-Immissionsschutz-Verordnungen (BImSchV) erlassen. Ziel des Gesetzes ist der Schutz von Flora, Fauna und Habitat (Schutzgüter) vor schädlichen Luftverunreinigungen, Geräuschen, Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch den Ausstoß von Rauch, Ruß, Staub, Gasen, Aerosolen, Dämpfen oder Geruchsstoffen.

Grundsätzlich muss in zwei potenzielle Wirkweisen von Luftschadstoffen unterschieden werden. Zum einen in die Emission und zum anderen in die Immission. Nach dem BImSchG sind Emissionen, die von einer Anlage ausgestoßenen Luftverunreinigungen, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und Geräusche. Unter Immission wird die Einwirkung auf den Menschen, das Tier oder die Pflanze nach der Verteilung, dem Transport oder der Verdünnung der Schadstoffe in der Luft, verstanden. (Fritz, W., Kern H., 1990, S. 13 – 18)

Zu den typischen Luftschadstoffen zählen:

- Partikel (Staub)
- Kohlenstoffverbindungen
- Stickstoffverbindungen
- Schwefelverbindungen
- Halogenwasserstoffe
- Organische Schadstoffe

4.4.2 Bewertung der Rückbelastung der Abwässer aus der Klärschlammverbrennung (Abwassermengen, Abwasserzusammensetzung)

Die bei der Klärschlammverbrennung anfallende Abwassermenge ist abhängig von

- dem Input-TR-Gehalt des Schlammes in der Zuführung zur Verbrennung
- der Kondensation der Brüden in der Rauchgasreinigung (Brennwert-Technik)
- der Rauchgasreinigung

Je nach Grad der Vorentwässerung bzw. der Vortrocknung (Input-TR-Gehalt) sind im zu verbrennenden Klärschlamm (in diesem Fall 72.557 t/a mit 25 % TR entsprechend 18.139 t TR/a) folgende Wassermengen enthalten:

- bei 25 % TR (ohne Vortrocknung):
OS: 72.557 t/a, TR: 18.139 t/a, Wasser: $72.557 - 18.139 = 54.417 \text{ m}^3/\text{a} = 149 \text{ m}^3/\text{d}$
- bei 40 % TR (Vortrocknung):
OS: 45.348 t/a, TR: 18.139 t/a, Wasser: $45.348 - 18.139 = 27.209 \text{ m}^3/\text{a} = 74,5 \text{ m}^3/\text{d}$
- bei 45 % TR (Vortrocknung):
OS: 40.309 t/a, TR: 18.139 t/a, Wasser: $40.309 - 18.139 = 22.170 \text{ m}^3/\text{a} = 60,7 \text{ m}^3/\text{d}$

Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Abwässer einen erhöhten Anteil schwer abbaubarer organischer Verbindungen enthalten.

4.5 Emissionsminderung

Eine Emissionsminderung ist auf Grundlage primärer und sekundärer Maßnahmen möglich:

Zu den Primärmaßnahmen zählen alle Methoden, mit denen der Verbrennungsprozess beeinflusst wird (z. B. konstruktive Änderung sowie Änderung der Prozessführung). Der Schwerpunkt der Primärmaßnahmen liegt üblicherweise in der Reduktion von Stickstoffoxiden, Kohlenstoffmonoxiden und Kohlenwasserstoffverbindungen.

Bei den Sekundärmaßnahmen handelt es sich um die dem Verbrennungsprozess nachgeschalteten Maßnahmen. Das bedeutet, das Abgas wird mithilfe additiver technischer Maßnahmen gereinigt, ohne die eigentliche Verbrennung zu beeinflussen (Hartmann, H. et. al., 2016). Für die Abscheidung der Emissionen kommen im Sekundärbereich die in der nachfolgenden Tab. 4-1 dargestellten Wirk- und Reaktionsprinzipien zum Einsatz.

Tab. 4-1: Wirk- und Reaktionsprinzipien zur Abscheidung von Schadstoffen in der Abgasreinigung, [Fink, M. 2019, Darstellung in Anlehnung an: [Löschau, 2014, S. 93]]

Schadstoff	Verfahren	Wirkprinzip
Partikel (Staub)	Zyklon	Fliehkraft
	Filternde Abscheider	Filtration
	Elektroabscheider	Elektrische Anziehungskraft
NO _x	Nassabscheider	Heterokoagulation (Ein- und Anlagerung an Flüssigkeitströpfchen)
	Selektive nichtkatalytische Reduktion (SNCR)	Gasphasenreaktion
	Selektive katalytische Reduktion (SCR)	Heterogene Katalyse (Chemische Adsorption)
HCl, HF, SO ₂ , SO ₃	Nassverfahren	Absorption
	Quasitrockenverfahren	Absorption und Adsorption
	Trockenverfahren	Chemische Adsorption
Organische Schadstoffe, Schwermetallverbindungen	Flugstromadsorber Fest- oder Wanderbettadsorber	Physikalische Adsorption

4.5.1 Emissionsminderung saurer Schadgase

Durch Zugabe von natrium- oder calciumbasierter Sorptionsmittel lassen sich saure Schadgase wie Chlorwasserstoff (HCl), Schwefeloxid (SO_x) und Fluorwasserstoff (HF) chemisch binden (Chemisorption).

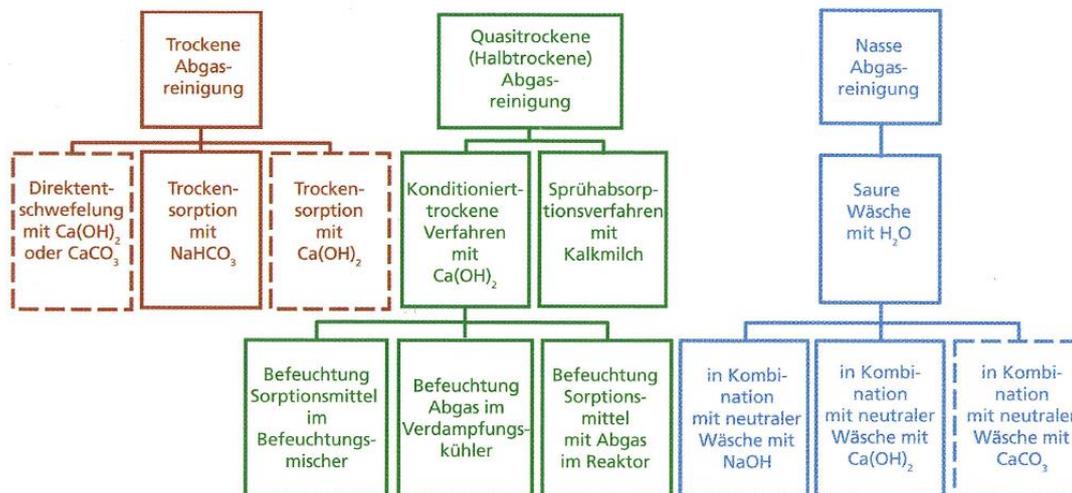


Abb. 4-5: Einteilung der Verfahren zur Minderung saurer Schadgase (Löschau, 2014, S. 233)

Trockene und quasitrockene Abgasreinigung

Für viele Emissionsminderungsverfahren wird als Sorptionsmittel Kalkhydrat verwendet. Dieses wird durch das Mischen von gemahlenem Branntkalk mit Wasser hergestellt und fällt als trockenes, sehr feines Pulver an. Die Reaktion des Branntkalks mit Wasser ist stark exotherm und wird als Kalklösch bezeichnet.

Das Kalkhydrat wird in das heiße Abgas eingeblasen und im Anschluss über einen Gewebefilter abgeschieden. Die optimale Reaktionstemperatur liegt dabei zwischen 130 – 140 °C. Für eine hinreichende Abscheidung der Schademission wird mit einem Stöchiometriefaktor zwischen 2 bis 3 gearbeitet (Löschau, 2014, S. 297).

Auch bei der trockenen Sorption spielt die hohe Lösungsgeschwindigkeit in wässrigen Lösungen eine wichtige Rolle. Das im Rauchgas enthaltene Wasser bindet um den Ca(OH)_2 Partikel eine Hydrathülle, wodurch die Reaktionskinetik gegenüber der eben beschriebenen reinen Trockensorption mit Ca(OH)_2 deutlich verbessert wird.

Ein von der Rauchgasfeuchte unabhängiges Behandlungsverfahren für saure Schadgase ist der Einsatz von Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3) als Additiv. Natriumhydrogencarbonat ist als Backtriebmittel bekannt und ein ungiftiger Stoff, der als weißes, geruchloses, kristallines Pulver vorliegt. Für eine effektive Abscheidung ist die Partikelgröße des Kornes ausschlaggebend, da hierdurch die für die Reaktion zur Verfügung stehende Kontaktfläche beeinflusst wird.

Die für die Abscheidung erforderlichen Additivmengen liegen nicht viel höher als die benötigte Stöchiometrie, oftmals genügt eine 0,1 – 0,4-fache stöchiometrische Zugabe. (Conrad, Y., Karpf, R., 2014; Löschau, 2014; ete.a, 2006).

5 Phosphorrecycling aus Klärschlamm-Mono-Aschen

5.1 Recherche und Dokumentation des Stands der Entwicklung und Technik bei verschiedenen P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm-Aschen

Der Stand der Entwicklungen bei Phosphorrückgewinnungsverfahren wurde zwischenzeitlich in adäquater Weise durch die Deutsche Phosphor Plattform dokumentiert und ist als Sammlung von Verfahrenskennblättern unter über eine Web-Anwendung abrufbar (Deutsche Phosphor Plattform, 2018).

Eine Zusammenstellung des Spektrum an P-Rückgewinnungsverfahren zeigt die nachstehende Tabelle 5-1. Für das Mittelhessische Vorhaben gilt es zu beachten, dass infolge des Bestrebens der thermischen Verwertung der regionalen Klärschlamme naturgemäß die aschebasierten Verfahren im Fokus stehen. Diese haben auch den Vorteil, dass infolge der vorgelagerten Mineralisierung der Phosphor gegenüber dem Abwasser bzw. dem Klärschlamm aufkonzentriert wird und das die organische Schadstofffracht keine Rolle mehr spielt.

Die an der Asche ansetzenden Verfahren lassen sich grob in drei Verfahrensfamilien einteilen. Diese sind:

- **Thermochemische Ansätze**
(z.B. EuPhoRe, AshDec)
Diese Verfahrensgruppe macht sich zunutze, dass mit Hilfe von Chlordonatoren Schwermetalle als Schwermetallchloride volatilisiert werden und damit die Asche entfrachtet wird.
- **Leaching Ansätze mit nachgelagerter Aufbereitung der Flüssigphase**
(z.B. EcoPhos, PASCH)
Diese Verfahrensgruppe transferiert die Metalle sowie den Phosphor zunächst in eine saure Flüssigphase, aus der dann die selektive Rückgewinnung des Phosphors bzw. die Abtrennung von Schadstoffen erfolgt.
- **Aufschlussverfahren ohne Separation der Asche-Matrix**
(z.B. Seraplant/RecoPhos, pontes pabuli)
In dieser Verfahrensgruppe erfolgt der Ausschluss bei einem möglichen engen fest/flüssig Verhältnis mit nachgelagerter Verdampfung der Flüssigphase. Die Aschematrix geht quantitativ in das Endprodukt über.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie galt es ergebnisoffen alternative P-Rückgewinnungsverfahren hinsichtlich ihrer Kosten und der Rahmenbedingungen ihrer Umsetzung in Mittelhessen zu prüfen. Dabei war festzustellen, dass die Verfahrensanbieter teils sehr zurückhaltend sind, was die Preisgabe von Verfahrensschritten, Energiebedarfen, Einsatzstoffen und Preisen betrifft.

Tab. 5-1: Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm (KS) und Klärschlammasche (KSA) (Adam, 2018), Teil 1

Verfahren		Produkte	Entwicklungsstand	Voraussetzung	Rückgewinnung* %
Auf Kläranlage integrierte Verfahren (P-Rückgewinnung aus KS)					
AirPrex	ohne forcierte Rücklösung, Fällung im Schlamm	Struvit	Großtechnik	Bio-P Kläranlage	5-15
Lysogest	Hydrolyse, Fällung im Schlamm	Struvit	Großtechnik	Bio-P Kläranlage	5-15
Pearl, NuRe-Sys, Phospaq	Fällung im Zentrat	Struvit	Großtechnik	Bio-P Kläranlage	~ 15
Wasstrip	Hydrolyse, Fällung im Zentrat	Struvit	Großtechnik	Bio-P Kläranlage	~ 30
Haarlslev	Hydrolyse, Fällung im Zentrat	Struvit	Pilotanlage, Großtechnik in Bau	Bio-P Kläranlage	~ 22
CalPrex	saure Faulung, Fällung im Zentrat mit CaCl_2	Brushit	Pilotanlage	Bio-P Kläranlage	> 50 techn. möglich
Stuttgarter Verfahren	KS-Aufschluss mit H_2SO_4	Struvit	Pilotanlage	keine	> 50 techn. möglich
ExtraPhos	KS-Aufschluss mit CO_2 im Druckreaktor	Brushit	Pilotanlage	keine	> 50 techn. möglich
P-Rückgewinnung aus KSA und alternative thermische Verfahren					
Mephrec	Schmelzvergasung von KS/KSA	P-Schlacke	Pilotanlage	keine	keine Angabe
EuPhoRe	thermische Behandlung (ox./red.) von KS im Drehrohrofen unter Zufuhr von Cl-Trägern	P-haltige Asche	Pilotanlage, großtechnische Versuche	keine	> 80
RecoPhos (InduCarb)	induktiv beheizte Schmelzvergasung von KSA	elementarer Phosphor oder H_3PO_4	Pilotanlage	Monoverbrennung	keine Angabe

Tab. 5-2: Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm (KS) und Klärschlammmasche (KSA) (Adam, 2018), Teil 2

Verfahren		Produkte	Entwicklungsstand	Voraussetzung	Rückgewinnung* %
SeraPlant	Aufschluss KSA mit H_3PO_4 , keine Separation von Störstoffen	Aufgeschlossene KSA	Pilotanlage	Monoverbrennung, Aschen mit geringen Schadstoffgehalten.	> 80
konv. Düngereproduktion	saurer Aufschluss von KSA zusammen mit Rohphosphat, keine Separation von Störstoffen	Aufgeschlossene KSA	Versuche Großtechnik	Monoverbrennung, <i>Premiumaschen</i> mit geringen Fe- und Al-Gehalten	> 80
PASCH-Verfahren der RWTH Aachen	saurer Aufschluss von KSA mit HCl, Separation mit Solventextraktion	Calciumphosphate	Pilotanlage	Mono-verbrennung	> 80
EcoPhos	saurer Aufschluss von KSA mit H_3PO_4 , Separation mit selektiven Ionenaustauschern	technische H_3PO_4 (75%ig), Fe-/Al-Salze, Ca-/Mg-Salze	Pilotanlage	Mono-verbrennung	> 80
TetraPhos	saurer Aufschluss mit H_3PO_4 , Separation mit Fällung und Ionenaustauschern	technische H_3PO_4 (75%ig), Gips, Fe-/Al-Salze	Pilotanlage, Großtechnik in Bau	Mono-verbrennung	> 80
PARFORCE	saurer Aufschluss von KSA mit HCl oder HNO_3 , Separation mit Elektrodialyse und Solventextraktion	technische H_3PO_4 (75%ig), Fe-/Al-Salze, Ca-/Mg-Salze	Pilotanlage	Mono-verbrennung	> 80
Ash2Phos	saurer Aufschluss von KSA mit HCl oder H_2SO_4 , Separation durch Fällungs- und Lösungsvorgänge	Ca-Phosphate, Ammoniumphosphate, H_3PO_4 (75%ig), Fe-/Al-Salze, Ca-/Mg-Salze	Pilotanlage	Mono-verbrennung	> 80
AshDec	thermochemische Behandlung von KSA mit Alkali-Verbindungen im Drehrohrofen	thermisch aufgeschlossene KSA mit Ca-Alkali-Phosphaten als P-Komponente	Pilotanlage	Mono-verbrennung	> 80

5.2 Bewertung der erforderlichen Qualität des getrockneten Klärschlammes für eine thermische Verwertung

Die Erhebung der Daten aus der ersten LOI-Phase ergab, dass die Masse der Portfolio-Klärschlamm TS-Gehalte von 20 bis 25 % aufweist. Eine solche Matrix ist wahrscheinlich (und in Abhängigkeit vom oTS-Gehalt) bei Luftvorwärmung als selbstgänglich brennbar einzustufen. Grundsätzlich beeinflusst der Wassergehalt die thermische Verwertung in 2facher Weise: Zum einen weist feuchter Klärschlamm eine geringere Energiedichte auf. Dieser Effekt wird weitgehend dadurch kompensiert, dass die Masse des Klärschlammes um den Verdünnungsfaktor höher ist. Damit ist der Wärmeinhalt eines trockenen Klärschlammes mit niedrigem Massenaufkommen als annähernd gleich der eines feuchten Klärschlammes mit einem hohen Masseraufkommen anzusehen. Der zweite Aspekt betrifft die Verdampfungswärme des Wassers. Um diese bereitzustellen und das Wasser in den dampfförmigen Zustand zu überführen, muss ein Teil des Energieinhalts des Brennstoffs aufgewendet werden, der für eine Nutzung nicht zur Verfügung stünde. Dieser Anteil ist umso größer, je feuchter der Brennstoff ist.

Die Überlegungen für die zu errichtende Monoverbrennung gehen aktuell dahin, eine Auskondensation des Wasserdampfes aus dem Abgas vorzunehmen. Mit einer solchen Verfahrensstufe könnte der Großteil der Verdampfungswärme als Kondensationswärme zurückgewonnen werden. Entsprechende Erfahrungen liegen bei der Stadtwerke Gießen AG aus dem Bau und dem Betrieb der Gießener Ersatzstoffverbrennungsanlage vor.

5.3 Bewertung von P-Recyclingverfahren in Hinblick auf das Rückgewinnungspotential, die Pflanzenverfügbarkeit des P-Recyclats und Einsatzfähigkeit als Dünger bei den landwirtschaftlich vorhandenen Ausbringungs-Maschinen

Die im Rahmen des Vorhabens fokussierten Rückgewinnungsverfahren (SeraPlant, EuPhoRe pontes pabuli) arbeiten sämtlich ohne Separation der Aschematrix. Dies bedingt, dass die aus dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammmasche resultierende P-Fracht quantitativ in das Produkt eingebracht wird. Geringfügige Verluste treten allenfalls dann auf, wenn es aus der Produkt-Perspektive erforderlich sein sollte, Feinmaterial zur Unterbindung der Staubproduktion aus dem Prozess auszuschleusen und dessen Rückführung in den Prozess nicht möglich ist.

Für das SeraPlant-Verfahren (ehemals RecoPhos) liegen umfangreiche Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit und zur Handhabbarkeit des Produktes vor (Weigand et al, 2013, Weigand und Bertau, 2013). Diese belegen eindeutig, dass das Produkt einem konventionell hergestellten Triple Superphosphat ebenbürtig ist. In Abhängigkeit von der Ausbaustufe einer entsprechenden Behandlungsanlage (Vor-/oder Endprodukt) muss der Nachweis der Düngewirksamkeit des Rezyklates durch das Projektkonsortium selbst oder durch eine nachgelagert einzuschaltenden Düngemittelerzeuger nachgewiesen werden.

Nach Aussagen des Verfahrensanbieters weist der Output des EuPhoRe-Prozesses zwar nur einen sehr geringen Anteil an wasserlöslichen P jedoch mindestens 80 % zitronensäurelösliches P auf. Wenn das Material ohne weitergehende Aufbereitung genutzt werden sollte, wäre es anders als der RecoPhos/Seraplant-Dünger eher als „langsam fließende“ Nährstoffquelle anzusehen.

Neben der Ertragswirkung sind die Randbedingungen der Ausbringungstechnik zu beachten. In der modernen Landwirtschaft erfolgt die Düngung häufig mit Wurfstreuern. In der mittleren Leis-

tungsklasse lassen sich damit Arbeitsbreiten von 18 bis 36 m realisieren. Die Qualität der Querverteilung hängt ab von der Einstellung des Streuers sowie wesentlich auch von den physikalischen Eigenschaften des Düngers (Kornoberfläche, Kornfestigkeit, Korngrößenspektrum usw.). Im Rahmen der Prüfung der Produkteigenschaften des RecoPhos P38 Düngemittels wurden entsprechende Daten erhoben und zeigten eine sehr gute Vergleichbarkeit mit handelsüblichen, konventionellen Düngemitteln. Dies ergab sich durch systematische Anpassung der Granulationsbedingungen. Für kein anderes Verfahren sind entsprechende Untersuchungen bekannt geworden.

Eine im Genehmigungsprozess befindliche Umsetzung des SeraPlant-Verfahrens erfolgt in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen, das einschlägige Expertise in der Granulierteknik einbringt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Konfektionierung des Düngemittels die physikalischen Erfordernisse der Ausbringungstechnik berücksichtigt.

Bei Inaugenscheinnahme des EuPhoRe-Produktes fiel auf, dass das entsprechende Granulat den physikalischen Beanspruchung in einem Düngestreuteller mit hoher Sicherheit nicht standhalten sondern zerfallen würde. Die Folgen wären einerseits Staubbildung und andererseits eine reduzierte Streubreite. Dies ist jedoch insofern unschädlich, als gem. Aussagen des Verfahrensanbieters der Output des EuPhoRe-Prozesses als Zwischenprodukt und nicht als fertiges Düngemittel anzusehen ist.

5.4 Recherche zum Volatilisierungsverhalten von Nickel - Bewertung der Auswirkung auf die Aschequalität

Die Frage nach dem Volatilisierungsverhalten des Nickels steht im Zusammenhang damit, dass ein Teil der Klärschlämme, die möglicherweise in dem Mittelhessischen Verwertungsprojekt anfallen werden, eine geogene Nickelbelastung aufweisen. Für Nickel existiert in der Düngemittelverordnung ein Grenzwert, der im Endprodukt eingehalten werden muss. Käme es bei der Verbrennung des Klärschlammes zu einer Volatilisierung des Nickels, so würde dieses in der Asche angereichert werden (Lind et al 1999) und das Produkt günstig beeinflussen. Für die im Berichtszeitraum durchgeführte Recherche wurden die einschlägigen Datenbanken wissenschaftlicher Fachzeitschriftenartikel ausgewertet. Dabei erwies sich die Mehrzahl an Publikationen als zentriert auf die Frage nach einer Verflüchtigung von Metallen aus kommunalem Restmüll z.B. Chang et al (2007) oder aus Regelenergieträgern (z.B. Xu et al., 2003). Diesem zufolge ist zwar Nickel als lithogenes Element bei der Verbrennung von kommunalem Restmüll durchaus auch in den Abgasreinigungsrückständen zu finden ist (Abanades et al, 2002), was möglicherweise in Verbindung mit der Bildung von Nickelchloriden steht, eine ausgeprägte Partitionierung scheint jedoch nicht zu erfolgen. Es konnte lediglich eine Arbeit ermittelt werden, die sich explizit dem Volatilisierungsverhalten von Nickel bei der Verbrennung von Kommunalem Klärschlamm in einer Wirbelschicht widmet (Marani et al., 2003). Die Autoren bestätigen zwar in Modellrechnungen die Neigung des Nickels, ebenfalls in Form von Chloriden volatilisiert zu werden, konnten die jedoch nur bei extrem hohen Cl-Konzentrationen im Brennstoff (4 Mass-%) bestätigen.

Für das Klärschlammprojekt sollte daher im Sinne eines konservativen Ansatzes davon ausgegangen werden, dass Nickel in der Asche verbleibt. Für dessen Konzentration im Endprodukt wäre demnach entscheidend:

- der Nickelgehalt des jeweiligen Klärschlammes,
- der oTS-Gehalt des jeweiligen Klärschlammes bzw. der Aschegehalt, sowie

- die bei Aufschlussverfahren hinsichtlich einer Verfügbarmachung des Phosphors einzusetzende Säuremenge.

Da nicht davon auszugehen ist, dass die Verbrennung der einzelnen Klärschlämme separat voneinander erfolgt hängt somit der Nickelgehalt des Produkts entscheidend vom Brennstoffmix und der Logistik ab.

Die in Tabelle 2-6 dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass die Nickelbelastung der virtuellen Asche aus dem Einzugsgebiet (77 mg/kg) letztlich nicht zu Überschreitungen des Nickelgrenzwerts gem. Düngemittelverordnung von 80 mg/kg führen wird. Hierbei ist zu beachten, dass es zur Konfektionierung eines Phosphor-Düngemittels mit hoher Pflanzenverfügbarkeit nach den SeraPlant- bzw. pontes pabuli-Verfahren Aufschlussäure zugesetzt wird, was den Nickelgehalt im Endprodukt weiter herabsetzt.

5.5 Einholung von Richtpreisangeboten für Anlagen zum Phosphorrecycling aus Klärschlammaschen

Insgesamt liegt der Kostenrahmen für 3 Varianten des P-Recyclings vor. Diese werden im Folgenden als alternative Szenarien P1, P2 und P3 vorgestellt. Die einzusetzende Technologie hat direkte Konsequenzen für Fertigungstiefe des Düngemittels am Standort Gießen. Daneben betreffen die Szenarien ganz entscheidend die Investkosten für das Gesamtvorhaben, die damit verbundene Risiken und den genehmigungsrechtlichen Aufwand.

Szenario P1: Einspeisung der Klärschlammasche in die Düngemittelproduktion am Industriepark Höchst

In diesem Szenario erfolgt in Gießen lediglich die Verbrennung des Klärschlammes unter Nutzung des Heizwerts durch Einspeisung der Überschusswärme in das bestehende Fernwärmenetz. Favorisiert wird die Behandlung in einer Wirbelschichtfeuerung. Die Asche wird nach Frankfurt-Höchst transportiert und dort in die Düngemittelproduktion im Industriepark Höchst eingespeist. Die Erfüllung der Auflagen zur Phosphorrückgewinnung gem. AbfKlärV erfolgt durch den Betreiber der dortigen Anlage, den Standort Gießen verlässt ein Abfall. Die genehmigungsrechtlichen Erfordernisse erstrecken sich somit nur auf die Errichtung des Klärschlammaglers, der Trocknungsanlage und der Wirbelschichtfeuerung.

Die Kosten belaufen sich angebotsseitig auf einen Kostendeckungsbeitrag in Höhe von 90 € pro Tonne Asche. Umgelegt auf 1 Tonne Klärschlamm mit 25 % TS und einem Glühverlust von 50 % der Trockensubstanz ergibt dies Behandlungskosten in Höhe von 12,10 € pro Tonnen Klärschlamm. Kosten für den Transport der Asche (Abfall) zum Standort Industriepark Höchst sind darin eingeschlossen.

Szenario P2: Behandlung des Klärschlammes nach dem EuPhoRe-Verfahren und Erzeugung eines Vorprodukts zur Abgabe in die Düngemittelindustrie

In diesem Szenario erfolgt die thermische Umsetzung des auf 40 % TS vorgetrockneten Klärschlammes in dem 2stufigen (reduktiv/oxidativ) EuPHoRe-Verfahren in einem Drehrohrreaktor unter Zugabe von Chlordonatoren zur Volatilisierung von Schwermetallen. In diesem Verfahren belaufen sich die umgelegten Behandlungskosten (75.000 Jahrestonnen Klärschlamm mit 25% TS und einem Glühverlust von 50 % der Trockensubstanz) auf 34,80 €. Anzumerken ist, dass dies

die Kosten der thermischen Behandlung beinhaltet, da die Prozesse der P-Rückgewinnung und der reduktiv-oxidativen Schwermetallvolatilisierung nicht voneinander zu trennen sind. Zieht man in einer Äquivalenzbetrachtung die Betriebskosten für die thermische Behandlung in einer Wirbelschichtfeuerung (ohne Berücksichtigung der Vortrocknungskosten) ab, so belaufen sich die „P-Rückgewinnungskosten“ auf 15,85 € pro Tonne Klärschlamm. In dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die EuPhoRe-Asche kosten- aber auch erlösfreiefrei an einen Düngemittelproduzenten abgegeben werden kann, der die Konfektionierung zum Endprodukt vornimmt.

Szenario P3: Fertigung eines verkaufsfähigen pontes pabuli-Düngers am Standort Gießen

Dieses Szenario weist die höchste Fertigungstiefe auf, da es in ein verkaufsfähiges Düngemittel mündet. Das Verfahrensfließbild von pontes pabuli zeigt die Abbildung 5-1.

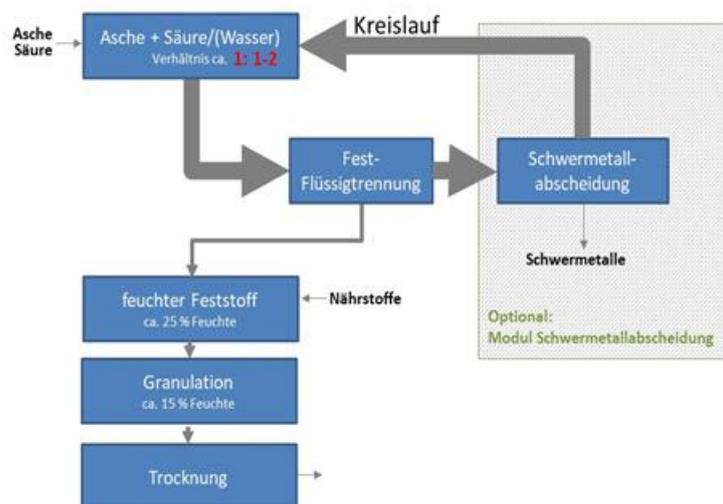


Abb. 5-1: Fließbild des pontes pabuli-Verfahrens

Verfahrenskern ist der saure Aufschluss der Asche, um das darin enthaltene Tricalciumphosphat in eine wasserlösliche und damit pflanzenverfügbare Form zu überführen. Die Wasserphase wird nach einer Fest-Flüssigtrennung im Kreis geführt, wobei die Option besteht, Schwermetalle auszuschleusen, was jedoch mit Blick auf die vergleichsweise geringe Belastung der Aschen aus der Region nicht erforderlich sein dürfte und auch kostenseitig nicht berücksichtigt wurde. Der Feststoff wird (bedarfsweise unter Zusatz weiterer Nährstoffträger) granuliert und getrocknet. Das Verfahren befindet sich derzeit im pre-engineering, welches noch im Jahr 2019 abgeschlossen sein wird. Die Herstellungskosten für den Dünger belaufen sich konservativ geschätzt auf 250 € pro Tonne. Als realisierbarer Produktpreis können 280 € pro Tonne angesetzt werden (Tagespreis für NPK-Dünger vom 26.06.2019 ab Handelslager: 341 € pro Tonnen). Legt man die Kosten und Erlöse um auf 75.000 Jahrestonnen Klärschlamm mit 25% TS und einem Glühverlust von 50 % der Trockensubstanz, so resultieren Fertigungskosten von 8,30 € pro Tonne Klärschlamm.

5.6 Bewertung der Rückbelastung für das Klärwerk Gießen aus den Prozesswässern der P-Recyclingverfahren

Eine nennenswerte Rückbelastung infolge P-Recyclings ist weder beim EuPhoRe noch beim pontes pabuli-Verfahren zu erwarten.

5.7 Massenstromdiagramme sowie Aufstellungsvorschläge

Ein Massenstromdiagramm zur Phosphorrückgewinnung kann sinnhaft nur für das pontes pabuli-Verfahren gegeben werden, da in den Szenarien P1 und P2 die Aufbereitung des Düngemittels nicht unter der Kontrolle des Konsortiums liegt (Abgabe der Asche an den Industriepark Höchst bzw. an einen Düngemittelproduzenten und dort Konfektionierung des Endprodukts).

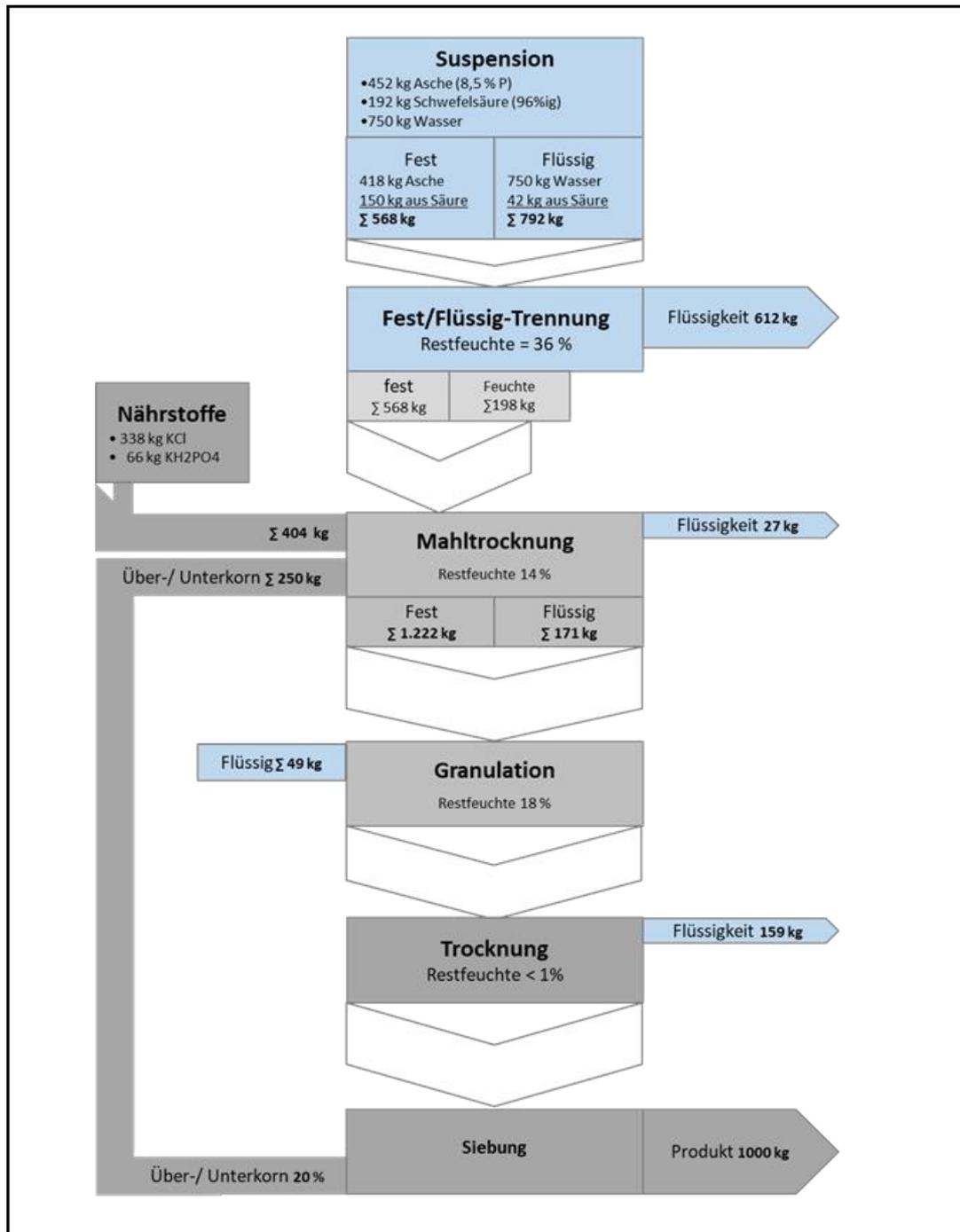


Abb. 5-2: Massenstromdiagramm des pontes pabuli-Verfahrens bei Aufschluss mit H₂SO₄

Entsprechend des in Abb. 5-2 exemplarisch dargestellten Aufschlusses der Asche mit Schwefelsäure ergibt sich ein Asche : Düngemittelverhältnis von 0,45 : 1. Damit lässt sich die in Kapitel 2-4 getroffene Annahme zur sicheren Einhaltung der Grenzwerte der Düngemittelverordnung erhärten. Die Belastung der Asche stellt keinen Engpass für die Aufbereitung zu einem handeltauglichen Düngemittel dar. Eine Schwermetallentfrachtung ist verzichtbar.

5.8 Erarbeitung eines Kriterienkataloges zur Entlassung der P-Rückgewinnungsprodukte aus dem Abfallrecht

Um eine freie Handelbarkeit des Rezyklats ohne die im Abfallrecht verankerte Pflicht zur Verbleibskontrolle zu erreichen, wird angestrebt, nach Konfektionierung des Düngemittels (Szenario P3, ggfs. auch Szenario P2) das Ende der Abfalleigenschaft zu erreichen. Laut Giesberts und Kleve (2008) sollte ein Kriterienkatalog zur Bestimmung des Endes der Abfalleigenschaft darauf fußen, dass dieses spiegelbildlich zur Begründung der Abfalleigenschaft aufzufassen ist. Entsprechend ist das Ende der Abfalleigenschaft erreicht, wenn diejenigen Aspekte, die ein Produkt am Ende des Lebensweges zu einem Abfall machen, nicht mehr zutreffen. Dies betrifft insbesondere den nach Kreislaufwirtschaftsgesetz in der Legaldefinition von Abfällen zentralen subjektiven und objektiven Entledigungswillen des Erzeugers (s. Tab. 5-2)

Tab. 5-3: Kriterienkatalog für die Entlassung des P-Rezyklats aus dem Abfallrecht

Spiegelbild des subjektiven Entledigungswillens

- | | |
|--|---|
| • Absicht zur Produktverwendung | ➤ Ziel Düngemittelerzeugung |
| • Bewusste Herstellung mit dem Ziel wirtschaftlicher Nutzung | ➤ Einkauf hochwertiger Reagenzien, Einsatz in komplexem Prozess |

Spiegelbild des objektiven Entledigungswillens

- | | |
|--|---|
| • Schaffung sekundärer Ressourcen | ➤ Substitution Rohphosphat durch KSA |
| • Wegfall abfallspezifischer Gefährlichkeit, produktäquivalente Gefährlichkeit | ➤ Einhaltung der DüMV-Grenzwerte Werte wie konventioneller P-Dünger |
| • Endprodukt kann direkt in Wirtschaftskreislauf entlassen werden | ➤ Konfektionierung im Werk, Abgabe über Direkt-/Zwischenvermarktung |
| • Abgrenzung des Produkts vom Abfall | ➤ P nach Prozess pflanzenverfügbar |
| • Produktwürdigung der Abnehmer | ➤ Verknappungsgetriebene Nachfrage |
| • Lieferverträge / Qualitätsanforderungen der Abnehmer | ➤ Entweder mit Direkt- oder Zwischenabnehmern |

Aus diesem Kriterienkatalog heraus wird vorgeschlagen, die Entlassung aus dem Abfallrecht im Einvernehmen mit der zuständigen Genehmigungsbehörde sowohl auf die Inputqualität (Vergleichbarkeit KSA mit marokkanischem Rohphosphat) als auch auf die Outputqualität (Düngewirksamkeit, Nährstoffverfügbarkeit, Einhaltung der Grenzwerte der Düngemittelverordnung) abzustellen (vgl. nachstehende Abbildung 5-3).

Input-Qualität	Output-Qualität		
Schadstoff- gehalte in KSA vs. Rohphosphat	Schadstoff- gehalte Recyclat vs. konvent. Dünger	P-Fraktionierung Recyclat vs. konvent. Dünger	Ertragswirkung Recyclat vs. konvent. Dünger

Abb. 5-3: Bemessung der Input- und Outputqualität bei der Erzeugung des P-Rezyklates im Rahmen der Entlassung aus dem Abfallrecht

5.9 Erarbeitung eines Realisierungsvorschlages

Die drei Szenarien zur P-Rückgewinnung unterscheiden sich einerseits in der Fertigungstiefe, andererseits in den anlagentechnischen Erfordernissen und dem Investitionsvolumen. Aus diesem Grund kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein Realisierungsvorschlag ausgesprochen werden. Vielmehr muss diese unter Berücksichtigung strategischer Aspekte und ggfs. einer möglichen Einwerbung von Fördermitteln (z.B. RePhoR-Programm des BMBF) durch das Konsortium diskutiert und abgewogen werden. Im Rahmen der Entscheidungsfindung zu berücksichtigende Aspekte fasst die nachstehende Tabelle 5-3 zusammen.

Tab. 5-3: Im Rahmen der Verfahrensauswahl zu berücksichtigende Aspekte

Aspekt	Szenario P1 SeraPlant Infraserb	Szenario P2 EuPhoRe, Gießen	Szenario P3 Pontes pabuli, Gießen
Genehmigungsumfang.	Lager, Trocknung, Wirbelschicht	Lager, Trocknung, Drehrohr	Lager, Trocknung, Wirbelschicht, Düngerproduktion, ggfs. Produktlager
Ausfallrisiko bez. Erfüllung P-Recyclingpflicht	nicht vollständig kontrollierbar (z.B. Vertragskündigung)	teils kontrollierbar wenn Prozessoutput bereits Dünger ist	vollständig kontrollierbar
Externalisierung Havarierisiko bei P-Recycling	vollständig externalisiert	teilweise externalisiert	nicht externalisiert
Invest für P-Recycling	kein	25,5 Mio. € (inkl. integrierte therm. Behandlung)	9 Mio. €
Erfordernis zum Aufbau Vertriebsstrukturen	kein	für Vorprodukt	für Dünger
Erfüllungsgrad Regionalität der Düngemittelproduktion	ja, Metropolregion Frankfurt Rhein-Main	ja, Mittelhessen	ja, Mittelhessen
Förderfähigkeit RePhoR	nein	möglicherweise gegeben	sicher gegeben

6 Logistik-Konzepte im Einzugsgebiet des Projektes

6.1 Prüfung der aktuellen Eigenschaften (insbesondere der Entwässerungsgerad) der Klärschlämme in Bezug auf ggf. erforderliche oder sinnhafte Entwässerung oder Trocknung am Anfallort (Kläranlagen im Einzugsgebiet der Studie)

Die Daten wurden im Zusammenhang mit der Steckbriefabfrage bei den potentiell interessierten Kommunen erhoben und sind in Kapitel 2-2 dargestellt. Bis auf wenige Nassschlämme liegen die TS-Gehalte im Bereich von 20 bis max. 35 Mass.-%. Dabei zeigt die Datenbank, dass sehr hohe TS-Gehalte häufig mit Klärschlämmen assoziiert sind, die einen hohen Gehalt an basisch wirkenden Stoffen aufweisen, denen also Kalk zugeschlagen wird.

Die Übersicht macht deutlich, dass sich die Entwässerungsgrade steigern und sich die Transportaufwendungen möglicherweise minimieren ließen, wenn die Klärschlämme an geeigneten dezentralen Trocknungsstandorten gebündelt und unter Einsatz dort vorhandener Abwärme weiter getrocknet würden. Für Nassschlämme wäre eine weitergehende dezentrale Entwässerung bzw. eine Trocknung erforderlich um eine optimierte Transportfähigkeit herzustellen.

6.2 Erstellung eines Logistik-Konzeptes zur Einsammlung und Transport der Klärschlämmen von externen Standorten zum Standort Gießen (zentrale Trocknung)

Die logistische Modellierung erfolgte unter Einsatz einer professionellen Softwarelösung. Hiermit wurde nach einer geeigneten Clusterung der einzelnen Anlagen eine Routenoptimierung vorgenommen. Die Clusterung erfolgte alternativ nach 2 Szenarien, dem Szenario „Landkreise“ und dem Szenario „Himmelsrichtungen“. Entsprechend der Clusterung wurden die Routen nach Landkreisen bzw. nach den vier Himmelsrichtungen und einer zentralen Tour aufgeteilt. Durch die Planung mit möglichen Klärschlammkapazitäten am Anfallort, konnten individuelle Anzahlen an Transportfahrzeugen im Jahr für die jeweiligen Touren berechnet werden. Somit wird vermieden, dass jede Tour in einem Szenario täglich gefahren werden muss. Durch entstehende Tagesschwankungen der Quantität und Qualität des zentral zusammengeführten Klärschlammes, wurden die Jahresganglinien ausgewählter Klärschlammkenngrößen ausgewertet. Dies betrifft die Frachten und Konzentrationen des Heizwerts, sowie des Phosphors, Nickels und Quecksilbers. Diese dienen einer Prognose für die mögliche Klärschlammzusammensetzung am Ort der Verbrennungsanlage, woraus Auslegungsdaten für die Verbrennungsanlage und die spätere Phosphorrückgewinnung und Düngerherstellung abgeleitet werden können.

Die Abb. 6-1 zeigt beispielhaft die Jahresganglinie des Energie-Inputs in die Zentrale Verbrennungsanlage, so wie er sich aus der Logistik in Abhängigkeit von der Anlagenclusterung und den zu den jeweiligen Tagen erfassten Anlagen bei deren gegebener Klärschlammzusammensetzung ergibt. Es wird deutlich, dass die von der Verbrennungsanlage zu bewältigenden Brennstoffeigenschaften ausgeprägten Schwankungen unterliegen, die einerseits von Klärschlamm selber abhängen, andererseits vom Abfuhrhythmus und der Art der Clusterung.

Aus Sicht des Betreibers einer Verbrennungsanlage kann es vorteilhaft sein die Schwankungen der Inputeigenschaften zu glätten um die Anlage mit möglichst konstanter Last fahren zu können. Analog könnte aus Sicht des Betreibers eine Phosphorrückgewinnungsanlage vorteilhaft sein die Spitzen im Nickelgehalt der Schlämme bzw. der daraus resultierenden Aschen zu glätten, um Produktqualitäten sicher gewährleisten zu können.

Sollte nicht nur eine nach Kosten optimierte Routenführung theoretisch abgeleitet werden sondern auch derartige stoffliche Eigenschaften berücksichtigt werden, liefe dies auf die Lösung eines mehrdimensionalen Optimierungsproblems hinaus, die nicht Gegenstand der Machbarkeitsstudie ist.

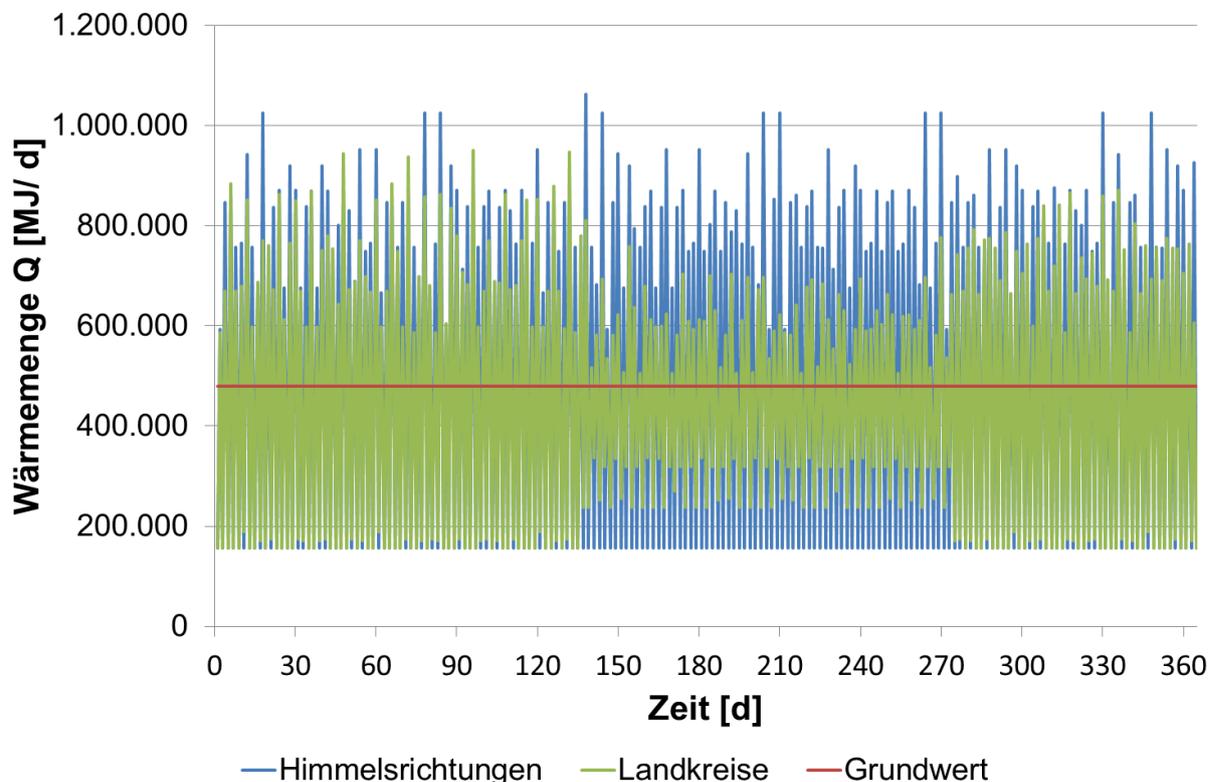


Abb. 6-1: Auswirkung der Transportlogistik auf die Jahresganglinie der Brennstoffeigenschaften am Beispiel des täglichen Energieinputs

Um bei den Gesamtkosten auch die Aufwendungen für Transporte zu berücksichtigen wurde ein orientierendes Angebot eingeholt. Basis der damit berechneten spezifischen Transportkosten für die Anlieferung der Klärschlamme zu einem zentralen Trocknungsstandort in Gießen bildet die nachstehende Zonenkarte Abb. 6-2 sowie die den einzelnen Zonen zugewiesenen Kosten pro Transport. Den Zonen wurden im Angebot die folgenden Netto-Kosten (ohne Maut) zugeordnet:

Zone 1	165,00 €	Zone 5	335,00 €
Zone 2	195,00 €	Zone 6	365,00 €
Zone 3	245,00 €	Zone 7	keine Anfallstelle
Zone 4	275,00 €	Zone 8	425,00 €

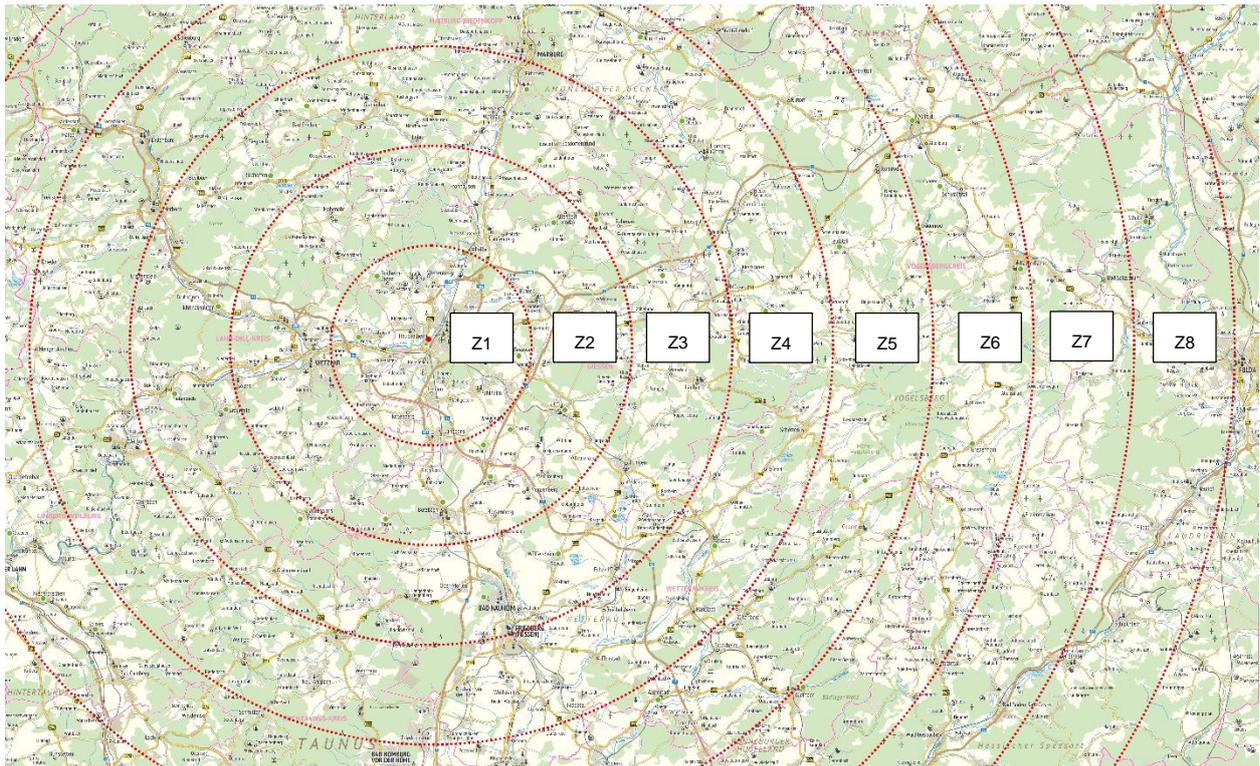


Abb. 6-2: Zonenkarte für die Berechnung der Transportkosten der Klärschlammlieferung zum zentralen Standort Gießen mit den Zonen Z1 bis Z8

Anhand der Postleitzahlen wurden die Kläranlagenstandorte den Zonen Z1 bis 8 zugeordnet, unter Zuhilfenahme der Klärschlamm-mengen aus der Datenbank die Anzahl der jährlichen Transporte ermittelt und die spezifischen Transportkosten für jede anzufahrende Kläranlage berechnet.

Für das Logistikkonzept und die daraus resultierende Kostenbetrachtung wurden folgende technische Randdaten vorgegeben:

- Der Preis gilt ohne Beladung bei der jeweiligen Kläranlage, die Ladezeit beträgt maximal 30 Minuten.
- Die Verwiegung erfolgt am Standort Gießen.
- Die Verladung erfolgt in Sattelfahrzeuge, eventuell andere Systeme wie Absetzkipper ergeben sich aus den final teilnehmenden Kläranlagen und können erst nach Vertragsabschluss kalkuliert werden
- Die maximale Zuladung beträgt 27 t, konservativ wurde von einer Zuladung von 20 t ausgegangen.

Mit diesen Eckdaten ergeben sich die Transportkosten im gewichteten Mittel aller berücksichtigten Kläranlagen zu 14,10 € netto pro Tonne Klärschlamm bei 25 % TS. Die minimalen spezifischen Kosten liegen bei 8,20 € die maximalen bei 21,30 €.

6.3 Erstellung eines Logistik-Konzeptes zur Einsammlung und Transport der Klärschlammengen zu dezentralen Trocknungsanlagen und anschließend nach der Trocknung zum Standort Gießen, zentrale Klärschlammverbrennung mit Energienutzung und Phosphorrückgewinnung

Die Erstellung des konkreten Logistik-Konzeptes kann erst nach Festlegung der tatsächlichen teilnehmenden Kommunen und Verbände sowie der Klärschlammengen erfolgen. Hierbei wird sicher auch die Frage eine Rolle spielen, inwieweit eine solidarische Aufteilung der Logistikkosten durchsetzbar ist (Verrechnung der mittleren spezifischen Kosten bei allen teilnehmenden Partner) oder ob diese individuell für jeden Partner ausgewiesen werden müssen.

7 Gesamtkonzept

7.1 Ziele des Klärschlammverwertungskonzeptes Mittelhessen

Die vorrangigen Ziele des mittelhessischen Klärschlammverwertungskonzeptes sind:

- eine hohe Entsorgungssicherheit für die beteiligten Kläranlagenbetreiber,
- stabile marktgerechte Entsorgungspreise für die beteiligten Kläranlagenbetreiber,
- eine weitgehende thermische Verwertung des organischen Anteils der Klärschlämme im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen
- eine weitestgehende Phosphorrückgewinnung mit Rückgewinnungsquoten > 80 %
- eine Rückführung des Phosphor-Rezyklats in die regionale Landwirtschaft
- eine insgesamt möglichst geringe CO₂-Emission, auch unter Berücksichtigung von Transportaufwendungen.

Für eine weitgehende thermische Verwertung sowie ebenfalls weitgehende Phosphor-Rückgewinnung ist eine zentrale Verbrennungs- und -Rückgewinnungsanlage aus der Asche am Standort Gießen mit Anbindung an das Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen obligatorisch. Dezentrale Phosphor-Rückgewinnungsanlagen aus dem Abwasser oder dem Klärschlamm werden nicht betrachtet, da mit diesen Verfahren keine weitestgehende Rückgewinnungsquote > 80 % erreicht werden kann. Dezentrale Verbrennungsanlagen sowie auch dezentrale Phosphorrückgewinnungsanlagen aus der Asche sind aufgrund ihrer Anlagengröße deutlich unwirtschaftlicher als eine zentrale Anlage und werden daher nicht weiter betrachtet.

Um dieses Ziel erreichen zu können, werden nachfolgend 5 Szenarien betrachtet, in denen zentrale und dezentrale Trocknungsanlagen sowie verschiedene thermische Verwertungsanlagen (Wirbelschichtverbrennung und Drehrohr-Technik nach dem EUPHORE-Verfahren) miteinander kombiniert und verglichen werden.

7.2 Entwässerung der zu behandelnden Klärschlämme

Insbesondere in ländlichen Regionen wie Mittelhessen wird nach wie vor Klärschlamm als Nassschlamm ohne Entwässerung in der Landwirtschaft verwertet. Diese Form der Klärschlammverwertung wird bei den derzeit am mittelhessischen Klärschlammverwertungskonzept zunehmend schwierig, so dass diese Betreiber zukünftig auch ihre Schlämme in dem hier beschriebenen Modell verwerten möchten.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wird davon ausgegangen, dass alle für die weitere thermische und stoffliche Verwertung zur Verfügung stehenden Klärschlämme einheitlich zunächst mit ca. 25 % TS zur Verfügung gestellt werden. Dies ist bei vielen Kläranlagen ohnehin der Fall, da Schlammentwässerungsaggregate installiert sind. Schwankungen bei den entwässerten Schlämmen (zwischen ca. 20 und ca. 30 % TS) sind zum einen den verschiedenen Entwässerungsaggregaten geschuldet (Schlämme aus Kammerfilterpressen fallen mit ca. 30 % TS, Schlämme aus Zentrifugen / Dekantern mit 20 – 25 % TS an), andererseits auch den Entwässerungseigenschaften der Schlämme, die durchaus verschieden sein können.

Insbesondere von kleinen Kläranlagen werden aber derzeit noch Schlämme in einer Menge von ca. 21.150 t/a als Nassschlämme mit i.M. ca. 3,9 % TS landwirtschaftlich verwertet (siehe Tab.

2-4). Diese Nassschlämme machen zwar nur ca. 4,6 % der gesamten Klärschlamm-Trockenmasse aus, sollen aber dennoch zukünftig auch mit in das hier beschriebene Konzept eingebracht werden. Diese Nassschlämme müssten dann vor allem durch mobile Entwässerungsaggregate (Kammerfilterpressen und / oder Dekanter) ebenfalls auf ca. 25 % TS vorbehandelt werden. Dies sollte grundsätzlich im Aufgabenbereich der Kläranlagenbetreiber liegen. Zu beachten ist hierbei u.a. die Rückbelastung der Kläranlagen durch das beim Entwässern anfallende Schlammwasser. Hier sind individuell Vorkehrungen zu treffen, wie z.B. die Zwischenspeicherung und gezielte Zudosierung des Schlammwassers in den Abwasserreinigungsprozess der jeweiligen Kläranlage unter Beachtung der Überwachungswerte. Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Kläranlagen erfolgt im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nicht.

Denkbar ist auch, dass im Rahmen eines Dienstleistungsvertrags die neu zu gründende Klärschlammverwertungs-Gesellschaft die Entwässerung der Nassschlämme bei den Partnerkommunen durchführt, damit diese nicht jeweils einzeln die Entwässerung individuell beauftragen müssen. Diese Dienstleistung muss individuell gesondert vergütet werden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Transport der Nassschlämme zu benachbarten größeren Kläranlagen, auf denen ein Entwässerungsaggregat mit entsprechender Kapazität vorhanden ist und dann dort die Entwässerung durchgeführt wird.

7.3 Transport der Klärschlämme

Da als zentrale Verwertungsanlage eine thermische Verwertung mit anschließender Phosphor-Rückgewinnung am Standort Gießen realisiert werden soll, ist ein Transport der entwässerten Klärschlämme nach Gießen erforderlich.

Je nach betrachtetem Szenario (siehe Kap. 7.7) werden unterschiedliche Transportleistungen erforderlich (siehe auch Kap. 6):

- Transporte von Nassschlamm zu Entwässerungsanlagen (wird hier nicht weiter betrachtet, da die Nassschlamm-Entwässerung Aufgabe der Kläranlagenbetreiber bleiben sollte)
- Transport von entwässerten Schlämmen zur zentralen Verwertungsanlage (Trocknung und Verbrennung bzw. Drehrohr-EuPhoRe) (siehe Szenarien 1,2, 4 und 5, Kap. 7.7)
- Transport von entwässerten Schlämmen zu dezentralen Trocknungsanlagen (siehe Szenario 3, Kap. 7.7.3)
- Transport von getrocknetem Klärschlamm zur zentralen Verwertungsanlage nach Gießen (siehe Szenario 3, Kap. 7.7.3)

Der Transport der Klärschlammmasche zur Phosphor-Aufbereitungsanlage wird nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die Phosphor-Aufbereitungsanlage in direkter Nachbarschaft zur Verbrennungsanlage errichtet werden wird.

Der Transport des Phosphor-Recyclats als Düngerprodukt ggf. zu einer Düngemittelproduktionsanlage und der Vermarktungsplattform (Landhandel, Großhandel etc.) wird ebenfalls nicht betrachtet, da dieser unabhängig von den Aufbereitungsszenarien ist und insofern keinen Einfluss auf die Auswahl des empfohlenen Szenarios hat.

7.4 Vortrocknung des Klärschlammes vor anschließender thermischer Verwertung

Für die thermische Verwertung am Standort Gießen wurden seitens des Konsortiums Mittelhessische Wasserbetriebe (MWB) und Stadtwerke Gießen (SWG) verschiedene Technologien insbesondere Rostfeuerungen, Staubfeuerung und Wirbelschichtfeuerung untersucht. Aufgrund der Erfahrungen aus in Betrieb befindlichen Klärschlammverbrennungsanlagen wurde seitens SWG entschieden, die Anlage in Gießen als Wirbelschichtverbrennung zu realisieren. Die Wirbelschichtverbrennung ist in den nachfolgend untersuchten Szenarien 1 bis 3 enthalten.

Alternativ zur Wirbelschichtverbrennung wird in den Szenarien 4 und 5 noch die 2-stufige Drehrohr-Technik der Fa. EuPhoRe mit vorgeschalteter Reduktion (inkl. Trocknung) sowie nachgeschalteter Oxidation (Verbrennung) betrachtet.

Um eine Wirbelschicht-Klärschlammverbrennung optimal betreiben zu können, ist es erforderlich den Klärschlamminput auf ca. 45 % TR vorzutrocknen. Dies bedeutet, dass Trocknungskapazitäten für die zu verarbeitenden ca. 75.000 t KS / a (lt. Datenzusammenstellung 72.559 t/a siehe Tab. 2-3) realisiert werden müssen, um von i.M. 25 % TR auf ca. 45 % TR zu kommen.

Unter Zugrundelegung der Klärschlammmenge von 72.559 t/a (siehe Tab. 2-3) entsprechend 18.140 t TR / a ergibt sich bei Trocknung von 25 auf 45 % TR eine erforderliche Wasserverdampfungsleistung von ca. 32.450 t/a. Nach Trocknung verbleiben ca. 40.310 t KS /a mit 45 % TR.

Dieser TR-Gehalt lässt sich grundsätzlich mit verschiedenen Verfahrensführungen der Klärschlamm-trocknung vor der Wirbelschichtverbrennung erreichen. Die verschiedenen Trocknungstechnologien sind bereits in Kap. 3 erläutert.

Nachfolgend werden verschiedene Szenarien für die Verfahrensstrategie zur Klärschlamm-trocknung in Verbindung mit der thermischen Verwertung beschrieben.

7.5 Standorte zur Realisierung der Klärschlammbehandlung (Trocknung und Verbrennung) sowie der Phosphor-Rückgewinnung

Seitens des Konsortiums Mittelhessische Wasserbetriebe (MWB) und Stadtwerke Gießen (SWG) wurden im Stadtgebiet Gießen 3 Standorte vorausgewählt, die grundsätzlich für die Realisierung der Klärschlammbehandlung mit Trocknung und Verbrennung sowie der Phosphor-Rückgewinnung in Frage kommen.

7.6 Thermische Verwertung zur Nutzung im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen

Der virtuell gemischte Klärschlamm (Rückmeldungen gemäß LOI 2) weist einen gewichteten organischen Anteil von 53,6 % oTR (entsprechend Glühverlust) auf. Bei Trocknung des Klärschlammes auf 45 % TR (als Voraussetzung für einen optimalen Betrieb der Wirbelschichtverbrennungsanlage) weist dieser vorgetrocknete Schlamm einen Heizwert von ca. 4.200 kJ/kg entspr. ca. 1,167 kWh/kg bzw. 1.167 kWh/t auf (siehe Abb. 7-1). Bei 40.310 t/a (KS 45 %) ergibt sich ein Heizwert von ca. 47.028.333 kWh/a, der für eine thermische Verwertung theoretisch zur Verfügung steht.

Abzüglich eines angenommenen Verlustes in Anlagentechnik (Anlagenwirkungsgrad) bzw. auch zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Klärschlammzusammensetzung von ca. 20 % könnte eine Wärmemenge von

$$47.028.333 \text{ kWh/a} * (1 - 0,2) = 37.622.666 \text{ kWh/a}$$

im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen verwertet werden.

Die Szenarien 1 (integrierte Vortrocknung vor Wirbelschichtverbrennung) und 4 (integrierte Vortrocknung vor EUPHORE-Verfahren) gehen davon aus, dass der auf 25 % entwässerte Klärschlamm direkt in die thermische Verwertung gegeben wird.

In diesen Fällen weist der Schlamm nur einen Heizwert von ca. 1.200 kJ/kg entspr. ca. 333 kWh/t auf (siehe Abb. 7-1). Bei einem Input-Strom von 72.559 t/a (KS 25 %) ergibt sich ein Heizwert von ca. 24.186.333 kWh/a, der für eine thermische Verwertung theoretisch zur Verfügung steht. Abzüglich eines angenommenen Verlustes in Anlagentechnik (Anlagenwirkungsgrad) bzw. auch zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Klärschlammzusammensetzung von ca. 20 % könnte dann noch eine Wärmemenge von

$$24.186.333 \text{ kWh/a} * (1 - 0,2) = 19.349.066 \text{ kWh/a}$$

im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen verwertet werden.

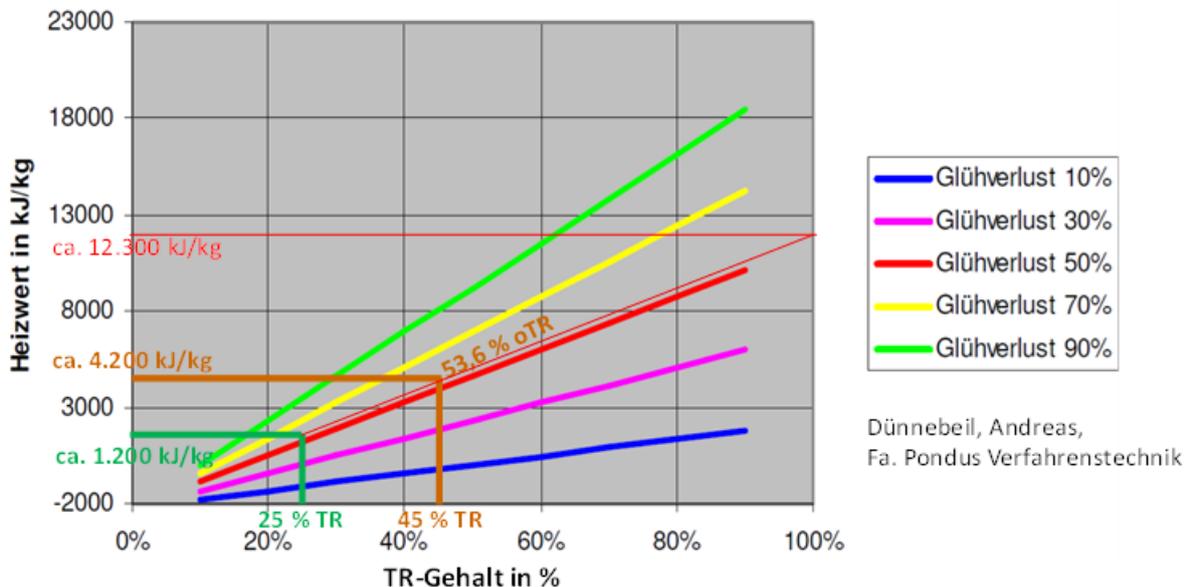


Abb. 7-1: Abhängigkeit des Heizwertes von Klärschlamm vom TR-Gehalt sowie Glühverlust (oTR-Gehalt), PONDUS Verfahrenstechnik GmbH, 2017
Bsp. bei 45 % TR und einem organischen Anteil von 53,6 % oTR ergibt sich ein Heizwert von ca. 4.200 kJ/kg Schlamm

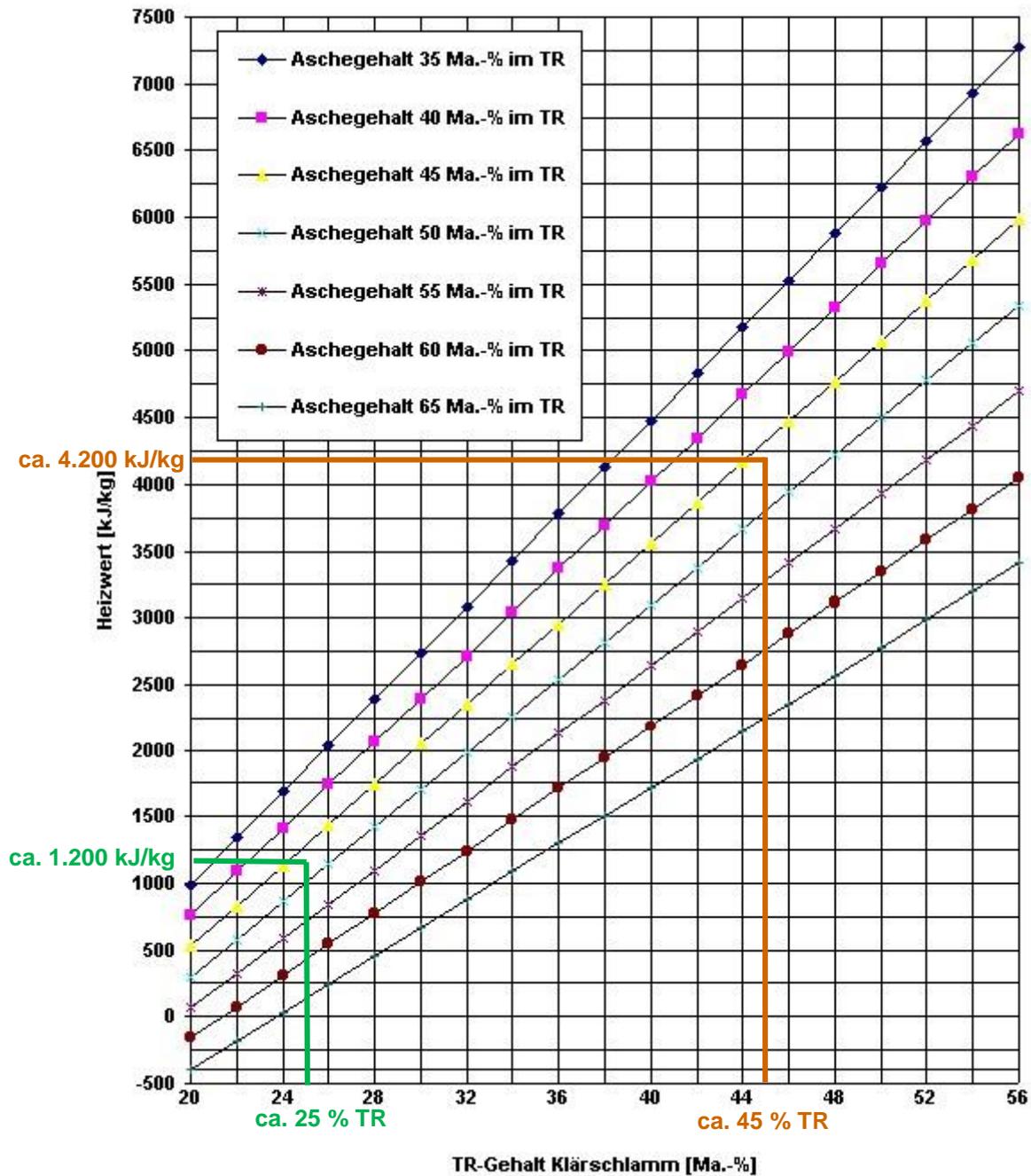


Abb. 7-2: Abhängigkeit des Heizwertes von Klärschlamm vom TR-Gehalt sowie Aschegehalt (mTR-Gehalt), Meyer, U., 1997
Bsp. bei 45 % TR und einem organischen Anteil von 53,6 % oTR (entspr. 46,4 % mTR entspr. Aschegehalt) ergibt sich ein Heizwert von ca. 4.200 kJ/kg Schlamm

7.7 Mögliche Szenarien für das Klärschlammkonzept Mittelhessen unter Einbeziehung einer Wirbelschichtverbrennung

Daher ergeben sich 5 grundlegende Szenarien zur thermischen und stofflichen Verwertung der Klärschlämme aus der erweiterten Region Mittelhessen, die nachfolgend weiter betrachtet werden:

7.7.1 Szenario 1: Zentrale Trocknung als Vorschaltanlage vor der Wirbelschichtverbrennung

Das Szenario 1 geht von einer zentralen Anlage zur Monoverbrennung des Klärschlammes in einer Wirbelschichtverbrennung am Standort Gießen aus. Der für die Wirbelschichtverbrennung erforderliche TS-Gehalt von ca. 45 % TR wird in einer direkt der Verbrennungsanlage vorgeschalteten Trocknungsanlage erreicht.

- Die Nassschlämme werden am Standort der jeweiligen Kläranlage mittels mobiler Entwässerungsaggregate oder nach Transport auf eine größere Kläranlage mit fest installierter Entwässerung auf ca. 25 % TR entwässert.
- Alle auf ca. 25 % TR entwässerten Klärschlämme werden per Lkw-Transport zur zentralen Trocknungsanlage nach Gießen gebracht.
- In Gießen wird der gesamte entwässerte Schlamm von ca. 25 % TR auf ca. 45 % TR getrocknet. Die Trocknung erfolgt direkt am Standort der Verbrennung als Vorschaltanlage unter Nutzung der bei der Verbrennung entstehenden Abwärme.
- Als Trocknungstechnologie wird ein Scheiben- oder Dünnschichttrockner eingesetzt, der mit Hochtemperatur-Wärme (Dampf) aus der Verbrennungsanlage beheizt wird (siehe Kap. 3.1).
- Der vorgetrocknete Schlamm wird in einer zentralen Wirbelschichtfeuerungs-Verbrennungsanlage thermisch verwertet. Die entstehende Wärme wird für die Vortrocknung der entwässerten Schlämme benötigt.
- Trocknung und Verbrennung arbeiten weitgehend energieneutral; ein signifikanter Energieüberschuss zur Einspeisung in das Fernwärmenetz entsteht nicht.
- Die Klärschlammmasche wird in einer zentralen Aufbereitungsanlage zu Phosphor-Rezyklat aufbereitet (externe Abgabe zur Aufbereitung nach dem SeraPlant Verfahren oder interne Aufbereitung nach dem pontes pabuli Verfahren).

Die Abb. 7-3 zeigt das Szenario 1 mit dem grundsätzlichen Verfahrens-Blockbild sowie den Massenströmen.

Unter Ansatz der Menge an Brüdenkondensaten im Szenario 1 bei Trocknung der gesamten Klärschlammmenge von 25 % TR auf 45 % TR von ca. 32.248 m³/a entsprechend 88,4 m³/d sowie der o.g. CSB- und NH₄-N-Konzentrationen ergibt sich folgende CSB- und NH₄-N-Fracht, die als Rückbelastung vom Klärwerk behandelt werden muss (siehe auch Kap. 3.4):

- CSB: (120 g CSB/EW*d)

Mittelwert:	88,4 m ³ /d * 3.452 g/m ³ = 305.157 g CSB/d	entspr. 2.540 EW _{CSB}
Maximum:	88,4 m ³ /d * 9.647 g/m ³ = 852.795 g CSB/d	entspr. 7.107 EW _{CSB}
- NH₄-N: (10 g NH₄-N/EW*d bzw. 11 g TKN/EW*d)

Mittelwert:	88,4 m ³ /d * 1.068 g/m ³ = 94.411 g NH ₄ -N/d	entspr. 9.441 EW _N
Maximum:	88,4 m ³ /d * 3.110 g/m ³ = 274.924 g NH ₄ -N/d	entspr. 27.492 EW _N

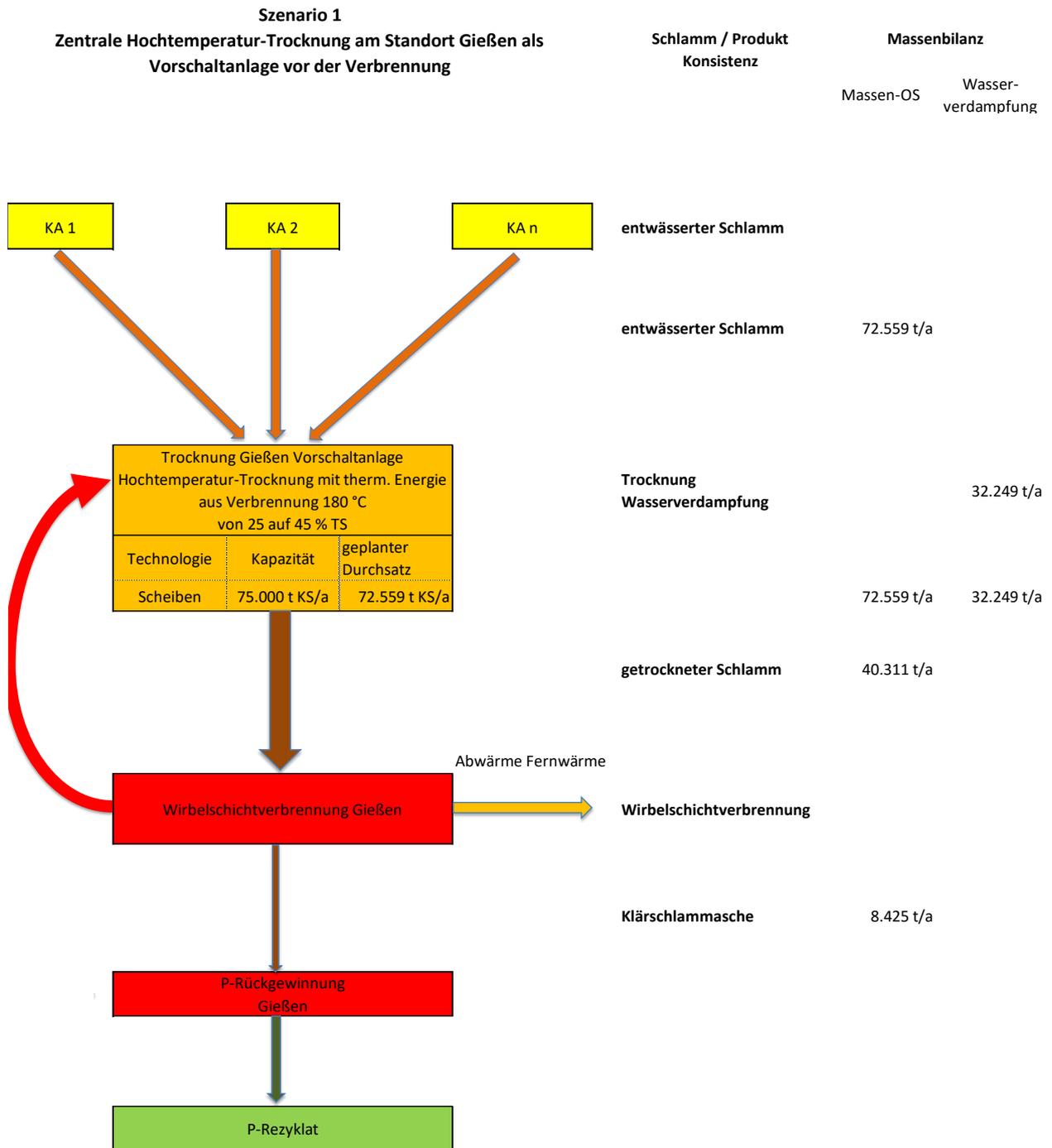


Abb. 7-3: Szenario 1: Zentrale Hochtemperatur-Trocknung als Vorschaltanlage am Standort Gießen vor der Wirbelschichtverbrennung, Verfahrens-Blockbild und Massenströme

Bei Realisierung des Szenarios 1 sind Rückbelastungen von max. 7.107 EW_{CSB} bzw. 27.492 EW_N zu erwarten und im Klärwerk Gießen zu verarbeiten. In diesem Fall ist eine detaillierte Überprüfung der Kapazität des Klärwerks Gießen vorzunehmen. Sollte eine erste Überprüfung nach DWA-A 131 zum Schluss kommen, dass die Kläranlagenstandorte nicht in der Lage sind, die zusätzlichen Frachten zu behandeln, kann ein Speicher zum Ausgleich sowie zur bedarfsgerechten und gesteuerten Zudosierung des Brüdenkondensates Abhilfe schaffen.

Möglicherweise muss eine gesonderte Brüdenkondensatbehandlung – ggf. gemeinsam mit einer Schlammwasserbehandlung zur Behandlung der Zenträte aus der Klärschlammmentwässerung realisiert werden. Hier sind heute Verfahren der gezielten Deammonifikation Stand der Technik.

Die Abb. 7-4 zeigt ein Prinzip-Bild des Szenarios 1 mit der Kombination aus Dünnschichttrockner und Wirbelschichtverbrennung.

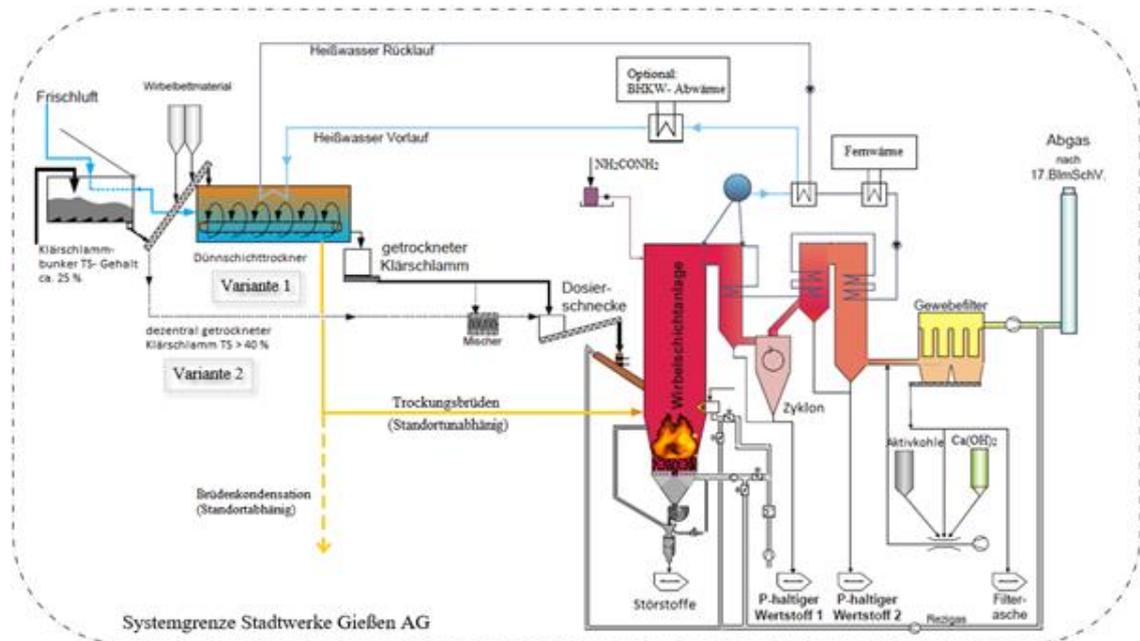


Abb. 7-4: Szenario 1: Zentrale Hochtemperatur-Trocknung als Vorschaltanlage am Standort Gießen vor der Wirbelschichtverbrennung

7.7.2 Szenario 2: Zentrale Trocknung unter Nutzung von Abfallwärme aus dem Fernwärmenetz als getrennte Anlage vor der Wirbelschichtverbrennung

Das Szenario 2 geht ebenfalls von einer zentralen Anlage zur Monoverbrennung des Klärschlammes in einer Wirbelschichtverbrennung am Standort Gießen aus. Der für die Wirbelschichtverbrennung erforderliche TS-Gehalt von ca. 45 % TR wird in einem Trockner erreicht, der mit Niedertemperatur unter Nutzung von Rest-Wärme aus dem Fernwärmesystem mit einem Temperaturniveau von 60-65 °C (Vorlauf) und 40-45 °C (Rücklauf) versorgt wird. Damit ist eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 20 \text{ K}$ für die Trocknung nutzbar.

- Die Nassschlämme werden am Standort der jeweiligen Kläranlage mittels mobiler Entwässerungsaggregate oder nach Transport auf eine größere Kläranlage mit fest installierter Entwässerung auf ca. 25 % TS entwässert.
- Alle auf ca. 25 % entwässerten Klärschlämme werden per Lkw-Transport zur zentralen Trocknungsanlage nach Gießen gebracht.
- Der entwässerte Klärschlamm (ca. 72.559 t/a) wird am Standort Gießen unter Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme (Abfall-Wärme) aus dem Rücklauf der Fernwärme (60-65 °C (Vorlauf) und 40-45 °C (Rücklauf)) von ca. 25 % auf ca. 45 % TS getrocknet. Die Trocknung erfolgt an einem Standort, an dem Rücklauf-Abwärme aus dem Fernwärmenetz zur Verfügung steht.

Bilanziell (unter Ansatz von Jahres-Mittelwerten) kann aus dem Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen ganzjährig eine Rücklaufwassermenge von ca. 150 m³/h mit einem Temperaturniveau von ca. 60-65 °C (Vorlauf) abgezogen werden. Unter Ansatz einer Rückspeisungs-Temperatur von 40-45 °C (Rücklauf) (entsprechend einem Delta-T = 20 K) ist damit eine Wärmemenge Q von

$$Q = m \text{ (kg/h)} * c_p \text{ (kJ/(kg*Delta-T))} * \text{Delta-T (kJ/h)}$$

$$Q = 150 \text{ m}^3/\text{h} * 1000 * 4,18 \text{ kJ/(kg*Delta-T)} * 20 = 12.540.000 \text{ kJ/h} \text{ entspr. } 3.483 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{h}$$

zu erzielen.

Unter Ansatz einer erforderlichen Wasserverdampfung bei Trocknung von 25 % TR auf 45 % TR bei einer Klärschlammmenge von 72.559 t/a (25 % TR) ergibt sich eine erforderliche Wasserverdampfungsleistung von 72.559 t/a * (1 - 0,25/0,45) = 32.248 t/a. Ausgehend von einer spezifische erforderlichen Wärmemenge von ca. 930 kWh/t Wasserverdampfung (Erfahrungswerte von Niedertemperatur-Bandrocknern) ist insgesamt eine Wärmemenge von 30 Mio. kWh/a bzw. i.M. 3.420 kWh/h erforderlich.

Damit ist in diesem Szenario 2 die Trocknung über die aus dem Fernwärmenetz zur Verfügung stehende Niedertemperatur-Energie möglich.

- Der so konfektionierte getrocknete Klärschlamm (40.311 t/a mit 45 % TR) wird in einer zentralen Wirbelschichtfeuerungs-Verbrennungsanlage thermisch verwertet.
- Aufgrund der Vortrocknung der Klärschlammteilmenge mit Abfallwärme ergibt sich ein Energie-Überschuss von ca. 37,6 Mio. kWh/a durch die Verbrennung des Klärschlammes, der in das Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen eingespeist werden kann.
- Die Klärschlammmasche (ca. 8.425 t/a) wird in einer zentralen Aufbereitungsanlage zu Phosphor-Rezyklat aufbereitet (externe Abgabe zur Aufbereitung nach dem SeraPlant Verfahren oder interne Aufbereitung nach dem pontes pabuli Verfahren).

Für das Szenario 2 werden nachfolgend – insbesondere auch in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung – zwei verschiedene Varianten betrachtet:

- Szenario 2a: Einsatz eines Bandrockners
- Szenario 2b: Einsatz eines abwärmegestützten Solartrockners

Die beiden verschiedenen Trocknungstechnologien führen auch zu unterschiedlichen Mengen an Brüdenkondensaten, die als Rückbelastung in der Kläranlage behandelt werden müssen:

Szenario 2a: Rückbelastung bei Einsatz eines Bandrockners

Beim im Szenario 2a eingesetzten Bandrockner fällt grundsätzlich bei Trocknung der gesamten Klärschlammmenge von 25 % TR auf 45 % TR eine Menge an Brüdenkondensaten von ca. 32.248 m³/a entsprechend 88,4 m³/d an. Dieses Brüdenkondensat führt zu folgenden CSB- und NH₄-N-Frachten, die als Rückbelastung vom Klärwerk behandelt werden muss (siehe auch Kap. 3.4):

- CSB: (120 g CSB/EW*d)

Mittelwert:	88,4 m ³ /d * 3.452 g/m ³ = 305.157 g CSB/d	entspr. 2.540 EW _{CSB}
Maximum:	88,4 m ³ /d * 9.647 g/m ³ = 852.795 g CSB/d	entspr. 7.107 EW _{CSB}

- $\text{NH}_4\text{-N}$: (10 g $\text{NH}_4\text{-N}/\text{EW}^*\text{d}$ bzw. 11 g TKN/ EW^*d)

Mittelwert:	$88,4 \text{ m}^3/\text{d} * 1.068 \text{ g}/\text{m}^3 = 94.411 \text{ g } \text{NH}_4\text{-N}/\text{d}$	entspr. 9.441 EW_N
Maximum:	$88,4 \text{ m}^3/\text{d} * 3.110 \text{ g}/\text{m}^3 = 274.924 \text{ g } \text{NH}_4\text{-N}/\text{d}$	entspr. 27.492 EW_N

Szenario 2b: Rückbelastung bei Einsatz eines Solartrockners

Beim im Szenario 2b eingesetzten Solartrockner fällt nur ca. 10 – 15 % der verdampften Wassermenge als Brüdenkondensat an. Die Menge an Brüdenkondensaten ergibt sich zu ca. 15 % * 32.248 $\text{m}^3/\text{a} = 4.837 \text{ m}^3/\text{a}$ entsprechend 13,3 m^3/d an. Dieses Brüdenkondensat führt zu folgenden CSB- und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachten, die als Rückbelastung vom Klärwerk behandelt werden muss (siehe auch Kap. 3.4):

- CSB: (120 g CSB/ EW^*d)

Mittelwert:	$13,3 \text{ m}^3/\text{d} * 3.452 \text{ g}/\text{m}^3 = 45.912 \text{ g CSB}/\text{d}$	entspr. 384 EW_{CSB}
Maximum:	$13,3 \text{ m}^3/\text{d} * 9.647 \text{ g}/\text{m}^3 = 128.305 \text{ g CSB}/\text{d}$	entspr. 1.069 EW_{CSB}
- $\text{NH}_4\text{-N}$: (10 g $\text{NH}_4\text{-N}/\text{EW}^*\text{d}$ bzw. 11 g TKN/ EW^*d)

Mittelwert:	$13,3 \text{ m}^3/\text{d} * 1.068 \text{ g}/\text{m}^3 = 14.204 \text{ g } \text{NH}_4\text{-N}/\text{d}$	entspr. 1.420 EW_N
Maximum:	$13,3 \text{ m}^3/\text{d} * 3.110 \text{ g}/\text{m}^3 = 41.363 \text{ g } \text{NH}_4\text{-N}/\text{d}$	entspr. 4.136 EW_N

Je nach Szenario ist zu prüfen, ob die Rückbelastung aus den Brüdenkondensaten im Klärwerk Gießen verarbeitet werden kann. Bei Anwendung eines Solartrockners (Szenario 2b) und bei den damit verbundenen deutlich verringerten Rückbelastungen von i.M. 384 EW_{CSB} (max. 1.069 EW_{CSB}) und i.M. 1.420 EW_N (max. 4.136 EW_N) ist keine negative Auswirkung auf den Betrieb des Klärwerks Gießen mit einer Ausbaugröße von 300.000 EW zu erwarten.

Sollte ein Bandtrockner (Szenario 2a) eingesetzt werden, sind Rückbelastungen von max. 7.107 EW_{CSB} bzw. 27.492 EW_N zu erwarten und zu verarbeiten. In diesem Fall ist eine detaillierte Überprüfung der Kapazität des Klärwerks Gießen vorzunehmen.

Sollte eine erste Überprüfung nach DWA-A 131 zum Schluss kommen, dass die Kläranlagenstandorte nicht in der Lage sind, die zusätzlichen Frachten zu behandeln, kann ein Speicher zur Ausgleich sowie zur bedarfsgerechten und gesteuerten Zudosierung des Brüdenkondensates Abhilfe schaffen.

Ggf. muss eine gesonderte Brüdenkondensatbehandlung – ggf. gemeinsam mit einer Schlammwasserbehandlung zur Behandlung der Zentrante aus der Klärschlammmentwässerung realisiert werden. Hier sind heute Verfahren der gezielten Deammonifikation Stand der Technik.

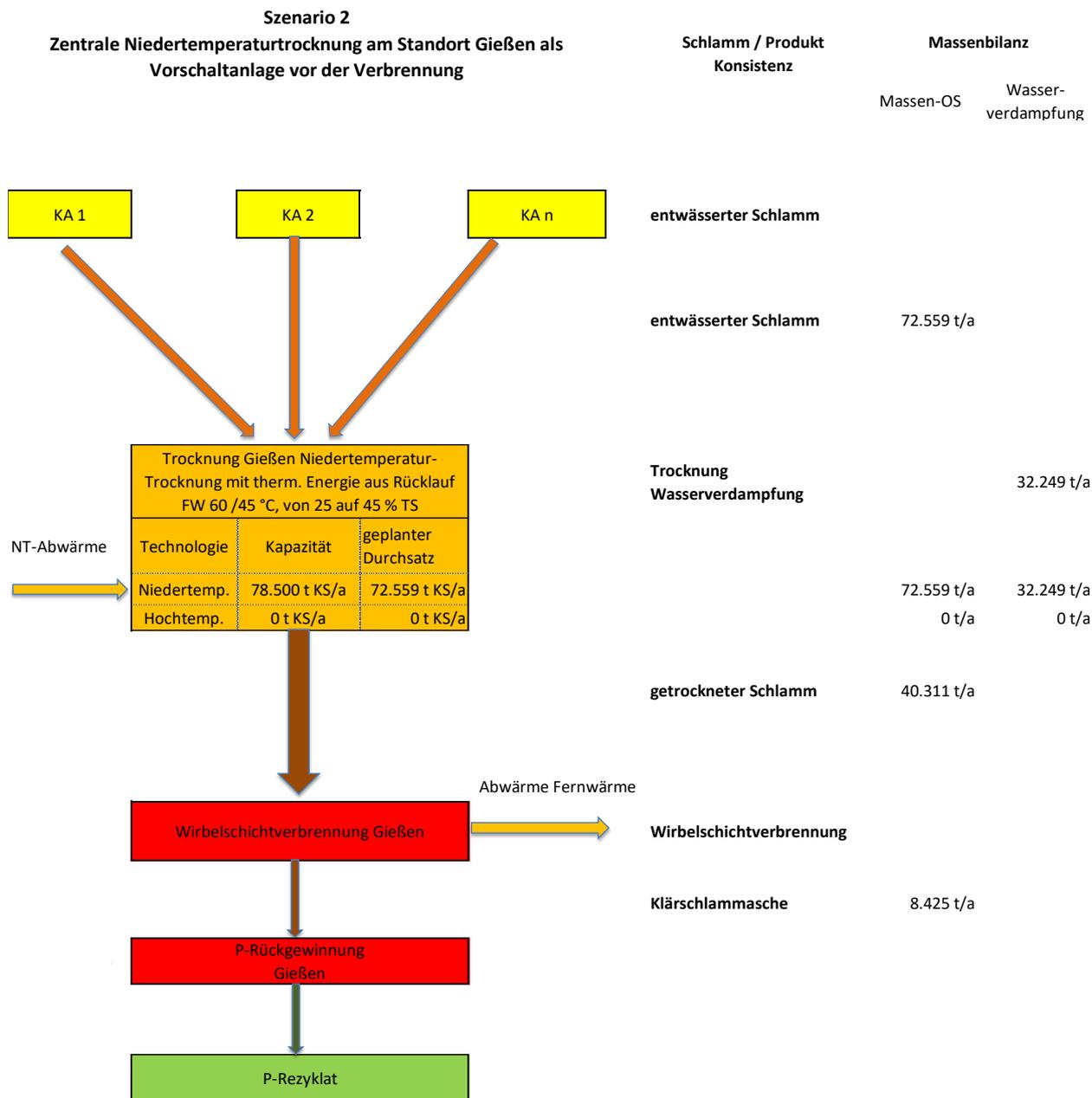


Abb. 7-5: Szenario 2: Zentrale Niedertemperatur-Trocknung mit Nutzung von thermischer Energie aus dem Rücklauf des Fernwärmenetzes mit einer Temperatur von ca. 60 °C sowie Abwärme aus der Klärschlammverbrennung am Standort Gießen vor der Wirbelschichtverbrennung

7.7.3 Szenario 3: Dezentrale Trocknung

Beim Szenario 3 werden Teil-Klärschlamm-mengen von verschiedenen Kläranlagen zu dezentralen Trocknungsstandorten transportiert und dort unter Einsatz von Abfall-Wärme getrocknet. Ziel ist die Trocknung auf ca. 70 % TR, um Transportkosten und Transport-Energie zu sparen.

Der getrocknete Klärschlamm wird anschließend zur zentralen Anlage zur Monoverbrennung des Klärschlammes in einer Wirbelschichtverbrennung am Standort Gießen transportiert.

- Die Nassschlämme werden am Standort der jeweiligen Kläranlage mittels mobiler Entwässerungsaggregate oder nach Transport auf eine größere Kläranlage mit fest installierter Entwässerung auf ca. 25 % TS entwässert.
- Klärschlamm-Teil mengen insbesondere von weiter entfernten Kläranlagen werden in dezentralen Trocknungsanlagen an verschiedenen Standorten unter Nutzung von bisher nicht genutzter Abfallwärme aus Blockheizkraftwerken oder Industrieprozessen sowie unter Nutzung von Solarenergie von ca. 25 % auf ca. 70 % TS getrocknet.

Für die dezentrale Trocknung konnten folgende Standorte im Rahmen der Machbarkeitsstudie genauer betrachtet werden (siehe Tab. 7-1):

Tab. 7-1: Mögliche Standorte für dezentrale Trocknungsanlagen mit theoretischer Kapazität (Potential) sowie möglichem Durchsatz (Input und Output) anhand der nach LOI 2 im direkten Einzugsgebiet der Standorte verfügbaren Klärschlämme

Standort	Sinnvolle Technologie	Erforderl. Fläche	Theoretische Kapazität	möglicher Durchsatz anhand von KS-Mengen nach LOI 2	
				Input (25 % TR)	Output (70 % TR)
Butzbach	Band	2.000 m ²	5.000 t/a	4.815 t KS/a	1.720 t/a
Gladenbach	Solar	7.000 m ²	10.000 t/a	9.933 t KS/a	3.548 t/a
Grebenhain	Solar	1.750 m ²	2.500 t/a	1.036 t KS/a	370 t/a
Ilbenstadt	Band	2.750 m ²	20.000 t/a	12.275 t KS/a	4.384 t/a
Oberscheld	Band	1.750 m ²	10.000 t/a	2.920 t KS/a	1.043 t/a
Summe		44.500 m²	47.500 t/a	30.979 t/a	11.064 t/a

Danach könnten an den dezentralen Trocknungsstandorten insgesamt ca. 31.000 t/a (25 % TR) getrocknet werden. Die Standorte sowie die Einzugsgebiete mit den Standorten der dorthin liefernden Kläranlagen sind in der nachfolgenden Abb. 7-6 dargestellt.

Die anfallenden Brüdenkondensatmengen sowie die daraus ergebenden CSB- und NH₄-N-Frachten als Rückbelastung für die Kläranlagen sind in den nachfolgenden Tabellen

- Tab. 7-2 und Tab. 7-3 zusammengestellt.
- Diese auf ca. 70 % getrockneten Klärschlämme werden per Lkw-Transport zur zentralen Verbrennungsanlage nach Gießen transportiert.
- Die übrigen nicht dezentral getrockneten Klärschlämme (Rest ca. 41.500 t/a= werden mit ca. 25 % TS per Lkw-Transport zur zentralen Anlage nach Gießen gebracht.
- Vor der Verbrennungsanlage werden die auf 25 % TS entwässerten Schlämme und die auf 70 % TS getrockneten Schlämme in einer Mischanlage weitgehend durchmischt.

Die Massenbilanz ergibt:

– getrockneter Schlamm:	11.064 t/a mit 70 % TR
– entwässerter Schlamm:	41.578 t/a mit 25 % TR
– gemischter Schlamm:	52.642 t/a mit 34 % TR

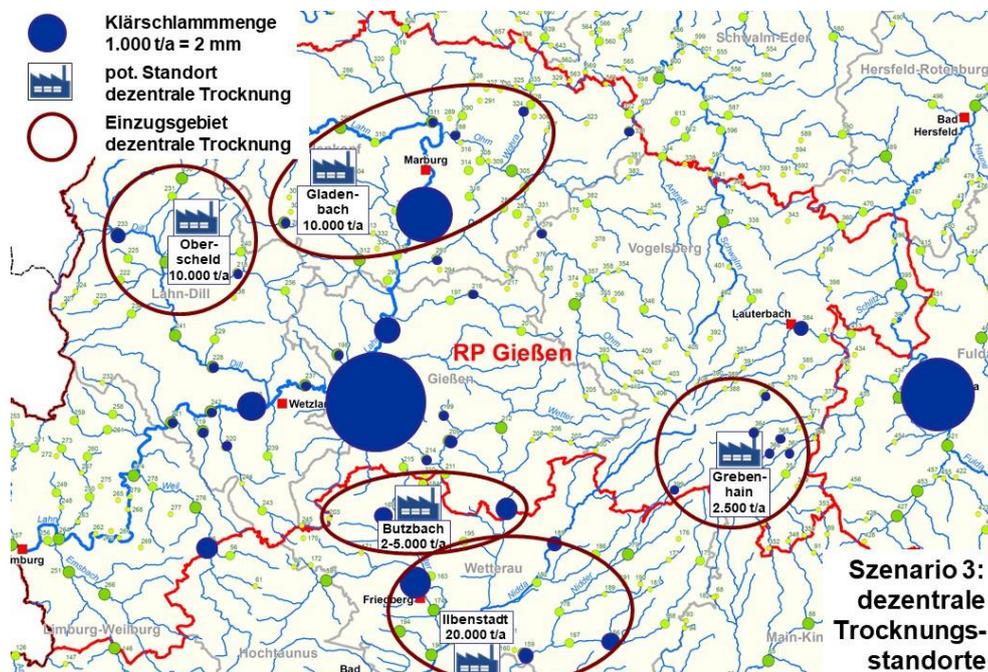


Abb. 7-6: Szenario 3: Dezentrale Standorte von Niedertemperatur-Trocknungsanlagen mit Nutzung von Abwärme, Einzugsgebiet der jeweiligen Standorte

- Der vermischte Schlamm muss am zentralen Standort weiter auf ca. 45 % getrocknet werden. Hier wird eine Scheibentrockner-Anlage vorgesehen, die direkt mit Hochtemperatur-Abwärme aus der Verbrennungsanlage betrieben wird. Es fällt am Standort Gießen noch eine Brüdenkondensatmenge von 12.332 m³/a an.
- Der so konfektionierte getrocknete Klärschlamm (40.309 t/a mit 45 % TR) wird in einer zentralen Wirbelschichtfeuerungs-Verbrennungsanlage thermisch verwertet.
- Die Klärschlammmasche (ca. 8.425 t/a) wird in einer zentralen Aufbereitungsanlage zu Phosphor-Rezyklat aufbereitet.

Die Einzel-Investitionen sowie die Jahreskosten der dezentralen Trocknungsanlagen des Szenarios 3 sind in den nachfolgenden Tab. 7-4 und Tab. 7-5 dargestellt.

Folgende Rückbelastungen aus den Brüdenkondensaten sind für die einzelnen Trocknungsstandorte im Szenario 3 zu erwarten:

Tab. 7-2: CSB-Rückbelastungen aus Brüdenkondensaten an den verschiedenen Trocknerstandorten des Szenarios 3

Standort	Trockner-Technologie	Brüdenkondensat Menge		CSB-Frachten		Einwohnerwerte CSB	
		m³/a	m³/d	Mittel	max.	Mittel	max.
				3.452 mg/l	9.647 mg/l	120 g CSB//EW*d)	
Butzbach	Band	3.096 m³/a	8,5 m³/d	29.276 g/d	81.815 g/d	244 EW	682 EW
Gladenbach	Solar	958 m³/a	2,6 m³/d	9.059 g/d	25.316 g/d	75 EW	211 EW
Grebenhain	Solar	100 m³/a	0,3 m³/d	945 g/d	2.641 g/d	8 EW	22 EW
Ilbenstadt	Band	7.891 m³/a	21,6 m³/d	74.627 g/d	208.555 g/d	622 EW	1.738 EW
Oberscheld	Band	1.877 m³/a	5,1 m³/d	17.752 g/d	49.609 g/d	148 EW	413 EW
Gießen	Scheiben	12.332 m³/a	33,8 m³/d	116.630 g/d	325.936 g/d	972 EW	2.716 EW
Summe		26.253 m³/a	71,9 m³/a	248.289 g/d	693.872 g/d	2.069 EW	5.782 EW

Tab. 7-3: NH₄-N-Rückbelastungen aus Brüdenkondensaten an den verschiedenen Trocknerstandorten des Szenarios 3

Standort	Trockner-Technologie	Brüdenkondensat		NH ₄ -N-Frachten		Einwohnerwerte NH ₄ -N	
		m³/a	m³/d	Mittel	max.	Mittel	max.
				1.068 mg/l	3.110 mg/l	10 g NH ₄ -N//EW*d)	
Butzbach	Band	3.096 m³/a	8,5 m³/d	9.058 g/d	26.375 g/d	906 EW	2.638 EW
Gladenbach	Solar	958 m³/a	2,6 m³/d	2.803 g/d	8.161 g/d	280 EW	816 EW
Grebenhain	Solar	100 m³/a	0,3 m³/d	292 g/d	851 g/d	29 EW	85 EW
Ilbenstadt	Band	7.891 m³/a	21,6 m³/d	23.089 g/d	67.234 g/d	2.309 EW	6.723 EW
Oberscheld	Band	1.877 m³/a	5,1 m³/d	5.492 g/d	15.993 g/d	549 EW	1.599 EW
Gießen	Scheiben	12.332 m³/a	33,8 m³/d	36.084 g/d	105.075 g/d	3.608 EW	10.508 EW
Summe		26.253 m³/a	71,9 m³/a	76.817 kg/a	223.690 kg/a	7.682 EW	22.369 EW

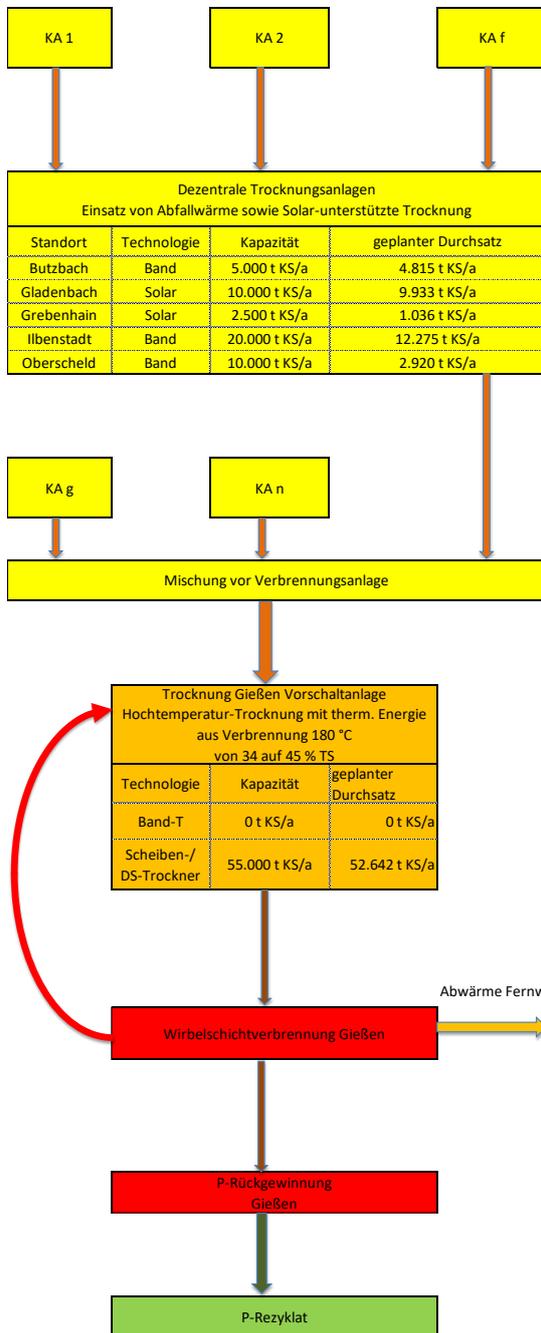
Für jeden einzelnen Trocknungsstandort ist zu prüfen, ob die Rückbelastung aus den Brüdenkondensaten in den Kläranlagen, in denen diese eingeleitet werden sollen, verarbeitet werden können. Vor allem ist zu prüfen, ob die für eine weitgehende Stickstoffelimination erforderliche gut abbaubare CSB-Fracht an den einzelnen Standorten ausreicht.

Insbesondere für den Standort Ilbenstadt ist eine zusätzliche Behandlung des Brüdenkondensates mit max. 1.738 EW_{CSB} und max. 6.723 EW_N zu erwarten, da der Standort Ilbenstadt an die Kläranlage Wöllstadt / Nieder-Wöllstadt angeschlossen ist, die eine Ausbaugröße von 12.000 EW aufweist. Alternativ ist für diesen Standort auch ein abwasserfreier Bandtrockner mit Ablufttechnologie einzusetzen, der allerdings mehr thermische Energie benötigt.

Sollte eine erste Überprüfung nach DWA-A 131 zum Schluss kommen, dass die Kläranlagenstandorte nicht in der Lage sind, die zusätzlichen Frachten zu behandeln, kann ein Speicher zum Ausgleich sowie zur bedarfsgerechten und gesteuerten Zudosierung des Brüdenkondensates Abhilfe schaffen.

Ggf. muss auch eine gesonderte Brüdenkondensatbehandlung z.B. durch Deammonifikation erfolgen.

Szenario 3
Dezentrale Trocknung an verschiedenen Standorten unter Nutzung von Abfallwärme, Mischung mit entwässertem Schlamm vor der Verbrennung



Schlamm / Produkt Konsistenz	Massenbilanz		
	Massen-OS	Wasser- verdampfung	Abwasser- menge
	72.557 t/a		
entwässertes Schlamm 25 % TS Teilmenge zu dezentralen Trocknungsanlagen	30.979 t/a		
Trocknung Wasserverdampfung		19.915 t/a	13.921 t/a
	4.815 t/a	3.096 t/a	3.096 t/a
	9.933 t/a	6.386 t/a	958 t/a
	1.036 t/a	666 t/a	100 t/a
	12.275 t/a	7.891 t/a	7.891 t/a
	2.920 t/a	1.877 t/a	1.877 t/a
getrockneter Schlamm 70 % Transport nach Gießen	11.064 t/a		
entwässertes Schlamm ohne Trocknung, Transport nach Gießen	41.578 t/a		
Mischschlamm	52.642 t/a		
Trocknung Wasserverdampfung		12.332 t/a	
	0 t/a	0 t/a	
	52.642 t/a	12.332 t/a	12.332 t/a
getrockneter Schlamm	40.309 t/a		
Wirbelschichtverbrennung		22.170 t/a	22.170 t/a
Klärschlammasche	8.426 t/a		

Abb. 7-7: Szenario 3: Dezentrale Niedertemperatur-Trocknung mit Nutzung von Abwärme, Transport des getrockneten Klärschlamm (70 % TR) zur zentralen Anlage (Standort Gießen), Vermischung mit entwässertem Schlamm (25 % TR) und anschließender Trocknung mit Abwärme aus der Klärschlammverbrennung am Standort Gießen vor der Wirbelschichtverbrennung

Tab. 7-4: Zusammenstellung der Investitionen für die dezentralen Trocknungsanlagen für das Szenario 3

		Szenario 3 Dezentrale Trocknungsanlagen						
			Grebenhain	Butzbach	Gladenbach	Ilbenstadt	Oberscheld	Summe
Trocknertyp			Solar ohne Abwärme	Band mit Abwärme	Solar m. Abwärme	Band mit Abwärme	Band mit Abwärme	
Kapazität			2.500 t/a	5.000 t/a	10.000 t/a	20.000 t/a	12.500 t/a	50.000 t/a
Input Klärschlamm OS			1.100 t/a	5.100 t/a	9.400 t/a	12.550 t/a	2.920 t/a	31.070 t/a
Input TS			25%	25%	25%	25%	25%	
Output TS			70%	70%	70%	70%	70%	
Output getrockneter Klärschlamm			393 t/a	1.821 t/a	3.357 t/a	4.482 t/a	1.043 t/a	11.096 t/a
Wasserverdampfung			707 t/a	3.279 t/a	6.043 t/a	8.068 t/a	1.877 t/a	19.974 t/a
bei 8.500 h/a			83 kg/h	386 kg/h	711 kg/h	949 kg/h	221 kg/h	
spez. WVD			0,20 t/m ² a	5,12 t/m ² a	1,29 t/m ² a	5,93 t/m ² a	2,76 t/m ² a	
Abwassermenge			0 m ³ a	3.279 m ³ a	0 m ³ a	8.068 m ³ a	1.877 m ³ a	13.224 m ³ a
Investitionen								
Grundstück	Fläche	50 €/m ²	282.750 €	82.250 €	351.750 €	134.750 €	85.750 €	937.250 €
Bau	Halle		500.000 €	155.000 €	800.000 €	300.000 €	160.000 €	1.915.000 €
	Erd- und Betonarbeiten		550.000 €	120.000 €	700.000 €	250.000 €	125.000 €	1.745.000 €
	Schlammannahme		50.000 €	170.000 €	120.000 €	450.000 €	300.000 €	1.090.000 €
	Sicherheit, Gründung, Ve	25%	275.000 €	111.250 €	405.000 €	250.000 €	146.250 €	1.187.500 €
	Summe Bau		1.375.000 €	556.250 €	2.025.000 €	1.250.000 €	731.250 €	5.937.500 €
	spez. Kosten Bau		1.250 €/t	109 €/t	215 €/t	100 €/t	250 €/t	
M+E	Technik		550.000 €	1.850.000 €	1.012.000 €	3.500.000 €	2.200.000 €	9.112.000 €
	Abluft		140.000 €	0 €	400.000 €	0 €	0 €	540.000 €
	Silo		0 €	200.000 €	330.000 €	350.000 €	350.000 €	1.230.000 €
	Sicherheit	25%	172.500 €	512.500 €	435.500 €	962.500 €	637.500 €	2.720.500 €
	Summe M+E		862.500 €	2.562.500 €	2.177.500 €	4.812.500 €	3.187.500 €	13.602.500 €
	spez. Kosten M+E		784 €/t	502 €/t	232 €/t	383 €/t	1.092 €/t	
Planung	pauschal	12%	268.500 €	374.250 €	504.300 €	727.500 €	470.250 €	2.344.800 €
Invest Gesamt			2.788.750 €	3.575.250 €	5.058.550 €	6.924.750 €	4.474.750 €	22.822.050 €
	spez. Investition		2.535 €/t	701 €/t	538 €/t	552 €/t	1.532 €/t	735 €/t

Tab. 7-5: Zusammenstellung der Jahreskosten für die dezentralen Trocknungsanlagen für das Szenario 3

Szenario 3 Dezentrale Trocknungsanlagen								
Alle Kosten netto			Grebenhain	Butzbach	Gladenbach	Ilbenstadt	Oberscheld	Summe
Trocknertyp			Solar ohne Abwärme	Band mit Abwärme	Solar m. Abwärme	Band mit Abwärme	Band mit Abwärme	
Kapazität			2.500 t/a	5.000 t/a	10.000 t/a	20.000 t/a	12.500 t/a	50.000 t/a
Input Klärschlamm OS			1.100 t/a	5.100 t/a	9.400 t/a	12.550 t/a	2.920 t/a	31.070 t/a
Jahreskosten								
Kapitalkosten	2,0%	Annuität						
Nutzungsdauer M+E	15 Jahre	a= 0,07783	107.010 €/a	43.290 €/a	157.597 €/a	97.282 €/a	56.910 €/a	462.089 €/a
Nutzungsdauer Bau	15 Jahre	a= 0,07783	67.124 €/a	199.428 €/a	169.465 €/a	374.535 €/a	248.069 €/a	1.058.621 €/a
Energiebedarf								
elektrisch			30 kWh/t WV	113 kWh/t WV	70 kWh/t WV	161 kWh/t WV	120 kWh/t WV	
			21.214 kWh/a	370.000 kWh/a	420.000 kWh/a	1.300.000 kWh/a	225.000 kWh/a	
		0,20 €/kWh	4.243 €/a	74.000 €/a	34.000 €/a	260.000 €/a	45.000 €/a	417.243 €/a
thermisch				0,00 €/kWh	0,00 €/kWh	0,00 €/kWh	0,00 €/kWh	
		8.500 h/a		350 kW	500 kW	1.375 kW	230 kW	
				907 kWh/t WVD	703 kWh/t WVD	1.449 kWh/t WVD	1.041 kWh/t WVD	
			0 kWh/a	2.975.000 kWh/a	4.250.000 kWh/a	11.687.500 kWh/a	1.955.000 kWh/a	
			0 €/a	0 €/a	0 €/a	0 €/a	0 €/a	0 €/a
Personalbedarf			2 h/Wo.	10 h/Wo.	15 h/Wo.	60 h/Wo.	30 h/Wo.	117 h/Wo.
		50 €/h	5.200 €/a	26.000 €/a	39.000 €/a	156.000 €/a	78.000 €/a	304.200 €/a
Wartung, Reparatur Bau		1,5%/a	20.625 €/a	8.344 €/a	30.375 €/a	18.750 €/a	10.969 €/a	
		5,0%/a	43.125 €/a	128.125 €/a	108.875 €/a	240.625 €/a	159.375 €/a	
Wartung, Reparatur			63.750 €/a	136.469 €/a	139.250 €/a	259.375 €/a	170.344 €/a	769.188 €/a
Versicherung		1,5%/a	33.563 €/a	46.781 €/a	63.038 €/a	90.938 €/a	58.781 €/a	293.100 €/a
Abwasserentsorgung		2,50 €/m ³	0 €/a	8.196 €/a	0 €/a	20.170 €/a	4.693 €/a	33.059 €/a
Jahreskosten			280.890 €/a	534.165 €/a	602.349 €/a	1.258.299 €/a	661.796 €/a	3.337.616 €/a
spez. Kosten			255,35 €/t	104,74 €/t	64,08 €/t	100,26 €/t	226,64 €/t	107,42 €/t

7.8 Mögliche Szenarien für das Klärschlammkonzept Mittelhessen unter Einbeziehung eines 2-stufigen thermochemischen Aufschlussverfahrens nach dem EUPHORE®-Verfahren

Die Szenarien 4 und 5 vereinen ein 2-stufiges thermochemisches Reduktions- und Oxidationsverfahren mit dem chemischen Aufschluss der Phosphate und einer Schwermetallentfrachtung durch Zugabe von Salzen z.B. von Magnesiumchlorid $MgCl_2$. Das Verfahren der EUPHORE®-GmbH beinhaltet also die thermische / energetische Verwertung der organischen Bestandteile des Klärschlammes, der chemische Aufschluss der vorhandenen Phosphate sowie die Schwermetallentfrachtung durch Zugabe von Additiven.

Beide Szenarien gehen von einer zentralen Anlage zum thermochemischen Aufschluss nach dem EUPHORE®-Verfahren am Standort Gießen aus.

Vergleichbar mit den Szenarien 1 und 2 werden für dieses Verfahren ebenfalls 2 Szenarien entwickelt:

- Szenario 4: direkte Behandlung des auf 25 % entwässerten Klärschlammes in der EUPHORE®-Anlage
- Szenario 5: Vortrocknung auf ca. 40 % TR durch Einsatz von Niedertemperatur-Abwärme, Behandlung des so auf 40 % vorgetrockneten Klärschlammes in der EUPHORE®-Anlage

7.8.1 Szenario 4: Zentrale EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) am Standort Gießen inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats

Folgende Verfahrensschritte werden für das Szenario 4 betrachtet:

- Die Nassschlämme werden am Standort der jeweiligen Kläranlage mittels mobiler Entwässerungsaggregate oder nach Transport auf eine größere Kläranlage mit fest installierter Entwässerung auf ca. 25 % TS entwässert.
- Alle auf ca. 25 % entwässerten Klärschlämme werden per Lkw-Transport zur zentralen Anlage nach Gießen gebracht.
- In Gießen wird der gesamte entwässerte Schlamm mit ca. 25 % TR in das Drehrohr des Thermochemischen Reduktions- und Oxidationsreaktors des EUPHORE®-Verfahrens eingebracht.
- Als Additive werden Alkali- und/oder Erdalkalichloride (z.B. $MgCl_2$) oder -sulfate zugegeben. Diese dissoziieren unmittelbar in der Schlammphase, womit einerseits der Schwermetallaustrag vorbereitet und andererseits die P-Löslichkeit im Ascheprodukt verbessert wird. Die Verwendung von Magnesium und/oder Kaliumsalzen führt darüber hinaus zu einer Anreicherung dieser wichtigen Makronährstoffe im Produkt.
- Trocknung und Verbrennung arbeiten weitgehend energieneutral; ein signifikanter Energieüberschuss zur Einspeisung in das Fernwärmenetz entsteht nicht.
- Das zu verdampfende Wasser wird über die Rauchgasreinigung ohne Kondensation als Wasserdampf in die Atmosphäre abgegeben.
- Der Output wird in einer zentralen Düngemittel-Produktionsanlage zu Phosphor-Dünger oder Mehrstoff-Mineraldünger (z.B. N-P-K-Dünger) konfektioniert.

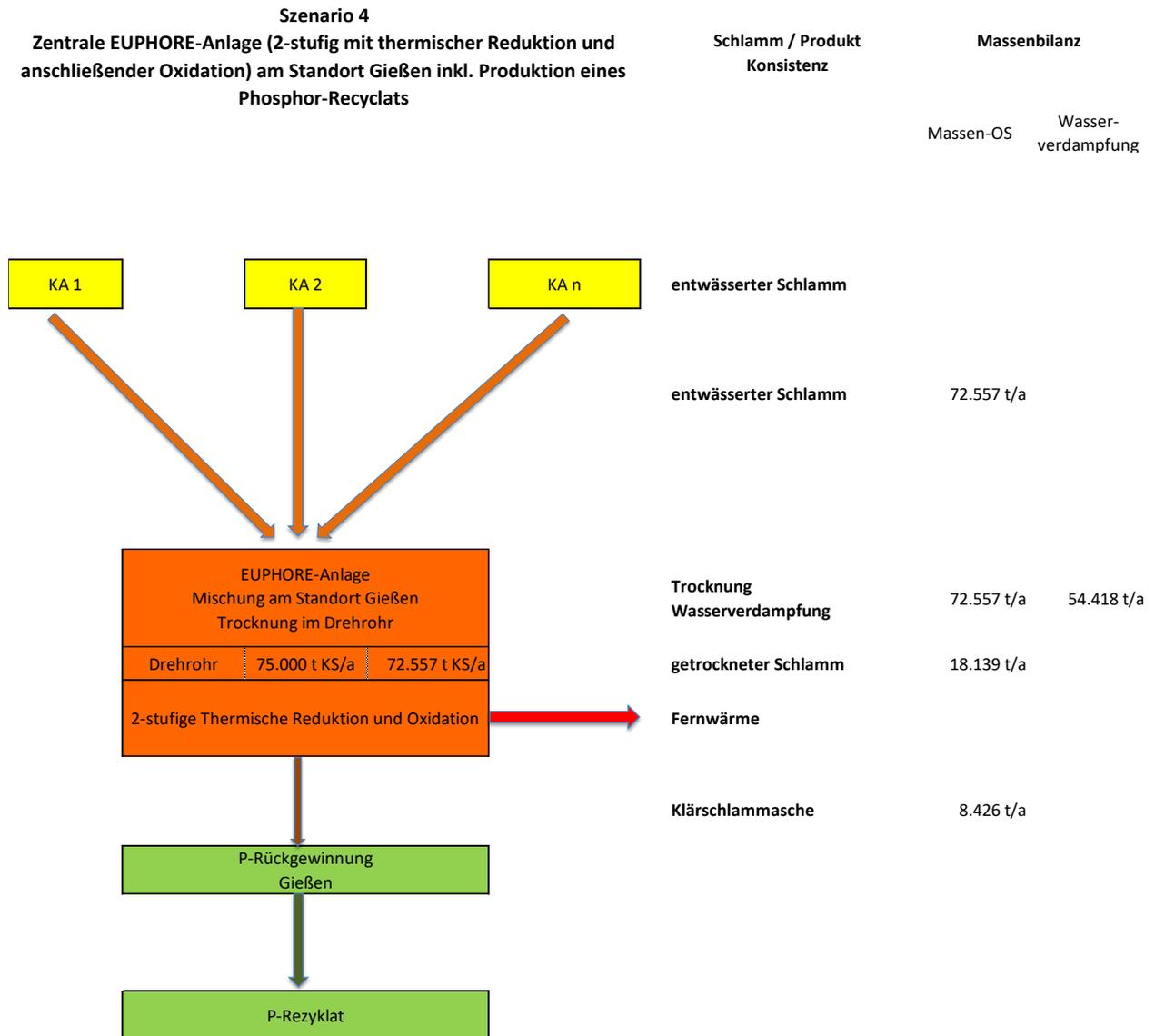


Abb. 7-8: Szenario 4: Zentrale EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) am Standort Gießen inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats

7.8.2 Szenario 5: Zentrale Niedertemperaturtrocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats

Das Szenario 5 geht ebenso von einer zentralen Anlage zur thermochemischen Wandlung und Aufschluss des Klärschlammes in einer EUPHORE-Anlage aus. In diesem Fall wird aber wie im Szenario 2 Niedertemperatur-Abwärme aus dem Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen mit einem Temperaturniveau von 60-65 °C (Vorlauf) und 40-45 °C (Rücklauf) genutzt, um den Schlamm auf ca. 40 % TR vorzutrocknen und so die auch im EUPHORE-Prozess entstehende

thermische Energie in das Fernwärmenetz einspeisen zu können. Folgende Verfahrensschritte werden für das Szenario 5 betrachtet:

- Die Nassschlämme werden am Standort der jeweiligen Kläranlage mittels mobiler Entwässerungsaggregate oder nach Transport auf eine größere Kläranlage mit fest installierter Entwässerung auf ca. 25 % TS entwässert.
- Alle auf ca. 25 % entwässerten Klärschlämme werden per Lkw-Transport zur zentralen Anlage nach Gießen gebracht.
- Der entwässerte Klärschlamm (ca. 72.559 t/a) wird am Standort Gießen unter Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme (Abfall-Wärme) aus dem Rücklauf der Fernwärme (60-65 °C (Vorlauf) und 40-45 °C (Rücklauf)) von ca. 25 % auf ca. 40 % TS getrocknet. Für dieses Szenario wird eine Bandtrockner-Anlage konzipiert.

Die Trocknung erfolgt an einem Standort, an dem Rücklauf-Abwärme aus dem Fernwärmenetz zur Verfügung steht. Bilanziell (unter Ansatz von Jahres-Mittelwerten) kann aus dem Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen ganzjährig eine Rücklaufwassermenge von ca. 150 m³/h mit einem Temperaturniveau von ca. 60-65 °C (Vorlauf) abgezogen werden. Unter Ansatz einer Rückspeisungs-Temperatur von 40-45 °C (Rücklauf) (entsprechend einem Delta-T = 20 K) ist damit eine Wärmemenge Q von

$$Q = m \text{ (kg/h)} * c_p \text{ (kJ/(kg*Delta-T))} * \text{Delta-T (kJ/h)}$$

$$Q = 150 \text{ m}^3/\text{h} * 1000 * 4,18 \text{ kJ/(kg*Delta-T)} * 20 = 12.540.000 \text{ kJ/h entspr. } 3.483 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{h}$$

zu erzielen.

Unter Ansatz einer erforderlichen Wasserverdampfung bei Trocknung von 25 % TR auf 40 % TR bei einer Klärschlammmenge von 72.559 t/a (25 % TR) ergibt sich eine erforderliche Wasserverdampfungsleistung von 72.559 t/a * (1 - 0,25/0,40) = 27.210 t/a. Ausgehend von einer spezifische erforderlichen Wärmemenge von ca. 930 kWh/t Wasserverdampfung (Erfahrungswerte von Niedertemperatur-Bandtrocknern) ist insgesamt eine Wärmemenge von 25,3 Mio. kWh/a bzw. i.M. 2.890 kWh/h erforderlich.

Damit ist in diesem Szenario 5 die Trocknung über die aus dem Fernwärmenetz zur Verfügung stehende Niedertemperatur-Energie möglich. .

- Der so konfektionierte getrocknete Klärschlamm (45.348 t/a mit 40 % TR) wird in der zentralen EUPHORE-Anlage thermisch verwertet und gleichzeitig chemisch aufgeschlossen.
- Aufgrund der Vortrocknung der Klärschlammteilmenge mit Abfallwärme ergibt sich ein Energie-Überschuss von ca. 31 Mio. kWh/a durch die thermische Verwertung des Klärschlammes, der in das Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen eingespeist werden kann.
- Als Additive werden Alkali- und/oder Erdalkalichloride (z.B. MgCl₂) oder -sulfate zugegeben. Diese dissoziieren unmittelbar in der Schlammphase, womit einerseits der Schwermetallaustrag vorbereitet und andererseits die P-Löslichkeit im Ascheprodukt verbessert wird. Die Verwendung von Magnesium und/oder Kaliumsalzen führt darüber hinaus zu einer Anreicherung dieser wichtigen Makronährstoffe im Produkt.
- Der Output ist bereits ein Düngemittel. Aus physikalischer Sicht (Kornfestigkeiten, Kornband) kann es zweckmäßig sein ihn in einer nachgeschalteten Anlage zu einem Phosphor-Dünger oder Mehrstoff-Mineraldünger (z.B. N-P-K-Dünger) weiter zu konfektionieren.

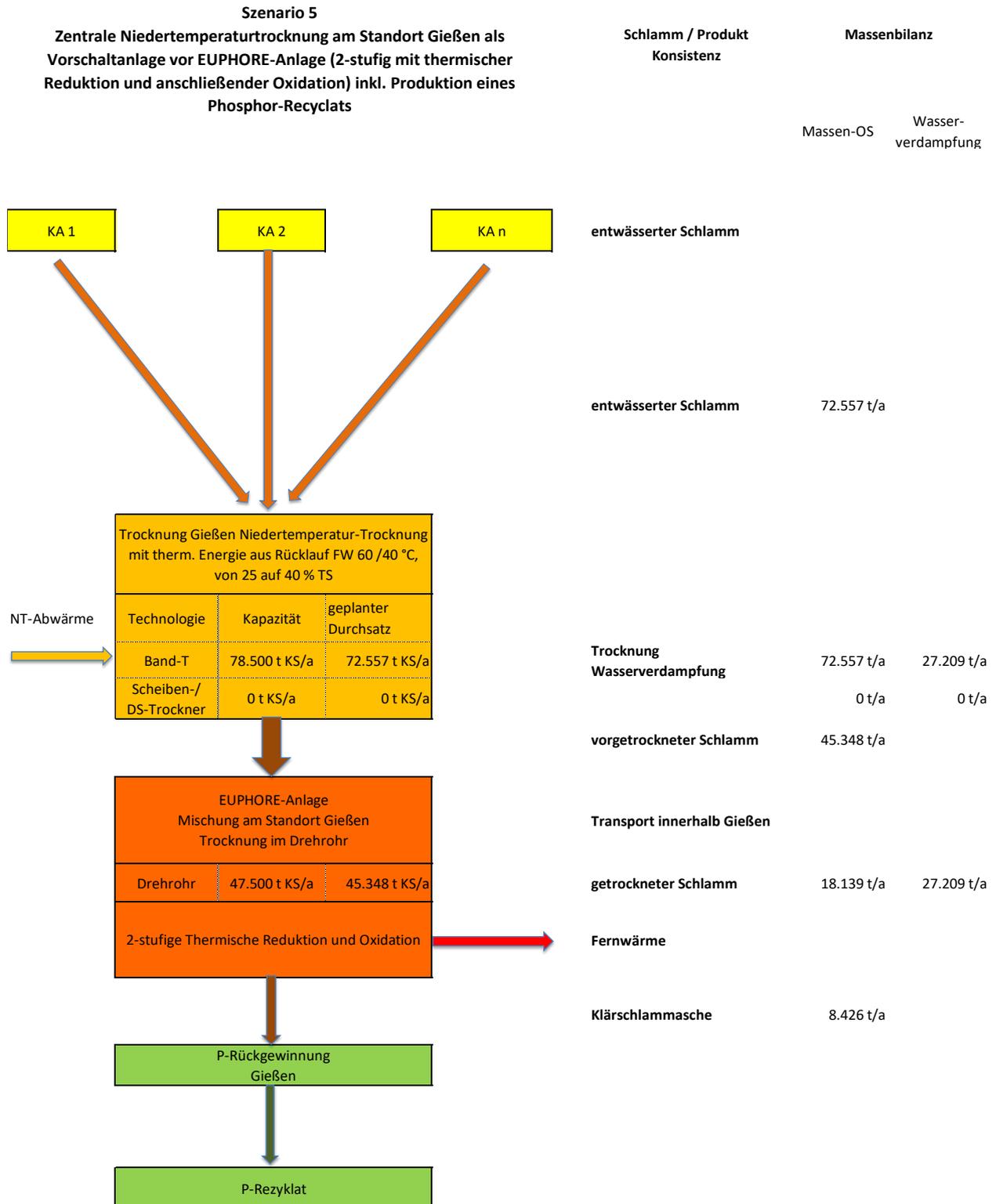


Abb. 7-9: Szenario 5: Zentrale Niedertemperaturtrocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats

Im Szenario 5 fällt durch den vorgesehenen Bandtrockner und die Trocknung von 25 % TR auf 40 % TR eine Menge von 27.209 m³/a entsprechend 74,5 m³/d Brüdenkondensat an. Dieses Brüdenkondensat führt zu folgenden CSB- und NH₄-N-Frachten, die als Rückbelastung vom Klärwerk behandelt werden muss (siehe auch Kap. 3.4):

- CSB: (120 g CSB/EW*d)
Mittelwert: $74,55 \text{ m}^3/\text{d} * 3.452 \text{ g}/\text{m}^3 = 257.330 \text{ g CSB}/\text{d}$ entspr. 2.144 EW_{CSB}
Maximum: $74,55 \text{ m}^3/\text{d} * 9.647 \text{ g}/\text{m}^3 = 719.138 \text{ g CSB}/\text{d}$ entspr. 5.993 EW_{CSB}
- NH₄-N: (10 g NH₄-N/EW*d bzw. 11 g TKN/EW*d)
Mittelwert: $74,55 \text{ m}^3/\text{d} * 1.068 \text{ g}/\text{m}^3 = 79.614 \text{ g NH}_4\text{-N}/\text{d}$ entspr. 7.961 EW_N
Maximum: $74,55 \text{ m}^3/\text{d} * 3.110 \text{ g}/\text{m}^3 = 231.835 \text{ g NH}_4\text{-N}/\text{d}$ entspr. 23.183 EW_N

8 Erarbeitung eines Realisierungsvorschlags

8.1 Kriterien zur Auswahl des Verfahrens der Klärschlammbehandlung durch Trocknung und Verbrennung

In Kap. 7.7 und 7.8 wurden verschiedene Szenarien für das Konzept zur thermischen und stofflichen Verwertung der Klärschlämme der Region Mittelhessen vorgestellt.

Szenario 1:

- Transport der entwässerten Schlämme (25 % TR) zur zentralen Anlage nach Gießen
- Trocknung der Schlämme auf 45 % TR mit Hochtemperatur-Wärme aus der Klärschlammverbrennung
- Wirbelschichtverbrennung
- Wärmenutzung im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen
- Aufbereitung der Asche zu P-Rezyklat

Szenario 2:

- Transport der entwässerten Schlämme (25 % TR) zur zentralen Anlage nach Gießen
- Trocknung der Schlämme auf 45 % TR mit Niedertemperatur-Abwärme aus dem Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen
- Wirbelschichtverbrennung
- Wärmenutzung im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen
- Aufbereitung der Asche zu P-Rezyklat

Szenario 3:

- Transport eines Teils der entwässerten Schlämme (25 % TR) zu dezentralen Trocknungsanlagen
- Dezentrale Trocknung dieser Schlämme auf ca. 70 % TR
- Transport der getrockneten Schlämme (70 % TR) sowie der restlichen entwässerten Schlämme (25 % TR) zur zentralen Anlage nach Gießen
- Mischung der getrockneten (70 % TR) sowie der entwässerten Schlämme (25 % TR) und Weibertrocknung auf ca. 45 % TR mit Hochtemperatur-Wärme aus der Klärschlammverbrennung
- Wirbelschichtverbrennung
- Wärmenutzung im Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen
- Aufbereitung der Asche zu P-Rezyklat

Diesen Szenarien 1 bis 3 gleich ist die Wirbelschicht-Verbrennung sowie die anschließende Aufbereitung der Asche zu P-Rezyklat.

Die Szenarien 4 und 5 beinhalten ein 2-stufiges thermisches Reduktions- und Oxidationsverfahren nach dem EUPHORE-Verfahren mit Zudosierung von z.B. Magnesium-Chorid zur weitgehenden Überführung der Schwermetalle in die Abluft und zum weiteren Aufschluss der Phosphate hin zu einem pflanzenverfügbaren Produkt.

Szenario 4:

Folgende Verfahrensschritte werden für das Szenario 4 betrachtet:

- Transport der entwässerten Schlämme (25 % TR) zur zentralen Anlage nach Gießen
- Behandlung der gesamten entwässerten Schlämme mit ca. 25 % TR im Drehrohr des Thermochemischen Reduktions- und Oxidationsreaktors des EUPHORE®-Verfahrens
- Zugabe von Additiven (z.B. Alkali- und/oder Erdalkalichloride (z.B. $MgCl_2$) oder -sulfate zugegeben.
- Der Output wird in einer zentralen Düngemittel-Produktionsanlage zu Phosphor-Dünger oder Mehrstoff-Mineraldünger (z.B. N-P-K-Dünger) konfektioniert.

Szenario 5:

Folgende Verfahrensschritte werden für das Szenario 4 betrachtet:

- Transport der entwässerten Schlämme (25 % TR) zur zentralen Anlage nach Gießen
- Trocknung der Schlämme auf ca. 40-45 % TR mit Niedertemperatur-Abwärme aus dem Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen
- Behandlung der gesamten entwässerten Schlämme mit ca. 40 % TR im Drehrohr des Thermochemischen Reduktions- und Oxidationsreaktors des EUPHORE®-Verfahrens
- Zugabe von Additiven (z.B. Alkali- und/oder Erdalkalichloride (z.B. $MgCl_2$) oder -sulfate zugegeben.
- Der Output wird in einer zentralen Düngemittel-Produktionsanlage zu Phosphor-Dünger oder Mehrstoff-Mineraldünger (z.B. N-P-K-Dünger) konfektioniert.

Die 5 Szenarien werden nachfolgend verglichen nach folgenden Kriterien:

- Gesamt-Kosten (als Jahreskosten €/a sowie als spezifische Kosten €/t Klärschlamm (25 % TR)
- CO₂-Emissionen aus Transport und Betrieb der Anlagen

8.1.1 Kriterium Kostenvergleich

Zur Ermittlung der Gesamt-Kosten sowie für den Kostenvergleich, zur Ermittlung der Jahreskosten und der spezifischen Kosten (€/t) wurden folgende spezifische Kostenansätze verwendet:

Kapitalkosten:

- Basis sind Richtpreisangebote verschiedener Hersteller von Trocknungsanlagen, Verbrennungsanlagen, Phosphor-Rückgewinnungsanlagen sowie Transportunternehmen
- spezifischer Grundstückspreis 50 €/m²
- Kosten für Planung, Gebühren pschl. 12 % der Investition
- Zinsen 2 %/a
- Nutzungsdauer einheitlich: 15 Jahre, Annuitätenfaktor $a = 0,07783$

Feste Betriebskosten

- Reparatur / Wartung / Unterhalt: 1,5 %/a der Investitionen Bautechnik
5,0 %/a der Investitionen M+E-Technik
- Versicherung: 1,0 %/a der Investitionen
- Personalkosten: 50.000 €/P*a
- Managementkosten: pschl. 200.000 €/a
- Analysenkosten: pschl. 100.000 €/a

Variable Betriebskosten (spez. Kosten gelten für Bezug und Einspeisung)

- Elektr. Energie: 0,20 €/kWh
- Therm. Energie: 0,00 €/kWh für 60/65 °C;
0,04 €/kWh für 90 °C
- Chemikalien: Marktpreise
- Reststoffentsorgung:
Rauchgasreinigungsrückstände 160,00 €/t
- Abwasserentsorgung 2,50 €/m³

Die Jahreskosten wurden über eine statische Kostenberechnung mit den oben genannten Ansätzen als Summe aus Kapitalkosten, festen und variablen Betriebskosten ermittelt. Die Tab. 8-1 zeigt eine Zusammenfassung der ermittelten Investitionen sowie Jahreskosten. Die genaue Kostenermittlung ist der Anlage zu entnehmen.

Danach weist das Szenario 4 mit der 2-stufigen Drehrohr-Ofen-Anlage mit vorgeschalteter Reduktions- und anschließender Oxidationszone der EuPhoRe GmbH mit ca. 112 €/t Klärschlamm die niedrigsten Kosten auf. Dieses Verfahren integriert durch die Zuführung von Alkalisalzen (z.B. Magnesiumchlorid) eine weitgehende Überfugung von Schwermetallen in das Rauchgas und damit in die Rauchgasreinigung sowie eine Überführung der Phosphate in weitgehend pflanzenverfügbare Verbindungen. Eine weitere Aufbereitung der Asche ist nur noch insofern erforderlich, dass eine Konfektionierung zu einem vermarktungsfähigen Dünger nachgeschaltet werden muss.

Das Szenario 1 mit einer zentralen Trocknung am Standort Gießen unter Einsatz von Hochtemperatur-Wärme aus der anschließenden Wirbelschicht-Verbrennung weist Kosten von ca. 119 €/t Klärschlamm auf.

Das Szenario 3 mit dezentralen Trocknungsanlagen ist mit ca. 150 €/t Klärschlamm deutlich teurer. Die geringeren Transportaufwendungen führen nur zu einer Reduzierung der Transportkosten in der Größenordnung von ca. 220.000 €/a entspr. ca. 3,00 €/t Klärschlamm. Die dezentralen Trocknungsanlagen erfordern aber Mehrinvestitionen von ca. 20 Mio. €, was zu entsprechend hohen Kapitalkosten führt.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Realisierung von dezentralen Trocknungsanlagen als nicht sinnvoll anzusehen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt auch, dass die Kapitalkosten mit ca. 35 – 50 % der Gesamtjahreskosten den deutlich größten Anteil an den Gesamtkosten ausmacht.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und 8-2 sind die spezifischen Behandlungskosten pro t Klärschlamm bei Ansatz von Abschreibungszeiten der Investitionen von 15 Jahren zusammengestellt.

Tab. 8-1: Kostenvergleich der in Kap. 7.7 und 7.8 erläuterten Szenarien (inkl. Transport)

Klärschlammmenge entwässert	72.557 t/a	Szenario 1	Szenario 2a	Szenario 2b	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
TR-Gehalt	25,0% TR	Zentrale HT-Trocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor der Verbrennung	Zentrale NT-Trocknung (<u>Bandtrockner</u>) am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor der Verbrennung	Zentrale NT-Trocknung (<u>Solartrockner</u>) am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor der Verbrennung	Dezentrale Trocknung an verschiedenen Standorten unter Nutzung von Abfallwärme, Mischung mit entwässertem Schlamm vor der Verbrennung	Zentrale EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) am Standort Gießen inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats	Zentrale NT-Trocknung (Bandtrockner) am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor EUPHORE-Anlage (2-stufig Reduktion und Oxidation) inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats
Klärschlammmenge TR	18.139 t TR/a						
P-Gehalt	25,2 g P / kg TS						
P-Menge	458 t P/a						
Asche-Menge	8.426 t/a						
INVESTITIONEN		38.798.500,00 €	53.437.300,00 €	57.865.500,00 €	60.360.550,00 €	39.823.800,00 €	55.680.600,00 €
KAPITALKOSTEN		3.019.511,59 €/a	4.158.783,11 €/a	4.503.409,86 €/a	4.697.588,31 €/a	3.099.306,04 €/a	4.333.368,99 €/a
FESTE BETRIEBSKOSTEN		2.455.937,50 €/a	3.187.462,50 €/a	2.986.000,00 €/a	3.603.025,00 €/a	3.185.345,44 €/a	3.971.276,69 €/a
SUMME VARIABLE BETRIEBSKOSTEN		3.127.767,82 €/a	2.303.297,05 €/a	1.877.975,69 €/a	2.590.513,73 €/a	1.828.118,14 €/a	1.341.670,75 €/a
SUMME JAHRESKOSTEN		8.603.216,91 €/a	9.649.542,66 €/a	9.367.385,55 €/a	10.891.127,04 €/a	8.112.769,62 €/a	9.646.316,44 €/a
SPEZIFISCHE KOSTEN (Trocknung und Verbrennung)		118,57 €/t KS	132,99 €/t KS	129,10 €/t KS	150,11 €/t KS	111,81 €/t KS	132,95 €/t KS

Tab. 8-2: Kostenvergleich der in Kap. 5.5 Szenarien zur Phosphor-Rückgewinnung; (Szenario P1 beinhaltet den Transport der Asche zum Standort Infraserb Höchst, die variablen Betriebskosten in Szenario P3 beinhalten die Erlöse aus dem Düngemittel)

Klärschlammmenge entwässert	72.557 t/a	Szenario P1	Szenario P2	Szenario P3
TR-Gehalt	25,0% TR	Ascheverarbeitung am Standort Infraserb am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor der Verbrennung	Zentrale EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) am Standort Gießen inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats	Zentrale Produktion am Standort Gießen nach dem pontes pabuli Verfahren
Klärschlammmenge TR	18.139 t TR/a			
P-Gehalt	25,2 g P / kg TS			
P-Menge	458 t P/a			
Asche-Menge	8.426 t/a			
INVESTITIONEN		0,00 €		9.100.000,00 €
KAPITALKOSTEN		0,00 €/a	s. Szenario 4 bzw. 5 P-Recycling in Kosten für therm. Behandlung integriert	656.407,79 €/a
FESTE BETRIEBSKOSTEN		0,00 €/a		204.140,00 €/a
SUMME VARIABLE BETRIEBSKOSTEN		877.041,00 €/a		-260.000,00 €/a
SUMME JAHRESKOSTEN		877.041,00 €/a		600.547,79 €/a
SPEZIFISCHE KOSTEN (P-Rückgewinnung)		12,09 €/t KS		8,28 €/t KS

8.1.2 Kriterium CO₂-Emission

Die oben beschriebenen Szenarien wurden ergänzend zu den wirtschaftlichen Kriterien nach Kriterium der CO₂-Emissionen verglichen. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie konnte allerdings keine systematische Lebenszyklus-Analyse (Life Cycle Analysis) oder gar komplette Ökobilanz mit Betrachtung von Abfallströmen und Auswirkungen von der Rohstoffgewinnung über den Bau, Betrieb sowie dem Rückbau der Anlagen durchgeführt werden.

Das Kriterium der CO₂-Emission beschränkt sich in diesem Fall auf die CO₂-Emissionen aus

- Klärschlammtransport
- elektrischem Energiebedarf
- thermischem Energiebedarf
- Einspeisung bzw. Nutzung elektrischer Energie aus der Verwertung der thermischen Energie der Klärschlammverbrennung
- Einspeisung thermischer Energie aus der Verwertung der thermischen Energie der Klärschlammverbrennung in das Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen

Folgende spezifische Faktoren wurde angesetzt :

Transport mit Lkw:

- mittlere Nutzlast: 20 t
- Fahrt-km: Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass die Lkw mit einer mittleren Nutzlast von 20 t vom Anfallort zum Verarbeitungsort fahren und leer (mit leeren Containern) zurückfahren. Daher wird für die Transport-km jeweils die doppelte Entfernung angesetzt.
- Verbrauch: 32 L Diesel / 100 km
es wird kein Verbrauchs-Unterschied zwischen voller Beladung und Leerfahrt angesetzt
- CO₂-Emission: 2,91 kg CO₂ / L Diesel
0,93 kg CO₂ / km

Elektrische Energie: 0,489 kg CO₂ / kWh (Strommix Deutschland 2017)
(Statista 2019)

dieser Wert wird sowohl für den Strombedarf der Anlagen als auch für die Einspeisung elektrischer Energie aus dem Klärschlammverbrennungsprozess in das Stromnetz angesetzt.

Thermische Energie:

- Niedertemperatur-Wärme 0,0 kg CO₂ / kWh (da ausschließlich Abwärme genutzt wird, die anderweitig nicht genutzt werden kann)
- Hochtemperatur-Wärme entsteht bei der Verbrennung getrockneten Klärschlammes,
kann in das Fernwärme-Netz der Stadtwerke Gießen eingespeist werden und substituiert dort fossile Energieträger (z.B. Erdgas)
Ansatz: 0,2 kg CO₂ / kWh
für die Wandlung und Einspeisung thermischer Energie in das Fernwärmenetz der Stadtwerke Gießen wird pauschal ein Wirkungsgrad-Verlust von 20 % (bezogen auf die im getrockneten Schlamm enthaltene Primärenergie) angesetzt.

Die mit dem Energiebedarf der P-Rückgewinnung verbundenen Emissionen wurden nicht bewertet. Beim pontes pabuli Verfahren sind diese derzeit nicht belastbar zu beziffern, beim SeraPlant Verfahren müssten die energiebedingten CO₂-Emissionen des Gesamtprozesses im Rahmen der Allokation auf den Anteil der verarbeiteten Klärschlammaschen aus Mittelhessen an der insgesamt nach diesem Verfahren künftig am Standort Frankfurt-Höchst verarbeiteten Menge heruntergebrochen werden (Allokation nach Masse). Da letztere noch nicht feststeht bzw. da die entsprechenden Gesamtenergiebedarfe dem Konsortium auch zukünftig nicht bekannt sein werden, ist keine Allokation möglich.

Die nachstehenden Tabellen Tab. 8-3 bis Tab. 8-7 zeigen die Zusammenstellung der Transport-km, elektrische und thermische Energieverbräuche (positive Werte) sowie Einspeisungen elektrischer und thermischer Energie in die Versorgungsnetze sowie die sich mit den oben genannten spezifischen Faktoren ergebenden CO₂-Emissionen.

Negative Werte bedeuten dabei Einsparungen der CO₂-Emissionen, positive Werte zusätzliche CO₂-Emissionen durch den Betrieb der Klärschlammverwertung in dem mittelhessischen Konzept.

Der Vergleich zeigt, dass das Szenario 2 mit einem Wert von - 6.400 t CO₂/a vor allem bedingt durch die Niedertemperatur-Vortrocknung unter Nutzung der Abwärme aus dem Fernwärmesystem das Szenario ist, welches unter den beschriebenen Randbedingungen durch die Substitution fossiler Energieträger einen deutlich positiven CO₂-Footprint aufweist.

Der ursprüngliche Gedanke, durch dezentrale Trocknungsstandorte insbesondere die Transportentfernungen und damit auch die CO₂-Emissionen aus dem Transport deutlich zu reduzieren, kann in dem aktuellen Szenario 3 mit den sich aus der Befragung ergebenden Standorten für die dezentralen Trocknungsstandorte nur geringfügig umgesetzt werden. Die erforderlichen Transport-km werden in diesem Szenario zwar um ca. 14.000 km/a reduziert, dies fällt jedoch in der Gesamt-Bilanz nicht ins Gewicht.

Tab. 8-3: CO₂-Bilanz des Szenarios 1 Zentrale Hochtemperatur-Trocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor der Verbrennung (siehe Kap. 7.7)

CO ₂ -Bilanz Szenario 1	Transportenergie Lkw		elektrische Energie		thermische Energie	
	286.093 km		1.717.175 kWh/a		-7.631.887 kWh/a	
0,93 kg CO ₂ /km	266,4 t CO ₂ /a	0,489 kg CO ₂ /kWh	839,7 t CO ₂ /a	0,20 kg CO ₂ /kWh	-1.526,4 t CO ₂ /a	
-420,3 t CO ₂ /a						

Tab. 8-4: CO₂-Bilanz des Szenarios 2 Zentrale Niedertemperatur-Trocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor der Verbrennung (siehe Kap. 7.7)

CO ₂ -Bilanz Szenario 2	Transportenergie Lkw		elektrische Energie		thermische Energie	
	286.093 km		1.717.175 kWh/a		-37.621.979 kWh/a	
0,93 kg CO ₂ /km	266,4 t CO ₂ /a	0,489 kg CO ₂ /kWh	839,7 t CO ₂ /a	0,20 kg CO ₂ /kWh	-7.524,4 t CO ₂ /a	
-6.418,3 t CO ₂ /a						

Tab. 8-5: CO₂-Bilanz des Szenarios 3 Dezentrale Trocknung an verschiedenen Standorten unter Nutzung von Abfallwärme, Mischung mit entwässertem Schlamm vor der Verbrennung (siehe Kap. 7.7)

CO ₂ -Bilanz Szenario 3	Transportenergie Lkw		elektrische Energie		thermische Energie	
	272.024 km		2.216.456 kWh/a		-27.139.524 kWh/a	
0,93 kg CO ₂ /km	253,3 t CO ₂ /a	0,489 kg CO ₂ /kWh	1.083,8 t CO ₂ /a	0,20 kg CO ₂ /kWh	-5.427,9 t CO ₂ /a	
-4.090,7 t CO ₂ /a						

Tab. 8-6: CO₂-Bilanz des Szenarios 4 Zentrale EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) am Standort Gießen inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats (siehe Kap. 7.8)

CO ₂ -Bilanz Szenario 4	Transportenergie Lkw		elektrische Energie		thermische Energie	
		286.093 km		5.737.500 kWh/a		-12.576.490 kWh/a
	0,93 kg CO ₂ /km	266,4 t CO ₂ /a	0,489 kg CO ₂ /kWh	2.805,6 t CO ₂ /a	0,20 kg CO ₂ /kWh	-2.515,3 t CO ₂ /a
	556,7 t CO ₂ /a					

Tab. 8-7: CO₂-Bilanz des Szenarios 5 Zentrale Niedertemperaturtrocknung am Standort Gießen als Vorschaltanlage vor EUPHORE-Anlage (2-stufig mit thermischer Reduktion und anschließender Oxidation) inkl. Produktion eines Phosphor-Recyclats (siehe Kap. 7.8)

CO ₂ -Bilanz Szenario 5	Transportenergie Lkw		elektrische Energie		thermische Energie	
		286.093 km		6.443.919 kWh/a		-31.078.442 kWh/a
	0,93 kg CO ₂ /km	266,4 t CO ₂ /a	0,489 kg CO ₂ /kWh	3.151,1 t CO ₂ /a	0,20 kg CO ₂ /kWh	-6.215,7 t CO ₂ /a
	-2.798,2 t CO ₂ /a					

8.2 Kriterien zur Auswahl des Verfahrens der Phosphor-Rückgewinnung

Die folgenden Kriterien werden zur Auswahl des P-Rückgewinnungsverfahrens vorgeschlagen, sind jedoch nicht abschließend und müssten in nachgelagerten Diskussionen im Kreis der Akteure ggfs. erweitert und priorisiert werden:

- **Genehmigungsumfang**

Dieser reduziert sich, wenn in der Gesamtkonzeption dem Szenario P1 bzw. P2 der Vorzug gegeben würde. Da im Modell P1 (SeraPlant) die Verarbeitung der Asche extern erfolgt, obliegt die Genehmigung nicht dem mittelhessischen Konsortium. Im Szenario P2 entfällt eine separate Betrachtung des Genehmigungsumfangs für die P-Rückgewinnung, da diese integraler Bestandteil des reduktiv/oxidativen thermochemischen Verfahrens ist. In Szenario P3 liegt die Genehmigungsverantwortung beim mittelhessischen Konsortium; es wäre zusätzlich eine chemie-technische Anlage zu genehmigen.

- **Ausfallrisiko bez. Erfüllung P-Recyclingpflicht**

Der Betreiber der Verbrennungsanlage tritt – sofern keine vorgelagerte P-Rückgewinnung aus dem Abwasser oder Schlamm erfolgt (was in diesem Konzept der Fall sein wird) in die Pflicht, die vorgegebene Recyclingquote von 80% zu erfüllen.

Die Erfüllung stünde bei dem Szenario P1 dann in Gefahr wenn die Verarbeitungskette wegbricht. Eine Ursache könnte eine Nicht-Verlängerung des zu schließenden Vertrags sein (weswegen zwingend auf eine Synchronisierung der Lieferverträge für Klärschlamm und des Abnahmevertrags in diesem Modell zu achten ist!). Eine weiterer Anlass könnte ein längerfristiger Anlagenausfall beim externen Verarbeiter sein.

Im Falle des Szenarios P2 ist dieses Risiko beherrschbar (erforderlichenfalls Abgabe des Zwischenproduktes an einen Anwender), da z.B. auf Hersteller von Düngekalken ausgewichen werden kann.

Im Fall des Szenarios P3 ist das Risiko wg. der maximalen Fertigungstiefe auch maximal beherrschbar, da das P-Recycling nach jetziger Sicht in der Hand des Betreibers der Verbrennungsanlage liegen wird.

- **Externalisierung von Havarie-Risiko beim P-Recycling**

In der chemie-technischen Anlage zum P-Recycling werden möglicherweise umweltgefährdende Stoffe gelagert und gehandhabt. Die damit verbundenen Risiken werden in den Szenarien P1 und P2 vollständig externalisiert. Beim Szenario P3 tritt der Betreiber entsprechend in die Haftungspflicht und deren Absicherung.

- **Invest für P-Recycling**

Dieser Punkt entfällt im Szenario P1, da die Investition vollständig außerhalb des Konsortiums liegt. Im Szenario P2 könnte eine Splittung der Investitionen kalkulatorisch auf die thermische Behandlung und das P-Recycling erfolgen (Äquivalenzbetrachtung in Kapitel 5). In Szenario P3 ist der Invest für das P-Recycling dezidiert darstellbar. Die Frage des Investitionsvolumens ist insbesondere vor dem Hintergrund der strategischen Entscheidung (langfristige Verbindlichkeiten etc.) möglicherweise von Bedeutung.

- **Erfordernis zum Aufbau von Vertriebsstrukturen**

Ob am Standort Gießen kein Produkt (Szenario P1), ein Zwischenprodukt (Szenario P2) oder ein Endprodukt (Szenario P3) gefertigt wird, beeinflusst das Erfordernis eigene Vertriebsstrukturen aufzubauen. Wenn dies nötig wird bestehen die Alternativen die Produktionsmenge an den Landhandel abzugeben bzw. in die Direktvermarktung zu gehen. Dies lässt sich sicherlich darstellen stellt aber für die Mitglieder des Konsortiums ein vollkommen neues Geschäftsfeld dar. Der Aspekt der Direktvermarktung wird im Rahmen der Konzeptphase für das RePhoR-Projekt MHRRegPhos beleuchtet.

- **Erfüllungsgrad des Regionalitätsanspruchs der P-Rückgewinnung**

Je nachdem, wie eng der Anspruch an die regionalen Stoffkreisläufe ausgelegt wird, wäre die Szenarien P1, P2 und P3 unterschiedlich zu bewerten. Die engste Schließung des Kreislaufes wäre bei P3 gegeben, gefolgt von P2 und P1. Bei Szenario P3 wäre möglicherweise sogar eine Dokumentation des Endverbleibs des P realisierbar.

- **Förderfähigkeit speziell im Rahmen von RePhoR**

Die Förderbekanntmachung zur RePhoR-Programm sieht vor, dass nach Bewertung der insgesamt 19 Konzepte ausgewählte Projekte zur Antragstellung für die Ausführungsphase, d.h. den Aufbau eines regionalen P-Recyclings aufgefordert werden. Es ist damit zu rechnen, dass insgesamt 5 bis 6 Projekte ausgewählt und mit einem substanziellen Betrag hinsichtlich des P-Recyclings gefördert werden. Somit erscheint eine Verarbeitung der Asche gem. Szenario P1 nicht förderfähig, eine Umsetzung gem. Szenario P2 zumindest in Teilen förderfähig (zum Beispiel im Rahmen einer Äquivalenzbetrachtung, bei der der rein thermische Anteil der Invest-Kosten abgezogen wird) und eine Umsetzung gem. Szenario 3 voll förderfähig. Es wird erwartet dass, die Auswahl von zu fördernden Projekten u.a. einen Regional- und Technologie-Proporz berücksichtigen wird. Dies wäre bei einer Entscheidung zwischen den Szenarien P2 und P3 ein zu berücksichtigender Aspekt.

- **Technologischer Reifegrad**

Der technologische Reifegrad beeinflusst das Risikoempfinden des Investors in seiner Entscheidung für eine Technologie. Für Szenario P1 ist dieses externalisiert und muss nicht direkt berücksichtigt werden. Für die Szenarien P2 und P3 spielt der technologische Reifegrad eine Rolle innerhalb des Konsortiums. Hierzu ist festzuhalten, dass für das Eu-PhoRe-Verfahren Referenzanlagen existieren, für pontes pabuli hingegen nicht.

8.3 Empfehlung für die Ableitung eines Realisierungsvorschlags

Da die Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung rechtlich verankert und das Ende der bodenbezogenen Klärschlammverwertung für einen Großteil des hier betrachteten Klärschlammes terminiert ist, handelt es sich bei dem Projekt der energetischen und stofflichen Klärschlammverwertung in Mittelhessen um eine Aufgabe der Daseinsvorsorge. Unter der Prämisse, dass die sich ergebenden Aufgaben schwerlich von den einzelnen Kläranlagen im Rahmen solitärer Lösungen gelöst werden können, sollte an dem Verbundkonzept und der Interkommunalen Zusammenarbeit festgehalten werden.

Die konkrete Zusammensetzung des Verbundes bestimmt über die tatsächlich zu handhabende Klärschlammmenge sowie deren Qualität. Beide Aspekte zusammen wirken hinein in die komplette Prozesskette und in die sich dann ergebende Kostenstruktur unter Berücksichtigung von

Transport, Trocknung, Handhabung der Brüden, thermische Behandlung, Verarbeitung der Asche sowie die Genehmigungskosten.

Die im Rahmen der Machbarkeitsstudie durchgeführte Kalkulation der spezifischen Kosten ist rechnerisch verknüpft mit der KlärschlammDatenbank (bisherige „Portfolio-Klärschlämme“). Insofern kann bei der weitergehenden Konkretisierung des Teilnehmerkreises die Rückwirkung auf die Kosten in einem iterativen Prozess mitgeführt und in den einzelnen Kostenblöcken abgebildet werden.

Mit Blick auf die obigen Ausführungen wird die folgende Priorisierung von Entscheidungskriterien vorgeschlagen

- Priorität 1: Kosten des Gesamtvorhabens
- Priorität 2: Förderfähigkeit im RePhoR-Programm (mit entsprechender Rückkopplung zu den Kosten allerdings nur im Fall einer tatsächlichen Förderung)
- Priorität 3 CO₂-Emissionen

9 Sonstiges

9.1 Mögliche rechtliche Modelle zur gemeinsamen Klärschlammverwertung

Im Rahmen der Bearbeitung der Machbarkeitsstudie wurden insbesondere folgende juristische Aspekte diskutiert:

- Kooperationsvertrag zwischen Stadtwerke Gießen AG (SWG) und Mittelhessische Wasserbetriebe (MWB)
- Kooperationsvertrag zwischen MWB und weiteren kommunalen Kläranlagenbetreibern zur gemeinsamen Klärschlamm Entsorgung (interkommunale Zusammenarbeit)
- Erste und zweite Absichtserklärung (Letter of Intent) zur partnerschaftlichen Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts „thermische Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung“ zwischen Stadtwerken Gießen AG (SWG) und Mittelhessischen Wasserbetrieben (MWB) sowie weiteren kommunalen Kläranlagenbetreibern

Nachfolgend werden mögliche rechtliche Modelle zur gemeinsamen Klärschlammverwertung mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen dargestellt.

9.1.1 Gründung eines Zweckverbandes

Gemeinden und Landkreise können durch Vereinbarung kommunale Zweckverbände bilden. An diesen können auch sonstige Körperschaften, Anstalten und Stiftungen des öffentlichen Rechts sowie natürliche Personen und juristische Personen des Privatrechts beteiligt werden. Mit einem Zweckverband wird eine selbstständige juristische Person geschaffen, auf welche die dem Verband angehörenden Kommunen eigene Aufgaben und Hoheitsbefugnisse übertragen.

Im Regierungsbezirk Gießen gibt es derzeit sieben Zweckverbände, über die das Dezernat I 13 – Justizariat und Kommunales – des Regierungspräsidiums Gießen die Aufsicht führt. Dabei handelt es sich um: Zweckverband Naturpark „Hoher Vogelsberg“, Abwasserverband AV Wetzlar, Zweckverband Mittelhessische Wasserwerke ZMW, Zweckverband Hallenbad Waldgirmes, Zweckverband Abfallwirtschaft Vogelsberg ZAV, Regionaler Nahverkehrsverband Marburg-Biedenkopf, ekom 21.

Der Zweckverband ist eine eigene Körperschaft des öffentlichen Rechts. Er verwaltet seine Angelegenheiten im Rahmen der Gesetze unter eigener Verantwortung. Die Rechtsverhältnisse des Zweckverbandes werden durch eine Verbandssatzung geregelt. Soweit nicht das Gesetz oder die Verbandssatzung etwas anderes bestimmt, sind auf den Zweckverband die für Gemeinden geltenden Vorschriften sinngemäß anzuwenden. Das Recht und die Pflicht der in einem Zweckverband zusammengeschlossenen Gemeinden und Landkreise, die übertragenen Aufgaben zu erfüllen und die dazu notwendigen Befugnisse auszuüben, gehen auf den Zweckverband über. Der Zweckverband kann an Stelle der Verbandsmitglieder nach den für die übertragenen Aufgaben geltenden Vorschriften Satzungen erlassen sowie den Anschluss- und Benutzungszwang vorschreiben. Die Verbandssatzung kann den Übergang einzelner Befugnisse, insbesondere des Rechts, Satzungen zu erlassen, ausschließen oder auf den örtlichen Geltungsbereich einzelner Verbandsmitglieder beschränken; die Zuständigkeit der Verbandsmitglieder bleibt insoweit unberührt. Bestehende Beteiligungen der Gemeinden und Landkreise an Unternehmen und Verbänden, die denselben oder ähnlichen Aufgaben dienen wie der Zweckverband, bleiben unberührt. Hat nach der Verbandssatzung der Zweckverband anzustreben, solche Beteiligungen an Stelle

seiner Verbandsmitglieder zu übernehmen, sind die einzelnen Verbandsmitglieder zu den entsprechenden Rechtsgeschäften und Verwaltungsmaßnahmen verpflichtet. Zur Bildung eines Zweckverbandes als Freiverband vereinbaren die Beteiligten die Verbandssatzung. Die Verbandssatzung muss bestimmen

1. den Namen und Sitz des Zweckverbandes,
2. die Verbandsmitglieder und, soweit die dem Zweckverband übertragenen Aufgaben es erfordern, den räumlichen Wirkungsbereich des Zweckverbandes,
3. die Aufgaben,
4. die Verfassung und Verwaltung, insbesondere die Zuständigkeit der Verbandsorgane, die Sitz- und Stimmverteilung in den Verbandsorganen und die Amtszeit ihrer Mitglieder sowie die Bestellung der Mitglieder des Vorstandes,
5. die Art der öffentlichen Bekanntmachungen,
6. den Maßstab, nach dem die Verbandsmitglieder zur Deckung des Finanzbedarfs beizutragen haben,
7. die Abwicklung im Falle der Auflösung des Zweckverbandes.

Die Verbandssatzung bedarf der Genehmigung der Aufsichtsbehörde. Will die Aufsichtsbehörde die Genehmigung versagen, hat sie den Beteiligten vorher Gelegenheit zu geben, ihre Auffassung in einer mündlichen Verhandlung darzulegen. Ist für die Durchführung einer Aufgabe, für die der Zweckverband gebildet werden soll, eine besondere Genehmigung erforderlich, darf die Verbandssatzung nicht genehmigt werden, wenn zu erwarten ist, dass die besondere Genehmigung versagt wird. Die Verbandssatzung ist mit dem Genehmigungsvermerk der Aufsichtsbehörde öffentlich bekannt zu machen. Der Zweckverband entsteht, wenn kein späterer Zeitpunkt in der Verbandssatzung bestimmt ist, an dem auf die öffentliche Bekanntmachung folgenden Tage. Neben der Verbandssatzung können die Beteiligten schriftliche Abmachungen über den Ausgleich von Vorteilen und Nachteilen treffen, die sich für sie aus der Bildung des Zweckverbandes ergeben. Auf Antrag aller Beteiligten, für die ein Ausgleich in Betracht kommt, regelt die Aufsichtsbehörde den Ausgleich. Organe des Zweckverbandes sind die Verbandversammlung und der Vorstand. Die Verbandssatzung kann weitere Organe vorsehen. Die Verbandversammlung ist das oberste Organ des Zweckverbandes. Sie entscheidet über die Aufgaben, die ihr dieses Gesetz und die Verbandssatzung zuweisen, sowie über alle wichtigen Angelegenheiten des Verbandes. Die Verbandversammlung besteht aus mindestens einem Vertreter eines jeden Verbandsmitglieds. Die Vertreter der Gemeinden und Landkreise werden von ihren Vertretungskörperschaften für deren Wahlzeit gewählt. Der Vorsitzende der Verbandversammlung beruft die Verbandversammlung mindestens einmal im Jahr.

Zu ihrer ersten Sitzung nach der Bildung des Zweckverbandes wird die Verbandversammlung durch die Aufsichtsbehörde einberufen, soweit nicht die Verbandssatzung etwas anderes bestimmt. Der Vorstand ist die Verwaltungsbehörde des Zweckverbandes. Er besteht aus dem Vorsitzenden, dessen Stellvertreter und mindestens einem weiteren Mitglied. Die Mitglieder des Vorstandes können nicht gleichzeitig der Verbandversammlung angehören. Der Vorstand vertritt den Zweckverband. Erklärungen des Zweckverbandes werden in seinem Namen durch den Vorsitzenden oder dessen Stellvertreter abgegeben. Erklärungen, durch die der Zweckverband verpflichtet werden soll, bedürfen der Schriftform oder müssen in elektronischer Form mit einer dauerhaft überprüfbarer qualifizierter elektronischer Signatur versehen sein. Sie sind nur rechtsverbindlich, wenn sie vom Vorsitzenden oder seinem Stellvertreter sowie von einem weiteren Mitglied des Vorstandes unterzeichnet

sind. Die Mitglieder der Verbandsversammlung sind ehrenamtlich, die Mitglieder des Vorstandes in der Regel ehrenamtlich tätig. Der Zweckverband hat das Recht, Beamte zu ernennen. Beamte dürfen hauptamtlich nur angestellt werden, wenn dies in der Verbandssatzung vorgesehen ist. Hat der Zweckverband keine eigenen Dienstkräfte und Verwaltungseinrichtungen, sind die Verwaltungs- und Kassengeschäfte nach Maßgabe der Verbandssatzung durch ein Verbandsmitglied wahrzunehmen, der Zweckverband hat dem Verbandsmitglied einen angemessenen Ausgleich für die ihm hierdurch entstehenden Mehrkosten zu gewähren. Auf die Wirtschafts- und Haushaltsführung des Zweckverbandes sind die Vorschriften des Gemeindefinanzrechts sinngemäß anzuwenden mit Ausnahme der Bestimmungen über die Auslegung des Entwurfs der Haushaltssatzung und die Einrichtung des Rechnungsprüfungsamtes. Ist die Hauptaufgabe eines Zweckverbandes der Betrieb eines wirtschaftlichen Unternehmens, kann die Verbandssatzung bestimmen, dass auf die Wirtschafts- und Haushaltsführung des Zweckverbandes die Vorschriften über die Eigenbetriebe sinngemäß anzuwenden sind; an die Stelle des Haushaltsplanes tritt in diesem Falle der Wirtschaftsplan, an die Stelle der Haushaltsrechnung der Jahresabschluss. Die oberste Aufsichtsbehörde kann Ausnahmen zulassen. Der Zweckverband erhebt von den Verbandsmitgliedern eine Umlage, soweit seine sonstigen Einnahmen nicht ausreichen, um seinen Finanzbedarf zu decken (Verbandsumlage). Die Umlage soll in der Regel nach dem Verhältnis des Nutzens bemessen werden, den die Verbandsmitglieder aus der Erfüllung der Aufgaben des Zweckverbandes haben. Ein anderer Maßstab kann zu Grunde gelegt werden, wenn dies angemessen ist. Die Umlagepflicht einzelner Verbandsmitglieder kann durch die Verbandssatzung auf einen Höchstbetrag beschränkt oder ausgeschlossen werden. Die Höhe der Umlage ist in der Haushaltssatzung, im Falle des § 18 Abs. 2 im Wirtschaftsplan, für jedes Rechnungsjahr festzusetzen.

9.1.2 MWB, SWG sowie die anderen abwasserreinigungs- und klärschlammmentsorgungspflichtigen Körperschaften gründen eine gemeinsame Gesellschaft

MWB und die anderen abwasserreinigungs- und klärschlammmentsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften beauftragen die gemeinsame Gesellschaft (GmbH & Co. KG) mit der Erbringung der thermischen Verwertungsleistung.

Gründungsgesellschafter der KG sind die SWG und die MWB. Komplementärin der KG wird eine GmbH. Diese GmbH wird durch die SWG und die MWB begründet. Kommanditisten der KG sind Stadt Gießen, die SWG mit je 25,1 % der Kommanditanteile. Auch die abwasserreinigungs- und klärschlammmentsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften sollen Kommanditisten der KG werden.

Die Kommanditgesellschaft unterscheidet sich von einer OHG im Wesentlichen dadurch, dass bei einem oder mehreren Gesellschaftern die Haftung gegenüber Gläubigern auf einen genau bezifferten Geldbetrag - der auch in das Handelsregister eingetragen wird - beschränkt ist. Die voll haftenden Gesellschafter werden Komplementäre, die beschränkt haftenden Kommanditisten genannt. Dass die Gesellschafter unterschiedliche Risiken tragen, wirkt sich auf die Struktur aus. Die Stellung der persönlich haftenden Gesellschafter ist wesentlich stärker als die der beschränkt haftenden. Letztere sind insbesondere von der Geschäftsführung/Vertretung ausgeschlossen; sie unterliegen auch keinem Wettbewerbsverbot.

Die GmbH & Co. KG bildet einen Sonderfall der Kommanditgesellschaft. Als persönlich haftende Gesellschafterin ist eine GmbH beteiligt, was letztendlich zu einer mittelbaren Haftungsbegrenzung führt. Dieser Umstand muss im Namen gekennzeichnet werden, üblicherweise durch den Rechtsformzusatz "GmbH & Co. KG". Dieses Modell wird häufig im Immobilienbereich verwendet,

wo eine Vielzahl von Kommanditisten Geldbeträge einbringen und aufgrund hoher Finanzvolumen niemand die Position des persönlich haftenden Gesellschafters übernehmen will. Die Geschäftsführung wird von der Komplementär-GmbH wahrgenommen (also von deren Geschäftsführern); das bedeutet, die Willensbildung innerhalb der GmbH & Co. KG wird von der GmbH gelenkt. Der Hauptgrund für die Wahl einer GmbH ist die Haftungsbeschränkung. Die Rechtsform bewirkt nämlich eine Trennung zwischen dem Gesellschaftsvermögen und dem privaten Vermögen der jeweiligen Gesellschafter.

Die Gründung einer GmbH ist wesentlich aufwändiger als die der vorgenannten Rechtsformen. Erforderlich ist zum einen ein notarieller Gesellschaftsvertrag, der gesetzlich vorgegebenen Mindestanforderungen entsprechen muss, sowie die Eintragung in das Handelsregister. Erst durch die Eintragung entsteht die Gesellschaft und ihre Haftungsbeschränkung, sie ist dann eine eigene juristische Rechtsperson.

Die GmbH führt eine eigene Firma, sie ist eigenständiger Träger von Rechten und Pflichten und tritt verselbständigt neben die Inhaber. Eine Besonderheit besteht darin, dass auch eine Einzelperson eine GmbH gründen kann. Bei Neugründungen beträgt das gesetzliche Mindeststammkapital 25.000 Euro.

Der Gründungsaufwand beläuft sich auf ca. 500,- Euro. Die Dauer des Eintragungsverfahrens wird entscheidend durch die Vollständigkeit und Richtigkeit der einzureichenden Unterlagen beeinflusst. Da nicht selten Verzögerungen z. B. durch die Wahl einer unzulässigen Firma oder ungenügender Ausformulierung des Unternehmensgegenstandes entstehen, empfiehlt es sich diese Punkte frühzeitig mit der örtlichen IHK abzustimmen. Sofern beim Handelsregistergericht kein besonderer Prüfungsaufwand entsteht, kann mit einer Eintragung innerhalb von ein bis zwei Wochen gerechnet werden.

Für die GmbH ist zwingend die Erstellung einer Bilanz vorgeschrieben, die beim Amtsgericht zur öffentlichen Einsicht hinterlegt werden muss. Für die Auflösung einer GmbH ist ein aufwendiges Verfahren notwendig.

Durch die eigenständige Rechtspersönlichkeit (sie ist juristische Person) kann die GmbH monolithisch in einen „Konzern Stadt“ eingefügt werden. Sie agiert im Rechtsverkehr schnell und flexibel durch die Person des Geschäftsführers, der aber aufgrund der von der öffentlichen Gebietskörperschaft bestimmten Gesellschafterversammlung (oftmals ausschließlich vertreten durch den Bürgermeister) oder durch Gestaltungsmöglichkeiten in der Satzung relativ leicht und nachhaltig gelenkt oder sogar abberufen werden kann. Dies unterscheidet die GmbH insbesondere von der Aktiengesellschaft, die von der Kommunalaufsicht ungern gesehen wird und in deren Rechtsform nur rund 1,5 Prozent aller öffentlichen Unternehmen organisiert sind. Über die Einbindung einer Komplementär - GmbH und wegen der eingeschränkten Kommanditistenhaftung erfüllt auch eine GmbH & Co. KG die Vorgaben der Gemeindeordnungen zur Haftungsbeschränkung bei kommunalen Unternehmen.

9.1.3 Interkommunale Zusammenarbeit als interkommunale Vereinbarung (Kooperationsvereinbarung) zwischen MWB und den anderen abwasserreinigungs- und klärschlamm Entsorgungspflichtigen Einrichtungen.

Dieses Modell beruht darauf, dass die abwasserreinigungs- und klärschlamm Entsorgungspflichtigen Einrichtungen kooperieren und die MWB den anderen abwasserreinigungs- und klärschlamm Entsorgungspflichtigen Einrichtungen die thermische Verwertung inklusive Logistik usw. des

Klärschlamm anbieten. Ausgangspunkt der Überlegung ist die auf ein gleiches Interesse ausgerichtete Zusammenarbeit abwasserreinigungs- und klärschlammbehandlungsorganisatorischer Einrichtungen mit den MWB. Ohne dass die abwasserreinigungs- und klärschlammbehandlungsorganisatorischen Einrichtungen an den MWB beteiligt sind oder werden müssen, übernehmen die MWB die Klärschlammverwertung auf einer zu noch zu errichtenden Anlage inklusive Logistik. MWB und SWG kooperieren zum Zwecke der thermischen Verwertung des Klärschlammes über eine gemeinsame Gesellschaft. MWB beauftragen die gemeinsame Gesellschaft mit der thermischen Verwertung des eigenen (MWB) Klärschlammes und des fremden (von den abwasserreinigungs- und klärschlammbehandlungsorganisatorischen Einrichtungen übernommenen) Klärschlammes. Die gemeinsame Gesellschaft plant, baut und betreibt die für die thermische Verwertung des Klärschlammes erforderliche Infrastruktur, Anlagen etc. Erzeugte Wärme wird von der SWG abgenommen. Es erscheint ratsam, dass die gemeinsame Gesellschaft für den Fall, dass die Aschen nicht an Externe zur Gewährleistung der Phosphorrückgewinnungspflicht abgegeben werden, auch die Verarbeitung zum Düngemittel (idealerweise am gleichen Standort wie die Verbrennungsanlage) übernimmt

Die anderen abwasserreinigungs- und klärschlammbehandlungsorganisatorischen Einrichtungen haben Bestandsverträge mit unterschiedlichen Laufzeiten. Die Laufzeiten für die Verträge bis zur Aktivierung der Hauptphase müssen im Zweifel gleichlaufend und einheitlich gestaltet werden, damit die Mengen zu Beginn der Hauptphase zur Verfügung stehen. Das ergänzende Modell Vorschaltphase sieht vor eine gemeinsame Auftragsvergabe an einen Dritten bspw. im Namen der MWB und im Auftrag der anderen Einrichtungen. Mehrere öffentliche Auftraggeber können vereinbaren, bestimmte öffentliche Aufträge gemeinsam zu vergeben. Soweit das Vergabeverfahren im Namen und im Auftrag aller öffentlichen Auftraggeber insgesamt gemeinsam durchgeführt wird, sind diese für die Einhaltung der Bestimmungen über das Vergabeverfahren gemeinsam verantwortlich. Das gilt auch, wenn ein öffentlicher Auftraggeber das Verfahren in seinem Namen und im Auftrag der anderen öffentlichen Auftraggeber allein ausführt. Bei nur teilweise gemeinsamer Durchführung sind die öffentlichen Auftraggeber nur für jene Teile gemeinsam verantwortlich, die gemeinsam durchgeführt wurden. Hier wäre gut denkbar, wenn es eine Einkaufsgemeinschaft unter Leitung der MWB gäbe, die den Beschaffungsbedarf bis zur Aktivierung der Hauptphase ermittelt und umsetzen hilft. Es handelt sich um ein einheitliches Kooperationsmodell und eine einheitliche Kooperationsvereinbarung in Vorschaltphase und Hauptphase. Die interessierten Einrichtungen werden Schritt für Schritt in das kooperative Zusammenwirken hineingeführt. Die Schritte bauen aufeinander auf und sind abgeschichtet umsetzbar.

In der Hauptphase werden die bei den Mantel-Kooperationspartnern inklusive der bei den MWB anfallenden Klärschlämme weiterhin (d.h. über die Vorschaltphase hinaus) gebündelt und in einer bis zum Beginn der Hauptphase errichteten Monoverbrennungsanlage gesetzeskonform zu marktüblichen Preisen thermisch verwertet bzw. entsorgt. Die Rückgewinnung des Phosphors aus der Klärschlammmasche ist ein wesentlicher Bestandteil des Verwertungs- bzw. Entsorgungskonzepts. Die Mantel-Kooperationspartner verpflichten sich zu kooperativem Verhalten. Die wechselseitigen Kooperationsverpflichtungen der Mantel-Kooperationspartner ergeben sich aus dieser Mantelkooperationsvereinbarung und den mit den einzelnen Mantel-Kooperationspartnern abzuschließenden Einzelkooperationsvereinbarungen. Die MWB bringen in die Kooperation ein die Erbringung der thermischen Verwertungsleistungen durch eine gemeinsame Gesellschaft aus den MWB und der Stadtwerke Gießen AG (SWG) und die Erfüllung der P-Rückgewinnungspflicht. Damit reichen die Kooperationspartner diese (originär ihnen als betroffene Klärschlammproduzenten obliegende) Verpflichtung an die gemeinsame Gesellschaft durch. Durch die gemeinsame Gesellschaft erfolgen Planung, Bau und Betrieb einer modernen thermischen Verwertungsanlage

für rund 75.000 Tonnen pro Jahr bei 25 % Trockensubstanz Klärschlamm sowie die Sicherstellung der P-Rückgewinnung. Alle Mantel-Kooperationspartner bringen im Rahmen ihrer vorhandenen Möglichkeiten insbesondere ein: Klärschlammkapazitäten, Vortrocknungskapazitäten, Transportkapazitäten, Zwischenlagerungskapazitäten. Mit Abschluss der Kooperationsvereinbarung teilen die Kooperationspartner verbindlich mit, mit welchen Klärschlammjahresmengen (Darstellung erfolgt untergliedert nach den Jahren 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 usw.) sie in die Vorschaltphase eintreten. Die mitgeteilten Klärschlammjahresmengen gelten zugleich auch verbindlich für die Hauptphase. Wer nur an der Hauptphase teilnimmt, teilt mit Abschluss der Kooperationsvereinbarung nur die von ihm für die Hauptphase vorgesehenen Mengen mit. Aufgrund der Transportentfernungen zwischen den Standorten der Mantel-Kooperationspartner inklusive der MWB, wird durch die Kooperation federführend durch die MWB geprüft, ob die Klärschlämme teilweise bereits vor Ort oder in nächst gelegener Umgebung mittels verfügbarer Abwärme zu wirtschaftlichen Bedingungen getrocknet werden können. Sowohl die Vortrocknung als auch der Transport der Schlämme werden durch die Kooperation federführend durch die MWB organisiert und verrechnet. Die Mantel-Kooperationspartner mandatieren die MWB mit der Verhandlung und der Vorbereitung des Abschlusses der notwendigen Einzelkooperationsvereinbarungen. Verhandlung, Vorbereitung des Abschlusses der Einzelkooperationsvereinbarung und Abschluss der Einzelkooperationsvereinbarung erfolgen schnellstmöglich nach Beginn der Laufzeit der Mantel-Kooperationsvereinbarung. Die Kooperationsversammlung tritt mindestens einmal jährlich oder bei besonderen Anlässen auf begründeten Antrag eines Mantel-Kooperationspartners oder in den folgenden Fällen zusammen: Abschluss der notwendigen Einzelkooperationsvereinbarungen, etwaige Kündigung einer bestehenden Einzelkooperationsvereinbarung, etwaige Neuaufnahme eines weiteren Mantel-Kooperationspartners und ein daraus resultierender etwaiger Neuabschluss einer weiteren Einzelkooperationsvereinbarung, eine etwaige Kündigung eines Mantel-Kooperationspartners und etwaige sonstige wesentliche Maßnahmen die Kooperation an sich betreffend. Über vorgenannt aufgeführte Punkte entscheidet die Kooperation in der Kooperationsversammlung mit einfacher Mehrheit. Die MWB berichten in der Kooperationsversammlung den anderen Mantel-Kooperationspartnern über wesentliche Änderungen und Anpassungen bestehender Einzelkooperationsvereinbarungen.

10 Literatur

- Abanades S, Flamant G, Gagnepain B, Gauthier D: Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration. *Waste Manage Res.* 20 (2002) 55–68
- Adam, Christian, Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm, in Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Kopp-Assenmacher, S. (Hrsg.) *Verwertung von Klärschlamm*, Thomé-Kozmiensky-Verlag GmbH, Neuruppin, 2018, ISBN 978-3-944310-43-5
- ATV-DVWK (Hrsg.) Merkblatt M 379 Klärschlamm-trocknung, Hennef, 2004, ISBN 3-924063-36-2
- Bittermann P: Folgeentwicklungen der Ammoniak-synthese. Die Mutter der Verfahrenstechnik. Online abrufbar unter: Chemietechnik, <http://www.chemietechnik.de/folgeentwicklungen-der-ammoniak-synthese/> (2013) [Zugriff am 27.11.2017]
- Chang M, Jen C, Wu H: Investigation on the emission factors and removal efficiencies of heavy metals from MSW incinerators in Taiwan. *Waste Manage Res* 21(2003) 218–224
- Conrad Y, Karpf, R: Kennwerte zur Bewertung von Trockensorptionsverfahren auf Kalkbasis. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): *Energie aus Abfall*. Bd 11, Neuruppin: TK-Verlag, (2014), S. 633 – 648.
- DPP Deutsche Phosphorplattform, Verfahrenskennblätter: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/verfahrenskennblaetter-zu-methoden-der-phosphorrueckgewinnung/>, abgerufen am 28.08.2018
- DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.) , Merkblatt M 379 „Klärschlamm-trocknung“ (Entwurf), Hennef, 2019
- Fink M: Wirk- und Reaktionsprinzipien zur Abscheidung von Schadstoffen in der Abgasreinigung, persönliche Mitteilung 2019
- Franck J, Schröder L, 2015: Zukunftsfähigkeit kleiner Klärschlamm-verbrennungsanlagen. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): *Energie aus Abfall*. Bd. 12, Neuruppin: TK Verlag, S. 457 – 475.
- Fritz W, Kern H: *Reinigung von Abgasen*. Würzburg (1990): Vogel-Verlag.
- Giesberts, L.; Kleve, G.: Einmal Abfall – nicht immer Abfall: Das Ende der Abfallei-genschaft. *Deutsches Verwaltungsblatt (DVBL) – Abhandlungen*, 2008, 678–688.
- Hartmann H, Hofmann H, Nussbaumer T: Direkte thermo-chemische Umwandlung. In: *Energie aus Biomasse*. Berlin: Springer-Verlag,(2016), S. 815 – 1058.
- Ipsen C:: Mitverbrennung von Biobrennstoffen in zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen. *Verfahrenstechnik, Umweltschutz, Wirtschaftlichkeit*. Dissertation zur Erlagungen des akademischen Grades Doktor der Wissenschaften (Dr. rer. pol.). Zentrum für nachhaltige Entwicklung an der Europa-Universität Flensburg. (2016) Online abrufbar unter: ZHB Flensburg, <https://www.zhb-flensburg.de/fileadmin/content/spezial-einrichtungen/zhb/dokumente/dissertationen/ipsen/ipsen-christoph-2017-.pdf> [Zugriff am 17.12.2018].
- Karpf, R. (2006): Neueste Entwicklungen bei der trockenen und quasitrockenen AGR. Regensburger Fachtagung, 13./14. Juni 2006. ete.a GmbH Ingenieurbüro für Energie- und Umweltengineering & Beratung, Lich. Online abrufbar unter: http://www.ete-a.de/img/Vortraege/16_Neueste_Entwicklungen_bei_der_trockenen_und_quastrockenen_AGR.pdf [Zugriff am 17.12.2018]

Lind T, Valmari T, Kauppinen E, Sfiris G, Nilson K, Meanhaut, W: Volatilization of the heavy metals during circulating fluidized bed combustion of forest residue. *Environ. Sci. Technol.* 33 (1999), 496-502.

Löschau M: *Reinigung von Abgasen*. Neuruppin: TK-Verlag (2014).

Marani D, Braguglia CM, Mininni G, Maccioni F: Behaviour of Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, and Zn in sewage sludge incineration by fluidised bed furnace. *Waste Management* 23 (2003) 117–124

Meyer, U., *Energetische Aspekte der thermischen Behandlung von Klärschlamm*, Vortrag 12. ZAF-Seminar "Klärschlammbehandlung und Entsorgung - Erfahrungen und Perspektiven", Braunschweig, 18./19. Sept. 1997, Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der TU Braunschweig, Heft 12, 77/97.

Obernberger I: *Stand der Entwicklung der Verbrennungstechnik*. VDI-Bericht 1319. Düsseldorf: VDI-Verlag, (1997), S. 47 – 80. Online abrufbar unter: BIOS-Bioenergiesysteme GmbH, <http://bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-StandVerbrennungstechnik-1997-05-20.pdf> [Zugriff 24.11.2017]

Sijstermans, L.F.J., *Energie- und Emissionsmaßnahmen der KSWA SNB Moerdijk 1997-2019*, Vortrag auf den DWA-Klärschlammtagen, 21.-23.05.2019, Würzburg, DWA (Hrsg.), Hennef, 2019

Statista (2019),

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/> [Zugriff 18.05.2019]

Thomé-Kozmiensky K. J.,: *Verbrennung in Wirbelschichtreaktoren*. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): *Energie aus Abfall*. Bd. 10, Neuruppin: TK Verlag, (2013)S. 3 – 94

Vater W: *Thermische Verfahren*. In: Hennef, Ernst & Sohn (Hrsg.). *Klärschlamm*. Bd. 4, Berlin: Verlag für Architektur und technische Wissenschaft GmbH, (1996), S. 405 – 471

Weigand H, Bertau M, Hübner W, Bohndick F, Bruckert A: *RecoPhos: Full-scale fertilizer production from sewage sludge ash*. *Waste Manage.* 33 (2013), 540-544.

Weigand H, Bertau M: *Von der Klärschlammmasche zum Phosphordünger - RecoPhos P38 im Spannungsfeld von Abfall , Düngemittel- und Bodenschutzrecht*. In: Kausch P, Bertau, M., Gutzmer, J; Matschullat, J (Hrsg.) *Strategische Rohstoffe — Risikovorsorge*, Springer, Berlin, 2013.

Wiesgickl, S., *Thermisches Klärschlammverwertungskonzept am Standort Halle-Lochau*, Vortrag auf den DWA-Klärschlammtagen, 21.-23.05.2019, Würzburg, DWA (Hrsg.), Hennef, 2019

Xu M, Yan R, Zheng C, Qiao Y, Han J, Sheng C: Status of trace element emission in a coal combustion process: a review. *Fuel Processing Technology* 85 (2003) 215– 237

Zepke, F., persönliche Information, EuPhoRe GmbH, 2019

11 Anhang

11.1 Fragebogen Anlagensteckbrief



[THM | Campus Gießen | Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen | Wiesenstraße 14 | 35390 Gießen](#)

Stadtwerke Gießen AG
Vorstand Herrn Dipl.-Ing. Matthias Funk
Lahnstraße 31
D-35398 Gießen

MWB Mittelhessische Wasserbetriebe
Herrn Dipl.-Ing. Clemens Abel
Allicenstraße 33
D-35390 Gießen

Technische Hochschule Mittelhessen
Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen
Prof. Dr. Harald Weigand
Wiesenstraße 14, 35390 Gießen
E-Mail: ulf.theilen@bau.thm.de
harald.weigand@lse.thm.de
23. Juli 2018

Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger und Phosphor-Ressource für Mittelhessen **Informationen zur Entwicklung einer gemeinsamen Strategie**

Anlage: Anlagensteckbrief

Sehr geehrte Damen und Herren,

wie Ihnen bekannt ist, beabsichtigt das Land Hessen im Rahmen der Ressourcenschutzstrategie weitestgehend aus der direkten landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung auszusteigen und den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor zurückzugewinnen. Diese Strategie ist auf div. Veranstaltungen des HMUKLV erläutert worden (Phosphordialoge am 15.06.2016, 29.11.2016 und 15.12.2016 in Wiesbaden, Wetzlar und Kassel).

Insbesondere für Kläranlagen mit mehr als 50.000 EW aber auch für viele kleinere Kläranlagen führen die Novellierungen der Klärschlammverordnung sowie des Düngemittelrechts zu Änderungen der bisherigen Entsorgungspraxis, mit Konsequenzen auch für die Entsorgungspreise.

Auf Initiative der Mittelhessischen Wasserbetriebe MWB sowie der Stadtwerke Gießen SWG wird derzeit ein regionales Klärschlammverwertungskonzept entwickelt, welches durch Prof. Theilen und Prof. Weigand (Technischen Hochschule Mittelhessen, THM) wissenschaftlich begleitet wird.

Zusammen mit den kommunalen Kläranlagen-Betreibern wollen wir ein regionales Konzept zur energetischen und stofflichen Verwertung von Klärschlamm erarbeiten. Dabei liegt der Fokus auf einer nachhaltigen, ökologischen und ökonomischen Strategie, welche sowohl die Aspekte der Anforderungen aus dem Bereich der Düngemittel-, Klärschlamm- und Bodenverordnung als auch der energiepolitischen Ziele der Sektorkopplung verbindet. Treibhausgase sollen minimiert und fossile Brennstoffe bestmöglich substituiert werden.

Um diese Aufgabenstellung zu meistern, müssen neue Wege und Technologien geprüft, bewertet und berechnet werden. Dies können wir zusammen mit den Spezialisten aus den Unternehmen MWB und SWG sowie aus der Wissenschaft mit der THM erreichen. Dabei werden auch

abweichende Ideen vom heutigen Standard untersucht und damit die regionale Zusammenarbeit optimiert.

MWB und SWG suchen Partner aus den umliegenden Kommunen und Verbänden, mit denen sie gemeinsam dieses Konzept entwickeln und realisieren können.

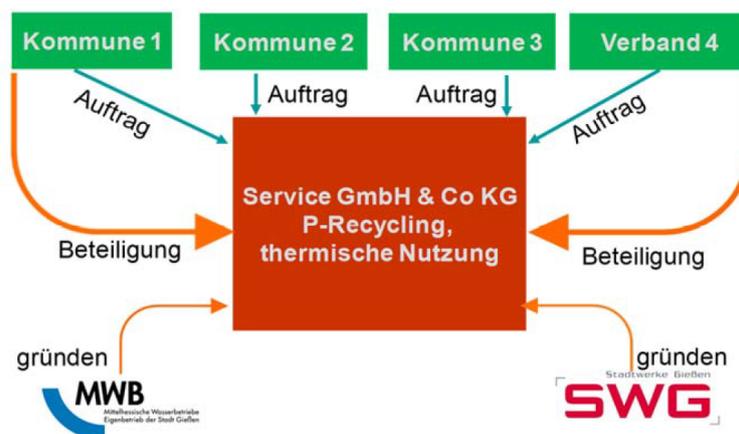
Dieses Schreiben mit dem anliegenden Anlagensteckbrief dient dazu, Ihnen den Stand des Konzeptes mitzuteilen und gleichzeitig wichtige Daten zu Ihrer Anlage zusammenzutragen. Diese werden benötigt, um das Konzept in technischer und ökonomischer Hinsicht weiterzuentwickeln und juristisch abzusichern.

Mit der Beantwortung des Fragebogens ist für Sie keinerlei Verbindlichkeit bez. einer Beteiligung an dem Vorhaben verbunden. Selbstverständlich werden Ihre Anlagendaten vertraulich behandelt.

Das Konzept verfolgt verschiedene Ziele:

1. Die Klärschlamm Entsorgung ist langfristig mit regionaler Wertschöpfung gesichert.
2. Die Entsorgung erfolgt zu marktüblichen stabilen Konditionen (keine Kostenvolatilität).
3. Der Klärschlamm wird als regenerativer Energieträger genutzt.
4. Phosphor wird weitgehend zurückgewonnen und in der regionalen Landwirtschaft genutzt.
5. Die Partnerkommunen werden in die Organisationsstruktur einbezogen werden. Damit ist die Klärschlammverwertung ohne regelmäßig wiederkehrende Ausschreibung möglich.

Ein mögliches Gesellschaftskonstrukt auf der Basis einer von SWG und MWB zu gründenden Service GmbH & Co KG zur Beteiligung von Partnerkommunen zeigt die nachstehende Abbildung.



Über dieses Konstrukt und auch das technische Konzept möchten wir in einer Infoveranstaltung voraussichtlich im Mai gemeinsam mit Ihnen diskutieren und Ihre Anregungen dazu aufnehmen.

Zur Vorbereitung bitten wir Sie uns die erbetenen Anlagensteckbriefe kurzfristig zur Verfügung zu stellen.



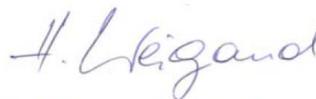
Rückfragen beantworten wir Ihnen gerne unter

Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen (THM)	Tel.: 0172 5118256	ulf.theilen@bau.thm.de
Prof. Dr.-Ing. Harald Weigand (THM)	Tel.: 0174 4997219	harald.weigand@lse.thm.de
Dipl.-Ing. Clemens Abel (MWB)	Tel.: 0641 306 1772	clemens.abel@giessen.de
Dipl.-Ing. Matthias Funk (SWG)	Tel.: 0641 708 1330	mfunk@stadtwerke-giessen.de

Mit freundlichen Grüßen



Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen
(Techn. Hochschule Mittelhessen)



Prof. Dr.-Ing. Harald Weigand
(Techn. Hochschule Mittelhessen)

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**
Anlagensteckbrief

Techn. Hochschule Mittelhessen
Kompetenzzentrum Energie- und
Umweltsystemtechnik ZEuUS
Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen
Wiesenstraße 14

35390 Gießen

E-Mail: ulf.theilen@bau.thm.de

Fax: 0641 309 2909

Absender:

.....
.....
.....

Ansprechpartner:.....

Tel.- Nr.:.....

Rücksendung bitte bis zum xx.xx 2018

Teil A: Allgemeine Daten zur Abwasserbehandlungsanlage

Bitte legen Sie die Klärschlammanalysen für 2015 und 2016 bei.

Frage 1:	Name / Standort / Adresse der Abwasserbehandlungsanlage

Frage 2:	Ansprechpartner für weitere Fragen
<p>Name:</p> <p>Telefon:</p> <p>Email:</p>	

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**

Anlagensteckbrief

Frage 3:	Ausbaugröße der Abwasserbehandlungsanlage [EW]

Frage 4:	Tatsächliche Belastung der Abwasserbehandlungsanlage [EW]

Frage 5:	Aufbau der Abwasserbehandlungsanlage (Bitte zutreffendes ankreuzen)	
<input type="checkbox"/> Regenwasserentlastung (Regenüberlauf)		
Mechanische Reinigungsstufen:		
<input type="checkbox"/> Rechen		
<input type="checkbox"/> Sandfang		
<input type="checkbox"/> Vorklärbecken	Anzahl Becken:	Stck
	gesamt.....	m ³
Biologische Reinigungsstufe:		
<input type="checkbox"/> Abwasserteiche	gesamt:	m ³
	belüftet	m ³
	unbelüftet	m ³
<input type="checkbox"/> Tauchkörper / Scheibentauchkörper	gesamt:	m ²
<input type="checkbox"/> Belebungsbecken	Anzahl Becken:	Stck.
	gesamt:	m ³
	Bio-P-Becken	m ³
	Nitrifikation	m ³
	Denitrifikation	m ³
	TS-Gehalt im Belebungsbecken (im Mittel)	.....g/l oder kg/m ³
<input type="checkbox"/> Nachklärbecken	Anzahl Becken:	Stck.
	gesamt:	m ³

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**
Anlagensteckbrief

Klärschlammbehandlung:

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Voreindickung | <input type="checkbox"/> maschinelle Voreindickung |
| | <input type="checkbox"/> statischer Voreindicker .....m ³ |
| <input type="checkbox"/> Faulbehälter | Anzahl Faulbehälter: Stck. |
| | gesamt: .....m ³ |
| <input type="checkbox"/> Nacheindickung | <input type="checkbox"/> maschinelle Nacheindickung |
| | <input type="checkbox"/> statischer Nacheindicker /
Schlammstapelbehälter.....m ³ |
| <input type="checkbox"/> Hilfsmittel zur Klärschlammindickung (Polymer o.ä.) | |
| | Produktbezeichnung |
| | Einsatzmenge .....m ³ /a |
| <input type="checkbox"/> Einrichtungen zur Klärschlammmentwässerung | |
| <input type="checkbox"/> Hilfsmittel zur Klärschlammmentwässerung (Polymer o.ä.) | |
| | Produktbezeichnung |
| | Einsatzmenge .....m ³ /a |
| <input type="checkbox"/> Einrichtungen zur Klärschlamm-trocknung | |
| <input type="checkbox"/> Klärgasspeicher | m ³ |
| <input type="checkbox"/> Klärgasnutzung: | <input type="checkbox"/> Klärgasbrenner / -kessel |
| (Details siehe Frage 17) | <input type="checkbox"/> Blockheizkraftwerk |
| | <input type="checkbox"/> Mikrogasturbine |
| <input type="checkbox"/> Sonstige Einrichtungen: | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**

Anlagensteckbrief

Teil B: Abwassermengen und Konzentrationen

Frage 6:	Zulaufmengen und Zulaufkonzentrationen
<u>Bitte legen Sie hierfür eine Kopie Ihrer EKVO-Berichte für 2014, 2015 und 2016 bei.</u>	

Frage 7:	Überwachungswerte
<u>Bitte legen Sie hierfür eine Kopie Ihrer Einleiterlaubnis bei.</u>	

Teil C: Klärschlammengen und Klärschlamm Entsorgung

Frage 8:	Schlammengen der Jahre 2014 und 2015	
Primärschlamm aus dem Vorklärbecken:		
2015	i.M. [m ³ /d]	2016 i.M. [m ³ /d]
Trockenrückstand (TR), organischer Anteil im Trockenrückstand (oTR)		
2015	i.M. [% TR]	2016 i.M. [% TR]
	i.M. [% oTR]	i.M. [% oTR]
Überschussschlamm:		
2015	i.M. [m ³ /d]	2016 i.M. [m ³ /d]
Trockenrückstand (TR), organischer Anteil im Trockenrückstand (oTR)		
2015	i.M. [% TR]	2016 i.M. [% TR]
	i.M. [% oTR]	i.M. [% oTR]
Falls Ihre Anlage eine Faulung hat:		
Ausgefaulter Schlamm bzw. eingedickter Schlamm nach Faulung:		
2015	i.M. [m ³ /d]	2016 i.M. [m ³ /d]
Trockenrückstand (TR) organischer Anteil im Trockenrückstand (oTR)		
2015	i.M. [% TR]	2016 i.M. [% TR]
	i.M. [% oTR]	i.M. [% oTR]

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**
Anlagensteckbrief

Frage 9:	Derzeitige Klärschlamm entsorgung
<p>Auf welche Weise wird der anfallende Klärschlamm derzeit verwertet und/oder entsorgt? Welche Entsorgungspreise (inkl. Transport) zahlen Sie?</p>	
<p><input type="checkbox"/> Klärschlammvererdung (voraussichtliche Laufzeit bis zur Räumung [a])</p>	
<p><input type="checkbox"/> landwirtschaftliche Klärschlammverwertung als Nassschlamm</p>	
<p>2015.....[m³/a][% TR] .....[€/m³]</p>	
<p>2016.....[m³/a][% TR] .....[€/m³]</p>	
<p><input type="checkbox"/> landwirtschaftliche Klärschlammverwertung als entwässerter Schlamm</p>	
<p>2015.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p>2016.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p><input type="checkbox"/> Klärschlammverwertung im Landschaftsbau als entwässerter Schlamm</p>	
<p>2015.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p>2016.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p><input type="checkbox"/> Klärschlammverbrennung in Monoverbrennungsanlage</p>	
<p>2015.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p>2016.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p><input type="checkbox"/> Klärschlammverbrennung in Co-Verbrennungsanlage (Kohlekraftwerk, MVA)</p>	
<p>2015.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p>2016.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p><input type="checkbox"/> sonstige Klärschlamm entsorgung</p>	
<p>2015.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	
<p>2016.....[t/a][% TR] .....[€/t]</p>	

Frage 10:	Zusammensetzung der Schlämme 2015 und 2016
<p>Bitte legen Sie Ihre letzten Klärschlammanalysen bei (2015 und 2016)</p>	

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**

Anlagensteckbrief

Teil D: Faulung

Frage 11:	Besitzt die Kläranlage einen / mehrere Faulbehälter?
<input type="checkbox"/> ja (weiter mit Frage 12) <input type="checkbox"/> nein (Ende des Fragebogens)	

Frage 12:	Daten zur Faulung
Nutzvolumen Faulbehälter	
Anzahl: Stck. Gesamt-Volumen: .....m ³	
Temperaturbereich	
<input type="checkbox"/> Mesophil (ca. 30 - 42° C) <input type="checkbox"/> Thermophil (> 50° C)	
Mittlere Schlammmenge (Input Faulbehälter)	
..... [m ³ /d]	
Aufenthaltszeit im Faulbehälter	
..... [d]	
Raumbelastung mit organischer Trockensubstanz (oTR)	
..... [kg oTR/(m ³ *d)]	
Faulgasproduktion	
Jährliche produzierte Faulgasmenge: [m ³ /a]	
Faulgaszusammensetzung (im Mittel): (ggf. Faulgasanalyse beilegen)	
Methan (CH ₄): [%]
Kohlendioxid (CO ₂): [%]
Schwefelwasserstoff (H ₂ S) :	..... [ppm]

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**
Anlagensteckbrief

Frage 13: Daten zur Energiegewinnung		
Wird das gewonnene Faul-/Klärgas verstromt?		
<input type="checkbox"/> ja		
<input type="checkbox"/> nein		
		Nutzung im Heizkessel: [kW]
Nennleistung BHKW		
elektrisch [kW _{el}]	thermisch	..... [kW _{el}]
Wirkungsgrade des BHKW		
elektrisch [%]	thermisch [%]
Stromproduktion		
		..... [kWh _{el} /a]
aktueller Stromverbrauch der gesamten Kläranlage (Fremdbezug und Eigenerzeugung)		
		..... [kWh/a]
Wärmenutzung		
		..... [kWh _{th} /a]
Heizöl- / Erdgas- / Flüssiggas-Bezug		
Heizöl [l/a]	Erdgas [m ³ /a]	Flüssiggas [kg/a]

Rücksendung bitte bis zum xx.xx. 2018

Rückfragen beantworten wir Ihnen gerne unter

Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen (THM) Tel.: 0172 5118256 ulf.theilen@bau.thm.de

Prof. Dr.-Ing. Harald Weigand (THM) Tel.: 0174 4997219 harald.weigand@lse.thm.de

11.2 Fragebogen Dezentrale Klärschlammlager und Trocknung



THM | Campus Gießen | Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen | Wiesenstraße 14 | 35390 Gießen

Gemeinde / Verband
Frau / Herr
Straße

PLZ Ort

Technische Hochschule Mittelhessen
Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen
Wiesenstraße 14, 35390 Gießen
E-Mail: ulf.theilen@bau.thm.de

Stadtwerke Gießen AG
Vorstand Herr Dipl.-Ing. Matthias Funk
Lahnstraße 31
D-35398 Gießen

MWB Mittelhessische Wasserbetriebe
Herr Dipl.-Ing. Clemens Abel
Alicenstraße 33
D-35390 Gießen

31. Juli 2018

Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger und Phosphor-Ressource für Mittelhessen Fragebogen Dezentrale Standorte für Trocknungsanlagen und Zwischenlager

Sehr geehrte Damen und Herren,

wie Ihnen bekannt ist, entwickeln die Mittelhessischen Wasserbetriebe MWB und die Stadtwerke Gießen SWG derzeit ein regionales Klärschlammverwertungskonzept, welches durch Prof. Theilen und Prof. Weigand (Technischen Hochschule Mittelhessen, THM) wissenschaftlich begleitet wird.

Zusammen mit Ihnen als kommunale Kläranlagen-Betreiber wollen wir ein regionales Konzept zur energetischen und stofflichen Verwertung von Klärschlamm erarbeiten. Dabei liegt der Fokus auf einer nachhaltigen, ökologischen und ökonomischen Strategie, welche sowohl die Aspekte der Anforderungen aus dem Bereich der Düngemittel-, Klärschlamm- und Bodenverordnung als auch der energiepolitischen Ziele der Sektorkopplung verbindet. Treibhausgase sollen minimiert und fossile Brennstoffe bestmöglich substituiert werden.

Ein Baustein in dieser Strategie ist die bedarfsgerechte Bereitstellung der entwässerten Klärschlämme in der Region vor der geplanten zentralen thermischen und stofflichen Verwertung, die am Standort in Gießen realisiert werden soll.

Wir hatten diesbezüglich bereits auf verschiedenen Veranstaltungen zwei Szenarien für die Bereitstellung der Klärschlämme nach der Entwässerung auf den jeweiligen Kläranlagen – ggf. mit mobilen Entwässerungsaggregaten – vorgestellt, die wir mit Ihrer Hilfe konkretisieren wollen:

Szenario 1: Transport der entwässerten Klärschlämme von den Kläranlagen zum zentralen Standort nach Gießen, zentrale Trocknung und Verbrennung in Gießen, Phosphorrückgewinnung aus der Asche

Szenario 2: Transport der entwässerten Klärschlämme zu dezentralen Klärschlammzwischenlagern, dezentrale Trocknung an geeigneten Standorten, Transport des getrockneten Klärschlamm nach Gießen

Aus den von Ihnen mit dem Anlagensteckbrief bereitgestellten Klärschlamm- und Klärschlammtransportdaten können wir die grundsätzlichen Massenströme zusammenstellen.

Nicht bekannt sind uns bisher potentielle Standorte für dezentrale Klärschlammzwischenlager, die entweder schon genehmigt sind oder genehmigt werden sollen, sowie Standorte für dezentrale Trocknungsstandorte.

Bitte füllen Sie diesbezüglich den anliegenden Fragebogen aus und informieren Sie uns über aktuelle Aktivitäten in Ihrer Kommune / Ihrem Verband, die für uns in diesem Konzept wichtig sein können. Rücksendung bitte bis zum 30.05.2018.

Selbstverständlich werden Ihre Anlagendaten vertraulich behandelt.

Rückfragen zu diesem Thema beantwortet Ihnen gerne

Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen (THM) Tel.: 0172 5118256 ulf.theilen@bau.thm.de

Mit freundlichen Grüßen



Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen
(Techn. Hochschule Mittelhessen)

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**
**Informationen zu dezentralen Trocknungsstandorten und
Klärschlammzwischenlagern**

Techn. Hochschule Mittelhessen
Kompetenzzentrum Energie- und
Umweltsystemtechnik ZEuUS
Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen
Wiesenstraße 14

35390 Gießen

E:-Mail: ulf.theilen@bau.thm.de

Fax: 0641 309 2909

Absender:

.....
.....
.....

Ansprechpartner:.....

Tel.- Nr.:.....

Rücksendung bitte bis zum 30.05.2018

Rückfragen beantworten wir Ihnen gerne unter

Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen (THM) Tel.: 0172 5118256 ulf.theilen@bau.thm.de

Frage 1:	Name / Standort / Adresse (Betreiber der Abwasseranlagen)

Frage 2:	Ansprechpartner für weitere Fragen
<p>Name:</p> <p>Telefon:</p> <p>Email:</p>	

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**
**Informationen zu dezentralen Trocknungsstandorten und
Klärschlammzwischenlagern**

Frage 3:	Besteht bereits ein genehmigtes Klärschlammzwischenlager?
<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Wenn ja, bitte Angabe der Größe und Ausstattung:	
<input type="checkbox"/> genehmigt für	..... Tonnen
<input type="checkbox"/> Fläche	..... m ²
<input type="checkbox"/> Abmessungen	Länge: .....m Breite: .....m
<input type="checkbox"/> überdacht	<input type="checkbox"/> offen
Aktuelle Nutzung des Zwischenlagers	<input type="checkbox"/> ausschließlich für eigene Schlämme <input type="checkbox"/> auch für Schlämme externer Betreiber Tonnen
Ausstattung:	
<input type="checkbox"/> Radlader	
<input type="checkbox"/> Förderbänder	
<input type="checkbox"/> Container-Stellplätze	Anzahl: Stück

Frage 4:	Können Sie Flächen für ein Klärschlammzwischenlager bereitstellen?
<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Wenn ja, bitte Angabe der Größe	
<input type="checkbox"/> Fläche	..... m ²
<input type="checkbox"/> Abmessungen	Länge: .....m Breite: .....m

11.3 Letter of Intent 1

11.4 Letter of Intent 2

**Kommunaler Klärschlamm als klimaneutraler Energieträger
und Phosphor-Ressource für Mittelhessen**

**Informationen zu dezentralen Trocknungsstandorten und
Klärschlammzwischenlagern**

Frage 5:	Kann in Ihrer Gemeinde ggf. ein Standort für eine dezentrale Trocknung bereitgestellt werden?
<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
Wenn ja, bitte Angabe der Größe	
<input type="checkbox"/> Fläche	..... m ²
<input type="checkbox"/> Abmessungen	Länge: .....m
	Breite: .....m

Frage 6:	Kann an diesem Standort Wärme z.B. aus einem Produktionsbetrieb, einem Nahwärmenetz oder einer Biogasanlage für die Trocknung bereitgestellt werden?
<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
Wenn ja, bitte weitere Angaben	
Unternehmen, das die Wärme bereitstellen kann	
Name	.....
Anschrift	.....
Ansprechpartner	.....
Tel.-Nr.	.....
E-Mail-Adresse	.....
Entfernung zum potentiellen Trocknungsstandort	..... m
<input type="checkbox"/> Wärmemenge pro Jahr	..... MWh/a
<input type="checkbox"/> Wärmemenge pro Tag	..... MWh/d
<input type="checkbox"/> Besonderheiten in der Wärmebereitstellung (Tages- bzw. Wochenschwankungen)	
.....	
.....	
<input type="checkbox"/> Temperaturniveau	Vorlauf °C
	Rücklauf °C