

Schlussbericht

WerAA - Erschließung neuer Wertschöpfungsketten in der Abfall- und Abwasserwirtschaft:

*Kombinierte Vergärung von Klärschlamm und biogene
Haushaltsabfälle für einen energieautarken Kläranlagenbetrieb*

Zuwendungsempfänger:

Fachhochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld
Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS)

Förderkennzeichen: 03FH046PX5

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2016 – 31.11.2018

Projektleitung: Prof. Dr. Peter Heck, Prof. Dr. Christian Kammlott

Autoren: Marco Angilella, Jackeline Martínez,
Tobias Gruben, Susanne Schierz,
Sebastian Gallery



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03FH046PX5 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Veröffentlicht am 08.07.2019

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
TABELLENVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
I. KURZDARSTELLUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES „WERAA“	8
I.1 AUFGABENSTELLUNG	8
I.2 VORAUSSETZUNG, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE	9
I.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	9
I.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE	11
I.6 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	13
II. EINGEHENDE DARSTELLUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES „WERAA“	14
II.1 ERGEBNISSE DES FORSCHUNGSPROJEKTES „WERAA“	14
II.1.1 VORBEMERKUNG	14
II.1.2 POTENZIAL FREIER FAULRAUMVOLUMEN AUF KLÄRANLAGEN IN RLP	14
II.1.3 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN	15
II.1.4 BIOABFALLVERWERTUNG IN DEUTSCHLAND	17
II.1.5 CO-VERGÄRUNG AUF KOMMUNALEN ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGEN	19
II.1.5.1 DEFINITION DER CO-VERGÄRUNG	19
II.1.5.2 ANFORDERUNGEN AN CO-SUBSTRATE	21
II.1.6 PROJEKTSTANDORTE	22
II.1.6.1 STANDORT ZWEIBRÜCKEN	22
II.1.6.2 STANDORT LAUTERECKEN-WOLFSTEIN	24
II.1.6.3 STANDORT HOPPSTÄDTEN-WEIERSBACH	26
II.1.7 AUFBEREITUNG VON CO-SUBSTRATEN	27
II.1.7.1 POTENZIAL- UND BEDARFSANALYSE	28
II.1.7.2 TECHNOLOGIEANALYSE	35
II.1.7.2.1 TECHNOLOGIEN ZUR AUFBEREITUNG VON CO-SUBSTRATEN	35
II.1.7.2.2 TECHNOLOGIEVERGLEICH DER IDENTIFIZIERTEN AUFBEREITUNGSANLAGEN	45
II.1.7.2.3 BEWERTUNG DER TECHNOLOGIEN	53
II.1.7.3 STANDORTANALYSE	56
II.1.7.3.1 VERGLEICH DER AUFBEREITUNGSVARIANTEN	57
II.1.7.3.2 BEWERTUNG DER AUFBEREITUNGSSTANDORTE	62
II.1.8 GESAMT ÖKONOMISCHE BEWERTUNG	64

II.1.9 FAZIT.....	66
II.2 POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES	67
II.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT	68
II.4 NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANS	68
II.5 FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN.....	69
II.6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES	69
LITERATURVERZEICHNIS	70

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: WERTSTOFF UND ABFALLAUFKOMMEN AUS HAUSHALTUNGEN 2014.....	23
TABELLE 2: ABFALLAUFKOMMEN IM LANDKREIS KUSEL IM JAHR 2015.....	24
TABELLE 3: BIOABFALLAUFKOMMEN DER VG LAUTERECKEN-WOLFENSTEIN UND DES LK KUSEL.....	25
TABELLE 4: ABFALLAUFKOMMEN IM LANDKREIS BIRKENFELD IM JAHR 2014.....	26
TABELLE 5: BIOABFALLAUFKOMMEN DER VG BIRKENFELD IM JAHR 2014.....	26
TABELLE 6: LITERATURWERTE ZUR ÜBERSCHLÄGIGEN BERECHNUNG DER BENÖTIGTEN SUBSTRATMENGE.....	29
TABELLE 7: LITERATURWERTE ZUR BERECHNUNG DES POTENZIELLEN ENERGIEERTRAGS DURCH EINSATZ DER CO-SUBSTRATE.....	29
TABELLE 8: LITERATURWERTE ZUR ÜBERSCHLÄGIGEN BERECHNUNG DER KLÄRSCHLAMMVERGÄRUNG.....	33
TABELLE 9: ERGEBNISSE DER BERECHNUNGEN ZUR ERMITTLUNG DER AUFBEREITUNGSKAPAZITÄT DER ANLAGEN.....	34
TABELLE 10: MECHANISCHE AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIEN FÜR ABFALLSTOFFE ZUR NASSVERGÄRUNG.....	36
TABELLE 11: KURZBESCHREIBUNG VERFÜGBARER AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIEN (STOFFLÖSER).....	37
TABELLE 12: KURZBESCHREIBUNG VERFÜGBARER AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIEN (PRESSE).....	37
TABELLE 13: KURZBESCHREIBUNG VERFÜGBARER AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIEN (ZERKLEINERER).....	38
TABELLE 14: GESAMTÜBERSICHT AM MARKT VERFÜGBARER AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIEN INKL. AUFBEREITUNGSKAPAZITÄTEN.....	38
TABELLE 15: RAHMENDATEN ZUR BTA HYDROMECHANISCHEN AUFBEREITUNG.....	41
TABELLE 16: RAHMENDATEN ZUR FINSTERWALDER SEPARATIONSPRESSE.....	43
TABELLE 17: ECKDATEN DES TIETJEN DRM-HYBRID SYSTEM.....	45
TABELLE 18: VERGLEICH DER TECHNOLOGIEN NACH DEN DEFINIERTEN KRITERIEN.....	47
TABELLE 19: ZUSAMMENFASSUNG DER ANNAHMEN ZUR KOSTENVERGLEICHSRECHNUNG.....	48
TABELLE 20: ZUSAMMENFASSUNG RELEVANTER KENNZAHLEN DER IDENTIFIZIERTEN TECHNOLOGIEN.....	48
TABELLE 21: GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE DER PERIODENBEZOGENEN KOSTENVERGLEICHSRECHNUNG.....	52
TABELLE 22: BEWERTUNG DER BETRACHTETEN AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIEN.....	53
TABELLE 23: VERGLEICH DER AUFBEREITUNGSSTANDORTE.....	58
TABELLE 24: FLÄCHENVERFÜGBARKEIT AN DEN MODELLSTANDORTEN (KLÄRANLAGEN).....	60
TABELLE 25: FLÄCHENVERFÜGBARKEIT AN DEN MODELLSTANDORTEN (ÖRE).....	61
TABELLE 26: VERGLEICH DER VARIANTEN NACH STANDORTSPEZIFISCHEN KRITERIEN.....	62
TABELLE 27: GEGENÜBERSTELLUNG DER TECHNISCHEN EIGENSCHAFTEN DER STANDORTVARIANTEN.....	63
TABELLE 28: BEWERTUNG DER MODELLSTANDORTE NACH STANDORTSPEZIFISCHEN MERKMALEN.....	63
TABELLE 29: GESAMT ÖKONOMISCHE BEWERTUNG JE MODELLSTANDORT.....	64

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KAPAZITÄTSRESERVEN DER FAULUNG ZUR MITBEHANDLUNG VON FREMDSCHLÄMMEN	15
ABBILDUNG 2: ABFALLHIERARCHIE DES KRWG	16
ABBILDUNG 3: HAUSHALTSABFALLAUFKOMMEN IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2017	18
ABBILDUNG 4: VERWERTUNGSWEGE VON ORGANISCHEN ABFÄLLEN AUS DER HÄUSLICHEN SAMMLUNG IN DEUTSCHLAND	19
ABBILDUNG 5: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER CO-VERGÄRUNG VON KLÄRSCHLAMM UND BIOABFÄLLEN AN KLÄRANLAGEN	20
ABBILDUNG 6: PROJEKTSTANDORTE DES FORSCHUNGSPROJEKTES WERAA	22
ABBILDUNG 7: METHODIK ZUR AUSWAHL GEEIGNETER AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIEN	28
ABBILDUNG 8: SCHEMA BTA HYDROMECHANISCHE AUFBEREITUNG.....	40
ABBILDUNG 9: STÖRSTOFFFRAKTIONEN DER BTA HYDROMECHANISCHEN AUFBEREITUNG	41
ABBILDUNG 10: SCHEMA DER FINSTERWALDER SEPARATIONSPRESSE – BIOSQUEEZE 200.....	42
ABBILDUNG 11: SCHEMA DES TIETJEN DRM-HYBRID SYSTEMS	44
ABBILDUNG 12: OUTPUTSTOFFE DES TIETJEN DRM-HYBRID SYSTEMS.....	44
ABBILDUNG 13: KOSTENVERLAUF DER SPEZIFISCHEN AUFBEREITUNGSKOSTEN DER BETRACHTETEN AUFBEREITUNGSANLAGEN.....	55
ABBILDUNG 14: STANDORTSPEZIFISCHE VARIANTEN ZUR AUFBEREITUNG DER CO-SUBSTRATE	56

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Aa	Anlagenauslastung
ABA	Aufbereitungsanlage
AfA	Absetzung für Abnutzung
AK	Anlagenkapazität
AWB	Abfallwirtschaftsbetrieb Landkreis Birkenfeld
AWZ	Abfallwirtschaftszentrum
b	Breite
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Destatis	Statistisches Bundesamt
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
E	absoluter Energiebedarf
e	spezifischer Energiebedarf
EGB	Entsorgungsgesellschaft Landkreis Birkenfeld
EW	Einwohnerwerte
EWG	Einwohnergleichwert
GK	Größenklasse
GWh	Gigawattstunden
h	Stunde
Hi	Energiegehalt
i	kalkulatorischer Zinssatz

IfaS	Institut für angewandtes Stoffstrommanagement
K	absolute Kosten
k	spezifische Kosten
KA	Kläranlage
km	Kilometer
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kWh	Kilowattstunde
kZ	kalkulatorische Zinsen
LK	Landkreis
LfU	Landesamt für Umwelt
l	Länge
m	Masse
Mg	Megagramm
mm	Millimeter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
n	Nutzungsdauer
örE	öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
oTS	organische Trockensubstanz
p	prozentualer Anteil
PV	Photovoltaik
RBW	Restbuchwert
s	Weglänge
SSM-Modell	Stoffstrommanagementmodell
T	Tonne

t	Zeit
TS	Trockensubstanz, Trockensubstanz
UBA	Umwelt Bundesamt
UBZ	Umwelt- und Servicebetrieb Zweibrücken
V	Methanausbeute
VG	Verbandsgemeinde
WerAA	Erschließung neuer Wertschöpfungsketten in der Abfall- und Abwasserwirtschaft: Kombinierte Vergärung von Klärschlamm und biogene Hausabfälle für einen energieautarken Kläranlagenbetrieb
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
ZEBRAS	Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz -

I. Kurzdarstellung des Forschungsprojektes „WerAA“

I.1 Aufgabenstellung

An die kommunale Abwasserbehandlung werden stetig neue Herausforderungen und Erwartungen gestellt. Zwar ist die schadlose Abwasserbeseitigung primäres Ziel des Kläranlagenbetriebes aber die Schnittmengen und Synergiepotenziale zur Abfallwirtschaft und Energiewirtschaft verlangen nach einer systemischen Betrachtungsweise. Zudem ergeben sich durch veränderte Rahmenbedingungen, bspw. Änderung/Erneuerung der Rechtsprechung, technologischer Fortschritt oder ökonomische Entwicklungen, stetig neue kommunale Handlungsfelder.

Kommunale Kläranlagen verfügen über ein hohes Potenzial zur CO₂-neutralen Energiegewinnung mittels Klärschlammfäulung. Durch die Zugabe von weiteren organischen Substraten (Co-Substrate), bspw. biogene Haushaltsabfälle, kann die Klärgasproduktion gesteigert werden. Der dadurch zu erwartende Mehrertrag an Biogas kann die Eigenstromproduktion soweit steigern, dass ein energieautarker Betrieb der Kläranlage erreicht wird.

Das Forschungsprojekt „WerAA“ dient der Erarbeitung einer neuen und auf kommunale Systeme zugeschnittenen Bewertungsmethode. Anhand eines neuen, integrativen Stoffstrommanagement-Ansatzes wird ein geeignetes Bewertungsmodell entwickelt, das technische, ökonomische und ökologische Rahmenparameter aus der Abfall- und Abwasserwirtschaft sowie der Energiewirtschaft miteinander verknüpft. Im Fokus stehen hauptsächlich kommunale Gebietskörperschaften, die über kleine und mittlere Kläranlagenstandorte mit 5.000 bis 50.000 Einwohnerwerten verfügen. Für diesen definierten Betrachtungsraum gibt es bislang keine geeigneten Bewertungsmethoden und Konzeptlösungen, die eine Verwertung von häuslichem Bioabfall als Co-Substrat auf Kläranlagen ermöglichen.

Die Entwicklung des SSM-Modells erfolgt am Beispiel von drei unterschiedlichen Modellanlagen. Hierzu werden konkrete Kläranlagenstandorte als Praxismodell und Forschungsplattform in das Vorhaben eingebunden. Somit zielen die entwickelten Modelle und Strategien auf einen starken Praxisbezug und damit einhergehend auf Umsetzbarkeit ab.

Durch die Erschließung neuer Wertschöpfungsketten findet eine Neubewertung der bisherigen Abfall- und Abwasserwirtschaftsstrategien statt. Kläranlagenbetreibern und Abfallwirtschaftsbetrieben wird eine fundierte Argumentationsgrundlage an die Hand gegeben, mit deren Hilfe sie ihre Entscheidungen in Bezug auf die Optimierung der Kläranlagen (KA) sowie die zukünftige Abfallwirtschaftsplanung besser vorbereiten können.

I.2 Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Forschungsvorhaben „WerAA“ wurde im Rahmen des Förderprogramms „Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt)“ vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Projektlaufzeit betrug 30 Monate, mit Vorhabenbeginn am 01.06.2016 und Projektende am 31.11.2019.

Entsprechend den Förderrichtlinien von FHprofUnt verfolgte das Vorhaben einen inter- und transdisziplinären Projektansatz. Das Projektteam setzte sich wissenschaftlichen Mitarbeitern diverser Fachrichtungen der Hochschule Trier, Standort Umwelt-Campus Birkenfeld, einem Unternehmenspartner und Drittmittelgeber, den Hydro-Ingenieure Energie & Wasser GmbH (Unternehmen der Privatwirtschaft/Fachplaner) und öffentlicher Einrichtungen (drei Modellkläranlagen/-regionen) zusammen. Der Unternehmenspartner unterstützte das Forschungsteam bei der Entwicklung und Bewertung der technischen Lösungsansätze. Hierdurch konnte auch der gegenseitige Transfer zwischen Wissenschaft und Praxis sichergestellt werden.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Bearbeitung des Vorhabens wurde in sechs Arbeitspaketen gegliedert, deren Durchführung nach einem festgelegten Zeit- und Arbeitsplan erfolgte. Wichtige Arbeitsergebnisse wurden mit Meilensteine hinterlegt. Die sechs Arbeitspakete umfassten folgende Inhalte:

- **AP 1: Projektleitung**

Neben der Projektleitung und Koordination der unterschiedlichen Arbeitspakete wurden diverse Workshops und Arbeitsgespräche mit Experten und Akteuren aus der Abwasser- und Abfallwirtschaft sowie aus Verwaltung und Ministerien durchgeführt. Ziel der Gespräche waren die Sensibilisierung für das Thema Co-Vergärung von biogenen Haushaltsabfällen, Informationstransfer sowie der Fachdiskurs zur Projektbearbeitung und zum Ergebnistransfer.

Darüber hinaus erfolgte innerhalb der Projektleitung die Auswahl von drei Modellanlagen. Im Fokus der Auswahl standen Kläranlagen mit einer Anschlussgröße zwischen 5.000 und 50.000 Einwohnerwertend (EW). Die drei Modellanlagen unterscheiden sich in folgende Charakteristiken:

Kläranlagentyp A (KA Hoppstädten Weiersbach, VG Birkenfeld):

- Die Kläranlage betreibt eine simultan aerobe Schlammstabilisierung.
- Durch Umstellung des Verfahrens auf eine anaerobe Schlammfäulung werden zusätzliche Kapazitäten für eine Co-Vergärung bereitgestellt.

Kläranlagentyp B (KA Lauterecken, VG Lauterecken-Wolfstein):

- Die Kläranlage betreibt eine anaerobe Schlammfäulung.
- Es sind freie Faulraumkapazitäten am Standort vorhanden oder
- es können freie Faulraumkapazitäten durch verfahrenstechnische Optimierung der vorhandenen Faulungsanlagen geschaffen werden.

Kläranlagentyp C (KA Zweibrücken, Stadt Zweibrücken):

- Die Kläranlage betreibt eine anaerobe Schlammfäulung und verfügt demzufolge über verfahrenstechnische Anlagenkomponenten zur Verwertung von Biogas
- Für die Behandlung von häuslichem Bioabfall wird am Standort der Kläranlage eine neue Bioabfallvergärungsanlage geplant
- Hierzu wird geprüft, welche Mengen erforderlich sind einen zusätzlichen Fermenter wirtschaftlich zu betreiben, wenn Synergien bzgl. Gasverwertung, Zentrat des Gärrestes usw. genutzt werden können und welche Auswirkungen sich für die Verwertung des Gärrestes (ohne Klärschlamm) ergeben.
- Ein Teil des Bioabfalls wird weiterhin als Co-Substrat eingesetzt (Nutzung freier Faulraumkapazitäten).

- **AP 2: Neubewertung der Co-Vergärung**

Für die jeweilige Modellanlage erfolgte eine Analyse und Bewertung der derzeitigen verfahrenstechnischen und energetischen Situation (Ist-Analyse). Darauf aufbauend erfolgt eine Potenzial-Analyse bezogen auf die energetischen Einsparmöglichkeiten (Energieeffizienzanalyse) und dem Potenzial zur Energiegewinnung mittels Co-Vergärung von häuslichem Bioabfall. Im Rahmen einer Technologie-Analyse wurden geeignete Verfahren für die Co-Vergärung ermittelt und die hierzu notwendigen Technologien ausgewählt.

- **AP 3: Bioabfallverwertungskonzept**

Entsprechend dem Standort der Modellkläranlagen wurde eine Ist- Analyse der lokalen Abfallwirtschaftsplanung durchgeführt. Hierzu werden die lokalen Bioabfallströme aus den privaten Haushalten ermittelt. Als Bilanzraum wurde die kommunale Ebene und die Landkreisebene betrachtet. Basierend auf bestehenden Abfallwirtschaftsplänen der Kreise sowie der Landesabfallbilanz wurden vorhandene Bioabfallmengen und die derzeitigen Entsorgungswege erhoben. Darauf aufbauend wurden energetische, ökonomische und ökologische Kennzahlen ermittelt.

- **AP 4: SSM-Modell**

Zur Evaluierung und Verschneidung der ermittelten abfall- und abwasserwirtschaftlichen Kennzahlen und Rahmendaten wurde ein SSM-Modell erarbeitet. Hierdurch sollte eine Bewertung der Co-Vergärung als alternativen Verwertungsweg hinsichtlich einer energetischen, ökonomischen und ökologischen Vorteilhaftigkeit gegenüber derzeit gängigen Verfahren ermöglicht werden.

- **AP 5: Organisations- und Betriebsmodelle**

In AP 5 erfolgte eine Analyse der aktuellen Organisations- und Betriebsstrukturen der kommunalen Abfallwirtschafts- und Abwasserbetriebe in den Betrachtungsregionen. Darüber hinaus wurden weitere in der Praxis übliche Organisationsformen analysiert. Vor dem Hintergrund einer dezentralen Bioabfallverwertungsstrategie, welche sich anhand der lokalen Potenziale zur Co-Vergärung ergibt, wurde geprüft, inwiefern die bestehenden Strukturen eine lokale Verwertung der Bioabfallströme ermöglichen.

- **AP 6: Finanzierungsmodelle**

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Kosten-Analyse wurden finanzmathematischen Berechnungen hinsichtlich einer wirtschaftlichen Betriebsführung durchgeführt. Zudem wurden notwendige Rahmendaten bzw. Kreditkonditionen für die Umsetzung von Maßnahmen geprüft.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bei der Umsetzung der Energie- und Klimaschutzpolitik übernehmen Kommunen eine tragende Rolle. Hierzu haben Kommunen in den letzten Jahren bereits eine Vielzahl von Konzepten zur Energieerzeugung durch Erneuerbare Energien sowie Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz erarbeitet und in Umsetzung gebracht. Dennoch sind die vorhandenen Potenziale zur Emissionsminderung und zur CO₂-neutralen Energiegewinnung bei Weitem nicht ausreichend erschlossen. Dies liegt zum einen darin begründet, dass die Erschließung von Potenzialen nur sektoral bzw. nur für einzelne Teilbereiche erfolgt. Eine systemübergreifende Betrachtung, bspw. durch transdisziplinäre Ansätze, kommt kaum zur Anwendung. Zum anderen ergeben sich durch veränderte Rahmenbedingungen, bspw. Änderung/Erneuerung der Rechtsprechung, technologischer Fortschritt oder ökonomische Entwicklungen, stetig neue Potenziale, welche in vorhergehenden Betrachtungen nicht berücksichtigt werden konnten. Die kontinuierliche Optimierung von Energie- und Stoffflüssen und die Erschließung neuer Wertschöpfungsketten bleibt somit weiterhin eine zentrale Herausforderung für Kommunen. Ein bislang kaum oder unzureichend berücksichtigter Untersuchungsraum bei kommunalen Konzepten liegt in der kommunalen Abwasser- und Abfallwirtschaft.

Als Teil der öffentlichen Infrastruktur sind Kläranlagen, durch die Aufbereitung industrieller und kommunaler Abwässer, ein wichtiger Bestandteil zum Schutz der ökologischen Artenvielfalt, insbesondere von Gewässern. So werden jährlich in rund 9.600 deutschen kommunalen Kläranlagen ca. 10 Mrd. m³ Abwasser gereinigt (DWA, 2015). Das primäre Ziel der Reinigung ist die ordnungsgemäße Aufbereitung von Abwässern mit anschließender Einleitung in Gewässer, welche immer neuen Anforderungen und der Einhaltung von zunehmend verschärften Grenzwerten, unterliegt. Die aufwendige Klärung der Abwässer, in verschiedenen energieintensiven Reinigungsstufen, führt hierbei zu einem vergleichsweise hohen Strombedarf. Mit einem Gesamtenergieverbrauch von rund 4.400 Gigawattstunden (GWh) elektrischer Energie, stellen sie den größten Energieverbraucher noch vor anderen öffentlichen Einrichtungen wie Krankenhäusern, Schulen etc. auf kommunaler Ebene dar (UBA, 2015). Mit Blick in die Zukunft ist eine Zunahme des Energiebedarfs der Abwasserreinigungsanlagen, durch Einführung weiterer Reinigungsstufen, wie z.B. zur Entfernung von Mikroplastik oder die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Abwässern, absehbar (vgl. BUND, 2017).

Mit der Motivation Effizienzpotenziale in öffentlichen Bereichen auszuschöpfen, gerät die Abwasserwirtschaft zunehmend ins Blickfeld kommunaler Verantwortungsträger. Es entsteht ein Spannungsfeld aus abwassertechnischen Anforderungen und der Dringlichkeit den kommunalen Energiebedarf zu senken. Zur Senkung des Energiebedarfs an Kläranlagen, wird meist die energetische Optimierung der bestehenden Verfahrenstechnik bzw. der technischen Anlagenkomponenten bspw. Erneuerung der Belüftungselemente, durchgeführt (DWA, 2015 S. 3). Des Weiteren kann die Umstellung des Abwasserreinigungsverfahrens, zur Senkung des Energiebedarfs führen. Darüber hinaus ist die Stromeigenerzeugung durch anaerobe Klärschlammbehandlung möglich. Hierbei wird in einer

Vergärungsanlage Faulgas erzeugt. Der in der Kläranlage anfallende Klärschlamm, wird dabei vor Ort unter Luftabschluss, in einer Klärschlammfaulung stabilisiert. Das dabei entstehende Faulgas kann wiederum zur Erzeugung von elektrischer bzw. thermischer Energie, mittels Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken (BHKW) vor Ort, genutzt werden. So wurden im Jahr 2017 bereits 1.491 GWh elektrische Energie aus Klärgas erzeugt (Statista, 2018). Die generierte elektrische Energie, wird so zur ganzen oder teilweisen Deckung des Energiebedarfs der Kläranlage genutzt. Die genannte Stromeigenerzeugung kann durch Erschließung ungenutzter Potenziale im Faulungsverfahren gesteigert werden. Oft werden hierdurch Kapazitäten im Faulraum frei, welche durch Mitvergärung weiterer organischer Substrate (Co-Vergärung) genutzt werden können. Viele bestehende Klärschlammfaulungsanlagen sind trotz Vergärung des gesamten anfallenden Klärschlammes aufgrund von Überdimensionierung derzeit nicht voll ausgelastet (vgl. Urban, 2017; DWA, 2009 S. 30). Des Weiteren können Schlammfaulungsanlagen nachträglich unter Berücksichtigung von mitvergärbaren Substraten errichtet werden und folglich die Energieeigenerzeugung realisiert werden. Durch Steigerung der Stromeigenproduktion ist die Verringerung des Energiedefizites bzw. die Deckung des Energiebedarfs, der s.g. energieautarke Betrieb, möglich.

Die Co-Vergärung von organischem Abfall, insbesondere biogene Haushaltsabfälle (Biotonne), könnte hierbei eine entscheidende Rolle einnehmen, da diese in großer Menge auf dem Entsorgungsmarkt zur Verfügung stehen und so energetisch und stofflich genutzt werden können. Mit Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) am 1. Juni 2012 müssen biogene Haushaltsabfälle spätestens bis zum 1. Januar 2015 getrennt gesammelt und einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Bei einer flächendeckenden Einführung der Biotonne in privaten Haushalten stehen in Deutschland jährlich rund 12 Mio. Tonnen Bioabfall für eine stoffliche Verwertung zur Verfügung. Trotz der gesetzlich vorgeschriebenen Getrennterfassung ist die Einführung einer getrennten Bioabfallerfassung bis zum 01.01.2015 nicht bzw. nicht rechtzeitig von allen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern umgesetzt worden. Grund hierfür sind vor allem kritische Vorbehalte der entsorgungspflichtigen Körperschaften, wie bspw. eine geringe Einwohnerdichte, geringe ökologische Vorteile oder eine mangelnde wirtschaftliche Zumutbarkeit (vgl. Oetjen-Dehne et.al. 2014).

Um biogene Haushaltsabfälle (Biotonne) an Kläranlagen mitvergären zu können, müssen diese mechanisch aufbereitet werden. Aufgrund der Neuheit des Ansatzes des Forschungsprojektes für kleine und mittlere Kläranlagen, sind bisweilen keine technischen Konzepte zur Aufbereitung der Reststoffe vorhanden. Eine Besonderheit stellt hierbei die geringe Durchsatzmenge der Aufbereitungsanlagen dar. Des Weiteren bestehen keine allgemein gültigen Empfehlungen zum Standort der Aufbereitung der Reststoffe.

I.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens und des Informationsaustausches während der inhaltlichen Bearbeitung der jeweiligen Arbeitspakete wurden folgende Akteure eingebunden:

- Verbandsgemeindewerke Birkenfeld
- Abfallwirtschaftsbetriebe Birkenfeld
- Verbandsgemeindewerke Lauterecken-Wolfstein
- Kreisverwaltung Kusel, Abfallwirtschaft
- Umwelt- und Servicebetrieb Zweibrücken
- Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten
- Energieagentur Rheinland-Pfalz
- Umwelttechniknetzwerk Ecoliance Rheinland-Pfalz
- Greater Green, Meta-Cluster in der Großregion
- DWA Landesverband Hessen/Rheinland Pfalz/Saarland
- BTA International GmbH
- TIETJEN Verfahrenstechnik GmbH
- Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG
- Maschinenbau Lohse GmbH
- Komptech GmbH
- Wackerbauer Maschinenbau GmbH
- HUNING Anlagenbau GmbH & Co. KG
- Werner Doppstadt Umwelttechnik GmbH
- VM Press Technologies GmbH
- BELLMER GmbH
- Abwasserverband Mittlere Mümling
- Entsorgungsverband Saar
- Landratsamt Oberallgäu
- Stadtwerke Trier
- ZAK - Zentrale Abfallwirtschaft Kaiserslautern
- WVE GmbH Kaiserslautern
- Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH
- Björnson Beratende Ingenieure GmbH
- ppa - Pfälzische Pensionsanstalt
- Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Professur für Abfallbehandlung und Ressourcenmanagement
- Soil-Concept S.A. (Unternehmen aus Luxemburg mit Expertise im Bereich Klärschlammkompostierung)
- L.E.E. SÀRL (Unternehmen aus Luxemburg mit Expertise in der Planung und im Betrieb von Biogasanlagen/Bioabfallvergärungsanlagen)

II. Eingehende Darstellung des Forschungsprojektes „WerAA“

II.1 Ergebnisse des Forschungsprojektes „WerAA“

II.1.1 Vorbemerkung

Zur Ausarbeitung der Studie wurden Umfeld- und Potenzialanalysen an den Projektstandorten durchgeführt. Hierbei wurden Daten der Kläranlagenbetreiber und der vorherrschenden Abfallwirtschaft ausgewertet. Diese bilden die Grundlage für die Berechnung der nötigen Inputmengen an Co-Substraten für einen energieautarken Kläranlagenbetrieb, durch Co-Vergärung.

Des Weiteren wurden Technologien zur Aufbereitung der Co-Substrate, welche die zuvor bestimmten Aufbereitungskapazitäten vorweisen, identifiziert. Hierfür wurde Recherche in einschlägiger Fachliteratur durchgeführt und Daten relevanter am Markt verfügbarer Technologien zusammengetragen. So wurden die besten am Markt verfügbaren Technologien identifiziert. Zudem wurden Kriterien, technischer und ökonomischer Natur definiert, um die identifizierten Technologien nach quantitativen und qualitativen Merkmalen zu bewerten. Zur Identifizierung eines geeigneten Aufbereitungsstandortes wurden zwei mögliche Standorte zur Aufbereitung der Co-Substrate definiert und anhand von festgelegten technischen sowie ökonomischen Kriterien verglichen und bewertet.

II.1.2 Potenzial freier Faulraumvolumen auf Kläranlagen in RLP

Im Rahmen des Projektes „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS“ wurden potenzielle freie Kapazitäten für die Mitbehandlung von Fremdschlämmen auf rheinland-pfälzische Kläranlagen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Potenzialabschätzung weisen an insgesamt 43 Standorten freie Kapazitäten für die Mitfaulung von rd. 40.000 m³ Fremdschlämmen auf. Das größte Potenzial besteht dabei auf Anlagen der Größenklasse IV (10.000 bis 100.000 EW) mit einem freien Volumen von rund 28.000 m³ (vgl. Schmitt 2018)¹.

¹ Schmitt, T. G.; Knerr, H.; Dilly, T. C.; Hansen, J.; Hien, S.; Siekmann, T.: „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS“. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) des Landes Rheinland-Pfalz. Deutschland. Schlussbericht 2018.

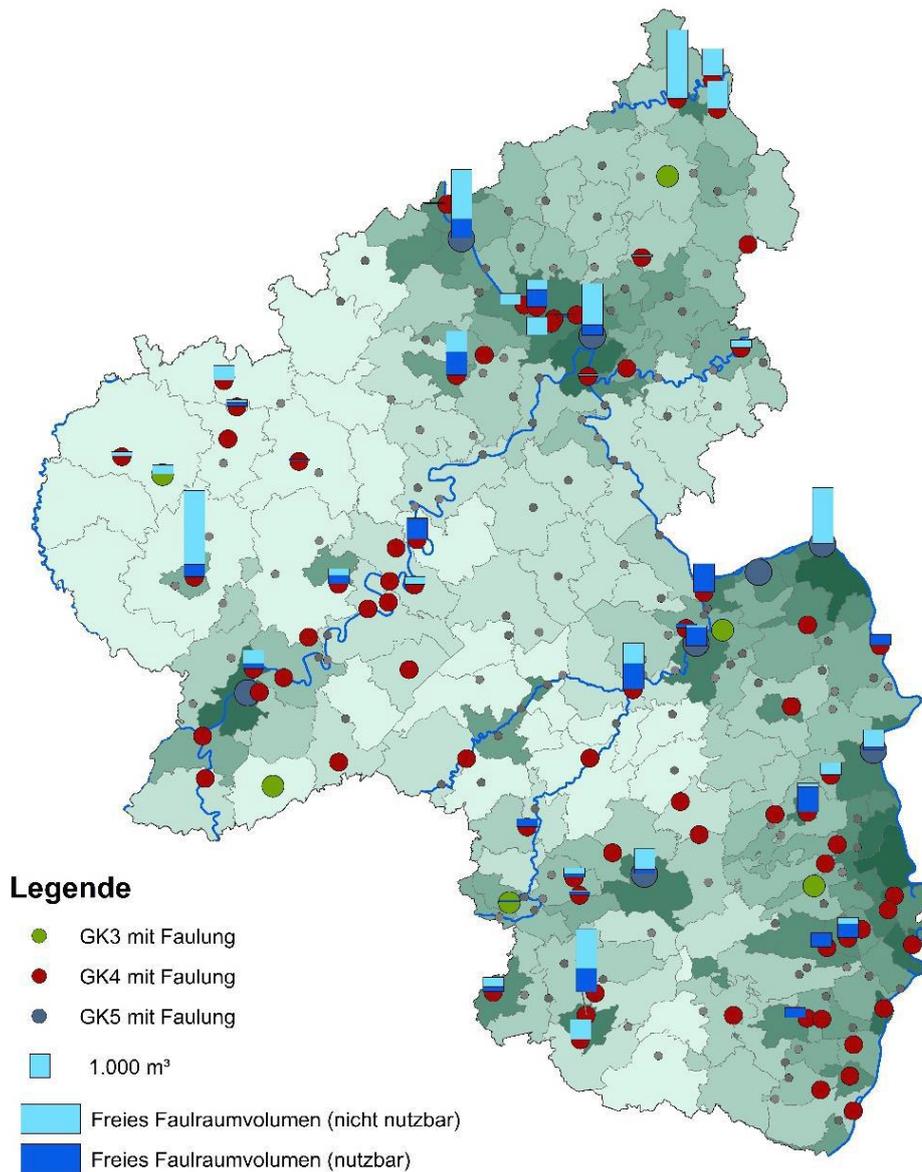


Abbildung 1: Kapazitätsreserven der Faulung zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen

Unter der Annahme, dass das gesamte Potenzial bzw. die freien Kapazitäten der GK IV mit Co-Substrat aus der Bioabfallaufbereitung aufgefüllt werden, könnten zusätzlich ca. 1 Mio. m³ Faulgas und daraus resultierend ca. 2 GWh_{el}/a Strom produziert werden.

Dieses Potenzial wird weiterhin gesteigert, wenn man zusätzlich die durch Verfahrensumstellung neu errichteten Faulungsanlagen mit entsprechenden Kapazitäten zur Co-Vergärung ausstattet. Allein in RLP werden mehr als 50 Kläranlagen weiterhin mit einer aeroben Schlammstabilisierung betrieben und bieten somit ein hohes Potenzial zur Co-Vergärung.

II.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die ersten bundeseinheitlichen rechtlichen Regelungen zur Abfallentsorgung wurden 1972 durch das Abfallbeseitigungsgesetz erlassen (vgl. UBA, 2016). Aus dem Gesetz ging eine lineare

Abfallentsorgungswirtschaft mit strikter Entsorgung der Abfälle hervor (§ 3 Abfallbeseitigungsgesetz 1972). Seit dem Erlass des Gesetzes wurde die Abfallwirtschaft grundlegend verändert. Aus der Beseitigungswirtschaft wurde eine Kreislaufwirtschaft, um natürliche Ressourcen zu schonen und eine für Mensch und Umwelt verträgliche Abfallwirtschaft umzusetzen. Die rechtliche Grundlage stellt hierfür das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) dar. Das Gesetz baut hierbei auf der in Abbildung 1 dargestellten fünfstufigen Abfallhierarchie auf (eigene Darstellung nach: Deutscher Bundestag; KrWG § 6 Abs. 1).



Abbildung 2: Abfallhierarchie des KrWG

Hierbei sollen Reststoffe in erster Linie vermieden werden. Wenn eine Vermeidung nicht möglich ist, ist eine Wiederverwertung, ein Recycling oder eine sonstige Verwertung im Sinne der Kaskadennutzung zu bevorzugen. Erst wenn die vorherigen Hierarchiestufen nicht realisierbar sind, sollte eine Beseitigung von Abfällen vorgenommen werden.

Abfälle im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes § 3 Abs. 1 KrWG sind:

„[...] alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss“ (Deutscher Bundestag; § 3 Abs. 1 KrWG).

Ferner werden durch das KrWG in § 3 Abs. 7 KrWG die im Rahmen dieser Ausarbeitung betrachteten Bioabfälle definiert als:

„[...] biologisch abbaubare pflanzliche, tierische oder aus Pilzmaterial bestehende:

Nahrungs- und Küchenabfälle aus Haushaltungen, aus dem Gaststätten- und Cateringgewerbe, aus dem Einzelhandel und vergleichbare Abfälle aus Nahrungsmittelverarbeitungsbetrieben [...]
(Deutscher Bundestag; § 3 Abs. 7 Nr. 3 KrWG)

Nach § 17 Abs. 1 KrWG sind Erzeuger und Besitzer von Abfällen aus privaten Haushaltungen und anderen Herkunftsbereichen dazu verpflichtet diese Abfälle durch einen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (öRE) verwerten zu lassen, insofern sie keine Verwertung auf ihren Grundstücken vornehmen können oder wollen. Im Sinne dieses Gesetzes wird der öRE zum Besitzer der Abfälle. Nach § 11 Abs. 1 KrWG in

Verbindung mit § 7 Abs. 2 KrWG ist der Besitzer von Bioabfällen und Klärschlämmen dazu verpflichtet eine Verwertung dieser biogenen Abfälle nach Abbildung 1 vorzunehmen und muss diese einer Beseitigung vorziehen.

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft:

„[...] sind Bioabfälle, die einer Überlassungspflicht nach § 17 Abs. 1 KrWG unterliegen, bis spätestens ab dem 1. Januar 2015 getrennt zu sammeln“ (Deutscher Bundestag; § 11 Abs. 1 KrWG).

Der öRE muss also eine getrennte Sammlung von Bio- und Restabfällen sicherstellen, um eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung durchführen zu können, zu welcher er nach § 7 Abs. 3 KrWG verpflichtet ist.

Eine Verwertung im Sinne des KrWG ist nach § 3 Abs. 23 S.1 KrWG u.a. ein jedes Verfahren, durch welches die Abfälle zur Erfüllung einer bestimmten Funktion (bspw. Vergärung zur Faulgaserzeugung) vorbereitet werden. Hieraus folgt, dass biogene Abfälle aus der häuslichen Sammlung, einer Aufbereitung zur späteren Verwertung als Co-substrat unterzogen werden dürfen.

Die Aufbereitung und die Vergärung von Abfällen fallen also unter das KrWG. Im Falle der Co-Vergärung muss allerdings eine Besonderheit beachtet werden. Die abfallrechtlichen Anforderungen an die Co-Substrate entfallen nach der Einbringung des Substrates in die Kläranlage (vgl. Franßen, 2017).

„Die Vorschriften dieses Gesetzes gelten nicht für Stoffe, sobald sie in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitet werden“ (Deutscher Bundestag; § 2 Abs. 2 Nr. 9 KrWG).

Dies bedeutet, dass eine Aufbereitung der Substrate auf dem Gelände der Kläranlage unter den Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) durchzuführen ist.

II.1.4 Bioabfallverwertung in Deutschland

In Deutschland wurde von einer reinen Entsorgungswirtschaft Abstand genommen und eine Kreislaufwirtschaft etabliert. Grund hierfür sind u.a. zunehmend knappere Ressourcen, welche aus Abfällen rückgewonnen werden können. So konnte durch moderne Behandlungs- und Verwertungstechnologien eine hohe Recyclingkapazität aufgebaut werden. Ziel ist hierbei eine Senkung der Beseitigungsquote zugunsten einer erhöhten Verwertungsquote. So konnten im Jahr 2015 bereits 79 % der Abfälle in Deutschland verwertet werden, während nur 21 % einer Beseitigung unterzogen wurden (vgl. BMU, 2018).

Die Abfallfraktionen der in Deutschland anfallenden Reststoffe, lassen sich in Abfälle aus der Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen, Bau und Abbruchabfälle, Sekundärabfälle, übrige Abfälle insbesondere aus Produktion und Gewerbe sowie Siedlungsabfälle unterteilen (vgl. Destatis, 2017). Aus diesen Fraktionen wurden im Jahr 2016 rund 15,61 Mio. Tonnen Bioabfälle in Bioabfallbehandlungsanlagen verwertet (Destatis, 2018). Hiervon wurde im genannten Jahr ein Aufkommen von 10,18 Mio. Tonnen des Bioabfalls in Siedlungsabfällen gesammelt (Destatis, 2018). Diese Fraktion ist somit die höchste Quelle an organischen Abfällen. Zu den Siedlungsabfällen zählen hierbei

Haushaltsabfälle, vergleichbare Abfälle aus Gewerbe und Industrie sowie Verpackungsabfälle (vgl. Destatis, 2014). Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt das deutsche Haushaltsabfallaufkommen im Jahr 2017 auf. Von dem Gesamtabfallaufkommen sind rund 27 % Garten- und Parkabfälle, sowie Abfälle aus der Biotonne, welche zu den organischen Abfällen zählen (Eigene Darstellung nach: Destatis, 2018).

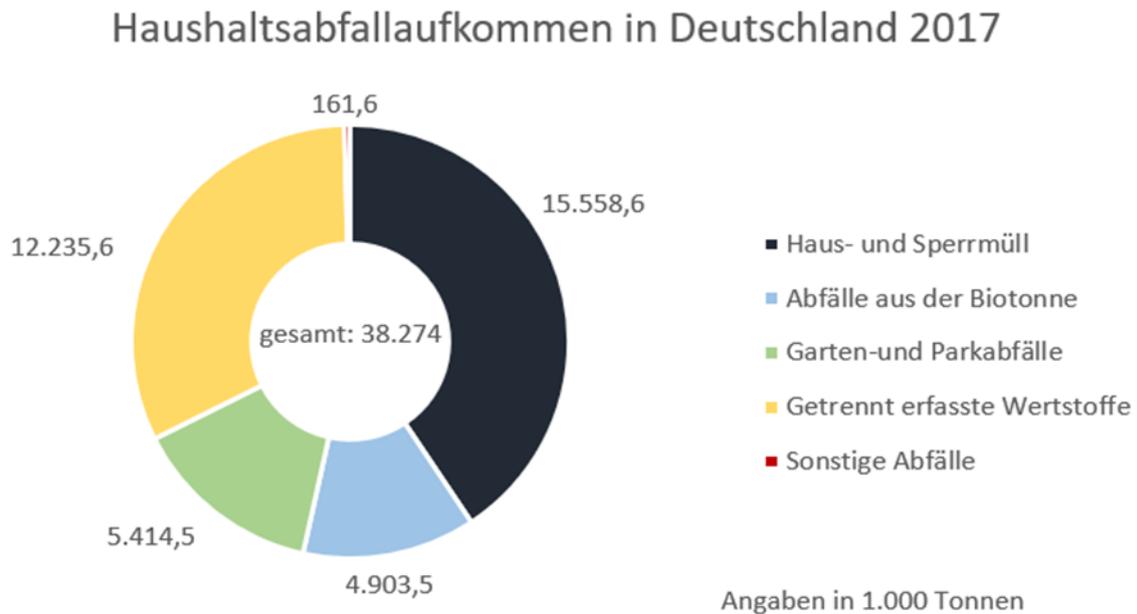


Abbildung 3: Haushaltsabfallaufkommen in Deutschland im Jahr 2017

Wie in Kapitel II.1.3 beschrieben, müssen nach Neuerung des KrWG Bioabfälle getrennt vom Restmüll gesammelt werden, dies wurde allerdings bis zum Jahr 2017 noch nicht flächendeckend umgesetzt. Von einem weiteren Anstieg des Anteils von organischen Abfällen durch Sammlung in der Biotonne ist also auszugehen. Eine Verwertung der biogenen Abfälle wird hierbei in stofflicher oder energetischer Form vorgenommen. Explizit werden Bioabfälle in Deutschland durch Kompostierung, Vergärung oder thermische Behandlung verwertet (Eigene Darstellung nach: UBA, 2017; LK-Böblingen, 2018).

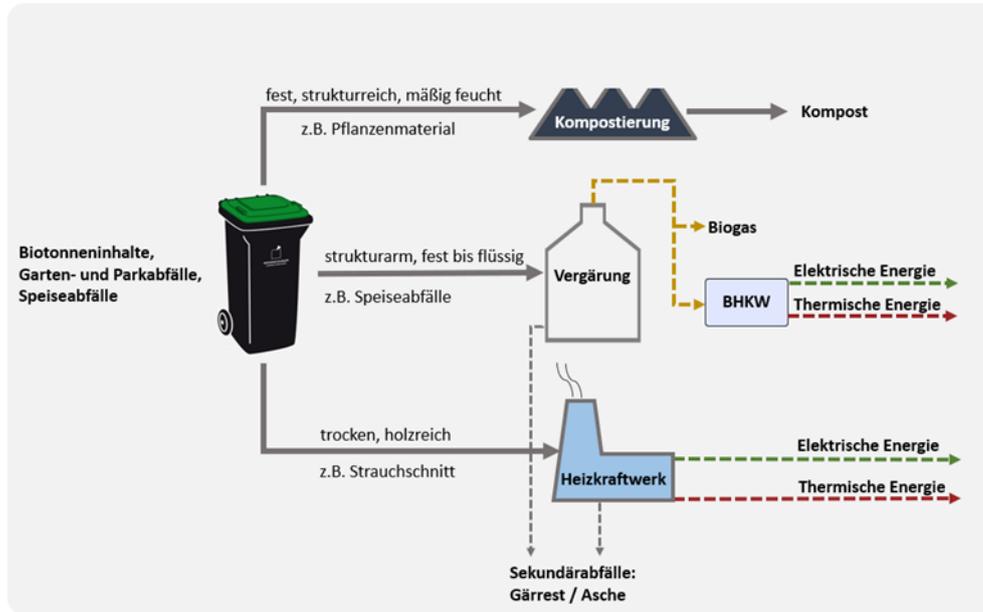


Abbildung 4: Verwertungswege von organischen Abfällen aus der häuslichen Sammlung in Deutschland

In Abbildung 4 sind die grundsätzlichen Verwertungswege von biogenen Abfällen aus der häuslichen Sammlung in Deutschland aufgezeigt. Zur stofflichen Verwertung zählen hierbei die Kompostierung und die anaerobe Vergärung zur Biogaserzeugung, während die Entsorgung im Biomasseheizkraftwerk eine energetische Verwertungsoption darstellt. Bei Vergärung und thermischer Entsorgung entstehen Sekundärabfälle wie Gärreste und Asche, welche einer weitergehenden Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden müssen. Darüber hinaus gibt es weitere nur in kleinem Maß eingesetzte Behandlungsverfahren wie bspw. Pyrolyseverfahren.

Die im nachfolgenden Kapitel beschriebene Co-Vergärung stellt ebenfalls eine ordnungsgemäße Möglichkeit zur stofflichen und energetischen Verwertung von organischen Abfällen dar.

II.1.5 Co-Vergärung auf kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen

II.1.5.1 Definition der Co-Vergärung

Unter Co-Vergärung wird die gleichzeitige Vergärung von mindestens zwei unterschiedlichen biologisch abbaubaren Substraten verstanden. Hierbei wird dem Vergärungsprozess des Hauptsubstrates, ein weiteres Substrat zugeben, um den Gasertrag zu steigern (vgl. Jank, 2017 S. 1). Im Kontext der Abwasserbehandlung, wird an Kläranlagen, welche über eine anaerobe Schlammbehandlung verfügen, dem Hauptsubstrat (Primär- und Sekundärklärslamm) ein weiteres organisches Substrat zur Faulung hinzugefügt. Hierdurch steigt der Faulgasanfall an und die Energieerzeugung der Kläranlage kann erhöht werden. Voraussetzung hierfür, ist das Vorhandensein bzw. die Nutzung vorhandener Kapazitäten im Faulbehälter und Anlagentechnik bzw. vorhergehende Erzeugung freier Kapazitäten. Neben der erhöhten Energieerzeugung weist die Co-Vergärung weitere Vorteile auf. So kann die wirtschaftliche und ökologisch sinnvolle Verwertung von organischen Reststoffen an Kläranlagen durchgeführt werden. Des Weiteren wird bei der geschickten Substratkombination der verfahrenstechnische Ablauf des Gärprozesses

verbessert und eine Steigerung der Qualität des Gärrückstandes bzw. eine Verbesserung des Klärschlammabbaus erreicht (vgl. DWA, 2009 S. 7; Nowak, 2016 S. 7).

Co-Substrate können auf unterschiedlichen Wegen in die Kläranlage bzw. in die Faulung eingebracht werden. Dies ist abhängig von der Beschaffenheit der Ausgangssubstrate. So können in Wasser gelöste Co-Substrate, bspw. Fremdwässer, direkt in die Kläranlage miteingeleitet werden. Substrate, welche einer vorherigen Aufbereitung unterzogen werden müssen, können separat oder gemeinsam mit dem Klärschlamm in den Faulurm eingeleitet werden. (vgl. DWA, 2009 S. 11).

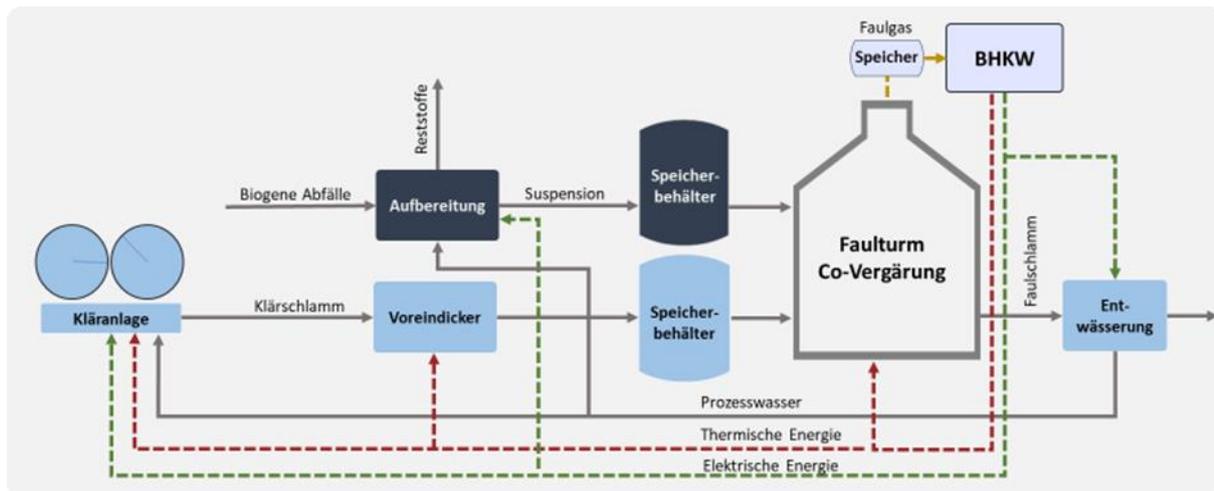


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfällen an Kläranlagen

In Abbildung 5 ist die Co-Vergärung von Bioabfällen aus der häuslichen Sammlung beispielhaft dargestellt. Die technische Umsetzung der Co-Vergärung kann je nach Verfahren und eingesetztem Co-Substrat von dieser Darstellung abweichen. Ein wichtiger Schritt bei der Co-Vergärung ist die Aufbereitung des eingesetzten biogenen Substrates. Diese variiert je nach Beschaffenheit des Co-Substrates. Während bereits vorbehandelte, pumpfähige Substrate direkt in einem Speicherbehälter zwischengespeichert werden können, müssen inhomogene Substrate wie Biotonneninhalte umfangreich aufbereitet werden (vgl. DWA, 2009 S. 28). Das Ziel der Aufbereitung ist hierbei eine pumpfähige, homogene Suspension zu erzeugen, welche für eine komplikationsarme Einbindung in den bestehenden Nassvergärungsprozess geeignet ist. Hierbei werden anfallende Störstoffe abgeschieden und einer externen Verwertung zugeführt. Nach Erzeugung der Suspension, wird diese im Speicherbehälter zwischengespeichert. Ebenso wird der Klärschlamm durch den Voreindicker behandelt und anschließend zwischengespeichert. Nach der Speicherung werden die Substrate bedarfsgerecht in den Faulbehälter eingeleitet. Im Faulurm wird durch die Vergärung der Inputstoffe Faulgas gewonnen, welches nach Zwischenspeicherung zu thermischer und elektrischer Energie im Blockheizkraftwerk umgewandelt wird. Der ausgefaulte Gärrest wird eingedickt und verwertet. Beim Eindicken des Gärrückstandes entsteht das s.g. Schlammwasser, welches wieder der biologischen Abwasserbehandlung zugeführt wird und hierdurch eine zusätzliche Belastung dieser hervorruft. Diese Rückbelastung der Kläranlage wird durch die Co-Vergärung erhöht und ist u.a. abhängig von der Zusammensetzung des Co-Substrates und dessen Abbaugrad im Faulbehälter. Eine hierdurch evtl. erforderliche Nachrüstung der Kläranlage sollte bei der Planung der Co-Vergärung beachtet werden (vgl. Urban, 2017). Die bei der Vergärung erzeugte thermische Energie wird im Gärprozess und im Betrieb der Kläranlage genutzt. Hierdurch wird in der Regel der gesamte Wärmebedarf der Kläranlagen gedeckt (vgl. Schmelz, 2002 S. 1). Die erzeugte elektrische Energie kann ebenso in der

Kläranlage und für den Aufbereitungsprozess der Co-Substrate eingesetzt werden. So kann der Eigenversorgungsgrad der Kläranlage stark erhöht werden. Der energieautarke Betrieb bzw. eine Überproduktion von elektrischer Energie ist bei der Kombination aus optimaler Co-Vergärung und dem energieeffizienten Kläranlagenbetrieb möglich und wurde in der Praxis bereits unter Beweis gestellt (vgl. Jank, 2017; Mattes, 2015).

Um die ordnungsgemäße, komplikationsfreie Einbringung der Co-Substrate in den laufenden Kläranlagenbetrieb gewährleisten zu können, werden einige Anforderungen an die Eigenschaften der Co-Substrate gestellt.

II.1.5.2 Anforderungen an Co-Substrate

Die schonende Einbindung der Co-Substrate in den bestehenden Vergärungsprozess bedarf einiger Anforderungen, welche in der nachfolgenden Aufzählung dargestellt sind (vgl. Roediger, 2017; Schmelz, 2002 S. 3; DWA, 2009 S. 26):

- Rechtliche Zulässigkeit des Co-Substrates zur Co-Vergärung
- Anaerob-biologisch Abbaubarkeit
- Pumpfähigkeit
- Möglichkeit zur Aufbereitung
- Geringer Störstoffanteil
- Gleichbleibende Zusammensetzung
- Evtl. Hygienisierung
- Geringe Rückbelastung der Kläranlage durch das Co-Substrat

Eine Vielzahl von potenziellen Co-Substraten, welche den beschriebenen Eigenschaften entsprechen, ist zur Co-Vergärung geeignet. Die grundlegende Eignung weisen organische Erzeugnisse und Rückstände aus der Landwirtschaft, Erzeugnisse und Rückstände aus der Lebensmittelproduktion und biologische Abfälle aus der gewerblichen und häuslichen Sammlung vor (vgl. DWA, 2009 S. 46). Im Rahmen dieser Arbeit werden insbesondere Co-Substrate aus der häuslichen Sammlung, sprich biogene Hausabfälle und vergärbare Grüngut betrachtet.

Da einige genannte Co-Substrate die zur Co-Vergärung benötigten Eigenschaften nicht oder nur teilweise aufweisen, ist eine Aufbereitung der Substrate notwendig. Zur Aufbereitung können verschiedene Verfahren eingesetzt werden. Ziel der Verfahren ist es, die Co-Substrate für eine komplikationsfreie Einbindung in den bestehenden Vergärungsprozess, vorzubereiten. Hierfür ist die Analyse der biologischen Abbaubarkeit des Co-Substrates im Vorfeld erforderlich (vgl. LfU Bayern, 2011 S. 12). Je nach Co-Substrat variiert die Aufbereitung, so müssen bereits pumpfähige homogene Substrate evtl. nur einer Störstoffabscheidung unterzogen werden. Inhomogene Co-Substrate wie die betrachteten Bioabfälle aus der häuslichen Sammlung müssen hingegen durch die Aufbereitung zu einer homogenen Suspension verarbeitet werden. Hierzu dienen Mühlen, Pressen und Pulper in unterschiedlichen Ausführungen. Durch nachfolgende Anmischung kann eine pumpfähige Suspension erzeugt und dem Faulbehälter zugeführt werden (vgl. LfU Bayern, 2011 S. 7). Aufbereitungsanlagen können aus verschiedenen Komponenten nach den standort- und inputspezifischen Anforderungen errichtet werden. Auf dem Markt werden allerdings

auch Komplettlösungen zur Aufbereitung von biogenen Abfällen, wie bspw. die hydromechanische Aufbereitungsanlage des Unternehmens BTA International GmbH, angeboten (vgl. BTA, 2015).

II.1.6 Projektstandorte

Nachfolgenden wird die Ist-Situation der Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung an den Projektstandorten innerhalb des Forschungsprojektes aufgezeigt.

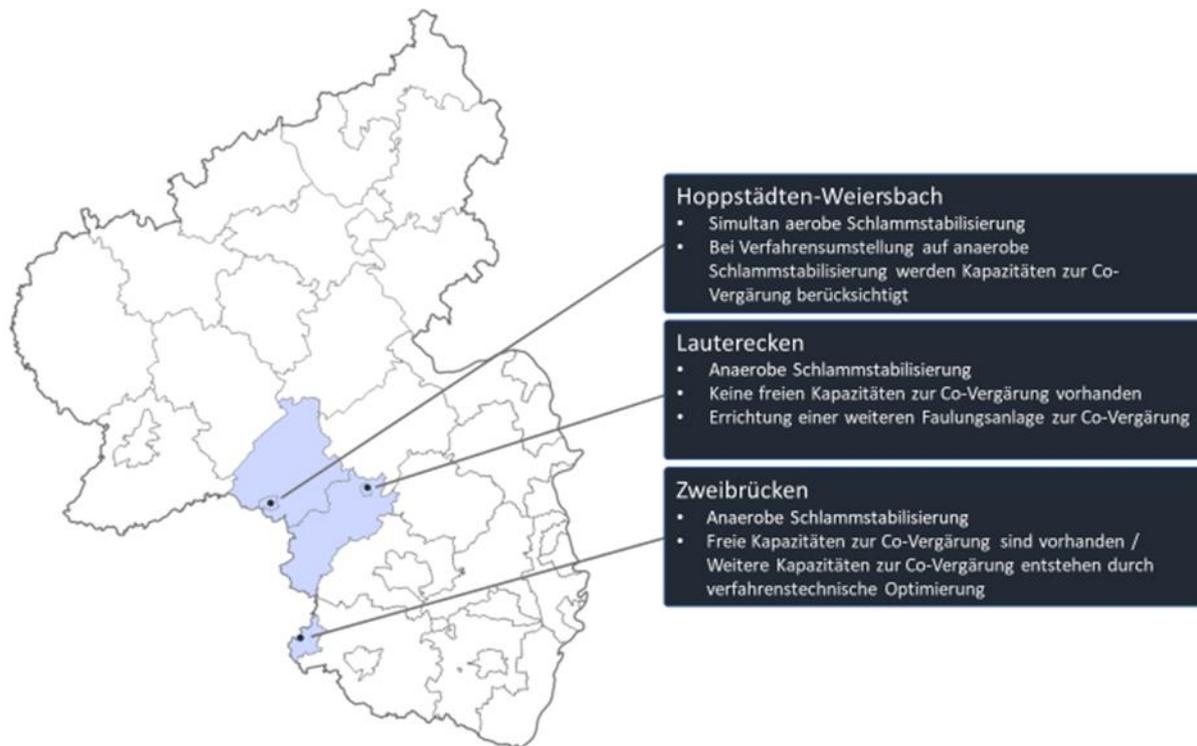


Abbildung 6: Projektstandorte des Forschungsprojektes WerAA

In Abbildung 6 sind die Projektstandorte, deren Landkreise, sowie die genannten Kläranlagen im Bundesland Rheinland-Pfalz, abgebildet. Im Weiteren werden die derzeitigen Schlammbehandlungsverfahren und für das Projekt dienlichen Eckdaten zur Einführung der Co-Vergärung aufgezeigt.

II.1.6.1 Standort Zweibrücken

Die kreisfreie Stadt Zweibrücken liegt im südwestlichen Teil des Bundeslandes Rheinland-Pfalz, direkt an der Grenze zum Saarland und grenznah zu Frankreich. Neben der Innenstadt vereint Zweibrücken vier weitere Stadteile sowie fünf Vororte, in welchen im Jahr 2017 rund 34.270 Menschen lebten (statistik.rlp, 2018). Sie ist somit die kleinste kreisfreie Stadt Deutschlands. Die Abfallsammlung und -entsorgung im gesamten Stadtgebiet wird durch den Umwelt- und Servicebetrieb Zweibrücken (UBZ) durchgeführt. Bio- und Grüngutabfälle werden vom UBZ selbst im Ganzen oder zu Teilen stofflich verwertet, während Sperr- und Restabfälle in interkommunaler Zusammenarbeit durch den Zweckverband Abfallverwertung Südpfalz beseitigt werden. Die Entsorgung von Problemabfällen wird durch die Sonderabfallgesellschaft

Rheinland-Pfalz mbH durchgeführt. Papier, Pappe, Kartonagen und Altkleider werden vom UBZ selbst vermarktet (vgl. UBZ, 2015 S.33).

Tabelle 1: Wertstoff und Abfallaufkommen aus Haushaltungen 2014

Abfallfraktion	Jahresanfall [Mg/a]	Einwohnerspezifischer Anfall [kg/(EW·a)]	Anteil
Bioabfälle	2.430	70,91	15%
Gartenabfälle	1.370	39,98	9%
Restabfälle	5.500	160,49	35%
Sperrabfälle	1.136	33,15	7%
Papier, Pappe, Kartonage	2.695	78,64	17%
Altglas	859	25,07	5%
Leichtverpackung	1.229	35,86	8%
weitere Wertstoffe	535	15,61	3%
Total	15.754	459,70	100%

Tabelle 1 zeigt das aufgeschlüsselte Gesamtabfallaufkommen der Stadt Zweibrücken im Jahr 2014. Hierbei fielen durch Bioabfälle aus Haushaltungen und Gartenabfällen insgesamt 3.800 t biogene Reststoffe an. Im Verhältnis zur Einwohnerzahl errechnet sich ein Pro-Kopf-Aufkommen von 70,91 kg/(EW·a) Bioabfälle und 39,98 kg/(EW·a) Gartenabfälle. Bei Vergärung der gesamten biologisch abbaubaren Abfallmenge, ist ein theoretischer Gasertrag von ca. 400.000 m³/a möglich. Restabfälle machten mit einem Anteil von 35 % den größten Teil des Abfallaufkommens aus, während biogene Abfälle mit 24 % ins Gewicht fallen. Zur Abfallsammlung werden je nach Abfallfraktion unterschiedliche Erfassungssysteme angeboten. Hierbei werden Rest-, Bio- und Papierabfälle im Holsystem durch bereitgestellte Abfallbehälter gesammelt. Seit dem Jahr 2018 wurde die bisher noch freiwillige Biotonne, durch Erneuerung des Abfallentsorgungssystems, verpflichtend eingeführt (UBZ, 2018). Die Biotonne wird in den Monaten Mai bis Oktober wöchentlich und in den übrigen Monaten im zweiwöchentlichen Rhythmus geleert (vgl. UBZ, 2015). Grünabfälle werden im Bringsystem am Abfallwirtschaftszentrum (AWZ) Reichenbachtal und am Wertstoffhof des UBZ angenommen. Die gesammelten Grünabfälle werden in der eignen UBZ-Kompostanlage am AWZ Rechenbachtal zu hochwertigem Kompost umgewandelt. Gesammelte Bioabfälle hingegen werden derzeit nicht mehr auf der Kompostanlage des AWZ verwertet, da dies der technische Zustand der Rottetrommeln vor Ort nicht zulässt. Stattdessen werden die biogenen Abfälle seit 2014 in einem externen Kompostwerk stofflich verwertet.

Neben der Abfallsammlung und -entsorgung, fällt ebenso die Abwasseraufbereitung in das Aufgabengebiet des UBZ. Hierzu wird die Kläranlage, welche sich im Stadtgebiet Zweibrücken befindet, betrieben. Die Abwässer werden in der Kläranlage durch das mechanisch-biologische Reinigungsverfahren mit Denitrifikation und Phosphorfällung aufbereitet. Die Ausbaugröße der Abwasserreinigungsanlage beträgt 70.000 EW, tatsächlich werden nur ca. 60.000 EW behandelt (Schmitt, 2016). Sie gehört somit der GK 4 an. Die im Vergleich zur Einwohnerzahl hohe Anzahl an behandelten EW ergibt sich aus der Mitbehandlung von ca. 25.000 Einwohnergleichwerten (EWG) aus industriellen Abwässern im Einzugsgebiet (vgl. Statistik.RLP, 2015). Im Jahr 2015 betrug der Gesamtenergiebedarf der Kläranlage 1.736.197 kWh, welcher zu einem einwohnerspezifischen Energiebedarf von 28,94 kWh/(EW·a) führte (Schmitt, 2016). Anfallende Primär- und Überschussschlämme werden voreingedickt und dem Faulturm zugeführt. Der Klärschlamm wird anaerob ausgefault. Das entstehende Faulgas wird zunächst in dem Gasbehälter zwischengespeichert und im Anschluss im BHKW zu

thermischer und elektrischer Energie umgewandelt. Hierdurch wurden im Jahr 2015 742.130 kWh elektrische Energie erzeugt (Schmitt, 2016). In Verbindung mit der PV-Anlage am Standort, welche 58.738 kWh elektrischen Strom generieren konnte, wurde ein Eigenversorgungsgrad von 43 % erreicht (Schmitt, 2016). Somit erfolgte ein Zukauf von 935.329 kWh elektrischer Energie (Schmitt, 2016).

Auf der Kläranlage Zweibrücken können durch verfahrens- und anlagentechnische Optimierungen freie Faulraumkapazitäten geschaffen werden. Durch die neuen Kapazitäten ist die Co-Vergärung von biogenen Hausabfällen und somit eine Steigerung der Faulgaserzeugung bzw. der Stromproduktion möglich.

II.1.6.2 Standort Lauterecken-Wolfstein

Im nordwestlichen Teil des Bundeslandes Rheinland-Pfalz liegt die Verbandsgemeinde Lauterecken-Wolfstein. Sie wurde im Jahr 2014 durch Zusammenschluss der Verbandsgemeinden (VG) Lauterecken und Wolfenstein im Landkreis (LK) Kusel gebildet. Ihr gehören die zwei gleichnamigen Städte sowie 39 weitere Ortsgemeinden an. Im Jahr 2017 wurde die Verbandsgemeinde von ca. 18.400 Einwohnern bewohnt, während auf Landkreisebene ca. 71.000 Einwohner lebten (statistik.rlp, 2018). Die Abfallsammlung in der Verbandsgemeinde wird, so wie in zwei weiteren im Landkreis liegenden Verbandsgemeinden, von der Abfallwirtschaft des Landkreises Kusel übernommen. Die Sammlung der Reststoffe erfolgt je nach Abfallfraktion in Hol- oder Bringsystemen. Für die Verwertung wird die eigene Deponie Schneewiederhof betrieben bzw. sind private Dritte zuständig. Bisher fand im Landkreis Kusel keine getrennte Erfassung des häuslichen Bioabfalls statt. Aufgrund der in Kapitel II.1.3 bereits beschriebenen Änderungen des KrWG wird ab dem Jahr 2019 die Getrenntsammlung von Bioabfällen im Landkreis Kusel eingeführt (vgl. LK Kusel, 2018 & IfaS, 2018).

Tabelle 2: Abfallaufkommen im Landkreis Kusel im Jahr 2015

Abfallfraktion	Jahresanfall [Mg/a]	Einwohnerspezifischer Anfall [kg/(EW·a)]	Anteil
Gartenabfälle	10.400	146,86	29%
Restabfälle	12.391	174,97	34%
Sperrabfälle	2.903	40,99	8%
Papier, Pappe, Kartonage	5.986	84,53	17%
Altglas	1.713	24,19	5%
Leichtverpackung	2.618	36,97	7%
weitere Wertstoffe	-		
Total	36.011	508,51	100%

In Tabelle 2 ist das gesamte Abfallaufkommen des Landkreises Kusel aufgezeigt. Da zum Zeitpunkt der Ausarbeitung noch keine getrennte Bioabfallsammlung vorgenommen wurde, sind biogene Abfälle zum einen im Restabfall enthalten zum anderen in den Gartenabfällen. Die Gartenabfälle machen mit einer Gesamtmasse von ca. 10.400 t einen Anteil von 29 % aus. Zur besseren Abschätzung des Biomassepotenzials ist das prognostizierte Bioabfallaufkommen und tatsächliche Grüngutaufkommen in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgezeigt (IfaS, 2018).

Tabelle 3: Bioabfallaufkommen der VG Lauterecken-Wolfenstein und des LK Kusel

Abfallfraktion		Jahresanfall [Mg/a]	Einwohnerspezifischer Anfall [kg/(EW·a)]
VG-Ebene	Bioabfälle	530	28,15
	Gartenabfälle	2.758	146,48
	Gesamte Bioabfallmenge	3.288	174,63
LK-Ebene	Bioabfälle	2.000	28,25
	Gartenabfälle	10.400	146,49
	Gesamte Bioabfallmenge	12.400	174,74

Tabelle 3 zeigt die für das Forschungsprojekt relevanten Abfallströme der VG Lauterecken-Wolfenstein und des LK Kusel auf. Hierbei ist zu beachten, dass der Bioabfallanfall im Rahmen des „Teilkonzept klimafreundliche Abfallentsorgung“ des IfaS für den LK Kusel berechnet wurde, da zum Zeitpunkt der Ausarbeitung die Getrenntsammlung von Bioabfällen noch nicht umgesetzt wurde. Bei einer berechneten Bioabfallmenge von 2.000 t/a und einem Grüngutanfall von 10.400 t im Jahr 2014, errechnet sich somit ein theoretischer Gesamtgasanfall von ca. 680.620 m³/a im Landkreis.

Die Sammlung überlassungspflichtiger Abfälle wird im Landkreis Kusel in verschiedenen Systemen durchgeführt. Auch nach Änderung der Abfallwirtschaft ab 2020 wird der anfallende Restmüll im Holsystem mit einer Restmülltonne gesammelt werden. Neu ist allerdings ab dem Jahr 2020 die geplante Sammlung des Biomülls in einer separaten Biotonne, welche im 14-tägigen Rhythmus geleert wird (vgl. LK Kusel, 2018). Bisher wird der gesammelte Restabfall, welcher das Biogut beinhaltet, in der Sortieranlage Reichenbach in eine heizwertreiche und eine nicht heizwertreiche Fraktion separiert. Im Anschluss werden die Fraktionen entweder als Ersatzbrennstoff im Industrieheizkraftwerk Andernach verwendet oder im Müllheizkraftwerk Laar thermisch entsorgt (vgl. LK Kusel, 2018). Die Erfassung des Grüngutes erfolgt weiterhin im Bringsystem an den 33 Annahmestellen im Landkreis. Nach Erfassung und Umschlag des Grüngutes, wird diese Fraktion durch den Maschinen-Betriebshilfsring Westpfalz e.V. aufbereitet. Holzige Anteile werden abgetrennt und einer thermischen Verwertung durch Dritte zugeführt.

Am Ortsrand des Gemeindegebietes Lauterecken ist die Kläranlage Lauterecken gelegen. Hier wird das Abwasser der Gemeinde mittels mechanisch-biologischer Abwasserbehandlung mit Denitrifikation gereinigt und anschließend in den Glan eingeleitet. Neben der Behandlung des in Lauterecken anfallenden Abwassers wird das Abwasser eines Fruchtsaftproduzenten gereinigt. Insgesamt werden rund 24.000 EW behandelt, somit gehört die Kläranlage der Größenklasse 4 an. Im Jahr 2016 betrug der Gesamtenergiebedarf 692.532 kWh, dies entspricht einem einwohnerspezifischen Strombedarf von 28,86 kWh/(EW·a). Die Kläranlage verfügt über eine anaerobe Schlammbehandlung, in welcher der anfallende Primär- und Sekundärschlamm aus dem Vorklärbecken und aus dem Belebungsbecken stabilisiert wird. Das hier erzeugte Faulgas wird im Anschluss in einem BHKW in Wärmeenergie und elektrische Energie umgewandelt. Neben der Energieerzeugung im BHKW wird ebenso elektrische Energie durch die installierte Photovoltaikanlage erzeugt. Insgesamt konnten so im Jahr 2016 rund 300.000 kWh elektrische Energie erzeugt werden. Dies entspricht einem Eigenversorgungsgrad von 40 %. Ein elektrisches Energiedefizit von 392.080 kWh musste somit durch Zukauf kompensiert werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die Nachrüstung eines zweiten Faulbehälters zur Vergärung der Co-Substrate und das Potenzial für einen energieautarken Kläranlagenbetrieb untersucht.

II.1.6.3 Standort Hoppstädten-Weiersbach

Grenznah zum Saarland, im Nahetal, liegt der Projektstandort Hoppstädten-Weiersbach. Er gehört neben 29 weiteren Gemeinden und der gleichnamigen Stadt Birkenfeld der Verbandsgemeinde Birkenfeld an. In der VG lebten im Jahr 2017 20.377 Einwohner (statistik.rlp, 2018). Der Nationalparklandkreis Birkenfeld setzt sich neben der VG Birkenfeld aus vier weiteren Verbandsgemeinden zusammen. Im Landkreis lebten im Jahr 2017, bei einer leicht sinkenden Einwohnerentwicklung, 80.728 Menschen (statistik.rlp, 2018). Die Abfallwirtschaft im gesamten Landkreisgebiet wird durch den Abfallwirtschaftsbetrieb Landkreis Birkenfeld (AWB) in Verbindung mit der Entsorgungsgesellschaft Landkreis Birkenfeld mbh (EGB) durchgeführt (IfaS, 2016).

Tabelle 4: Abfallaufkommen im Landkreis Birkenfeld im Jahr 2014

Abfallfraktion	Jahresanfall [Mg/a]	Einwohnerspezifischer Anfall [kg/(EW·a)]	Anteil
Bioabfälle	4.423	54,79	11%
Gartenabfälle	14.559	180,35	37%
Restabfälle	9.208	114,06	24%
Sperrabfälle	-	-	-
Papier, Pappe, Kartonage	6.180	76,55	16%
Altglas	2.004	24,82	5%
Leichtverpackung	2.698	33,42	7%
weitere Wertstoffe	-	-	-
Total	39.072	484,00	100%

Wie in Tabelle 4 zu sehen, macht der Grüngutanfall mit rund 180 kg/EW den größten Teil des Abfallaufkommens pro Einwohner im Landkreis Birkenfeld aus. In Verbindung mit dem Bioabfallanfall sind rund 48 % des gesamten pro-Kopf-Anfalls biologisch verwertbar, dies entspricht 18.982 t/a. In der nachfolgenden Tabelle 5 ist das Bioabfallaufkommen auf Landkreisebene sowie in der Verbandsgemeinde aufgezeigt (IfaS, 2016).

Tabelle 5: Bioabfallaufkommen der VG Birkenfeld im Jahr 2014

Abfallfraktion		Jahresanfall [Mg/a]	Einwohnerspezifischer Anfall [kg/(EW·a)]
VG-Ebene	Bioabfälle	1.116	54,79
	Gartenabfälle	3.675	180,35
	Gesamte Bioabfallmenge	4.791	235,14
LK-Ebene	Bioabfälle	4.423	54,79
	Gartenabfälle	14.559	180,35
	Gesamte Bioabfallmenge	18.982	235,14

Bei kompletter Vergärung der im Landkreis anfallenden Bioabfälle und des Grüngutes, ist eine theoretische Biogasmenge von ca. 1.200.000 m³/a möglich.

Die Sammlung der überlassungspflichtigen Abfälle erfolgt in verschiedenen Hol- und Bringsystemen. Für Bioabfälle sind im gesamten Landkreisgebiet an 708 Standorten 660l Container dezentral eingerichtet (vgl. IfaS, 2016). Hier können die Einwohner die Speise- und Küchenabfälle in kostenfrei bereitgestellten,

biologisch abbaubaren, Bioabfallbeuteln entsorgen. Die dem öRE überlassenen Bioabfälle werden durch ein beauftragtes Privatunternehmen, gesammelt und in einer Vergärungsanlage, der Veolia Umweltservice West GmbH in Hoppstädten-Weiersbach, stofflich und energetisch verwertet. Grüngut kann hingegen im reinen Bringsystem an 18 mobilen Annahmestellen, 3 Hofannahmestellen, sowie an 53 weiteren stationären Annahmestellen abgegeben werden (vgl. IfaS, 2016). Das gesammelte Grüngut wird geschreddert und derzeit als Bodenverbesserer auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht. Auch wenn laut der vorliegenden Abfallwirtschaftskonzepte eine thermische Verwertung der holzreichen Grüngut Fraktion angedacht ist, findet laut telefonischer Mitteilung der Abfallbetriebe des Nationalparklandkreises Birkenfeld derzeit keine thermische Verwertung statt.

Die Kläranlage Hoppstädten-Weiersbach ist am Ortsrand der Gemeinde gelegen. Hier werden die anfallenden Abwässer der Gemeinde aufbereitet und gereinigt in den Fluss Nahe eingeleitet. Die eigentliche Ausbaugröße der Anlage beträgt 23.000 EW während, die tatsächliche Belastung der Anlage derzeit bei ca. 28.000 EW liegt. Sie gehört somit der Größenklasse 4 an. Als Reinigungsverfahren wird eine Belebungsanlage mit aerober Schlammstabilisierung eingesetzt. Im Jahr 2018 fielen hierbei rund 1.202 t Klärschlamm an. Dieser wird derzeit eingedickt und einer Fremdverwertung unterzogen. Eine anaerobe Schlammbehandlung mit Faulgasnutzung wird nicht durchgeführt. Der derzeitige Energieverbrauch der Anlage beträgt 469.519 kWh/a. Dies führt zu einem spezifischen Energieverbrauch von 16,78 kWh/(EW·a). Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Umrüstung der Klärschlammstabilisierung von dem aktuellen aeroben zum anaeroben Verfahren untersucht. Hierbei wurden Kapazitäten zum Vergären der Co-Substrate neben dem Klärschlamm berücksichtigt.

II.1.7 Aufbereitung von Co-Substraten

Zur Identifizierung und Bewertung geeigneter Technologien zur Substrataufbereitung und Einbringung an Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe, wurde in einem ersten Schritt eine Potenzial- und Bedarfsanalyse durchgeführt. Hierbei wurden nötige Aufbereitungskapazitäten für Kläranlagen der genannten Größenklassen überschlägig berechnet. Grundlage hierfür bilden die in Kapitel II.1.6 beschriebenen Rahmenbedingungen der Abfall- und Abwasserwirtschaft an den Projektstandorten. Auf Grundlage der Berechnungen wurden technische Anforderungen an die Aufbereitungsanlagen definiert.

Im Anschluss daran wurde die Technologieanalyse durchgeführt. Hierbei wurden durch Literaturrecherche Technologien bestimmt, welche den in Kapitel II.1.5.2 beschriebenen Anforderungen an die Co-Substrate, durch technische Aufbereitung, generell gerecht werden können. Nach Benennung dieser, wurden die am Markt verfügbaren Aufbereitungsanlagen und deren Hersteller recherchiert und aufgelistet. Im Rahmen der BAT-Analyse wurde eine Vorauswahl der Anlagen durchgeführt. Als Kriterium dient dabei nur die Aufbereitungskapazität der Anlagen. Weiteren Betrachtungen werden also nur Technologien unterzogen, welche der in der Potenzial- und Bedarfsanalyse berechneten Kapazität entsprechen. Darauf aufbauend wurden Kriterien zur Kennzahlenbildung definiert und die nötigen Daten der Technologien recherchiert und zusammengetragen. Zur Bewertung der Technologien wurden Kennzahlen aus diesen Daten gebildet. In der Standortanalyse wurden die zur Aufbereitung möglichen Standorte (Kläranlage und Gelände des öRE) anhand der zuvor gebildeten Kennzahlen bzw. der anlagenspezifischen Anforderungen bewertet.

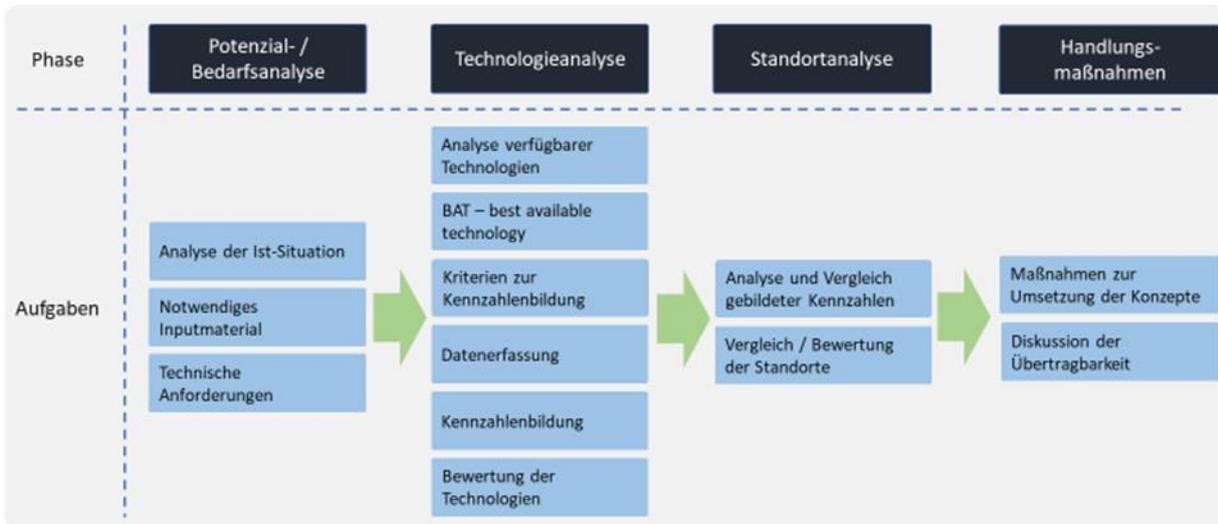


Abbildung 7: Methodik zur Auswahl geeigneter Aufbereitungstechnologien

II.1.7.1 Potenzial- und Bedarfsanalyse

Um eine erste Abschätzung der Anlagen- bzw. Aufbereitungskapazitäten vornehmen zu können, wurde im Rahmen der Potenzial- und Bedarfsanalyse, die überschlägige Berechnung der aufzubereitenden Co-Substrate durchgeführt. Hierbei wird vom Energiedefizit an den Modellstandorten ausgegangen und die nötige Substratmenge, durch welche die Energie durch Vergärung und Kraftwärmekopplung bereitgestellt werden kann, bestimmt. Als Grundlage der Berechnung dient hierbei das Energiedefizit im Ist-Zustand des Kläranlagenbetriebs, ohne Co-Vergärung, an den einzelnen Standorten, welche bereits im Rahmen der Beschreibung der Standorte in Kapitel II.1.6 genannt worden sind. Ausgehend von diesem Defizit wurde mit der nachfolgenden Formel (1) die benötigte Inputmenge der einzelnen Standorte berechnet. Die Berechnungen erfolgten zum einen für die reine Vergärung von biogenen Abfällen aus der häuslichen Sammlung, zum anderen für den ausschließlichen Einsatz von Grüngut. In den nachfolgenden Berechnungen werden zur Übersichtlichkeit, Kläranlagen mit KA und die Aufbereitungsanlagen mit ABA abgekürzt. Zur Berechnung der nötigen Inputmenge, zur Deckung des Energiedefizits an den Kläranlagen, wird der Quotient aus dem Energiedefizit und der Potenz aus dem Anteil (p) der Trockensubstanz (TS) im Substrat, Anteil der Organik in der Trockensubstanz (oTS), der Methanausbeute (V) aus der oTS, dem Energiegehalt des Methans (Hi) und dem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad (η) von BHKWs an Kläranlagen gebildet. Im Ergebnis ist der Quotient die benötigte Masse (m) des Substrates, welches zur Vergärung zugeführt wird.

$$m_{\text{Input, KA}} = \frac{E_{\text{Bedarf}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{oTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot H_i \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} \quad (1)$$

Zu beachten ist hierbei, dass sich der Energieverbrauch der gesamten Anlage durch den Energiebedarf (E) der Aufbereitung, in Abhängigkeit der zuvor errechneten Inputmenge erhöht. Hinsichtlich des angestrebten energieautarken Betriebs der Anlage, muss also mehr Substrat aufbereitet werden um den Energiebedarf des gesamten Prozesses zu decken. Zur Bestimmung des Energiebedarfs der Aufbereitung,

muss also der Eigenverbrauch der Anlage errechnet werden, welcher das Produkt der eingesetzten Aufbereitungsmenge $m_{Input,KA}$ und des spezifischen Energieverbrauchs $e_{elektr,ABA}$ der Aufbereitungsanlage ist. Die Berechnung erfolgt hierfür nach Gleichung (2). Für den spezifischen Energieverbrauch der Aufbereitung, wurden 11 kWh/t angenommen, welche die erfassten Höchstwerte der Herstellerangaben entspricht.

$$E_{Bedarf, ABA} = m_{Input, KA} \cdot e_{elektr, ABA} \quad (2)$$

Aus dem daraus folgenden errechneten Energieverbrauch der Aufbereitungsanlagen kann nun nach Gleichung (3) die zur Deckung des berechneten Energieverbrauchs nötige Substratmenge errechnet werden.

$$m_{Input, ABA} = \frac{E_{Bedarf, ABA}}{p_{TS} \cdot p_{oTS} \cdot V_{Methan} \cdot Hi \cdot \eta_{BHKW,el.}} \quad (3)$$

Im nachfolgenden Schritt wird mittels Gleichung (4) durch Addieren der errechneten nötigen Substratmenge aus Gleichung (1) und Gleichung (3) die gesamte nötige Menge errechnet.

$$m_{Input, gesamt} = m_{Input, KA} + m_{Input, ABA} \quad (4)$$

Die nachfolgenden überschlägigen Berechnungen wurden auf Grundlage von den in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgeführten Literaturwerten durchgeführt. Für die relativen Werte TS und oTS wurde der Durchschnitt aus den Literaturwerten genutzt (Vgl. DWA, 2009; Rosenwinkel, et al., 2015; Kranert, et al., 2010; ASUE, 2016; FNR, 2019 & Raming, 2019)

Tabelle 6: Literaturwerte zur überschlägigen Berechnung der benötigten Substratmenge

	Dichte [t/m ³]		Trockensubstanz [%]		organische Trockensubstanz [%]		Methanausbeute [m ³ /kg oTSzu]	
	Quelle	Wert	Quelle	Wert	Quelle	Wert	Quelle	Wert
Bioabfall	Krankert, 201	0,7	DWA M380	40-70	DWA M380	60	DWA M380	0,35
			Rosenwinkel	40-75	Rosenwinkel	30-70	Rosenwinkel	0,2-0,4
			Kranert	60	Kranert	50	Kranert	0,4
Mittelwert zur Berechnung		0,7		50		50		0,35
Grünschnitt	DWA M380	0,4	DWA M380	11,7	DWA M380	90	DWA M380	0,35

Tabelle 7: Literaturwerte zur Berechnung des potenziellen Energieertrags durch Einsatz der Co-Substrate

Energiegehalt Methan [kWh/m ³]		elektrischer Wirkungsgrad BHKW [%]	
Quelle	Wert	Quelle	Wert
FNR Biogas	9,97	ASUE BHKW	40
raming biogas	9,97		

Wie in Tabelle 7 aufgezeigt, wurde für den elektrischen Wirkungsgrad des BHKWs 40% angenommen. Dieser Wert ist ein Durchschnittswert aus den Angaben der ASUE in der Leistungsklasse der voraussichtlich installierten BHKWs an Kläranlagen.

Alle nachfolgend verwendeten Zahlen zu Energieverbräuchen u.Ä. wurden den Betriebstagebüchern der Kläranlagenbetreiber entnommen.

Standort Zweibrücken

Energiebedarf Kläranlage Zweibrücken zum energieautarken Betrieb

$$E_{\text{Bedarf, KA}} = 935.329 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Berechnung der Inputmenge zur Erzeugung des Fehlbedarfs elektrischer Energie:

$$m_{\text{Input, KA Biogut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, KA}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{oTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} = \frac{935.329 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 2.680.409,80 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 2.680,41 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

$$m_{\text{Input, KA Grüngut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, KA}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{oTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} = \frac{935.329 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,12 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 6.204.652,32 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 6.204,65 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

Spezifischer Energiebedarf des Aufbereitungsprozesses

$$e_{\text{elektr, AB}} = 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}}$$

Für den spezifischen Energieverbrauch der Aufbereitung wurden 11 kWh/t angenommen. Dieser entspricht dem maximalen Energiebedarf der recherchierten Aufbereitungsprozesse.

$$E_{\text{Bedarf, ABA, Biogut}} = m_{\text{Input, KA}} \cdot e_{\text{elektr, AB}} = 2.680,41 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 29.485 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

$$E_{\text{Bedarf, ABA, Grüngut}} = m_{\text{Input, KA}} \cdot e_{\text{elektr, AB}} = 6.204,65 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 68.251 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Berechnung der Inputmenge welche aufgrund des Eigenbedarfes der Aufbereitungsanlage benötigt wird

$$m_{\text{Input, ABA, Biogut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, AB}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{oTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} = \frac{29.485 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 84.494,94 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 84,94 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

$$m_{\text{Input, ABA, Grüngut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, AB}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{oTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} = \frac{68.251 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,12 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 452.754,93 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 452,75 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

Berechnung des gesamten Bedarfs an Input-Substrat

$$m_{\text{Input, Biogut gesamt}} = m_{\text{Input, KA}} + m_{\text{Input, AB}} = 2.680,41 \frac{t}{a} + 84,49 \frac{t}{a} = 2.764,90 \frac{t}{a}$$

$$m_{\text{Input, Grüngut gesamt}} = m_{\text{Input, KA}} + m_{\text{Input, AB}} = 6.204,65 \frac{t}{a} + 452,75 \frac{t}{a} = 6.657,41 \frac{t}{a}$$

Berechnung des Inputs bei Aufbereitung des kompletten Biomülls und Restbedarf an Grüngut

$$E_{\text{Biogut, Potenzial}} = m_{\text{Input, Biogut}} \cdot p_{\text{TS, Biogut}} \cdot p_{\text{oTS, Biogut}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW, el.}}$$

$$= 2.430.000 \frac{\text{kg}}{a} \cdot 0,5 \cdot 0,05 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4 = 847.948,5 \frac{\text{kWh}}{a}$$

Verbleibendes Energiedefizit nach Abzug der Energieerzeugung durch Vergärung des gesamt anfallenden Biomülls

$$E_{\text{Bedarf}} = E_{\text{Bedarf, KA}} - E_{\text{Erzeugung, Biogut}} = 935.329 \frac{\text{kWh}}{a} - 847.948,5 \frac{\text{kWh}}{a} = 87.381 \frac{\text{kWh}}{a}$$

Berechnung des nötigen Input an Grüngut zur Deckung des verbleibenden Energiedefizits und des Energiebedarfs der Aufbereitung

$$m_{\text{Input, Energiedefizit Grüngut}} = \frac{E_{\text{Bedarf}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{oTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW, el.}}}$$

$$= \frac{87.381 \frac{\text{kWh}}{a}}{0,12 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4} = 579.652,32 \frac{\text{kg}}{a} = 579,65 \frac{t}{a}$$

$$E_{\text{Bedarf, ABA, Grüngut}} = (m_{\text{Input, Biogut}} + m_{\text{Input, Energiedefizit Grüngut}}) \cdot e_{\text{elektr, AB}}$$

$$= \left(2.430 \frac{t}{a} + 579,65 \frac{t}{a} \right) \cdot 11 \frac{\text{kWh}}{t} = 33.106 \frac{\text{kWh}}{a}$$

$$m_{\text{Input, ABA, Grüngut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, AB}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{oTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW, el.}}} = \frac{33.106 \frac{\text{kWh}}{a}}{0,12 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 219.615,03 \frac{\text{kg}}{a} = 219,62 \frac{t}{a}$$

$$m_{\text{Input, Grüngut gesamt}} = m_{\text{Input, Energiedefizit}} + m_{\text{Input, ABA, Grüngut}} = 579,65 \frac{t}{a} + 219,62 \frac{t}{a}$$

$$= 799,27 \frac{t}{a}$$

$$m_{\text{Aufbereitung gesamt}} = m_{\text{Input, Biogut}} + m_{\text{Input, Grüngut}} = 2.430 \frac{t}{a} + 799,27 \frac{t}{a} = 3.229,27 \frac{t}{a}$$

Standort Lauterecken

Energiebedarf Kläranlage Lauterecken zum energieautarken Betrieb

$$E_{\text{Bedarf, KA}} = 392.080 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Berechnung der Inputmenge zur Erzeugung des Fehlbedarfs elektrischer Energie

$$m_{\text{Input, KA, Biogut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, KA}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{OTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} = \frac{392.080 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 1.123.599,37 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 1.123,60 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

$$m_{\text{Input, KA, Grüngut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, KA}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{OTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} = \frac{392.080 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,12 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 2.600.924,47 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 2.600,92 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

Spezifischer Energiebedarf des Aufbereitungsprozesses

$$e_{\text{elektr, AB}} = 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}}$$

$$E_{\text{Bedarf, ABA, Biogut}} = m_{\text{Input, KA}} \cdot e_{\text{elektr, AB}} = 1.123,60 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 12.360 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

$$E_{\text{Bedarf, ABA, Grüngut}} = m_{\text{Input, KA}} \cdot e_{\text{elektr, AB}} = 2.600,92 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 28.610 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Berechnung des Input-Substrates welches aufgrund des Eigenbedarfes der Aufbereitungsanlage benötigt wird

$$m_{\text{Input, ABA, Biogut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, AB}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{OTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} = \frac{12.360 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 35.419,38 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 35,42 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

$$m_{\text{Input, ABA, Grüngut}} = \frac{E_{\text{Bedarf, AB}}}{p_{\text{TS}} \cdot p_{\text{OTS}} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{\text{BHKW,el.}}} = \frac{28.610 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,12 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 189.790,07 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 189,79 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

Berechnung des gesamten Bedarfs an Input-Substrat

$$m_{\text{Input, Biogut gesamt}} = m_{\text{Input, KA}} + m_{\text{Input, ABA}} = 1.123,60 \frac{\text{t}}{\text{a}} + 35,42 \frac{\text{t}}{\text{a}} = 1.159,02 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

$$m_{\text{Input, Biogut gesamt}} = m_{\text{Input, KA}} + m_{\text{Input, ABA}} = 2.600,92 \frac{\text{t}}{\text{a}} + 189,79 \frac{\text{t}}{\text{a}} = 2.790,71 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

Standort Hoppstädten-Weiersbach

Berechnung der potenziellen Energieerzeugung durch Klärschlammvergärung am Standort Hoppstädten-Weiersbach. In der nachfolgenden Tabelle 8 sind die die Literaturwerte zur Berechnung der potenziellen elektrischen Energieerzeugung durch Vergärung des anfallenden Klärschlammes gelistet (DWA, 2015; UBA, 2017).

Tabelle 8: Literaturwerte zur überschlägigen Berechnung der Klärschlammvergärung

	Klärschlamm [t/a]		Trockensubstanz [%]		organische Trockensubstanz [%]		Methanausbeute [m ³ /kg oTSzu]	
	Quelle	Wert	Quelle	Wert	Quelle	durch Wert	Quelle	Wert
KA Hoppstädten-Weiersbach	Betreiber	1.202,00	Betreiber	23	UBA	63	DWA A216	0,45

Berechnung der potenziellen Energieerzeugung durch Klärschlammvergärung:

$$E_{KS, \text{Potenzial}} = m_{\text{Input}, KS} \cdot p_{TS, KS} \cdot p_{oTS, KS} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{BHKW, el.}$$

$$= 12.202.000 \frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 0,23 \cdot 0,63 \cdot 0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4 = 312.565 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

$$E_{\text{Bedarf}, KA} = E_{\text{Verbrauch}, KA} - E_{KS, \text{Potenzial}} = 469.519 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} - 312.565 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} = 156.954 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Berechnung der Inputmenge zur Erzeugung des Fehlbedarfs elektrischer Energie

$$m_{\text{Input}, KA, \text{Biogut}} = \frac{E_{\text{Bedarf}, KA}}{p_{TS} \cdot p_{oTS} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{BHKW, el.}} = \frac{156.954 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 449.789,02 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 449,78 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

$$m_{\text{Input}, KA, \text{Grüngut}} = \frac{E_{\text{Bedarf}, KA}}{p_{TS} \cdot p_{oTS} \cdot V_{\text{Methan}} \cdot Hi \cdot \eta_{BHKW, el.}} = \frac{156.954 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,12 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4}$$

$$= 1.041.178,28 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 1.041,18 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

Spezifischer Energiebedarf des Aufbereitungsprozesses

$$e_{\text{elektr}, AB} = 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}}$$

$$E_{\text{Bedarf}, ABA, \text{Biogut}} = m_{\text{Input}, KA} \cdot e_{\text{elektr}, AB} = 449,78 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 4.948 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

$$E_{\text{Bedarf}, ABA, \text{Grüngut}} = m_{\text{Input}, KA} \cdot e_{\text{elektr}, AB} = 1.041,18 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 11 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 11.453 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Berechnung des Input-Substrates welches aufgrund des Eigenbedarfes der Aufbereitungsanlage benötigt wird

$$m_{Input, ABA, Biogut} = \frac{E_{Bedarf, AB}}{p_{TS} \cdot p_{oTS} \cdot V_{Methan} \cdot Hi \cdot \eta_{BHKW,el.}} = \frac{4.948 \frac{kWh}{a}}{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,35 \frac{m^3}{kg} \cdot 9,97 \frac{kWh}{m^3} \cdot 0,4}$$

$$= 14.178,76 \frac{kg}{a} = 14,18 \frac{t}{a}$$

$$m_{Input, ABA, Grüngut} = \frac{E_{Bedarf, AB}}{p_{TS} \cdot p_{oTS} \cdot V_{Methan} \cdot Hi \cdot \eta_{BHKW,el.}} = \frac{11.453 \frac{kWh}{a}}{0,12 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \frac{m^3}{kg} \cdot 9,97 \frac{kWh}{m^3} \cdot 0,4}$$

$$= 75.975,02 \frac{kg}{a} = 75,98 \frac{t}{a}$$

Berechnung des gesamten Bedarfs an Input-Substrat

$$m_{Input, Biogut\ gesamt} = m_{Input, KA} + m_{Input, ABA} = 449,78 \frac{t}{a} + 14,18 \frac{t}{a} = 463,97 \frac{t}{a}$$

$$m_{Input, Grüngut\ gesamt} = m_{Input, KA} + m_{Input, ABA} = 1.041,18 \frac{t}{a} + 75,98 \frac{t}{a} = 1.117,16 \frac{t}{a}$$

In der nachfolgenden Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Berechnungen zusammengefasst. Für die Kläranlage Hoppstädten-Weiersbach wurde der potenzielle theoretische Faulgasanfall und die dementsprechende Energieerzeugung durch Errichtung einer anaeroben Faulgasbehandlung mit Vergärung des kompletten anfallenden Klärschlamm berechnet.

Tabelle 9: Ergebnisse der Berechnungen zur Ermittlung der Aufbereitungskapazität der Anlagen

		Einheit	Zweibrücken	Lauterecken	Hoppstädten-Weiersbach
Kläranlage	Energieverbrauch Kläranlage	kWh/a	1.736.197	692.532	469.519
	Energieerzeugung Klärschlammvergärung	kWh/a	800.868	300.452	312.565
	Energiedefizit	kWh/a	935.329	392.080	156.954
Bioabfall	verfügbare Bioabfallmenge	Mg/a	2.430	2.000	4.423
	benötigte Substratmenge: Kläranlage	Mg/a	2.680	1.124	450
	benötigte Substratmenge: Aufbereitungsanlage	Mg/a	84	35	14
	gesamte benötigte Substratmenge	Mg/a	2.765	1.159	464
Grüngut	verfügbare Grüngutmenge	Mg/a	1.370	10.400	14.559
	benötigte Substratmenge: Kläranlage	Mg/a	6.205	2.601	1.041
	benötigte Substratmenge: Aufbereitungsanlage	Mg/a	453	190	76
	gesamte benötigte Substratmenge	Mg/a	6.657	2.791	1.117

Nach Betrachtung der Aufbereitungsmengen ist festzustellen, dass die berechneten Substratmengen in Lauterecken und Hoppstädten-Weiersbach vom im Landkreis anfallenden Biogut und Grüngut gedeckt werden können und somit die reine Vergärung der jeweiligen Substrate möglich ist. In Zweibrücken ist die Ausgangssituation eine Andere. Hier würde der Bedarf des Inputmaterials weder vom Anfall des Biomülls, noch des Grüngutes gedeckt werden. Durch Kombination der beiden Substrate ist die Deckung des Energiebedarfs durch Vergärung trotzdem möglich. So ist bei Aufbereitung des kompletten Biomülls von 2.430 t/a weiterhin eine Inputbedarf von ca. 800 t/a Grüngut notwendig, um die Kläranlage energieautark zu betreiben. Hieraus ergibt sich eine Gesamtaufbereitungsmenge von 3.230 t/a.

Die durch die Technologien aufzubereitenden Inputmengen für den Biomüll betragen an den Standorten 464 Mg/a bis 2.430 Mg/a (verfügbare Menge in Zweibrücken). Bei der Aufbereitung für die Vergärung von Grüngut sind Kapazitäten von 1.117 Mg/a bis 2.791 Mg/a notwendig. Die höhere nötige Inputmasse des Grüngutes, ergibt sich aus der prozentual geringeren Trockensubstanz gegenüber der des Bioabfalls. Unter Betrachtung der berechneten maximalen Mengen der einzelnen bzw. kombinierten Substrate umfasst die Aufbereitungskapazität eine Spanne von 464 t/a (Biogut Hoppstädten-Weiersbach) bis 3.230 t/a (kombinierte Aufbereitung Zweibrücken).

Durch die überschlägigen Berechnungen ergeben sich Kapazitätsanforderungen an die Technologien, zur Aufbereitung der Co-Substrate. Ein besonderes Augenmerk liegt hier bei auf die, im Verhältnis zu anderen umgesetzten Projekten der Co-Vergärung, geringe Durchsatzmenge an Co-Substraten. Bei vielen der bereits umgesetzten Projekte sind hierbei höhere Durchsätze von über 10.000 t/a oder sehr geringe Durchsatzmengen bis 500 t/a die Regel (vgl. Schmelz, 2002). Im Rahmen des Forschungsprojektes WerAA sind Anlagenkapazitäten zwischen 500 t/a und ca. 3.300 t/a nötig. Zum Zwecke der Übertragbarkeit werden in der nachfolgenden Technologieanalyse Aufbereitungsanlagen bis ca. 5.500 t/a Aufbereitungskapazität in den Fokus der Betrachtungen gesetzt.

II.1.7.2 Technologieanalyse

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus der die Technologieanalyse zur Identifizierung der Aufbereitungstechnologien aufgezeigt. Die nötigen Informationen und Daten hierfür wurden aus Fachliteratur, Technologiebroschüren und persönlichen Gesprächen sowie Telefonaten mit den Verantwortlichen der Technologierhersteller zusammengetragen.

II.1.7.2.1 Technologien zur Aufbereitung von Co-Substraten

Wie in Kapitel II.1.5.2 bereits beschrieben, werden bestimmte Anforderungen an die Co-Substrate für die störungsfreie Einbindung in den bestehenden Vergärungsbetrieb gestellt. In den meisten Fällen muss das Co-Substrat vor Zugabe zur Vergärung aufbereitet werden. Die Aufbereitung kann hierbei durch eine einfache Siebung bis hin zu einem aufwendigen mehrstufigen Aufbereitungsprozess durchgeführt werden. Ziel hierbei ist die Trennung der vergärbaren Bestandteile von anorganischen Störstoffen, welche die Vergärung nachteilig beeinflussen können.

Da es sich auf Grund des geringen Trockensubstanzgehaltes von $TS < 15\%$ bei der Klärschlammvergärung um eine Nassvergärung handelt, wird aus den Co-Substraten meist eine Suspension erzeugt, welche sich leicht in den bestehenden Faulungsbetrieb einbinden lässt (Rosenwinkel, et al., 2015 S. 661; DWA, 2009 S. 29). Die Eigenschaften dieser Suspensionen sind zu Teilen vom Ausgangssubstrat abhängig. Einen weiteren Teil zu diesen leisten allerdings auch die Aufbereitungsverfahren. So können Störstoffanteile, Partikelgröße usw. durch die Aufbereitung des Substrates beeinflusst werden. Hierbei werden sich bei Anwendung der verschiedenen Technologien die stoffspezifischen Eigenschaften, wie Dichte, Löslichkeit, Sprödigkeit usw. zu Nutze gemacht. In der nachfolgenden Tabelle 7 wurden die grundlegenden Verfahren zur Aufbereitung der Co-Substrate zusammengefasst (vgl. Rosenwinkel, et al., 2015 S. 654; DWA, 2009 S. 28).

Tabelle 10: Mechanische Aufbereitungstechnologien für Abfallstoffe zur Nassvergärung

Technologie	genutzte Stoffeigenschaften	Funktion	Technisches Verfahren	
Stofflöser	Dichte, Zugfestigkeit, Löslichkeit, Quellfähigkeit	Öffnung v. Gebinden, Korngrößenverkleinerung bei Vergrößerung der spezifischen Oberfläche, Schwimm-Sink-Trennung, Anmischung	Pulper	Abtrennung organikreicher Fraktion
Zerkleinerer	Aufbau, Härte, Sprödigkeit, Spaltbarkeit	Vergrößerung der spezifischen Oberfläche bei Korngrößenverkleinerung, Öffnung von Gebinden, Homogenisierung	Schraubenmühle, Doppelrotormühle, Hammermühle, Schneckenmühle, Prallmühle	
Pressen	Partikelgröße, Konsistenz	Trennung in organikreiche nasse Feinfraktion und trockene Grobfraktion,	Schneckenpresse, Extruder, Separationspresse	
Siebe	Partikelgröße, Konsistenz	Trennung in Grob- und Feinfraktion	Trommelsieb, Spannwellensieb, Sternsieb	Trennung / Sortierung einzelner Fraktionen
Hydro-Klassierer	Fliehkraft, Partikelgröße	Trennung von Leicht- und Schwerfraktion	Hydrozyklon	
Perkolatoren	Löslichkeit	Trennung in lösliche flüssige und nicht lösliche feste Phase	Perkolator	
Sandscheider	Dichte	Schwimm-Sink-Trennung	Sandabscheider	
Fe-Scheider	Magnetisierung	Fe-Metallabscheidung	Überbandmagnet, Trommelmagnet	
Ne-Scheider	Leitfähigkeit und Dichte	Ne-Metallabscheidung	Wirbelstromseparator	

Für die in dieser Ausarbeitung betrachteten Bioabfälle und Grüngut aus der häuslichen Sammlung ist aufgrund der hohen Inhomogenität und des Störstoffanteils eine umfangreiche Aufbereitungstechnik erforderlich (vgl. DWA, 2009 S. 28; LfU Bayern, 2011 S. 6). Nur eine Aufbereitungsstufe, wie Metallabscheidung, Siebung oder Trennung der Leicht- und Schwerfraktion, ist für diese Art von Inputstoffen ungenügend. So sind Technologien erforderlich, welche aus den inhomogenen Ausgangssubstraten eine homogene Masse erzeugen und Störstoffe abscheiden. Geeignet hierfür sind die in Tabelle 7 aufgezeigten Technologien wie Stofflöser, Pressen und Zerkleinerer. Diese Technologien verbinden mehrere Verfahrensschritte und trennen die organische von der anorganischen Fraktion bzw. von Störstoffen. Die weiteren gelisteten Technologien sind generell nur bei Kombination mehrerer Aufbereitungsstufen, in Verbindung mit erhöhten Investitionskosten, zur Aufbereitung der genannten Co-Substrate geeignet. Darüber hinaus ist die Verwendung dieser mit einem erhöhten Bedarf an Fläche verbunden, welche auf den Geländen der Kläranlagen bzw. des öRE unter Umständen nicht vorhanden ist. Diese Technologien werden deshalb im weiteren Teil dieser Ausarbeitung nicht betrachtet.

Im weiteren Vorgehen der Technologieanalyse wurden für die oben genannten technischen Verfahren auf dem Markt verfügbare Technologien identifiziert. In den nachfolgenden Tabellen sind die recherchierten Technologien zur Aufbereitung der Co-Substrate gelistet und kurz beschrieben bzw. deren geringste verfügbare Aufbereitungskapazität aufgezeigt. Anhand dieser wurde die Vorauswahl der Technologien getroffen.

Tabelle 11: Kurzbeschreibung verfügbarer Aufbereitungstechnologien (Stofflöser)

Technologie Unternehmen	Stofflöser		
	BTA International GmbH	Maschinenbau Lohse GmbH	Komptech GmbH
Bezeichnung der Anlage	BTA Abfall Pulper	Bio-mechanische Nassaufbereitungsanlage	Gärsubstrataufbereitung
Spezifikation der Aufbereitung	Hydromechanische Aufbereitung und hydraulischer Separation mit Pulper	Hydromechanische Aufbereitung und hydraulischer Separation mit Pulper	Hydromechanische Aufbereitung und hydraulischer Separation mit Pulper
Beschreibung der Anlagenkomponenten	Pulper zur Auflösung und Zerkleinerung vergärbaren Organik mit Prozesswasserbeimischung. Abtrennung schwerer Störstoffe durch eine Schwerstoffschleuse. Abtrennung leichter Störstoffe mittels Schneckenrechen und anschließender Pressung. Abtrennung von Steinen, Glassplinter, Sand in Gritabscheidung.	Auflösung des organischen Abfalls und gleichzeitiges Abtrennen schwerer Feststoffe in Müllauflöser. Anschließend Abtrennung der Feststoffe aus der Suspension durch Siebung in Siebaggugat. Entwässerung leichter Reststoffe in Entwässerungspressen. Speicherung der Suspension in Puffertank. Sandabscheidung in Hydrozyklon.	Zerkleinerung des Inputs durch Zweiwellen-Zerkleinerer mit anschließender Siebung. Befüllung des Pulpers im Batchbetrieb. Abscheidung inerter und schwerer Teile durch Störstoffschleuse. Entfernung von Kleinmaterialien mittels Sieb. Abtrennung von Sanden und sandähnlichen Stoffen per Absetzbecken. Behandlung des Gärstoffes in einem Rohrzerkleinerer, zur Zerkleinerung von Faserstoffen und Vermeidung von Schwimmschichten im Fermenter
kleinste verfügbare Aufbereitungskapazität	5.000 t/a	2.400 t/a	15.000 t/a
Quelle:	Broschüre Prozessbeschreibung BTA Hydromechanische Aufbereitung, BTA	Broschüre: Bio-mechanische Nassaufbereitungsanlage für Biomüll, Speisereste und Restmüll, Lohse online: http://www.tietjen-original.com/de/produkte/drm-hybrid.html , Stand 30.11.2017	www.komptech.com/de/anlagen/gaers-substrat-aufbereitung.html , Stand 30.11.2017

Tabelle 12: Kurzbeschreibung verfügbarer Aufbereitungstechnologien (Presse)

Technologie Unternehmen	Presse		
	Doppstadt Familienholding GmbH	Finsterwalder Umwelttechnik GmbH	Vmpress s.r.l.
Bezeichnung der Anlage	DSP 205 Schneckenpresse	Biosqueeze 200 -	Extruderpresse
Spezifikation der Aufbereitung	Schneckenpresse	hydraulische Presse	mechanische Pressung mittels Extruder
Beschreibung der Anlagenkomponenten	Gegenläufige Mischschnecken öffnen Verpackungen. Abtrennung von Störstoffen vom Gärsubstrat.	Grobe Zerkleinerung der unverpackten Abfälle. Anschließend Trennung vergärbaren und unvergärbaren Stoffe mittels hydraulischer Separationspresse. Ausschub des Presskuchens durch Schieber.	Auspressung von Siedlungsabfällen (ohne Vorbehandlung) durch einen Extruder in drei Presskammern. Erzeugung vergärbaren Biomasse und eines Trockenbrennstoffes (Verhältnis 30:70 bis 40:60). Austrag der verbliebenden Trockenfraktion mittels Rammbock.
kleinste verfügbare Aufbereitungskapazität	11.000 t/a	5.500 t/a	32.000 t/a
Quelle:	Broschüre: DSP 205 Schneckenpresse online: https://doppstadt.de/leistungen/downloads/stationaere-maschinen/ , Stand 30.11.2017	https://www.fitec.com/inhalt.php?cd_categoriaGeral=79&li=1	Quelle: Prospekt VM-Pressen, RLK Ingenieurgruppe

Tabelle 13: Kurzbeschreibung verfügbarer Aufbereitungstechnologien (Zerkleinerer)

Technologie	Zerkleinerer	
	Tietjen Verfahrenstechnik GmbH	Wackerbauer Maschinenbau GmbH
Unternehmen	DRM Hybrid-Doppelrotormühle	Hammermühle
Bezeichnung der Anlage	DRM Hybrid-Doppelrotormühle	Hammermühle
Spezifikation der Aufbereitung	Mechanische Störstoffseparation und Aufbereitung mittels Doppelrotormühle	mechanische Aufbereitung durch Hammermühle
Beschreibung der Anlagenkomponenten	Zerkleinerung in einer Doppelrotormühle, mit Trennung der organischen Suspension von anorganischen Störstoffen. Die Partikelgröße des Gärsubstrates wird durch ein Sieb gewährleistet.	Zerkleinerung des Inputs durch auf einem Rotor sitzendem Schlaghammer. Auch leichte Abfallfraktionen können so zerkleinert werden.
kleinste verfügbare Aufbereitungskapazität	12.500 t/a	25.000 t/a
Quelle:	Broschüre DRM Hybrid, Tietjen online: http://www.tietjen-original.com/de/produkte/drm-hybrid.html	http://www.wackerbauer-maschinenbau.de/Hammemuehlen.65.0.htm , 30.11.2017

Nachfolgende Tabelle zeigt eine Gesamtübersicht der am Markt verfügbaren Aufbereitungstechnologien, sowie die kleinste bekannte Aufbereitungskapazität der Anlagen. Die Kapazitäten der aufgezeigten Technologien konnten aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit nur teilweise direkt aus den Angaben der Technologiehersteller entnommen werden. War dies nicht möglich, so wurden die Kapazitäten aus den spezifischen Herstellerangaben, unter der Annahme von sechs Betriebsstunden pro Tag, fünf Werktagen in der Woche und 52 Wochen pro Jahr, berechnet. Waren keine Herstellerangaben verfügbar, so wurden die Kapazitäten aus Referenzprojekten entnommen, auch wenn diese nicht unbedingt auf die kleinste bauartbedingte Kapazität schließen lässt.

Tabelle 14: Gesamtübersicht am Markt verfügbarer Aufbereitungstechnologien inkl. Aufbereitungskapazitäten

Technologie	Unternehmen	kleinste bekannte Kapazitäten
Stofflöser	BTA International GmbH	5.000 t/a
	Maschinenbau Lohse GmbH	2.400 t/a
	Komptech GmbH	15.000 t/a
Zerkleinerer	Tietjen Verfahrenstechnik GmbH	12.500 t/a
	Wackerbauer Maschinenbau GmbH	25.000 t/a
Pressen	Doppstadt Familienholding GmbH	11.000 t/a
	Finsterwalder Umwelttechnik GmbH	5.500 t/a
	Vmpress s.r.l.	32.000 t/a

Die Neuheit des Ansatzes und somit die Veranlassung zu der Ausarbeitung, ist die in Kapitel II.1.7.1 berechnete, vergleichsweise geringe, Aufbereitungskapazität. Wie beschrieben, werden weitere Betrachtungen nur an Technologien, welche eine Aufbereitungskapazität von ca. 5.500 t/a nicht überschreiten, durchgeführt und somit eine sinnvolle Auslastung der Anlagen gewährleistet ist. Anlagen mit höheren Aufbereitungskapazitäten verursachen höhere Anschaffungskosten, welche sich in vergleichsweise hohen Fixkosten niederschlagen. Ebenso sinkt bei zu hoher Anlagenkapazität die Anlagenauslastung, welche in Verbindung mit hohen Fixkosten, zu hohen spezifischen Kosten pro

aufbereiteter Tonne Co-Substrat führt und sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage auswirkt (vgl. Friedl, 2017). Eine Ausnahme bildet hierbei das DRM-Hybrid System der Tietjen Verfahrenstechnik GmbH. Der Technologiehersteller hat hierbei versichert, dass die Anlage trotz der vergleichsweise hohen maximalen Aufbereitungskapazität, auch mit geringerem Input wirtschaftlich betrieben werden kann. Dies wird auch durch Referenzprojekte belegt. Trotz ähnlich hoher Kapazitäten haben andere Technologiehersteller, wie die Komptech GmbH von weiteren Betrachtungen derer Technologien abgeraten. Nach Aussage des Unternehmens können deren Anlagen unter den genannten Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich betrieben werden. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen entsprechen somit die vier Technologien, der BTA International GmbH - Abfallpulper, der Maschinenbau Lohse GmbH – Abfallpulper, die hydraulische Presse der Finsterwalder Umwelttechnik GmbH und das Tietjen Verfahrenstechnik GmbH DRM-Hybrid System der angestrebten Aufbereitungskapazität. Der Abfallpulper der Maschinenbau Lohse GmbH kann aufgrund der geringen Datenlage keinen weiteren Betrachtungen unterzogen werden. Nachfolgende wird die Funktionsweise der drei weiteren identifizierten Technologien beschrieben und die produktspezifischen Spezifikationen der Anlagen erläutert.

Stofflöser

Im Kontext der Biomasseaufbereitung werden Stofflöser zur nassmechanischen Aufbereitung durch Pulper technologisch umgesetzt. Pulper sind hierbei Rundbehälter mit integriertem Schneidrad oder Mischschnecke. Dieser wird im kontinuierlichen oder diskontinuierlich Batch-Verfahren mit Prozesswasser und dem Co-Substrat befüllt. Durch das rotierende Schneidrad bzw. Schnecke entstehen Scherkräfte, welche zu einem Aufschluss des Co-Substrates und einer starken Durchmischung mit dem zugefügten Prozesswasser führt. Störstoffe können während dem Aufbereitungsprozess aus der erzeugten Suspension ausgeschleust werden. Anschließend wird die erzeugte Suspension abgepumpt und kann der Vergärung zugeführt oder zwischengespeichert werden. Das Pulperverfahren eignet sich besonders zur Aufbereitung von biogenen Reststoffen, welche anschließend einer Nassvergärung zugeführt werden (vgl. Rosenwinkel, et al., 2015 S. 674).

Hydromechanische Aufbereitung der BTA International GmbH

Die Firma BTA International GmbH bietet eine auf Pulper-Technologie basierende Komplettlösung, die BTA Hydromechanische Aufbereitung, an. Die Aufbereitungsanlage besteht im Wesentlichen aus Abfallpulper und der nachgeschalteten Gritabscheidung (eigene Darstellung nach: BTA, 2015).

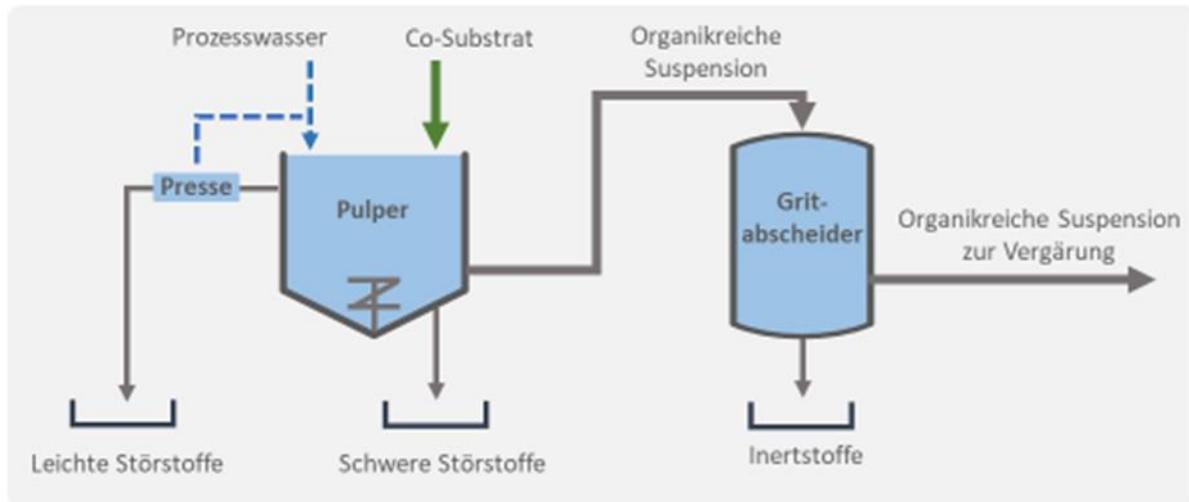


Abbildung 8: Schema BTA Hydromechanische Aufbereitung

Im diskontinuierlichen Betrieb wird der Pulper hierbei mit einem Co-Substrat und Prozesswasser beschickt. Durch ein eine rotierende Mischschnecke werden Strömungskräfte erzeugt, durch welche die festen Abfallbestandteile zerfasert werden und mit dem Prozesswasser eine pumpfähige Suspension herstellen. Die erzeugte Suspension weist einen Trockensubstanzgehalt von etwa 10 % auf. Sie wird durch ein Lochsieb, mit einem Lochdurchmesser von 10 mm, im unteren Teil des Pulpers abgepumpt. Die Suspension beinhaltet nun keine Störstoffe mit einer Partikelgröße von über 10 mm mehr und wird der nachgeschalteten Gritabscheidung zugeführt (vgl. BTA, 2015). Im Anschluss wird der Pulper erneut mit Prozesswasser befüllt. Zurückgebliebene schwere Störstoffe wie Steine, Knochen, Glas, Batterien etc., sinken hierbei zum Boden ab und werden in einer Schwerstschleuse mittels Klassierschnecke und Förderband in einen Störstoffcontainer ausgeworfen. Schwimmende Störstoffe, wie Kunststoffe, Holz, Textilien etc., werden mit einem Schneckenrechen ausgeschwemmt und in einer Rechengutpresse entwässert. Das ausgepresste Wasser wird in den Pulper rückgeführt. Die organische Fraktion ist nun weitestgehend von Störstoffen befreit, Sand, Glassplitter, Muschel- und Eierschalen o.ä. können allerdings noch enthalten sein (BTA, 2019). Zur Abtrennung dieser, wird die Suspension in die nachfolgende Gritabscheidung gepumpt. Die zuvor erzeugte Suspension wird in der Gritabscheidung mittels Hydrozyklon verwirbelt. Durch die konische Bauform des Hydrozyklons, entweicht die Flüssigkeit nach oben, während Schwebestoffe nach unten ausgetragen werden. Abgeschieden werden hierbei 90 % der anorganischen Partikel mit einer Partikelgröße > 1 mm. Durch die hohe Qualität und geringen Störstoffgehalt der erzeugten Suspension ist eine störungsarme Einbindung der Suspension in den bestehenden Vergärungsprozess möglich (BTA, 2015).

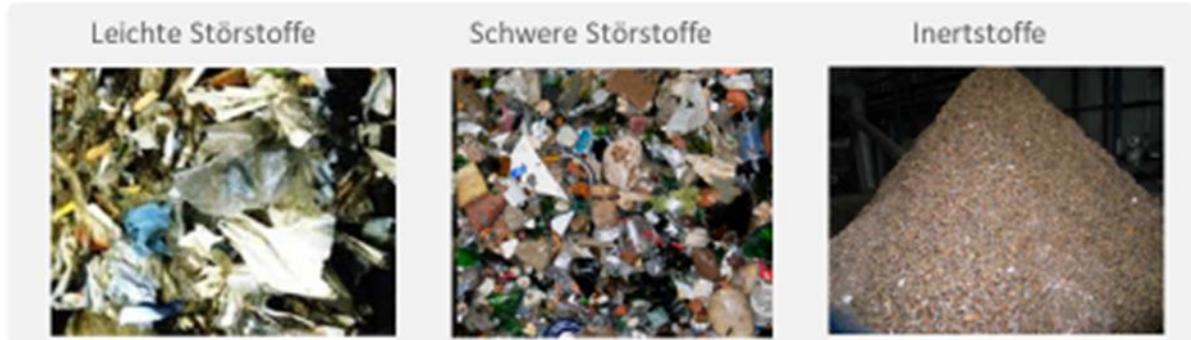


Abbildung 9: Störstofffraktionen der BTA Hydromechanischen Aufbereitung

Der BTA nassmechanische Aufbereitungsprozess befindet sich in vielfacher Ausführung zur reinen Aufbereitung von organischen Abfällen oder in Verbindung mit dem BTA Fermenter im Betrieb. So werden derzeit etwa 45 Anlagen mit Kapazitäten von 5.000 t/a bis ca. 200.000 t/a betrieben. Die kleinsten betriebenen Anlagen verfügen derzeit über ein Pulpervolumen von 12 m³ (vgl. BTA, 2019).

Tabelle 15: Rahmendaten zur BTA Hydromechanischen Aufbereitung

BTA International GmbH - Hydromechanische Aufbereitung 12m ³	
Wartungskosten	2-3 €/t
Personalbedarf	1,5 Pers (6 h/d)
Investitionskosten	700.000 € Gesamtanlage
Durchsatzleistung	5.000 t/a
spezifische Durchsatzleistung	3,2 t/h
max. Partikelgröße	< 200 mm
Abmessungen	16,0 m · 3,3 m
spezifischer Energiebedarf	7-11 kWh/t
Störstofffraktionen	Leichtstoffe, Schwerstoffe, Grit
Partikelgröße im aufbereiteten Substrat	anorganische Stoffe: < 10mm
	Inertstoffe: < 1mm
Frischwasserbedarf	inputabhängig

Die in Tabelle 15 aufgeführten Kosten der Anlage beinhalten sowohl den Pulper als auch die Gritabscheidung.

Pressen

In Pressen wird das zugeführte Co-Substrat stark verdichtet, um die organische Substanz zu lösen. Unter hohem Druck wird hierbei die flüssige vergärbare Organik von den strukturhaltigen anorganischen Inhaltsstoffen abgeschieden. Der Einsatz von Pressen setzt also einen gewissen Feuchtigkeitsgrad des Inputmaterial voraus. Je nach Pressverfahren kann dies ohne oder mit zusätzlicher Einbringung von Prozesswasser durchgeführt werden. Eingesetzt werden hierbei technische Verfahren wie Schneckenpressen und hydraulische Pressen. Als Störstoff entsteht ein anorganikreicher, störstoffhaltiger Presskuchen mit geringem Organikanteil.

Separationspresse der Finsterwalder Umwelttechnik GmbH „Biosqueeze 200“

Mit der Finsterwalder hydraulischen Separationspresse werden biogene Substrate wie Speiseabfälle, verpackte Lebensmittel, Inhalte der Biomülltonne und Reste aus der Lebens- und Futtermittelindustrie behandelt. Bei diesem Pressverfahren werden die Substrate über den Einlaufschacht der Presse zugeführt. Durch einen vorfahrenden Plunger wird das Substrat aufgeschlossen und die vergärbare flüssige Organik durch ein Lochrohr ausgeführt und kann der Vergärung zugeführt werden. Die Partikelgröße der organischen Fraktion ist hierbei kleiner 12 mm. Zurück in der Presse bleibt der Presskuchen, welcher durch zwei Schieber an der Stirnseite der Presse nach vorn ausgeschoben wird. Nun fährt der Plunger in seine Ausgangslage und die Presse ist bereit für einen neuen Pressvorgang. Frischwasser muss für den Pressvorgang nicht zugegeben werden (vgl. Finsterwalder, 2015). In der nachfolgenden Abbildung 10 ist das Verfahrensschema zum Pressvorgang mittels Finsterwalder Separationspresse aufgezeigt (eigene Darstellung nach: Finsterwalder, 2015).

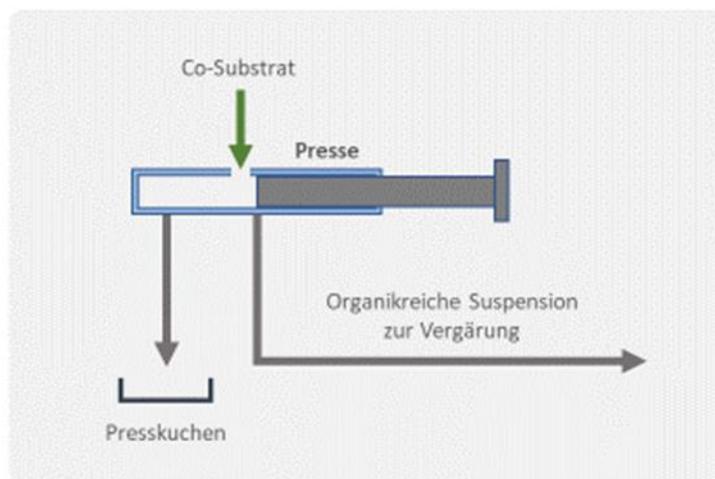


Abbildung 10: Schema der Finsterwalder Separationspresse – Biosqueeze 200

Das Co-Substrat wird in die Presse eingeführt. Während eines Pressvorgangs wird die organikreiche Suspension ausgepresst, zurück bleibt der Presskuchen. In der nachfolgenden Tabelle 10 wurden die Rahmendaten zu der Finsterwalder Separationspresse gelistet. Die Gesamtkosten der Anlage setzen sich hierbei aus der Hydraulikpresse, dem Hydraulikaggregat und der Steuerung zusammen.

Tabelle 16: Rahmendaten zur Finsterwalder Separationspresse

Finsterwalder - Separationspresse Komplettlösung	
Wartungskosten	2,30 €/t
Personalbedarf	2-3 h/Woche
Investitionskosten	134.000 € (Gesamtanlage)
Durchsatzleistung	5.500 t/a
spezifische Durchsatzleistung	3,5 t/h
max. Partikelgröße Input	< 200 mm
Abmessungen	4,0 m · 2,0 m
spezifischer Energiebedarf	3,8 kWh/t
Störstofffraktionen	unsortierter Presskuchen
Partikelgröße im aufbereiteten Substrat	< 12 mm
Frischwasserbedarf	inputabhängig

Der Betrieb der Anlage erfolgt vollautomatisch. Der in der Tabelle 16 aufgezeigte Personalbedarf bezieht sich nur auf die Wartung.

Zerkleinerer

Zerkleinerer werden im Kontext zur Aufbereitung von Substraten zur anschließenden Nassvergärung durch Mühlen technologisch umgesetzt. Mühlen dienen hierbei der mechanischen Zerkleinerung des Inputmaterials und somit zur Erhöhung der spezifischen Oberfläche und zur Homogenisierung des meist sehr heterogenen Ausgangsmaterials. Je nach Art der eingesetzten Mühle, wird auf den Inputstoff eine Kombination aus Druck-, Schlag-, Prall-, Scher- und Schneidbeanspruchungen ausgeübt. Mühlen sind hierbei in verschiedenen technischen Ausführungen und als Komplettsysteme zur Gärsubstrataufbereitung auf dem Markt verfügbar. Abhängig vom Inputmaterial, kann eine Anmischung des Substrates mit Prozesswasser direkt in der Mühle erfolgen.

DRM-Hybrid System der TIETJEN Verfahrenstechnik GmbH

Zur nassen Stoffaufbereitung bietet das Unternehmen Tietjen eine Komplettanlagen, das DRM-Hybrid System, an. Im Kern besteht die Anlage hierbei aus einer Doppelrotormühle, mit zwei gegenläufigen Rotoren. Das Co-Substrat wird hierbei in die Mühle eingebracht und abhängig von dessen Trockensubstanzgehalt mit Prozesswasser vermischt. Unter Einfluss von Prall-, Schneid- und Scherwirkungen findet der Aufschluss des Materials statt. Während Zerkleinerung und Homogenisierung des Stoffes werden anorganische Störstoffe wie Verpackungen etc. aus der Mühle ausgeworfen. Die mit dem beigefügten Prozesswasser vermengte flüssige Organik wird durch ein Lochsieb, im Bodenbereich der Mühle ausgetragen. Die Partikelgröße der Organik ist hierbei kleiner als 12 mm, allerdings beinhaltet sie auch Störstoffe unterhalb dieses Durchmessers. Der Betrieb der Anlage erfolgt hierbei vollautomatisch. Der angegebene Personalbedarf wurde vom Hersteller nur für die wöchentliche Wartung der Doppelrotormühle angegeben. Das DRM-Hybrid System ist sehr einfach aufgebaut, sodass sich der Betreiber der Anlage im Schadensfall meist selbst helfen kann und keine Techniker nötig sind (vgl. Tietjen, 2018). Wie in der nachfolgenden Abbildung 11 zu sehen, wird die Doppelrotormühle mit dem Co-Substrat und bei Bedarf mit Prozesswasser, zum Einstellen des späteren TS-Gehalte der Suspension, beschickt. Ausgeworfen werden unsortierte Störstoffe (Eigene Darstellung nach: Tietjen, 2019).

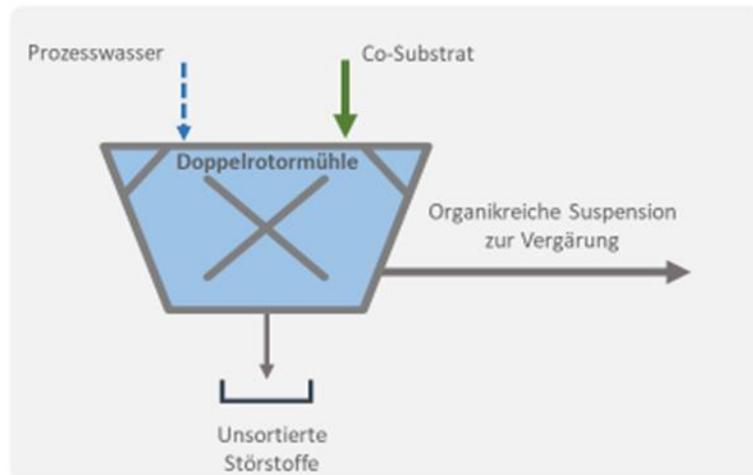


Abbildung 11: Schema des Tietjen DRM-Hybrid Systems

Wie in der nachfolgenden Abbildung 12 dargestellt, wird aus dem DRM-Hybrid System eine organikreiche Suspension und eine unsortierte Störstofffraktion abgeschieden (Tietjen, 2019).



Abbildung 12: Outputstoffe des Tietjen DRM-Hybrid Systems

Die in der nachfolgenden Tabelle 17 aufgeführten Investitionskosten der Anlage weisen eine Spanne zwischen 160.000 € und 190.000 € auf (Tietjen, 2019). Die Kosten sind hierbei abhängig von den Spezifikationen der Anlage. Es handelt sich hierbei allerdings nur um die Verkleidung der Anlage, welche optional in Edelstahl ausgeführt werden kann (Tietjen, 2018).

Tabelle 17: Eckdaten des Tietjen DRM-Hybrid System

Tietjen - DRM-Hybrid System	
Wartungskosten	0,4 - 0,6 €/t
Personalbedarf	0,5 h/Woche
Investitionskosten	160.000 - 190.000 €
Durchsatzleistung	12.480 t/a
spezifische Durchsatzleistung	8 t/h
max. Partikelgröße Input	< 200 mm
Abmessungen	12,0 m · 12,0 m
spezifischer Energiebedarf	10-11 kWh/t
Störstofffraktionen	unsortierte Störstofffraktion
Partikelgröße im aufbereiteten Substrat	< 12 mm
Frischwasserbedarf	inputabhängig

Der aufgezeigte Personalbedarf der Anlage ist auf die wöchentliche Wartung zurückzuführen. Die Wartungskosten sind im Wesentlichen vom Störstoffanteil des Inputmaterials und somit vom Verschleiß der Anlage abhängig.

Die beschriebenen Technologien sind für die maschinelle Aufbereitung bzw. zur Sicherstellung der Eigenschaften der Co-Substrate verantwortlich. Die Technologien stellen allerdings nur einen Teil der nötigen Anlagenkomponenten einer kompletten Aufbereitungsanlage dar. Weitere Komponenten wie Annahmehöcker, Förderbänder, Vorzerkleinerer, Speicherbehälter, Hygienisierungsanlage usw. sind nötig, unterscheiden sich aber vor allem durch das eingesetzte Co-Substrat (vgl. DWA, 2009 S. 28). Eine Vorzerkleinerung bspw. wäre bei allen aufgezeigten Anlagen nur nötig, wenn das Inputmaterial eine Länge von 200 mm überschreitet. In den nachfolgenden Kapiteln wird davon ausgegangen, dass die Annahme- und Förderinfrastruktur, welche für die Aufbereitungsanlagen nötig ist, sich nicht unterscheidet und somit nicht ins Gewicht für die in dieser Ausarbeitung aufgezeigten technischen und ökonomischen Betrachtungen fallen.

II.1.7.2.2 Technologievergleich der identifizierten Aufbereitungsanlagen

Als Kriterien zum nachfolgenden Technologievergleich bzw. zur Bewertung dieser, aus technischer und ökonomischer Sicht, wurden Kennzahlen und qualitative Anlageneigenschaften ausgewählt, welche in dem vorherigen Kapitel zur Beschreibung der Aufbereitungstechnologien von den Technologieherstellern genannt wurden. Aus ökonomischer Sicht sind dies Wartungskosten, Personalbedarf und Investitionskosten. Aus technischer Sicht Durchsatzleistung der Anlagen, maximale Partikelgröße des Inputstoffes, Flächenbedarf, spezifischer Energiebedarf, abgeschiedene Störstofffraktionen, Partikelgröße in der Suspension und Prozesswasserbedarf.

Vergleich nach technischen Kriterien

In den nachfolgenden Betrachtungen werden die Merkmale der drei identifizierten Technologien gegenübergestellt. Die Merkmale sind hierbei quantitativ als Kennzahlen, als auch in qualitativer Form erfasst worden. Die nachfolgenden Werte bzw. Merkmale dienen der späteren Bewertung der Systeme. Der Vergleich der einzelnen Kriterien bzw. deren anlagenspezifischen Werte wurden in Tabelle 18 zusammengefasst.

Flächenbedarf

Der Flächenbedarf der Anlagen wurde mit der nachfolgenden Formel (5) ermittelt. Hierbei wurde Länge und Breite der Anlagen multipliziert.

$$A_{Anlage} = l \cdot b \quad (5)$$

Das Produkt der Multiplikation ist der Flächenbedarf der Aufbereitungsanlagen. Der Flächenbedarf der Anlagen gibt Aufschluss darüber, ob die Anlagen für evtl. begrenzte räumliche Verfügbarkeit am Aufbereitungsort geeignet sind.

$$A_{BTA} = l \cdot b = 11,5 \text{ m} \cdot 3,5 \text{ m} = 40,25 \text{ m}^2$$

$$A_{Finster.} = l \cdot b = 4,0 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ m} = 8 \text{ m}^2$$

$$A_{Tietjen} = l \cdot b = 2,2 \text{ m} \cdot 1,9 \text{ m} = 4,18 \text{ m}^2$$

Zulässige Partikelgröße des Inputstoffes

Verglichen wird die höchstzulässige Partikelgröße der Inputstoffe. Je nach zulässigen höchsten Abmessungen der Inputstoffe, nach Herstellerangaben, ist eine Vorzerkleinerung der Inputstoffe notwendig. Die zulässige Partikelgröße ist hierbei bei allen Anlagen gleich und muss ein Höchstmaß von 200 mm unterschreiten

Energiebedarf

Der spezifische Energiebedarf der Anlagen wurde ebenso in der nachfolgenden Tabelle 18 dargestellt. Der mengenspezifische Energiebedarf ist hierbei pro Tonne angegeben. Bei Betrachtung der Werte ist zu sehen, dass der Energiebedarf von 3,8 kWh/t bis zu 11 kWh/t reicht.

Störstoffe

In den Anlagen werden verschiedene Störstoffe abgeschieden. Hierbei werden bei Verwendung der BTA-Anlage einzelne, in Tabelle 18 gelistete Störstofffraktionen separat gesammelt, während in den Tietjen und Finsterwalder Anlagen die Störstoffe gemischt ausgeworfen werden.

Partikelgröße der aufbereiteten Suspension

Die Partikelgröße in der Suspension ist für die spätere Einbindung der Substrate in den bestehenden Faulungsbetrieb von Bedeutung. Sind zu viele Störstoffe vorhanden, kann der Abbauprozess gehemmt oder die Verfahrenstechnik beschädigt werden. Im BTA Aufbereitungsprozess werden hierbei anorganische Störstoffe über 10 mm und Inertstoffe mit einer Partikelgröße von über 1 mm aus der Suspension abgeschieden. In der Tietjen und Finsterwalder Anlage, werden Partikel über 12 mm Größe abgeschieden

Prozesswasserbedarf

In Tabelle 18 ist der Frisch- und Prozesswasserbedarf der Anlagen aufgezeigt. Der Frischwasserbedarf der Anlagen, welcher zur Einstellung des TS-Gehaltes der zu erzeugenden Suspension nötig ist, ist hierbei stark vom Inputstoff abhängig und kann erst nach genauer Analyse dessen bestimmt werden und wird deshalb von den nachfolgenden Betrachtungen ausgenommen. Der Prozesswasserbedarf hingegen ist hierbei jenes Wasser, welches zum Betrieb der Anlagen benötigt wird. Dieses wird aus dem Wasserkreislauf der Kläranlage entnommen und mit der aufbereiteten Suspension dieser wieder zugeführt. Wie in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet, ist Prozesswasser nur für den Betrieb der BTA-Aufbereitungsanlage grundlegend nötig.

Tabelle 18: Vergleich der Technologien nach den definierten Kriterien

Kriterium	Einheit	BTA International GmbH Hydromechanische Aufbereitung	Finsterwalder Seperationspresse	Tietjen DRM-Hybrid System
spezifische Durchsatzleistung	t/h	3,2	3,5	8
spezifischer Energiebedarf	kWh/t	9	3,8	11
Länge (l)	m	16	4	2,2
Breite (b)	m	3,5	2	1,9
Flächenbedarf (A)	m ²	56	8	4,18
zulässige Partikelgröße Inputstoff	mm	< 200	< 200	< 200
Partikelgröße im aufbereiteten Substrat	mm	anorganische Partikel: < 10 Inertstoffe: < 1	< 12	< 12
abgeschiedene Störstoffe		Leichtstoffe Schwerstoffe Gritfraktion	Presskuchen	unsortierte Störstoffe
Prozesswasserbedarf		ja	nein	nein
Firschwasserbedarf		inputabhängig	inputabhängig	inputabhängig

In Tabelle 18 sind die anlagenspezifischen Merkmale der Aufbereitungsanlagen nach Kriterien aufgeführt. Die Merkmale dienen zur nachfolgenden durchgeführten technischen Bewertung der Aufbereitungsanlagen.

Ökonomischer Technologievergleich

Für den nachfolgenden ökonomischen Vergleich der Aufbereitungstechnologien wird die periodenbezogene Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Hierbei werden die anlagenspezifischen Aufbereitungskosten berechnet. Somit können die Anlagen später anhand dieser verglichen werden (vgl. Götze, 2014 S. 57).

Für die aufgeführten Berechnungen wurden die nachfolgenden Annahmen getroffen. Für die Abschreibungsdauer der Aufbereitungsanlagen werden zehn Jahre nach AfA-Tabelle angenommen (BMF, 1996). Ein Restbuchwert der Anlagen besteht nach Ablauf der Nutzungszeit nicht. Die Anlagen werden linear abgeschrieben. Die durchschnittlichen Energiekosten von 19 Cent/kWh wurden durch den Vergleich auf dem Stromvergleichsportal enermarket.de für Gewerbekunden ermittelt (vgl. enermarket, 2019). Die stündlichen Personalkosten wurden unter der Annahme von 2.700 € Bruttoverdienst, sowie einem Aufschlag für weitere direkte und indirekte Personalkosten mit dem Faktor 1,7 berechnet und durch die monatliche Stundenanzahl dividiert (vgl. agentur-jungesherz, 2019). Für den Personalaufwand wurden 1,5 Personen, mit sechs Arbeitsstunden am Tag, fünf Arbeitstage die Woche und 52 Wochen pro

Jahr angenommen. Als kalkulatorischer Zinssatz wurde 6 % angenommen. Zur Übersichtlichkeit wurden die Annahmen in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 19: Zusammenfassung der Annahmen zur Kostenvergleichsrechnung

Annahmen	Einheit	Werte
Abschreibungsdauer	a	10
Durchsatz 1	t/a	1.000
Durchsatz 2	t/a	3.500
Durchsatz 3	t/a	5.000
Durchsatz 4	t/a	6.500
Energiekosten	€/kWh	0,19
Personalkosten	€/h	23
kalkulatorische Zinsen	%	6

Neben den gelisteten Annahmen zur Kostenvergleichsrechnung wurden in Tabelle 19 vier Durchsatzleistungen aufgeführt. Diese wurden hierbei aufgrund der in der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** berechneten Aufbereitungskapazitäten angenommen und werden später zur Ermittlung der spezifischen Aufbereitungskosten nach Tonnen, dienen. Die Durchsatzleistung von 6.500 t wurde hierbei gewählt um den Kostenverlauf bei leicht höheren, als den berechneten Durchsatzkapazitäten mit den identifizierten Technologien, darzustellen.

In der nachfolgenden Tabelle 20 wurden die anlagenspezifischen ökonomischen sowie technischen Kennzahlen aus der Technologieanalyse, aufgezeigt, welche in Verbindung mit den aufgezeigten Annahmen aus Tabelle 19 als Grundlage zur Kostenvergleichsrechnung dienen.

Tabelle 20: Zusammenfassung relevanter Kennzahlen der identifizierten Technologien

relevante Daten		Einheit	BTA Hydromechanische Aufbereitung	Finsterwalder Biosqueeze 200	Tietjen DRM-Hybrid
absolut	Anschaffungskosten	€	700.000	134.000	175.000
spezifisch	Aufbereitungskapazität	t/a	5.000	5.500	12.500
	Wartungskosten	€/t	3	2,3	0,6
	Personalbedarf (100 % Auslastung)	h/a	2.340	2.340	2.340
	Energiebedarf	kWh/t	9	3,8	11

Zur periodenbezogenen Kostenvergleichsrechnung dient die grundlegende Formel (6). Hierbei wird die Summe aus Fixkosten und variablen Kosten ins Verhältnis zur eingesetzten Inputmenge gesetzt. Im Ergebnis können die spezifischen Aufbereitungskosten der Anlagen pro eingesetzter Inputmenge errechnet werden.

$$\text{spezifische Aufbereitungskosten} = \frac{\text{Fixkosten} + \text{variable Kosten}}{\text{Inputmenge}} \quad (6)$$

Die Fixkosten (K_{Fix}) setzen sich in der Formel aus den jährlichen Abschreibungen (AB_{Fix}) und den kalkulatorischen Zinsen (kZ_{Fix}) zusammen und sind unabhängig von der Inputmasse (m_{Input}) zu entrichten. Die variablen Kosten (K_{variabel}) hingegen setzen sich wie der Formel (7) zu entnehmen aus Wartungskosten

(K_{Wartung}), Personalkosten (K_{Personal}) und den Energiekosten (K_{Energie}) zusammen. Die variablen Kosten sind abhängig von der eingesetzten Inputmasse.

$$\begin{aligned}
 k_{\text{ges, spez}} &= \frac{K_{\text{Fix}} + K_{\text{variabel}}}{m_{\text{Input}}} \\
 &= \frac{AB_{\text{Fix}} + kZ_{\text{Fix}} + K_{\text{Wartung, vari}} + K_{\text{Personal, vari}} + K_{\text{Energie, vari}}}{m_{\text{Input}}}
 \end{aligned} \quad (7)$$

Bei steigendem Input bleiben also die Fixkosten gleich hoch, während sich die variablen Kosten im Verhältnis zur eingesetzten Inputmasse erhöhen. Dies führt zu sinkenden spezifischen Kosten der Aufbereitung bei Erhöhung des Inputs. Zur Bestimmung der spezifischen Aufbereitungskosten wird die Summe aus Fixkosten und variablen Kosten durch die eingesetzte Inputmasse dividiert.

Die Berechnungen wurden hierbei durch einsetzen der Annahmen aus Tabelle 19, sowie der anlagenspezifischen Kennzahlen aus Tabelle 20 für die vier Durchsatzleistungen von 1.000 t/a, 3.500 t/a, 5.000 t/a und 6.500 t/a durchgeführt. Nachfolgende werden die Berechnungen beispielhaft mit der BTA-Anlage, bei einer Aufbereitungskapazität von 3.500 t/a Input aufgezeigt. Die Berechnungen können auf alle weiteren Anlagen mit den unterschiedlichen Inputmengen übertragen werden und sind aufgrund des hohen Umfangs nicht separat aufgeführt.

Berechnung der Fixkosten

Zur Berechnung der Fixkosten (K_{Fix}) wird der jährliche Abschreibungsbetrag (AB) berechnet. Hierfür werden der Anschaffungswert (AW) der Anlagen durch die Nutzungsdauer (n) von 10 Jahren dividiert. Es wird angenommen, dass der Restbuchwert (RBW) der Anlagen Null beträgt. Zu Berechnung der kalkulatorischen Zinsen (kZ) wird die Differenz aus AW und RBW durch zwei dividiert und mit dem kalkulatorischen Zinssatz (i) von 6% multipliziert. Durch Addition der des AB und der kZ errechnen sich die Fixkosten

$$K_{\text{Fix, BTA}} = AB_{\text{BTA}} + kZ_{\text{BTA}} = \frac{AW_{\text{BTA}} - RBW}{n} + \frac{AW_{\text{BTA}} - RBW}{2} \cdot i = \frac{700.000\text{€} - 0}{10\text{a}} + \frac{700.000\text{€} - 0}{2} \cdot 0,06 = 91.000 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

Berechnung der Anlagenauslastung

Zur späteren Berechnung des tatsächlichen Personalbedarfs wird die prozentuale Anlagenauslastung (Aa) in Abhängigkeit der Inputmasse berechnet. Hierfür wird die zugeführte Inputmasse (m) durch die technische Anlagekapazität geteilt (AK)

$$Aa = \frac{m_{\text{Input}}}{AK_{\text{techn., BTA}}} \cdot 100\% = \frac{3.500 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{5.000 \frac{\text{t}}{\text{a}}} \cdot 100\% = 70\%$$

Bei einer Anlagenauslastung von über 100 % muss die Anlagenkapazität durch weitere Anlagen erweitert werden. Dies führt zur Erhöhung der Fixkosten.

Berechnung der variablen Kosten

Zur Berechnung der variablen Kosten werden die Wartungs-, Personal- und Energiekosten addiert. Alle der genannten absoluten Kosten werden in den nachfolgenden Berechnungen mit (K) bezeichnet, alles spezifischen Kosten mit (k). Die Wartungskosten (K_{Wartung}) sind hierbei das Produkt aus des spezifischen

Wartungskosten der Anlagen in €/t und der aufbereiteten Inputmasse. Die Personalkosten (K_{Personal}) sind das Produkt aus angenommenen Stundenlohnsatz in €/h ($k_{\text{Stundenlohn}}$), dem Personalaufwand ($t_{\text{Personalaufwand}}$) in h/a bei einer Anlagenauslastung von 100 % und der tatsächlichen Auslastung der Anlagen. Der jährliche Personalaufwand wird hierbei als 2.340 angenommen. Dies entspricht 1,5 Personen, mit sechs Stunden am Tag, fünf Tage die Woche und 52 Wochen pro Jahr. Wartungsarbeiten können laut Herstellerangaben vom betriebseigenen Personal durchgeführt. Kosten für Wasserbedarf fließen nicht in die Betrachtungen mit ein, da dies laut Herstellerangaben sehr vom Inputmaterial abhängig ist und diese somit erst nach Analyse der Inputstoffe bestimmt werden können. Die Energiekosten ($K_{\text{Energie,elektr.}}$) werden aus dem Produkt des spezifischen Energiebedarfs ($e_{\text{elektr.}}$), den spezifischen Energiekosten ($k_{\text{Energie,elektr.}}$) und der Inputmenge (m_{Input}) berechnet. Die eingesetzten Werte wurden in der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen.

$$\begin{aligned}
 K_{\text{Vari,BTA,3.500}} &= K_{\text{Wartung,BTA}} + K_{\text{Personal,BTA}} + K_{\text{Energie,BTA}} \\
 &= k_{\text{Wartung,BTA}} \cdot m_{\text{Input}} + k_{\text{Stundenlohn}} \cdot t_{\text{Personalaufwand}} \cdot Aa_{3.500t} + k_{\text{Energie elektr.}} \\
 &\quad \cdot e_{\text{elektr,BTA}} \cdot m_{\text{Input}} \\
 &= 3,0 \frac{\text{€}}{\text{t}} \cdot 3.500 \frac{\text{t}}{\text{a}} + 28,70 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 2.340 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 70 \% + 0,19 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 9,0 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 3.500 \frac{\text{t}}{\text{a}} \\
 &= 63.496 \frac{\text{€}}{\text{a}}
 \end{aligned}$$

Gesamtkosten

Die Gesamtkosten (K_{ges}) der Aufbereitung ist die Summe aus Fixkosten und variablen Kosten.

$$K_{\text{ges,BTA,3.500}} = K_{\text{Vari,BTA,3.500}} + K_{\text{Fix,BTA}} = 63.496 \frac{\text{€}}{\text{a}} + 91.000 \frac{\text{€}}{\text{a}} = 154.496 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

Die spezifischen Kosten (k_{ges}) pro aufbereitete Tonne lassen sich durch Division der Gesamtkosten durch die jährlich aufbereitete Inputmasse berechnen

$$k_{\text{ges,BTA,3.500}} = \frac{K_{\text{ges,BTA,3.500}}}{m_{\text{Input}}} = \frac{154.496 \frac{\text{€}}{\text{a}}}{3.500 \frac{\text{t}}{\text{a}}} = 44,14 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$

Da die Anlagen der Firma BTA GmbH und Finsterwalder GmbH nur eine Aufbereitungskapazität von 5.000 t bzw. 5.500 t vorweisen, beträgt die Anlagenauslastung in den Berechnungen teilweise über 100 %. Nach Rücksprache mit den Technologieherstellern, kann eine weitere Anlage zugeschaltet und parallel betrieben werden. Dies wirkt sich auf die Fixkosten aus, welche sich durch eine zweite Anlage verdoppeln. Die spezifischen Aufbereitungskosten wurden ab einer Maschinenauslastung von über 100 % mit der nachfolgenden Formel berechnet.

$$\begin{aligned}
 k_{\text{ges,spez,Aa>100\%}} &= \frac{K_{\text{Fix}} \cdot 2 + K_{\text{variabel}}}{m_{\text{Input}}} \\
 &= \frac{(AB_{\text{fix}} + kZ_{\text{fix}}) \cdot 2 + K_{\text{Wartung,vari}} + K_{\text{Personal,vari}} + K_{\text{Energie,vari}}}{m_{\text{Input}}}
 \end{aligned}$$

Die variablen Kosten werden durch das ergänzen einer weiteren Anlage nicht beeinflusst, da diese ausschließlich abhängig von der Inputmasse sind. Nachfolgend werden die beispielhaften Berechnungen der BTA-Anlage mit einer Aufbereitungsmenge von 6.500 Tonnen durchgeführt.

$$K_{Fix,BTA,Aa>100\%} = (AB_{BTA} + kZ_{BTA}) \cdot 2 = \left(\frac{AW_{BTA}-RBW}{n} + \frac{AW_{BTA}-RBW}{2} \cdot i \right) \cdot 2 = \left(\frac{700.000\text{€}-0}{10a} + \frac{700.000\text{€}-0}{2} \cdot 0,06 \right) \cdot 2 = 182.000 \frac{\text{€}}{a}$$

$$\begin{aligned} K_{Vari,BTA,6.500t} &= K_{Wartung,BTA} + K_{Personal,BTA} + K_{Energie,BTA} \\ &= k_{Wartung,BTA} \cdot m_{Input} + k_{Stundenlohn} \cdot t_{Personalaufwand} \cdot Aa_{6.500t} + k_{Energie\ elektr.} \\ &\quad \cdot e_{elektr,BTA} \cdot m_{Input} \\ &= 3,0 \frac{\text{€}}{t} \cdot 6.500 \frac{t}{a} + 28,70 \frac{\text{€}}{h} \cdot 2.340 \frac{h}{a} \cdot 130\% + 0,19 \frac{\text{€}}{kWh} \cdot 9,0 \frac{kWh}{t} \cdot 6.500 \frac{t}{a} \\ &= 117.920 \frac{\text{€}}{a} \end{aligned}$$

$$K_{ges,BTA,6.500} = K_{Vari,BTA,6.500} + K_{Fix,BTA,Aa>100\%} = 117.920 \frac{\text{€}}{a} + 182.000 \frac{\text{€}}{a} = 299.920 \frac{\text{€}}{a}$$

$$k_{ges,BTA,3.500} = \frac{K_{ges,BTA,6.500}}{m_{Input}} = \frac{299.920 \frac{\text{€}}{a}}{6.500 \frac{t}{a}} = 46,14 \frac{\text{€}}{t}$$

Die Ergebnisse der gesamten Berechnungen werden nachfolgend in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgezeigt. Anzumerken ist hierbei, dass im letzten Szenario „6.500 t/a Durchsatzleistung“ die jährliche Aufbereitungskapazität der Technologien der Unternehmen BTA und Finsterwalder überstiegen wird. Dies führt zu einer Maschinenauslastung von über 100 %. Nach Rücksprache mit den Technologieherstellern wurde der Zubau jeweils einer weiteren Anlage der gleichen Ausbaugröße empfohlen. Hierfür wurden die Fixkosten für jeweils eine weitere Anlage berücksichtigt. Folglich wurden die Investitionskosten verdoppelt, während die variablen Kosten weiterhin in Abhängigkeit der tatsächlich behandelten Inputmenge berechnet wurden. Dies verursacht den sprunghaften Kostenanstieg der spezifischen Aufbereitungskosten dieser Anlagen, während die die Aufbereitungskosten der Tietjen Anlage weiter sinken.

Tabelle 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse der periodenbezogenen Kostenvergleichsrechnung

Kostenart	jährliche Durchsatzleistung	relevante Daten	Einheit	BTA Hydromechanische Aufbereitung	Finsterwalder Biosqueeze 200	Tietjen DRM-Hybrid
fix		kalkulatorische Abschreibungen	€/a	70.000	13.400	17.500
		kalkulatorische Zinsen	€/a	21.000	4.020	5.250
		gesamt	€/a	91.000	17.420	22.750
variabel	1.000 t/a	Auslastung	%	20%	18%	8%
		Wartungskosten	€/a	3.000	2.300	600
		Personalkosten	€/a	13.432	12.211	5.373
		Energiekosten	€/a	1.710	722	2.090
		gesamt	€/a	18.142	15.233	8.063
	jährliche Gesamtkosten	€/a	109.142	32.653	30.813	
	spezifische Kosten	€/t	109,14	32,65	30,81	
variabel	3.500 t/a	Auslastung	%	70%	64%	28%
		Wartungskosten	€/a	10.500	8.050	2.100
		Personalkosten	€/a	47.011	42.737	18.804
		Energiekosten	€/a	5.985	2.527	7.315
		gesamt	€/a	63.496	53.314	28.219
	jährliche Gesamtkosten	€/a	154.496	70.734	50.969	
	spezifische Kosten	€/t	44,14	20,21	14,56	
variabel	5.000 t/a	Auslastung	%	100%	91%	40%
		Wartungskosten	€/a	15.000	11.500	3.000
		Personalkosten	€/a	67.158	61.053	26.863
		Energiekosten	€/a	8.550	3.610	10.450
		gesamt	€/a	90.708	76.163	40.313
	jährliche Gesamtkosten	€/a	181.708	93.583	63.063	
	spezifische Kosten	€/t	36,34	18,72	12,61	
variabel	6.500 t/a	Auslastung	%	130%	118%	52%
		Wartungskosten	€/a	19.500	14.950	3.900
		Personalkosten	€/a	87.305	79.369	34.922
		Energiekosten	€/a	11.115	4.693	13.585
		gesamt	€/a	117.920	99.012	52.407
	jährliche Gesamtkosten	€/a	299.920	133.852	75.157	
	spezifische Kosten	€/t	46,14	20,59	11,56	

In der vorangegangenen **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Ergebnisse der Kostenvergleichsrechnung aufgeführt. Hierbei ist festzustellen, dass die spezifischen Kosten aller Aufbereitungstechnologien mit steigender Durchsatzleistung sinken. Durch die erhöhten Fixkosten der Anlagen, der Unternehmen BTA International GmbH und Finsterwalder Umwelttechnik GmbH, bei der Durchsatzleistung von 6.500 t/a, steigen die spezifischen Kosten allerdings an, während die spezifischen Kosten der Anlage des Unternehmens Tietjen Verfahrenstechnik GmbH weiter sinken. Anzumerken ist hierbei, dass in diesem Szenario die zugeschalteten Module der Unternehmen BTA International GmbH und Finsterwalder Umwelttechnik GmbH eine nur sehr geringe Auslastung von nur 30 % bzw. 18 % vorweisen.

II.1.7.2.3 Bewertung der Technologien

Technische Bewertung

Die drei näher betrachteten Aufbereitungstechnologien eignen sich generell zur Aufbereitung der Inputstoffe und -mengen, welche in der vorliegenden Ausarbeitung im Fokus stehen. Eine erste Vorauswahl wurde hierbei in Kapitel II.1.7.2.1 durch das Kriterium Aufbereitungskapazität getroffen. Eine geeignete Aufbereitungskapazität wird also bei allen Anlagen angenommen und wird keiner weiteren Bewertung mehr unterzogen. In der nachfolgenden Gegenüberstellung der Anlagen in Tabelle 22 wurden die drei Aufbereitungsanlagen mit einem farblichen Schema je nach Kriterium hinsichtlich deren Eignung zur Aufbereitung der Substrate, bewertet. Grün steht hierbei für einen im Vergleich zu den anderen Anlagen guten Wert, Gelb für einen mittelmäßigen bzw. neutralen und Rot für einen nachteiligen Wert.

Tabelle 22: Bewertung der betrachteten Aufbereitungstechnologien

Kriterium	Einheit	BTA International GmbH Hydromechanische Aufbereitung	Finsterwalder Separationspresse	Tietjen DRM-Hybrid System
Flächenbedarf	m ²	56	8	4,2
spezifischer Energiebedarf	kWh/t	9	3,8	11
zulässige Partikelgröße	mm	< 200	< 200	< 200
Prozesswasserbedarf		ja	nein	nein
Partikelgröße in der Suspension	mm	< 10 (Inerststoffe: < 1)	< 12	< 12
abgeschiedene Störstoffe		Leichtstoffe Schwerstoffe Gritfraktion	Presskuchen	unsortierte Störstoffe

In Kapitel II.1.7.2.2 wurde der Flächenbedarf der Anlagen berechnet und verglichen. Hierbei hat der Tietjen DRM-Hybrid den geringsten Flächenverbrauch von 4,2 m² während zum Betrieb der BTA-hydromechanischen Aufbereitungsanlage eine Fläche von 56 m² nötig ist. Die Finsterwalder Separationspresse weist hingegen mit einem Flächenbedarf von 8 m² ebenso einen vergleichsweise geringen Flächenbedarf auf. Wie in Tabelle 22 zu sehen, weist die Finsterwalder Separationspresse mit 3,8 kWh/t den geringsten spezifischen Energieverbrauch auf. Einen mittleren durchschnittlichen Wert hat hierbei die BTA Aufbereitungsanlage, welche mit 9 kWh/t rund doppelt so hoch ist wie der Energieverbrauch der Finsterwalder Separationspresse. Den höchsten Energieverbrauch weist das Tietjen DRM-Hybrid System auf. Unter alleiniger Betrachtung des Energieverbrauchs bzw. der Emissionen bei der Energieerzeugung, kann die Finsterwalder Separationspresse somit am ökologischsten betrieben werden. Die zulässige Partikelgröße, des Inputmaterials liegt bei allen betrachteten Anlagen bei < 200 mm und lässt somit keine Bewertung der Anlagen durch dieses Kriterium zu. Bei allen Anlagen gilt also, dass bei einer Partikelgröße von über 200 mm eine Zerkleinerung vorgeschaltet werden muss. Der Frischwasserbedarf der Anlagen wurde nicht als Kriterium in die Bewertung miteinbezogen. Die einzige Anlage welche Prozesswasser grundlegend für den Aufbereitungsprozess benötigt, ist die BTA hydromechanische Aufbereitung. Dies hat zur Folge, dass die Anlage nur auf dem Gelände der Kläranlage betrieben werden kann oder ein sehr hoher Frischwassereinsatz nötig ist. Unter normalen Umständen wird diese Anlage in den Prozesswasserkreislauf der Kläranlage integriert. Bei den aufgezeigten Mühlen und Pressen, ist Prozesswasser nicht zwingend nötig. Angemerkt sei hierbei allerdings, dass diese Technologien zum alleinigen Aufbereitungsprozess zwar kein Prozesswasser benötigen, je nach Anforderungen der Nassvergärung und der Eigenschaften des Inputmaterials dennoch Prozesswasser

nötig ist. Grund hierfür ist der nötige Trockensubstanzgehalt der Suspension zur störungsfreien Einbindung in die bestehende Nassvergärung. Eine Anmischung des aufbereiteten Substrates ist also erforderlich, wenn nicht in der Aufbereitungsanlage selbst, dann zu einem späteren Zeitpunkt. Die Partikelgröße in der Suspension ist ebenfalls vom Aufbereitungsverfahren abhängig. Hierbei ist festzustellen, dass der BTA Aufbereitungsprozess eine kleinere Partikelgröße von < 10 mm und bei Inertstoffen von < 1 mm, gegenüber den beiden weiteren Aufbereitungsverfahren mit Störstoffgrößen < 12 mm in der Suspension vorweist. Dies führt zu einer einfacheren Einbindung der Suspensionen aus dem BTA-Prozess, im Vergleich zu den aufbereiteten Substraten der weiteren Technologien. Unter Umständen ist für die Substrate aus der Finsterwalder Separationspresse und der Tietjen Doppelrotormühle ein nachgeschalteter Verfahrensschritt zur weiteren Aufbereitung nötig. Auch bei der Störstoffabscheidung ist die BTA Hydromechanische Aufbereitung besser zu bewerten. Im Gegensatz zu den weiteren Anlagen, werden hierbei die Störstoffe in den drei aufgeführten Fraktionen (Leicht-, Schwer- und Gritfraktion) abgeschieden. Diese lassen sich leichter einer weiteren Verwertung zuführen, als der abgeschiedene Presskuchen bzw. die unsortierten Störstoffe der weiteren Technologien.

Unter Betrachtung aller Kriterien lässt sich feststellen, dass das Tietjen DRM-Hybrid System mit drei positiven und drei negativen Bewertungen am schlechtesten bewertet wurde. Die BTA Hydromechanische Aufbereitung und die Finsterwalder Separationspresse hingegen schneiden mit drei positiven, zwei neutralen und zwei negativen Bewertungen im Vergleich am besten ab.

Ökonomische Bewertung

Um die Anlagen aus ökonomischer Sicht bewerten zu können wurde innerhalb des ökonomischen Technologievergleich (Kapitel II.1.7.2.2) die periodenbezogene Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Zur Veranschaulichung der Aufbereitungskosten sind die Kostenkurven der einzelnen Technologien mit einer Durchsatzspanne von > 500 t/a und < 6.500 t/a in der nachfolgenden Abbildung 13 grafisch dargestellt. Hierbei ist festzustellen, dass bei einer sehr geringen Aufbereitungskapazität, die Aufbereitung durch die Separationspresse der Finsterwalder GmbH, die kostengünstigste Variante darstellt. Die Tietjen Aufbereitungstechnologie ist aufgrund höherer Anschaffungskosten im Inputbereich von 500 t/a bis ca. 1.000 t/a geringfügig teurer im Betrieb. Die spezifischen Kosten der BTA-Aufbereitungsanlage sind in diesem Aufbereitungsbereich rund vierfach so hoch wie die Aufbereitung durch die Finsterwalder Separationspresse. Hierbei ist anzumerken, dass die Anschaffungskosten der BTA Aufbereitungsanlage im Vergleich sehr hoch sind und hierdurch die spezifischen Aufbereitungskosten durch die hohen Fixkosten stark angehoben werden.

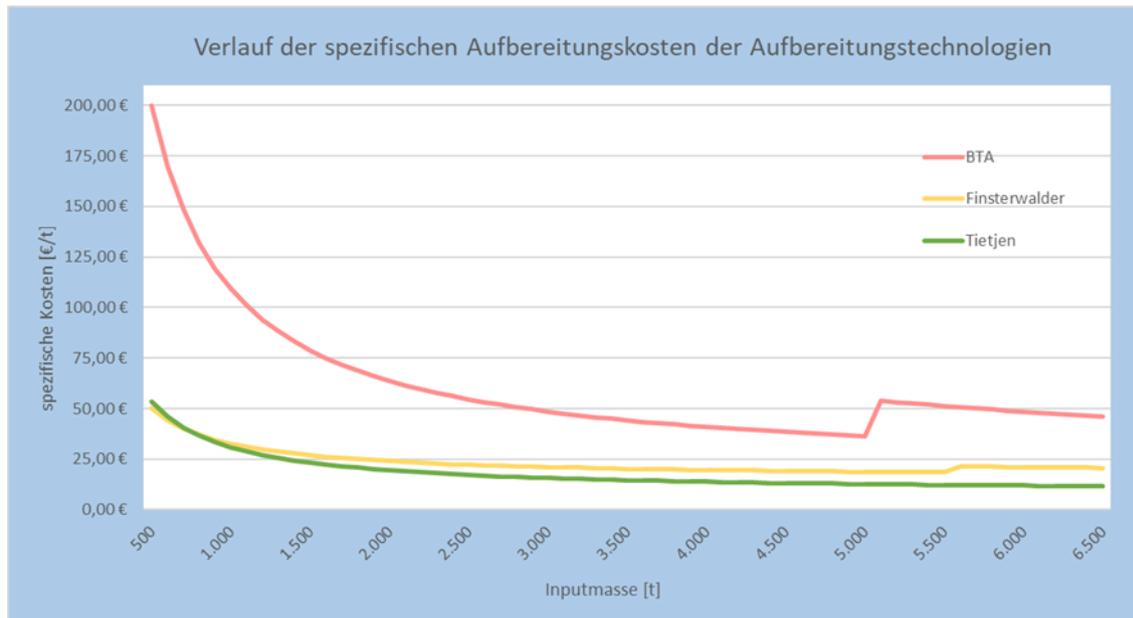


Abbildung 13: Kostenverlauf der spezifischen Aufbereitungskosten der betrachteten Aufbereitungsanlagen

Im Aufbereitungsbereich von 1.000 t/a liegen die spezifischen Aufbereitungskosten der Tietjen Technologie bei rund 31 €/t, diese sinken allerdings mit zunehmender jährlicher Durchsatzleistung bis auf 12 €/t bei einem Durchsatz von 6.500 t/a ab. Bei der Finsterwalder Technologie fallen hierbei leicht höhere Aufbereitungskosten im Gegensatz zur Tietjen Technologie an. Die Kosten der Finsterwalder Technologie sind bei 1.000 t/a rund 3 € höher je Tonne als die der Tietjen Technologie. Bei 5.500 t/a betragen die Kosten noch 18,40 €/t. Ab 5.500 t/a entsteht durch nötige Erweiterung der Aufbereitungskapazität ein Kostensprung auf 21,45 €/t. Die BTA-Technologie stellt die teuerste Aufbereitungsvariante unabhängig von der Durchsatzleistung dar. Bei 5.000 t/a betragen die Kosten der Aufbereitung noch 36,70 €/t. Nach der Schwelle von 5.000 t/a steigen die Aufbereitungskosten sprunghaft an, da die Anlage zur Kapazitätserweiterung durch eine zweite Anlage ergänzt werden muss. Die spezifischen Kosten steigen hierbei auf über 50 €/t an, und sinken anschließend wieder ab.

Zur ökonomischen Bewertung der Technologien kann festgestellt werden, dass das Tietjen DRM-Hybrid System am kosteneffizientesten betrieben werden kann. Ebenso weist die Finsterwalder Separationspresse, wenn auch leicht höhere, relativ geringe spezifische Aufbereitungskosten auf. Die BTA Hydromechanische Aufbereitung ist hierbei vor allem im Bereich geringer jährlicher Aufbereitungsdurchsätze am ineffizientesten. Hierbei sei aber angemerkt, dass durch den BTA Prozess eine bessere Störstoffabscheidung stattfindet. Den Finsterwalder und Tietjen Technologien müssen unter Umständen weitere Behandlungsstufen nachgeschaltet werden. Gerade bei höheren Durchsatzmengen und damit verbundener mengenmäßig höhere Zugabe des Co-Substrates zur bestehenden Faulung, spielt die Reinheit des Substrates eine steigende Rolle im Vergärungsprozess. Geht man davon aus, dass hierbei ein weiteres Reinigungsverfahren nachgeschaltet werden muss, führt dies zu einer Erhöhung der spezifischen Aufbereitungskosten.

II.1.7.3 Standortanalyse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Analyse zur Ermittlung des effizientesten Standortes zur Aufbereitung der Co-Substrate dargestellt. Hierfür wurden wie in Abbildung 14 zu sehen, zwei Varianten, die Aufbereitung des Co-Substrates auf dem Gelände der Kläranlage und auf dem Gelände des öRE, untersucht.

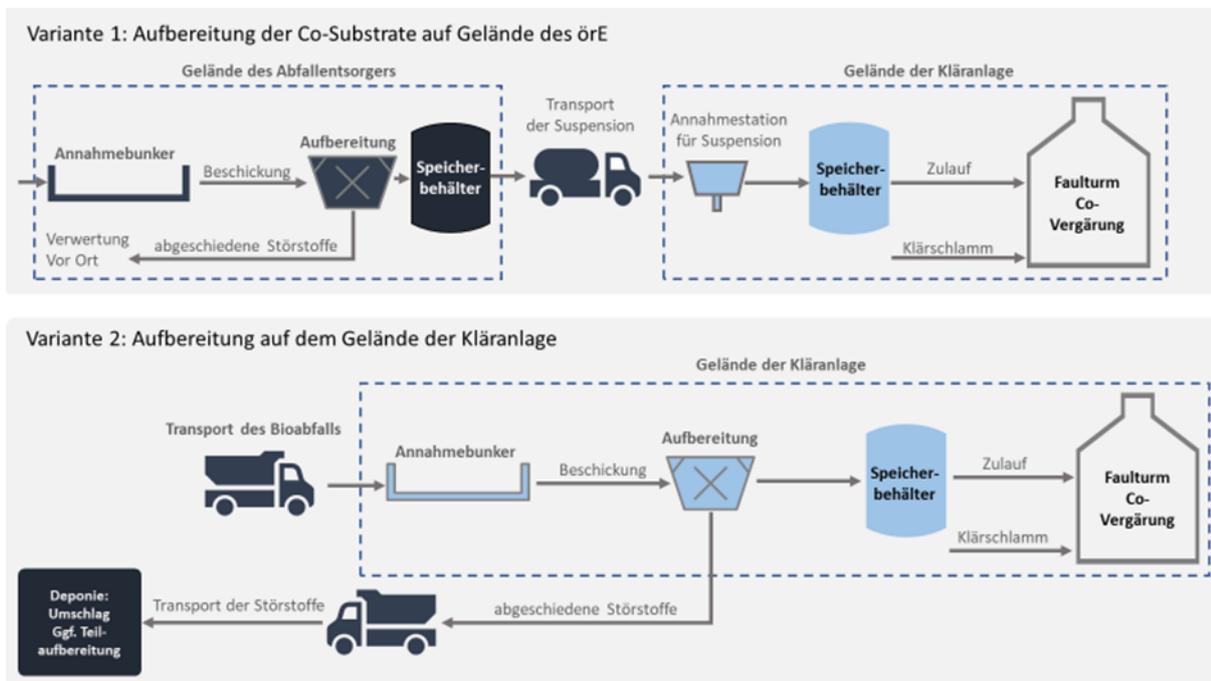


Abbildung 14: Standortsspezifische Varianten zur Aufbereitung der Co-Substrate

In den nachfolgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die biogenen Abfälle aus der häuslichen Sammlung, in Variante 1 mit den Abfallsammelfahrzeugen zum Gelände des öRE transportiert werden. Hierfür ist ein Annahmehunker zur Sammlung der biogenen Abfälle nötig. Es wird davon ausgegangen, dass bei den öRE derzeit ein Umschlag der biogenen Abfälle auf dem Gelände durchgeführt wird und somit die Infrastruktur zur Sammlung und Übergabe (bspw. Flachbunker und Radlader) der Substrate in die Aufbereitungsanlage vorhanden ist. Das Substrat wird dann auf dem Gelände des öRE mit einer der identifizierten Technologien aufbereitet, der gewünschte TS-Gehalt der Suspension vor Ort eingestellt und anschließend in einem Speicherbehälter zwischengespeichert. Die abgeschiedenen Störstoffe können direkt auf dem Gelände des öRE verwertet werden. In regelmäßigen Abständen wird die Suspension mittels Tankfahrzeug zur Kläranlage transportiert und dort über eine Annahmestation in einen Speicherbehälter umgefüllt (vgl. Zeig, 2013). Ohne weitere Aufbereitung soll das Substrat in der Kläranlage eingesetzt werden. Das bedeutet, dass der TS-Gehalt der Suspension bereits auf dem Gelände des öRE mittels Frischwasser eingestellt wird.

Bei Variante 2 der in Abbildung 14 aufgezeigten Standortoptionen wird das Substrat auf dem Gelände der Kläranlage aufbereitet. Hierbei werden die biogenen Abfälle mit den Abfallsammelfahrzeugen direkt auf das Gelände der Kläranlage angeliefert. Von einer ausreichend großen Flächenverfügbarkeit für den Lieferverkehr wird ausgegangen. Hierfür muss ein Annahmehunker errichtet werden. Über eine Fördereinrichtung wird die Aufbereitungsanlage mit dem Co-Substrat beschickt. Abgeschiedene

Störstoffe aus der Aufbereitungsanlage werden in einem 40 m³ Abrollcontainer gesammelt und anschließend zum Gelände des öRE transportiert. Die aufbereitete Suspension wird direkt in einen Speicherbehälter geleitet und kann im Anschluss in die bestehende Vergärung eingebracht werden. Zur Einstellung des gewünschten TS-Gehaltes der Suspension kann das Prozesswasser der Kläranlage genutzt werden.

Wie in der vorangegangenen Technologieanalyse werden nun Kriterien zum Vergleich und der Bewertung der Standortvarianten bestimmt. Diese resultieren hierbei aus den Anforderungen der identifizierten Technologien und der variantenbedingten Gegebenheiten. Die Kriterien werden so gewählt, dass eine allgemeine Übertragbarkeit auf andere Standorte gewährleistet werden kann.

Die in Kapitel II.1.7.2.1 beschriebenen Technologien erzeugen organische Substrate bzw. Suspensionen mit unterschiedlichen TS-Gehalten. Um die Pumpfähigkeit sicherzustellen muss das Substrat nach der Aufbereitung, falls nicht beim Aufbereitungsvorgang selbst geschehen, nachträglich mit Wasser angereichert werden. Die Pumpfähigkeit ist hierbei ab einem TS-Gehalt < 14 % gewährleistet (vgl. DWA, 2009 S. 29). Zur Anmischung der Substrate kann, wie bereits oben beschrieben, das Prozesswasser der Kläranlage genutzt werden. Die Verwendung von Frischwasser würde zu einem sehr hohen Wasserbedarf führen. Während das Pulperverfahren nur unter Zuführung von Prozesswasser durchführbar ist, so ist die Zuführung von Prozesswasser zum DRM-Hybrid optional. Der TS-Gehalt aufbereiteter Substrate aus der Separationspresse muss hingegen nachträglich durch Anmischung mit weiteren verfahrenstechnischen Anlagenkomponenten eingestellt werden. Da in den aufgezeigten Varianten die Aufbereitung komplett an der Kläranlage oder komplett auf dem Gelände des öRE durchgeführt werden soll, wird von einer Anmischung des Substrates jeweils am Ort der Aufbereitung ausgegangen.

Im Rahmen der Technologierecherche, bzw. der Rücksprache mit den Technologieherstellern, wurde von der BTA International GmbH eine Massenbilanz zur Aufbereitung mit der BTA Hydromechanischen Aufbereitung eines standortspezifischen Inputstoffes für das Projekt erstellt. Hierbei wird bei einer Inputmasse von 5.000 t/a (TS-Gehalt 29 %) eine Suspensionsmasse von 15.218 t/a (TS-Gehalt 8,4 %) erzeugt. Abgeschieden werden 729 t/a Störstoffe und ca. 11.000 m³/a Prozesswasser und 84 m³/a Frischwasser eingesetzt. Für die nachfolgenden Betrachtungen und Berechnungen werden diese Werte herangezogen.

II.1.7.3.1 Vergleich der Aufbereitungsvarianten

Zum Vergleich und der späteren Bewertung der unterschiedlichen Standortvarianten werden nachfolgend Kriterien definiert. Die Kriterien unterscheiden sich hierbei durch rein variantenspezifische Kriterien, also Kriterien deren Eigenschaften nicht von den Modellstandorten abhängig sind und Kriterien, welche auf den standortspezifischen Gegebenheiten der Modellstandorte beruhen. Diese Kriterien werden getrennt voneinander aufgezeigt. Variantenspezifische Kriterien sind hierbei unterschiedliche Anlagenkomponenten, die Anzahl nötiger Transportfahrten, und der Kostenvergleich. Als standortspezifische Kriterien lassen sich verfügbare Flächen, vorhandene Infrastruktur sowie Transportkilometer definieren.

Variantenabhängige Betrachtungen

Je nach Aufbereitungsvariante unterscheiden sich die nötigen Anlagenkomponenten, welche zum Betrieb der identifizierten Technologien nötig sind. In der nachfolgenden Tabelle 23 sind alle Anlagenkomponenten, welche für Variante 1 oder Variante 2 nötig sind gelistet. Bei Umsetzung der Variante 1 bedarf es aller gelisteten Anlagenkomponenten mit Ausnahme des Annahmestations. In Variante 2 müssen keine Speichermöglichkeiten auf dem Gelände des örE geschaffen werden, ebenso ist keine Annahmestation für die Suspension an der Kläranlage nötig.

Nötige Transportfahrten sind vom Standort der Aufbereitung abhängig. So muss in Variante 1 unter der Annahme, dass die Störstoffe auf dem Gelände des Abfallentsorgers verwertet werden können, die aufbereitete Suspension zur Kläranlage transportiert werden. Stattdessen müssen in Variante 2 lediglich die Störstoffe von der Kläranlage hin zum Gelände des örE transportiert werden. Anhand der beschriebenen Massenbilanz wurden nötige Transportfahrten der zwei Varianten mit der Formel (8) berechnet.

$$n_{Transport} = \frac{m_{Output}}{\rho_{Outputstoff} \cdot V_{Transportfahrzeug}} \quad (8)$$

Berechnet wurde die Anzahl der Transportfahrten ($n_{Transport}$) unter der Annahme, der beschriebenen Volumina der Transportfahrzeuge. Hierbei wurden die jährlich anfallenden Gesamtmassen der Störstoffe und der Suspension (m_{Output}) durch das Produkt der Dichte des Outputstoffs ($\rho_{Outputstoff}$) und des Volumen des jeweiligen Transportfahrzeuges ($V_{Transportfahrzeug}$) dividiert. Die Berechnungen befinden sich in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Wie in Tabelle 23 zu sehen, sind in Variante 1 rund 300 Fahrten zum Transport der Suspension nötig, während bei Variante 2 nur 33 Fahrten zum Abtransport der Störstoffe zum Gelände des örE nötig sind.

Die Kosten, welche durch die zwei standortspezifischen Varianten entstehen, lassen sich in variable Kosten und Fixkosten unterscheiden. Die Fixkosten entstehen hierbei durch den Bedarf an verschiedenen Anlagenkomponenten, welche in Tabelle 23 gelistet sind. Die variablen Kosten werden hier vor allem durch die Transportfahrten verursacht. Um die zwei Varianten quantitativ ökonomisch zu vergleichen, müsste eine Kostenaufstellung der gesamten standortspezifischen Anlagentechnik durchgeführt werden. Darüber hinaus sind die variablen Kosten, welche durch die Transportfahrten verursacht werden, zu vergleichen.

Tabelle 23: Vergleich der Aufbereitungsstandorte

benötigte Anlagenkomponenten	Variante 1	Variante 2
Aufbereitungsort	Gelände örE	Kläranlage
Annahmestation Suspension	ja	nein
Speicherbehälter KA	ja	ja
Speicherbehälter Gelände örE	ja	nein
Annahmestations	nein	ja
Transportfahrten der Störstoffe	-	33
Transportfahrten der Suspension	300	-

Standortsspezifische Betrachtungen

Die an den Standorten verfügbaren Flächen wurden mit dem Geoinformationssystem QGIS an den Standorten identifiziert und vermessen.

Tabelle 24: Flächenverfügbarkeit an den Modellstandorten (Kläranlagen)

Kläranlagen	Flächenverfügbarkeit
Hopstädten-Weiersbach	
Zweibrücken	
Lauterecken	

Tabelle 25: Flächenverfügbarkeit an den Modellstandorten (örE)

Gelände des örE	Flächenverfügbarkeit
Zweibrücken	
Lauterecken	

Das Gelände des örE im Kreis Birkenfeld bzw. des Modellstandortes Hoppstädten wurde nicht betrachtet, da hier bisweilen kein Umschlag von Biomasse durchgeführt wurde und somit auch keine Infrastruktur für die Standortvariante 1 vorhanden ist. Die geringste Flächenverfügbarkeit weist hierbei mit 750 m² das Gelände des örE am Modellstandort Lauterecken auf. Die höchste Flächenverfügbarkeit ist hierbei auf der Kläranlage Zweibrücken mit 2.500 m² vorhanden.

Je nach Standortvariante ist eine unterschiedliche Infrastruktur an den Aufbereitungsorten notwendig. Die Aufbereitung nach Variante 1 ist nur dann potenziell vorteilhaft, wenn bereits ein Annahmehöcker zur Sammlung bzw. technische Einrichtung zum Umladen der zur Sammlung der Störstoffe vorhanden ist. Dies ist auf dem Gelände des örE am Modellstandort Hoppstädten nicht der Fall, da hier die Sammlung, Umschlag und Verwertung von einem beauftragten externen Unternehmen durchgeführt wird.

Zur Berechnung der standortspezifischen Transportkilometer wurden die in Tabelle 26 aufgezeigten Transportwege (sTransport) mit dem Online-Kartendienst Google Maps kalkuliert. Der Transportweg ist hierbei sowohl für den Transport der Suspension, als auch der Störstoffe die Entfernung zwischen

Kläranlage und Gelände des örE. Die Transportwege wurden anschließend mit der in Tabelle 25 gezeigten variantenabhängigen Anzahl an Transportfahrten ($n_{Transport}$) multipliziert und somit die gesamten jährlichen Transportwege ($n_{Transport}$) berechnet.

$$S_{Transport,ges} = n_{Transport} \cdot S_{Transportweg} \quad (9)$$

Wie der nachfolgenden Tabelle entnehmbar, wurden keine Wege für den Standort Hoppstädten berechnet. Dies resultiert aus den bereits erläuterten Umständen der aktuellen externen Biomasse Sammlung.

Tabelle 26: Vergleich der Varianten nach standortspezifischen Kriterien

Modellstandort	Einheit	Zweibrücken		Lauterecken		Hoppstädten	
		Kläranlage	Gelände örE	Kläranlage	Gelände örE	Kläranlage	Gelände örE
Annahmestation		nein	ja	nein	ja	nein	nein
Verwertungsmöglichkeit der Störstoffe		nein	ja	nein	ja	nein	nein
verfügbare Fläche	m ²	2.500	1.500	1.200	750	1.575	-
Entfernung KA bis Gelände örE	km/Fahrt	10,1		15		-	
Transportweg Störstoffe	km/a	333		495		-	
Transportweg Suspension	km/a	3.030		4.500		-	

Wie in der Tabelle 26 aufgezeigt, ist eine Umsetzung beider Standortvarianten unter gegebenen Umständen nur an den Modellstandorten Zweibrücken und Lauterecken möglich. Eine Aufbereitungsanlage wird am Standort Hoppstädten voraussichtlich nur auf dem Gelände der Kläranlage errichtet werden, da zurzeit kein Umschlag von Bioabfällen beim örE durchgeführt wird.

II.1.7.3.2 Bewertung der Aufbereitungsstandorte

Technische Bewertung der Standortvarianten

Unter Betrachtung der zwei definierten Aufbereitungsvarianten lassen sich aus technischer Sicht vor allem Unterschiede der nötigen Anlagenkomponenten zum Betrieb der Aufbereitungsanlagen feststellen. In der nachfolgenden Tabelle 27 wurden die technischen Anlagenkomponenten gegenübergestellt und durch die in Kapitel II.1.7.2.3 bereits erläuterte farbliche Kennzeichnung bewertet. Hierbei ist zu erkennen, dass bei Variante 1 die Annahmestation für die Suspension und ein Speicherbehälter auf dem Gelände des örE nötig sind, welche für den Betrieb der Anlage auf dem Gelände der Kläranlage, sprich unter Variante 2, nicht nötig sind. Zur Umsetzung der Variante 2 hingegen, muss ein Annahmestation errichtet werden. Negativ wird dieses Kriterium in Variante 2 bewertet, da davon ausgegangen wird, dass auf dem Gelände des örE ein Annahmestation, also bei Variante 1, bereits vorhanden ist. Eine Einrichtung eines Speicherbehälters zur Speicherung des aufbereiteten Substrates an der Kläranlage, ist in beiden Varianten nötig und wird deshalb als neutral bewertet. Bewertet man die Aufbereitungsstandorte nach den qualitativen Kriterien der nötigen Anlagenkomponenten, ist also die Standortvariante 2 die effizientere.

Tabelle 27: Gegenüberstellung der technischen Eigenschaften der Standortvarianten

Anlagenkomponenten		Variante 1	Variante 2
Annahmestation Suspension		ja	nein
Speicherbehälter KA		ja	ja
Speicherbehälter Gelände örE		ja	nein
Annahmehunker		nein	ja
Transportfahrten	km/a	300	33

Beim Vergleich der nötigen Transportfahrten fällt auf, dass durch die in Variante 1 dargestellte Aufbereitung auf dem Gelände des Abfallentsorgers fast zehnmal so viele Fahrten gegenüber Variante 2 nötig sind. Auch hierbei stellt Variante 2 die effizientere der Varianten dar.

In der nachfolgenden Tabelle 28 wurden die Modellstandorte anhand der Flächenverfügbarkeit und der Transportwege bewertet.

Tabelle 28: Bewertung der Modellstandorte nach standortspezifischen Merkmalen

Modellstandort	Einheit	Zweibrücken		Lauterecken		Hoppstädten	
		Kläranlage	Gelände örE	Kläranlage	Gelände örE	Kläranlage	Gelände örE
verfügbare Fläche	m ²	2.500	1.500	1.200	750	1.575	-
Transportweg Störstoffe	km/a	333		495		-	
Transportweg Suspension	km/a	3.030		4.500		-	

Wie in der Tabelle 28 zu entnehmen, ist die Flächenverfügbarkeit, wenn diese besteht, ausreichend um den Flächenbedarf der Aufbereitungsanlagen aus Tabelle 18 zu decken. Beachtet werden muss hierbei allerdings, dass weitere zum Betrieb nötige Einrichtungen wie Annahme- und Förderinfrastruktur usw. ebenso Flächenbedarf verursachen. Die aufgezeigten Transportwege sind proportional zu den nötigen variantenspezifischen Transportfahrten. Folglich werden weniger Transportkilometer bei Transport der Störstoffe, als bei Transport der Suspension zurückgelegt.

Ökonomische Bewertung der Standortvarianten

Auch bei der ökonomischen Bewertung kann auf die Ergebnisse der Tabelle 27 zurückgegriffen werden. Hierbei werden die jeweils nötigen Anlagenkomponenten den Fixkosten zugeordnet. Ein quantitativer Vergleich der Anschaffungskosten ist nur unter hohem Aufwand möglich, da die technische Umsetzung in sehr verschiedenen Ausführungen in Abhängigkeit der standortspezifischen Gegebenheiten stattfinden können. Auch wenn in Variante 1 im Gegensatz zu Variante 2 eine Anlagenkomponente mehr angeschafft werden muss, so stehen in Variante 2 die Anschaffungskosten für einen Annahmehunker gegenüber. Dieser kann im einfachsten Fall ein Flachbunker sein, von welchem aus mit einem Radlader der Aufgabetrichter der Aufbereitungstechnologie beschickt wird. Ebenso ist die technische Umsetzung per ebenerdigem Aufgabetrichter möglich, welcher mittels Fördereinrichtung dann die Aufbereitungsanlage beschickt. Für weitere detailliert quantitative ökonomische Betrachtungen müssen die Gesamtkonzepte der Aufbereitung zu den einzelnen Standorten ausgearbeitet werden. Dies übersteigt allerdings den Rahmen dieser Bachelorarbeit und muss in weiteren Betrachtungen über die vorliegende Bachelorarbeit hinaus erarbeitet werden. Gesagt sei aber, dass die variablen Kosten vor allem durch den Transport des Substrates bzw. der Störstoffe verursacht werden. Es gilt, je weiter die Kläranlage und der Umschlagplatz des örE auseinanderliegen und je mehr Substrat aufbereitet und damit einhergehend transportiert wird, desto höher werden die variablen Kosten ausfallen. Je höher die variablen Kosten, desto weniger fallen

die Fixkosten bei der Gesamtbetrachtung ins Gewicht. Auch wenn sowohl bei Variante 1 als auch bei Variante 2 mit der Transportentfernung die variablen Aufbereitungskosten ansteigen, werden diese bei der Standortvariante 2 um ca. den Faktor 10 höher ins Gewicht fallen. Es ist also davon auszugehen, dass bedingt durch die Transportkosten, die spezifischen Kosten der Aufbereitungsvarianten in Variante 1 höher sein werden. Auch aus ökonomischer Sicht ist also davon auszugehen, dass Variante 2 den effizienteren Aufbereitungsstandort darstellt.

II.1.8 Gesamt ökonomische Bewertung

Im Rahmen einer gesamt ökonomischen Bewertung wurde, neben den spezifischen Aufbereitungskosten für den Bioabfall, spezifische Kosten für die Integration der Co-Vergärung auf der Kläranlage ermittelt. Dem gegenüber wurden die spezifischen Kostenvorteile aus der Co-Vergärung gestellt.

Zur Bewertung wurde die Aufbereitung am Kläranlagenstandort mittels der Tietjien DRM-Hybrid Aufbereitungstechnik gewählt. Die jeweilige Behandlungskapazität des Co-Substrats wurde entsprechend der ermittelten Ausgangslage am Modellstandort sowie der sich hieraus bestmöglich verfügbaren Größe der Aufbereitungsanlage gewählt.

Die spezifischen Kosten zur Integration der Co-Vergärung in die bestehende Kläranlage berücksichtigt Kapitalkosten für die erforderlichen baulichen Maßnahmen (bspw. Annahmehunker, Speicherbehälter, Pumpwerke, Erweiterung BHKW, MSR-Technik usw.). Für den Standort Zweibrücken wurden zudem die Baukosten für die Errichtung eines zusätzlichen Faulturms berücksichtigt. Für die beiden anderen Standorte nur die Kosten zur Schaffung der notwendigen Faulraumkapazitäten.

Die spezifischen Kostenvorteile aus der Co-Vergärung berücksichtigen zum einen Einsparungen aus der Eigenstromerzeugung sowie Erlöse aus der Stromeinspeisung in das öffentliche Stromnetz (Annahme 0,06 €/kWh) und der Annahme/Verwertung von Bioabfall bzw. Grüngut. Zum anderen höhere Betriebskosten welche sich aus der Co-Vergärung ergeben (bspw. Rückbelastung der Kläranlagen, höherer Klärschlammanfall, Entsorgung der Störstoffe usw.).

Tabelle 29: Gesamt ökonomische Bewertung je Modellstandort

Kläranlagenstandort	Einheit	Zweibrücken	Lauterecken	Hoppstädten-Weiersbach
Gewählte Substratmenge		5.000	3.500	1.000
Bioabfall	t/a	2.430	2.000	1.000
Grüngut	t/a	2.570	1.500	
Annahmepreis				
Bioabfall	€/t	90,00	40,00	70,00
Grüngut	€/t	20,00	10,00	
Gewählte Aufbereitung		Tietjien DRM-Hybrid		
Spezifische Kosten Aufbereitung	€/t	36,34	20,21	30,81
Spezifische Kosten Faulung Co-Substrat	€/t	17,75	8,68	17,99
Spezifische Kostenvorteile aus Co-Vergärung	€/t	54,58	30,45	49,14
Gewinn/Verlust	€/t	0,49	1,55	0,34

Um eine verhältnismäßig kostenneutrale Verwertung der Bioabfallströme auf der Kläranlage zu erzielen sind je Standortvariante unterschiedliche Mindestpreise erforderlich. Während am Standort Lauterecken ein Annahmepreis von 40,00 €/Tonne Bioabfall und 10,00 €/Tonne Grüngut ausreichend sind müssen am Standort Hoppstädten-Weiersbach min. 70,00 €/Tonne Bioabfall und am Standort Zweibrücken min. 90,00 €/Tonne Bioabfall und 20,00 €/Tonne Grüngut erzielt werden. Für den durchgeführten Vergleich, wurden somit Annahmepreise angenommen, welche für den kostendeckenden Betrieb der Co-Vergärung nötig sind. Die Annahmepreise berücksichtigen nur die Behandlung, notwendige Sammlungskosten blieben bei der Berechnung unberücksichtigt.

Im Vorhaben wurden marktübliche Behandlungskosten anhand verschiedener Fallbeispiele sowie aus einschlägiger Fachliteratur erhoben. Es ist festzuhalten, dass große Schwankungen bei den Behandlungskosten vorherrschen, diese liegen in der Regel zwischen 40 und 120 €/t bei der anaeroben Behandlung sowie zwischen 70 und 120€/t bei der Bioabfallsammlung (vgl. Birkenfeld & Kusel, 2016). Die Behandlungskosten variieren hierbei erheblich von der gewählten Verwertungsart. So sind die Behandlungskosten bei der Bioabfallvergärung deutlicher höher als bei einer Kompostierung. Allerdings weist die Bioabfallvergärung durch die stoffliche und energetische Nutzung eine weitaus höhere Wertschöpfung als die Kompostierung aus.

II.1.9 Fazit

Im Hinblick auf eine regionale, nachhaltige Kreislaufwirtschaft ist die Lenkung regionaler Stoffströme ein zentrales Element. Unter Betrachtung der Abfallhierarchie gilt die stoffliche Nutzung von biogenen Abfällen hierbei als hochwertiger Nutzungsweg, noch vor der energetischen Verwertung. Die Co-Vergärung an kommunalen Kläranlagen bietet hierbei Synergieeffekte aus stofflichem Verwertungsweg und Potenzial zur regionalen klimaneutralen Energieerzeugung. Als weitestgehend ungenutzt ist hierbei das Potenzial der Kläranlagen kleiner und mittlerer Ausbaugrößen durch Co-Vergärung einzustufen.

Grundlegend für die Durchführung der Co-Vergärung ist die technische Aufbereitung der Co-Substrate und die verfahrenstechnische Integration in den laufenden Kläranlagenbetrieb. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die aufzubereitenden Mengen zur Co-Vergärung, unter der Bedingung eines späteren energieautarken Betriebs, der Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 10.000 bis 50.000 EW bestimmt. Die hierzu notwendige Größenordnung der Aufbereitungsanlagen ist allerdings nicht am Markt verfügbar, so dass keine Vollausslastung und damit einhergehend ein kostenoptimaler Betrieb gewährleistet werden kann.

Im Ergebnis konnten geeignete Technologien zur Aufbereitung der Co-Substrate und zur reibungsfreien Einbindung in den bestehenden Faulungsprozess an den Kläranlagen, identifiziert und eine Vorauswahl der geeigneten am Markt verfügbaren Technologien, anhand der jährlichen Durchsatzleistung getroffen werden. Zudem konnte das notwendige Mengenverhältnis von verfügbaren Bioabfällen innerhalb der Modellregion aufgezeigt werden. Kommunen bzw. Landkreise verfügen über ausreichend Bioabfälle, um hieraus auch einen Teilstrom via Co-Vergärung verwerten zu können. Ebenso verfügen die Kläranlagen über ausreichend Kapazitäten bzw. können diese durch Optimierung oder baulicher Erweiterung zur Verfügung stellen. Ob eine Co-Vergärung von Bioabfall auf kleine und mittlere Kläranlagen ökonomisch sinnvoll ist, hängt im Wesentlichen vom erzielbaren Annahmepreis der Substrate ab. Inwiefern ein erforderlicher Annahmepreis am Markt erzielt werden kann, ist allerdings regional sehr unterschiedlich und ist ebenso stark von den vorherrschenden Angebotspreisen alternativer Verwertungswege ab. Es kann allerdings festgehalten werden, dass die ermittelten Annahmepreise für eine kostendeckende Aufbereitung durchaus mit den marktüblichen Behandlungspreisen konkurrieren können. In der VG respektive dem Landkreis Birkenfeld betragen die derzeitigen Behandlungspreise für Bioabfall 120 €/t, wohingegen die Co-Vergärung auf der Kläranlage Hoppstädten-Weiersbach Deckungskosten von rund 70 €/t erfordert.

Als ein wesentlicher Hemmnisfaktor konnte die Akzeptanz der Thematik der Co-Vergärung, insbesondere von häuslichem Bioabfall, innerhalb der Abwasserwirtschaft identifiziert werden. In diversen Expertengesprächen wurden mögliche negative Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb hervorgehoben. In diesem Zusammenhang wurden insbesondere mögliche Störungen im Betrieb der Faulungsanlage (Störstoffe, Faserbildung usw.) sowie erhöhte Rückbelastung (Stickstofffrachten) durch Zentratwasser und höhere Klärschlammengen zur Entsorgung genannt. Das Vorhaben wurde, auch wenn mit Beteiligung von Praxispartnern, auf theoretischer Ebene durchgeführt. Um den vorherrschenden Hemmnissen zukünftig entgegenzuwirken bedarf es auch praktischer Erfahrungen, bspw. Umsetzung von Pilotanlagen, aus dem Praxisbetrieb. Erfahrungen aus Österreich zeigen, dass ein ordnungsgemäßer Kläranlagenbetrieb mit Co-Vergärung von häuslichem Bioabfall technisch und praktisch möglich ist. Die Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb sind weitaus geringer als in Expertenkreisen vermutet und postuliert wird.

II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben- und Finanzierungsplanung der Hochschule Trier mit Angaben zu den relevanten Ausgabenpositionen gilt als vertraulich und wurde gesondert eingereicht.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund der gesetzlichen Verpflichtungen zur Getrenntsammlung nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz hat sich die Menge der getrennt erfassten Bioabfälle in Deutschland erhöht. Die Vergärung von Bioabfällen weist im Vergleich zu anderen Behandlungsalternativen sehr hohe Treibhausgaseinsparungen auf. Auf der anderen Seite verfügen Kläranlagen über ungenutzte Behandlungskapazitäten in den Faultürmen oder könnten neue Kapazitäten am Standort aufbauen.

Das Projekt betrachtete insbesondere kleine und mittlere Kläranlagenstandorte und damit einhergehend die Behandlung von kleineren regional anfallenden Bioabfallströme. Bisweilen waren allerdings keine technischen Konzepte zur Aufbereitung geringe Durchsatzmenge vorhanden. Zudem ist die Co-Vergärung von biogenen Haushaltsabfällen auf Kläranlagen in Deutschland unüblich, so dass entsprechende Vorbehalte bei den Akteuren vorherrscht. Das Forschungsvorhaben WerAA stellt mit den erzielten Ergebnissen erste Lösungsansätze für die kombinierte Vergärung von Bioabfall und Klärschlamm dar. Damit kann ein wichtiger Beitrag für die verstärkte Nutzung von Co-Substraten im Allgemeinen auf Kläranlagen geleistet werden.

II.4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Ziel des Gesamtprojektes war es, zum einen technische Lösungsansätze für die Mitbehandlung von organischen Haushaltsabfällen in Faultürmen von kleinen und mittleren Kläranlagen aufzuzeigen. Zum anderen die entwickelten Maßnahmen ökonomisch zu bewerten und entsprechende Finanzierungsmöglichkeiten abzuleiten.

Im Ergebnis konnten geeignete Technologien zur Aufbereitung der Co-Substrate und zur reibungsfreien Einbindung in den bestehenden Faulungsprozess an den Kläranlagen, identifiziert und eine Vorauswahl der geeigneten am Markt verfügbaren Technologien, anhand der jährlichen Durchsatzleistung getroffen werden. Darüber hinaus wurden die Technologien nach technischen sowie ökonomischen Merkmalen bewertet. Hierbei konnte im Vergleich und unter Abhängigkeit der Aufbereitungsmenge die effizienteste Aufbereitungsanlage jeweils identifiziert werden. Die technischen als auch ökonomischen Rahmendaten sind auf andere Kläranlagen dieser Größenklassen übertragbar. Sie müssen allerdings im Einzelfall individuell und im Gesamtkontext des Aufbereitungskonzeptes neu ermittelt werden, da diese nach anlagenspezifischen Rahmenbedingungen stark variieren können.

Die hier erzielten Ergebnisse fließen zur weiteren Verwertung in die vom IfaS durchgeführte Kommunalberatung ein. Zudem ist die Einbindung in das vom IfaS geleitete EU-Life Projekt „ZENAPA - Zero Emission Nature Protection Areas“² vorgesehen. Das Projekt zielt auf die CO₂e-Neutralität von Großschutzgebieten, u. a. Nationalparks, Biosphärenreservate, Naturparks und deren umliegende Regionen ab. Die Projektkulisse deckt 11 Großschutzgebiete sowie deren angrenzende Regionen und die

² ZENAPA wird als Integriertes Projekt (IP) im Unterprogramm „Klima“ des EU-Förderprogramms für Umwelt, Naturschutz und Klimapolitik „LIFE“ gefördert.

Modellkommune Rhaunen ab. Im Rahmen des Vorhabens werden regionsspezifische Einzelmaßnahmen vorbereitet, u.a. im Bereich energieeffiziente Kläranlagen. Im Zeitraum von Oktober 2019 bis September 2020 werden diverse Workshops mit interessierten Kläranlagenbetreiber in der gesamten Projektregion durchgeführt. Hierzu bilden die erzielten Ergebnisse aus dem WerAA Vorhaben auch eine entscheidende Planungsgrundlage.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Laufe des Vorhabens gab es im Bereich der effizienten Bioabfallsammlung also auch im Bereich der Co-Vergärung auch bei anderen Stellen Entwicklungen und Forschungsprojekte. Hervorzuheben sind hierbei die Forschungsarbeiten in Österreich, wo sich die Verwertung von organischen Reststoffen im Faulturm von Kläranlagen seit Jahren etabliert hat. Allerdings wurden auch hier Kläranlagen mit einer Anlagengröße > 100.000 EW und einer jährlichen Mitbehandlung von > 10.000 t Bioabfall.

Projekt:	AraFerm (EnerAlp II Teil B)
Schwerpunkte:	Verwertung von organischen Reststoffen im Faulturm von Kläranlagen; Ermittlung des Störstoffgehaltes verschiedener Substrate und Möglichkeiten der weitergehenden Störstoffentfernung; Auswirkungen auf den Vergärungsprozess sowie den Gesamtprozess der Kläranlage; Energieautonome Kläranlageninfrastruktur
Laufzeit:	2012 – 2017
Institution:	Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Professur für Abfallbehandlung und Ressourcenmanagement, Dr.-Ing. Wolfgang Müller

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Neben der Veröffentlichung der Ergebnisse in dem vorliegenden Schlussbericht erfolgte während des Vorhabens die Veröffentlichung von Projektarbeiten und -ergebnissen über die Präsentation auf Veranstaltungen (Tagungen, Sitzungen, Konferenzen). Das Publikum betraf sowohl die Wissenschaft als auch relevante Akteure der Abwasser- und Abfallwirtschaft (Verwaltung, Politik, Planung, Technologielieferanten).

Literaturverzeichnis

- agentur-jungesherz. (2019). *Agentur-Junges Herz*. Abgerufen am 20. 05 2019 von <https://www.agentur-jungesherz.de/hr-glossar/personalkosten-berechnen-formel-vorgehen-methode/>
- ASUE, A. f. (2016). *BHKW-Kenndaten*. Frankfurt am Main.
- AU. (n.a.). *Rural Tourism in Guizhou Province*. Abgerufen am 24. 11 2013 von <http://www1.american.edu/ted/ghuizhou.htm>
- BMBF. (2018). *forschung-fachhochschulen*. (Bundesministerium für Bildung und Forschung) Abgerufen am 2018. 12 22 von <http://www.forschung-fachhochschulen.de/massnahmen/fhprofunt>
- BMF, B. d. (1996). *AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Landwirtschaft und Tierzucht"*. juris GmbH.
- BMU, B. f. (09. 04 2014). *www.bmu.de*. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) Abgerufen am 28. 12 2018 von <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/anpassung-an-den-klimawandel/klimaschutz-im-ueberblick/>
- BMU, B. f. (2018). *Abfallwirtschaft in Deutschland 2018 - Daten, Fakten, Grafiken*. Berlin.
- BMWi, B. f. (2010). *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- BMWi, B. f. (24. 11 2018). Von Deutschland macht's effizient: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energieeffizienz.html> abgerufen
- BMWi, B. f. (2018). *Energieeffizienz in Zahlen: Entwicklung und Trends in Deutschland*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- BMWi, B. f. (2018). *Innovationen für die Energiewende - 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- BTA. (2015). *Prozessbeschreibung BTA® Hydromechanische Aufbereitung*. BTA International .
- BTA. (2015). *Prozessbeschreibung: BTA Hydromechanische Aufbereitung*. Pfaffenhofen.
- BTA. (2019). *bta-international.de*. Abgerufen am 03. 01 2019 von <http://www.bta-international.de/der-bta-prozess/schlueselkomponente/bta-grit-removal-sys.html>
- BTA. (2019). *bta-international.de*. Abgerufen am 03. 01 2019 von <http://www.bta-international.de/referenzen/referenzliste.html>
- BUND, B. f. (2017). *Mikroschadstoffstrategie*. Berlin: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.
- Bundestag. (2011). *bundestag.de*. Abgerufen am 23. 12 2018 von https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2011/34915890_kw26_angenommen_abgelehnt-205788
- Bundestag, D. (24.02.2012). *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)*.
- Destatis, S. B. (2014). *Destatis.de*. Abgerufen am 31. 12 2018 von https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2014/PD14_027_p002.html

- Destatis, S. B. (2017). *Abfallbilanz 2016*. Abgerufen am 30. 12 2018 von [destatis.de](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/TabellenAbfallbilanzKurzuebersicht.html):
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/TabellenAbfallbilanzKurzuebersicht.html>
- Destatis, s. B. (2018). *Aufkommen an Haushaltsabfällen: Deutschland, Jahre, Abfallarten*. Statistisches Bundesamt.
- Destatis, s. B. (2018). *Fachserie 19 Umwelt; Reihe 1 Abfallentsorgung*. statistisches Bundesamt.
- DWA, D. V. (2009). *Merkblatt DWA-M 380: Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA, D. V. (2015). *DWA-Regelwerk - Arbeitsblatt DWA-A 216*. Hennef.
- DWA, D. V. (2016). *28. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen*.
- DWA, S. B. (2015). *Abwasser und Klärschlamm in Deutschland - Statistische Betrachtungen. Korrespondenz Abwasser, Abfall*.
- EMAF. (2010). *Circular Economy*. (E. M. Foundation, Produzent, & Ellen MacArthur Foundation)
Abgerufen am 25. May 2012 von Ellen MacArthur Foundation: Rethink the future:
<http://www.ellenmacarthurfoundation.org/about/circular-economy>
- enermarket. (20. 05 2019). www.enermarket.de. Abgerufen am 20. 05 2019 von
<https://www.enermarket.de/query/results>
- Finsterwalder. (2015). *Das FITEC-Verfahren*. Witzenhausen-Institut.
- Finsterwalder. (kein Datum). [fitec.com](http://www.fitec.com). Abgerufen am 18. 01 2018 von
[http://www.fitec.com/inhalt.php?cd_categoriaGeral=44&li=1#prettyPhoto\[galeria0\]/1/](http://www.fitec.com/inhalt.php?cd_categoriaGeral=44&li=1#prettyPhoto[galeria0]/1/)
- FNR, F. N. (2019). biogas.fnr.de. (fnr) Abgerufen am 05. 05 2019 von <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/>
- Franßen, G. (2017). *Rechtliche Rahmenbedingungen der Co-Vergärung - Arbeitsbericht des FA RE 4. In 10. Klärschlamm Tage*. Würzburg: DWA.
- Friedl, G. H. (2017). *Kostenrechnung - Eine entscheidungsorientierte Einführung*. München: Vahlen.
- Götze, U. (2014). *Investitionsrechnung - Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Chemnitz: Springer.
- gpaNRW. (2019). *kalkulatorischer Zinssatz 2019*. Herne: Gemeindeprüfungsanstalt Nordrhein-Westfalen.
- Hansen, J. K. (2013). *Zukünftige energetische Herausforderungen an kommunale Kläranlagen*. Wasser und Abfall.
- IfaS, I. f. (2016). *Abfallwirtschaftskonzept des Landkreises Kusel: Fortschreibung*. Birkenfeld: Landkreis Kusel.
- IfaS, I. f. (2016). *Abfallwirtschaftskonzept des Nationalparklandkreises Birkenfeld*. Birkenfeld: Nationalparklandkreis Birkenfeld Abfallwirtschaftsbetrieb.
- Jank, A. e. (2017). *Kosten und Erlöse bei der Co-Vergärung von mechanisch aufbereitetem Bioabfall in Faultürmen kommunaler Kläranlagen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*.

- Kaltschmitt, M. e. (2016). *Energie aus Biomasse*. Hamburg: Springer Vieweg.
- Kranert, M., & Cord-Landwehr, K. (2010). *Einführung in die Abfallwirtschaft, 4. vollständig aktualisierte und erweiterte Auflage*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- LfU Bayern, B. L. (2011). *Co-Vergärung auf kommunalen Kläranlagen*. Augsburg.
- LK Kusel. (2018). *Landkreis- Kusel*. (Landkreis Kusel) Abgerufen am 2018. 12 26 von <https://landkreis-kusel.de/aktuelles/informationen-der-abfallwirtschaft/was-ist-neu-ab-01012019.html>
- LK-Böblingen. (2018). *Irabb.de*. Abgerufen am 31. 12 2018 von https://www.Irabb.de/,Lde/start/Service+_+Verwaltung/Biotonnen.html
- Lobbe. (2018). *Broschüre Containertypen*. Iserlohn-Letmathe: Lobbe Entsorgung West GmbH & CO KG.
- Lohse. (2019). *Bio-mechanische Nassaufbereitungsanlage für Biomüll, Speisereste und Restmüll*. Heidenheim: Mashinenbau Lohse GmbH.
- LWG, L. W. (2012). *Klärwerke als Standort für die Erzeugung erneuerbarer Energien*. Wildau.
- Mattes, A. (2015). *Eine energieneutrale Kläranlage*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Nowak, O. E. (2016). *Verwertung organischer Reststoffe in Faulbehältern kommunaler Kläranlagen*. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft.
- Raming. (2019). *raming-biogas.de*. Abgerufen am 05. 05 2019 von </raming-biogas.de/energiegehalt-des-biogases/>
- Roediger. (2017). *Technische Problemstellung bei der Co-Vergärung in Klärschlammfaulungsanlagen*. Würzburg: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 10. Klärschlammstage 2017.
- Rosenwinkel, K., & et.al. (2015). *Anaerobtechnik: Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung*. Hannover: Springer Vieweg.
- Runde, T. (2017). *Trennung von Biogas mit der Doppelrotormühle – Bedeutung für die Kaskadennutzung in energetischer und stofflicher Verwertung*.
- Salzmann, T. (17. 01 2017). *Die Rheinpfalz*. (Die Rheinpfalz Zeitung) Abgerufen am 28. 12 2018 von <https://www.rheinpfalz.de/lokal/zweibruecken/artikel/zweibruecker-ubz-hat-einige-projekte-zu-stemmen/>
- Schmelz, K. (2002). *Co-Vergärung auf kommunalen Kläranlagen*. Essen: Emschergenossenschaft und Lippeverband.
- Schmitt, C. (2016). *Bericht KA Zweibrücken - Energiecheck und Energieanalyse*. Umwelt- u. Servicebetrieb Zweibrücken.
- Statista. (2018). *statista.com*. Abgerufen am 26. 12 2018 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/311638/umfrage/stromerzeugung-aus-klaergas-in-deutschland/>
- Statistik.RLP. (2015). *Statistische Berichte: Öffentliche Abwasserentsorgung 2013*. Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz.

- statistik.rlp. (2018). *Datentabelle: Bevölkerungsstand 31.12.2017*. (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz) Abgerufen am 19. 12 2018 von http://geodaten.statistik.rlp.de/mapbender/stala/showdatasheet.php?lingo=deutsch&tab_id=250
- statistik.rlp. (2018). *Rheinlandpfalz-Regional: Datenkompass, Bevölkerung und Gebiet, Haushalt und Familien - Landkreis Birkenfeld*. Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz.
- Tan, Z. (8. November 2008). *Circular Economy and Renewable Resource Industry in China*. Abgerufen am 25. May 2012 von www.eesc.europa.eu/resources
- Tietjen. (2018). *DRM-Hybrid Biomasse Abfallaufbereitung - Zerkleinern und Trennen von Organik und Anorganik in einem Arbeitsgang*. Hemdingen: Tietjen Verfahrenstechnik GmbH.
- Tietjen. (2018). *Ressourcen besser nutzen: Konditionierung von organischem Abfall - zuverlässig, unkompliziert und kosteneffizient*. Hemdingen: Tietjen Verfahrenstechnik GmbH.
- Tietjen. (2019). *tietjen-original.com*. Abgerufen am 03. 01 2019 von <http://www.tietjen-original.com/de/produkte/drm-hybrid.html>
- UBA. (2009). *Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen*. Dessau-Roßlau.
- UBA. (2016). *umweltbundesamt.de*. (Umweltbundesamt) Abgerufen am 23. 12 2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft>
- UBA, U. (26. 10 2017). *umweltbundesamt.de*. Abgerufen am 12. 03 2019 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/beobachtete-erwartete-klimafolgen>
- UBA, U. (06. 03 2019). *umweltbundesamt.de*. Abgerufen am 14. 03 2019 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle#textpart-2>
- UBA, U. B. (2015). *Wasserwirtschaft Deutschland: Wasserversorgung - Abwasserbeseitigung*. Dessau-Roßlau.
- UBA, U. B. (30. 11 2017). *umweltbundesamt.de*. Abgerufen am 31. 12 2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle#textpart-6>
- UBZ. (2015). *Abfallwirtschaftskonzept 2014 - Fortschreibung 2015 bis 2025*. Umwelt- und Servicebetrieb Zweibrücken.
- UNEP. (2010). *Driving a Green Economy Through Public Finance and Fiscal Policy Reform*. Abgerufen am 23. 11 2013 von http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/GER_Working_Paper_Public_Finance.pdf
- UNEP. (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. Abgerufen am 23. 11 2013 von www.unep.org/greeneconomy
- Urban, I. e. (2017). *Bemessungsansätze zur Co-Vergärung in kommunalen Faulbehältern. DWA-Klärschlammstage*. Würzburg.
- WAB, W. A. (2015). *Fortschreibung Abfallwirtschaftskonzept 2016 - 2020*.

wikipedia.org. (2013). *Guizhou*. Abgerufen am 24. 11 2013 von wikipedia:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Guizhou>

Zeig, C. (2013). *Stoffströme der Co-Vergärung in der Abwasserwirtschaft*. Darmstadt: TU Darmstadt.

Ziegerer, D. (2011). *Proposal for a Green Economy Roadmap*. Abgerufen am 23. 11 2013 von
http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/SustainableDevelopment/RPM2011/first/Item6_Switzerland_e.pdf