

## Abschlussbericht

Projekt nr: 11443UEPII/2  
Datum: 27.11.2015

Cicerostr. 24  
D-10709 Berlin  
Tel +49 (0)30 536 53 800  
Fax +49 (0)30 536 53 888  
www.kompetenz-wasser.de

# Weiterentwicklung des Klima- und Ressourceneffizienzpotentials durch HTC- Behandlung ausgewählter Berliner Klärschlämme - HTC-Berlin

von

Christian Remy, Johan Stüber

Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Cicerostr. 24, 10709 Berlin

Die Mittel für dieses Projekt wurden vom Berliner Umweltentlastungsprogramm (UEP) zur  
Verfügung gestellt (Projekt 11443UEPII/2)



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung

Investition in Ihre Zukunft



...eine Chance durch Europa!

Senatsverwaltung  
für Stadtentwicklung  
und Umwelt



Berlin 2015

© Copyright 2015 by the Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH. All rights including translation into other languages, reserved under the Universal Copyright Convention, the Berne Convention or the Protection of Literacy and Artistic Works, and the International and Pan American Copyright Conventions.

Present report was developed in compliance with the requirements of the  
quality management system DIN EN ISO 9001:2008

### **Important Legal Notice**

**Disclaimer:** The information in this publication was considered technically sound by the consensus of persons engaged in the development and approval of the document at the time it was developed. KWB disclaims liability to the full extent for any personal injury, property, or other damages of any nature whatsoever, whether special, indirect, consequential, or compensatory, directly or indirectly resulting from the publication, use of application, or reliance on this document. KWB disclaims and makes no guaranty or warranty, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of any information published herein. It is expressly pointed out that the information and results given in this publication may be out of date due to subsequent modifications. In addition, KWB disclaims and makes no warranty that the information in this document will fulfill any of your particular purposes or needs. The disclaimer on hand neither seeks to restrict nor to exclude KWB's liability against all relevant national statutory provisions.

### **Wichtiger rechtlicher Hinweis**

**Haftungsausschluss:** Die in dieser Publikation bereitgestellte Information wurde zum Zeitpunkt der Erstellung im Konsens mit den bei Entwicklung und Anfertigung des Dokumentes beteiligten Personen als technisch einwandfrei befunden. KWB schließt vollumfänglich die Haftung für jegliche Personen-, Sach- oder sonstige Schäden aus, ungeachtet ob diese speziell, indirekt, nachfolgend oder kompensatorisch, mittelbar oder unmittelbar sind oder direkt oder indirekt von dieser Publikation, einer Anwendung oder dem Vertrauen in dieses Dokument herrühren. KWB übernimmt keine Garantie und macht keine Zusicherungen ausdrücklicher oder stillschweigender Art bezüglich der Richtigkeit oder Vollständigkeit jeglicher Information hierin. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die in der Publikation gegebenen Informationen und Ergebnisse aufgrund nachfolgender Änderungen nicht mehr aktuell sein können. Weiterhin lehnt KWB die Haftung ab und übernimmt keine Garantie, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen der Erfüllung Ihrer besonderen Zwecke oder Ansprüche dienlich sind. Mit der vorliegenden Haftungsausschlussklausel wird weder bezweckt, die Haftung der KWB entgegen den einschlägigen nationalen Rechtsvorschriften einzuschränken noch sie in Fällen auszuschließen, in denen ein Ausschluss nach diesen Rechtsvorschriften nicht möglich ist.

# Impressum

Dieser Bericht wurde nach den Vorgaben des Qualitätsmanagements gemäß DIN EN ISO 9001:2008 erarbeitet.

## Titel

Weiterentwicklung des Klima- und Ressourceneffizienzpotentials durch HTC-Behandlung ausgewählter Berliner Klärschlämme – HTC-Berlin

## Autoren

Christian Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH  
Johan Stüber, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

## Qualitätssicherung

Beate Bruchmann, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt  
Bernhard Pietsch, Berliner Wasserbetriebe

## Erzeugnisse

D 2.2 sowie D4.1

Endversion

Datum: 27.11.2015

## Zusammenfassung

Die vorliegende wissenschaftliche Studie untersucht Potenziale und Grenzen der Hydrothermalen Karbonisierung (HTC) von entwässertem Klärschlamm zur Verbesserung der Energie- und Klimabilanz der Klärschlamm Entsorgung in Berlin. Für vier Berliner Klärwerke wurden Laborversuche zur HTC mit entwässertem Klärschlamm durchgeführt, um die Produkte HTC-Filtrat und hochentwässertes Klärschlamm zu charakterisieren. Mit diesen Daten und den Prozessangaben des HTC-Anbieters Terranova wurden Energie- und Treibhausgasbilanzen für vier Klärwerke erstellt, die neben dem Referenzzustand 2013 für verschiedene Entsorgungswege auch die Implementierung eines HTC-Prozesses vorsehen. Abschließend wurde das HTC-Verfahren in einem technischen Pilotversuch mit zwei Berliner Klärschlämmen getestet und ebenfalls bilanziert.

Die Laborversuche bestätigten die hohe Belastung des HTC-Filtrats mit CSB und N. Die organische Fracht im HTC-Filtrat zeigt im Biomethantest gute anaerobe Abbaubarkeit und einen entsprechenden Faulgasertrag. Der verbleibende CSB ist noch weiter aerob abbaubar (Zahn-Wellens-Test), so dass letztlich zwischen 1-14% der CSB-Fracht im Filtrat (7,4-14,5 g/L) als refraktär angesehen werden. Eine merkliche Rücklösung von Phosphor und Schwermetallen lässt sich erst bei stark sauren Bedingungen während der HTC (pH < 3) feststellen.

Die Pilotversuche mit Klärschlamm aus Waßmannsdorf und Münchehofe in der Anlage des Anbieters Terranova konnten aufgrund von Problemen bei der Klärschlammaufgabe nicht kontinuierlich durchgeführt werden. Zudem wurde bei der abschließenden Entwässerung nicht der hohe prognostizierte TR-Gehalt im Klärschlamm erreicht (> 65% TR). Damit bleiben erhebliche Zweifel an der Betriebsstabilität und den prognostizierten Entwässerungsergebnissen bestehen.

Die Energie- und Klimabilanz auf Basis der Labordaten und Herstellerangaben zeigt, dass die Einführung eines HTC-Prozesses für alle betrachteten Szenarien deutliche Vorteile bieten kann. Dabei spielt vor allem der erhöhte Faulgasertrag aus dem Prozesswasser (+16-19%) und der hohe Heizwert des hochentwässerten Klärschlamm eine Rolle. Die zusätzlichen Aufwendungen für den Prozess (Erdgas, Strom, Säure) und die höhere Rückbelastung des Klärwerks werden durch die Gutschriften ausgeglichen. Die Abwärme für den HTC-Prozess ist auf allen Klärwerken mit Faulung zu über 90% vorhanden, im Klärwerk Ruhleben sollte dazu eine separate Faulstufe für das HTC-Filtrat vorgesehen werden. Die Bilanzierung auf Basis der Daten aus den Pilotversuchen zeigt jedoch, dass die Vorteile der HTC deutlich geringer ausfallen, wenn Faulgasertrag im Filtrat und Entwässerbarkeit nicht erreicht werden.

Der refraktäre CSB aus dem HTC-Filtrat kann im Ablauf der Klärwerke maximal zu einer Erhöhung des CSB-Ablaufwerts von 7-12 mg/L führen, was bei einzelnen Klärwerken eine Überschreitung der Überwachungswerte zur Folge haben kann. Dieser Aspekt ist bei der weiteren Betrachtung des HTC-Verfahrens unbedingt zu berücksichtigen. Eine Kombination von Phosphorrückgewinnung und HTC lässt sich über eine Rückgewinnung aus der Asche der Monoverbrennung oder eine vorgeschaltete P-Extraktion erreichen. Die abgeschätzten Betriebskosten der HTC-Anlage können ggf. durch Einsparungen bei der Schlamm Entsorgung ausgeglichen werden, wobei die Investitionskosten für eine HTC-Anlage noch unbekannt sind.

## Danksagung

Die vorliegende wissenschaftliche Studie wurde in enger Zusammenarbeit von KWB und den assoziierten Projektpartnern SenStadtUm und BWB durchgeführt. Für die sehr gute Kooperation und die angenehme und produktive Zusammenarbeit danken die Autoren den folgenden Personen sehr herzlich:

- SenStadtUm: Beate Bruchmann, Dr. Karin Gerner
- Berliner Wasserbetriebe: Bernhard Pietsch, Jana Schaller, Andreas Lengemann, Frau Exner, Herr Schorradt, Herr Neumann
- B.&S.U.: Sabine Dornbusch, Iliane Eisenhuth
- ATB: Benjamin Wirth, Ulf Lüder, Laureen Herklotz
- KWB: Boris Lesjean, Simon Zander
- Terranova Energy: Marc Buttman, Erkan Yalcin
- AVA-CO2: Thomas Kläusli

## Inhaltverzeichnis

Chapter 1 Einleitung.....	1
Chapter 2 Arbeitspaket 1: Laborversuche .....	5
2.1 Material und Methoden.....	5
2.1.1 Hydrothermale Karbonisierung und Produktrennung .....	5
2.1.2 Biologisches Methanbildungspotenzial (BMP).....	5
2.1.3 Refraktärer CSB .....	6
2.1.4 Brennwertbestimmung und Schwermetalle .....	6
2.1.5 Ergebnisse entwässerter Klärschlamm .....	7
2.1.6 Van-Krevelen-Diagramm .....	7
2.1.7 Massenbilanzen.....	7
2.1.8 Phosphor und Stickstoff .....	8
2.1.9 Schwermetalle.....	9
2.1.10 Biologisches Methanbildungspotenzial (BMP).....	9
2.1.11 Refraktärer CSB - Laborversuche .....	10
Chapter 3 Arbeitspaket 3: technischer Pilotversuch .....	11
3.1 Material und Methodik .....	11
3.2 Versuchsplanung und Durchführung .....	12
3.3 Ergebnisse .....	13
3.3.1 CSB Prozessflüssigkeit, Trockenrückstand, Stickstoff und Phosphor .....	13
3.3.2 Biologisches Methanbildungspotenzial (BMP) – Prozessflüssigkeiten .....	14
3.3.3 Refraktärer CSB – Pilotversuche.....	15
3.3.4 Entwässerungsergebnisse und Energiebedarf .....	16
3.3.5 Energiebedarf .....	17
Chapter 4 Arbeitspaket 2: Stoffstrom- und Treibhausgasbilanz.....	18
4.1 Methodik der Bilanzierung.....	18
4.2 Eingabedaten der Bilanzierung .....	22
4.3 Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanz.....	30
4.3.1 Auswirkungen der HTC mit und ohne Ansäuerung.....	30
4.3.2 Gesamtbilanzen auf Basis der Laborversuche.....	32
4.3.3 Sensitivität der Stromgutschrift in der Mitverbrennung .....	34
4.3.4 Vergleich der HTC-Verfahren von Terranova und AVA-CO2 .....	34
4.3.5 Bilanzen für WAS und MÜN auf Basis des Pilotversuchs .....	36

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Energie- und Klimabilanz .....	38
Chapter 5 Diskussion und Schlussfolgerungen .....	39
5.1 Ergebnisse der Labor- und Pilotversuche .....	39
5.2 Ergebnisse der Energie- und Klimabilanz.....	39
5.3 Weitere betriebliche Aspekte .....	40
5.3.1 Refraktärer CSB .....	40
5.3.2 Kombination mit Phosphorrückgewinnung .....	41
5.3.3 Abschätzung der Betriebskosten .....	42
5.4 Schlussfolgerungen aus der Studie .....	42

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hydrothermale Karbonisierung - Durchführung im Druckreaktor (Batchbetrieb) - Die angegebenen Betriebsparameter wurden im Laufe des Projektes realisiert .....	4
Abbildung 2: Übersicht Versuchsdurchführung und Probennahmen .....	6
Abbildung 3: Inkohlungsdiagramm - alle Versuche .....	7
Abbildung 4: Massenbilanz in Abhängigkeit des pH-Wertes nach der HTC .....	8
Abbildung 5: Phosphoranteil in der Prozessflüssigkeit und der Kohle in Abhängigkeit des pH- Wertes nach der HTC.....	8
Abbildung 6: Phosphoranteil an der Kohle .....	9
Abbildung 7: Spezifisches Methanbildungspotenzial – Waßmannsdorf .....	10
Abbildung 8: Refraktärer CSB - Laborversuche.....	10
Abbildung 9: HTC-Verfahren Terranova energy .....	11
Abbildung 10: CSB in den Prozessflüssigkeiten - Vergleich Pilot & Labor .....	13
Abbildung 11: Phosphorgehalte Prozessflüssigkeit - Vergleich Pilot & Labor.....	14
Abbildung 12: Biologisches Methanbildungspotenzial – Vergleich Pilot & Labor.....	15
Abbildung 13: Refraktärer CSB - Pilotversuche.....	16
Abbildung 14: HTC Kohle der Pilotanlage .....	16
Abbildung 15: Entwässerungsergebnisse Pilotanlage - Mehrfachbestimmung beider Pressungen .....	17
Abbildung 16: Systemgrenzen der Energie- und Klimabilanz .....	19
Abbildung 17: Auswirkungen einer HTC-Behandlung auf die Energiebilanz der KW WAS und SCHÖ (Differenz zum Grundzustand) mit und ohne Ansäuerung im Prozess.....	31
Abbildung 18: Auswirkungen einer HTC-Behandlung auf die Klimabilanz der KW WAS und SCHÖ (Differenz zum Grundzustand) mit und ohne Ansäuerung im Prozess.....	32
Abbildung 19: Netto-Energiebilanz der Klärschlamm Entsorgung aller Klärwerke für verschiedene Entsorgungswege (invertierte Achse).....	33
Abbildung 20: Netto-Klimabilanz der Klärschlamm Entsorgung aller Klärwerke für verschiedene Entsorgungswege (invertierte Achse).....	33
Abbildung 21: Netto-Klimabilanz der Klärschlamm Entsorgung aller Klärwerke für verschiedene Entsorgungswege (invertierte Achse) mit Gutschrift von gleichem Strommix für Mono- und Coverbrennung .....	34
Abbildung 22: Auswirkungen eines HTC-Verfahrens im KW WAS auf die Klimabilanz (Differenz zum Grundzustand) für die Verfahren von Terranova und AVA-CO2.....	36
Abbildung 23: Auswirkungen eines HTC-Verfahrens in den KW WAS und MÜN auf die Energiebilanz (Differenz zum Grundzustand) mit Eingangsdaten der Labor- oder Pilotversuche.....	37
Abbildung 24: Auswirkungen eines HTC-Verfahrens in den KW WAS und MÜN auf die Klimabilanz (Differenz zum Grundzustand) mit Eingangsdaten der Labor- oder Pilotversuche.....	37

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Pilotversuche - geplant und durchgeführt .....	12
Tabelle 2: Säure-, Wärme- und Energiebedarf der Pilotanlage.....	17
Tabelle 3: Szenarien der Energie- und Klimabilanz .....	20
Tabelle 4: Datenquellen für die Stoffstrom- und Treibhausgasbilanz .....	21
Tabelle 5: Eigenschaften der Rohschlämme.....	22
Tabelle 6: Parameter der HTC-Szenarien basierend auf den Ergebnissen der Laborversuche	24
Tabelle 7: Parameter der HTC-Szenarien basierend auf den Ergebnissen der Pilotversuche WAS und MÜN und für alternative Verfahren in WAS (nach Herstellerangaben AVA- CO2).....	25
Tabelle 8: Transportentfernung zur Verbrennung .....	26
Tabelle 9: Berechnete Mengen und Heizwerte des entwässerten Klärschlammes .....	27
Tabelle 10: Eingabedaten für die Entsorgungswege für Brennstoffbedarf, Stromproduktion, N <sub>2</sub> O-Emissionen, und Abgasreinigung .....	28
Tabelle 11: Datensätze für Hintergrundprozesse und Gutschriften.....	29
Tabelle 12: Vergleich der Verfahren Terranova und AVA-CO2 nach Herstellerangaben.....	35

## Glossar

BHKW	-	Blockheizkraftwerk
Bio-P		Biologische Phosphorentfernung
BMP	-	Biologisches Methanbildungspotenzial
Chem-P		Chemische Phosphorentfernung
CSB	-	Chemischer Sauerstoffbedarf
GV	-	Glühverlust
HRT	-	Hydraulische Aufenthaltszeit
HTC	-	Hydrothermale Karbonisierung
KEA	-	Kumulierter Energieaufwand
KS	-	Klärschlamm
KSVA	-	Klärschlammverbrennungsanlage
MAP	-	Magnesium-Ammonium-Phosphat
Mg	-	Megagramm (= Tonne)
MÜN	-	Münchehofe
OS	-	Originalsubstanz
oTR	-	organischer Trockenrückstand
oTS	-	organische Trockensubstanz
PWB	-	Prozesswasserbehandlung
RUH	-	Ruhleben
SCHÖ	-	Schönerlinde
TN	-	Gesamtstickstoff
TP	-	Gesamtphosphor
TR	-	Trockenrückstand
TS	-	Trockensubstanz
UF	-	Ultrafiltration
WAS	-	Waßmannsdorf

# Chapter 1

## Einleitung

Die moderne kommunale Abwasserreinigung in Klärwerken verbraucht erhebliche Mengen an Strom und stellt dadurch innerhalb einer Kommune oft den höchsten Einzelbeitrag zum Energieverbrauch der öffentlichen Infrastruktur dar<sup>1</sup>. Gleichzeitig bietet eine energetische Verwertung des anfallenden Klärschlammes ein erhebliches Potenzial zur Energierückgewinnung, um damit den Netto-Energieverbrauch der Klärwerke zu senken. Vor dem Hintergrund der gegenwärtig laufenden Erstellung eines Konzepts zur zukunftsfähigen Klärschlammbehandlung in Berlin stellt sich daher die Frage, wie eine nachhaltige, energieeffiziente und ressourcenschonende Behandlung und Verwertung von Klärschlamm in Berlin erreicht und gesichert werden kann. Eng verknüpft mit dem Energieverbrauch ist auch der Ausstoß von Treibhausgasen, für dessen Absenkung das Land Berlin mittel- und langfristige Klimaziele formuliert hat:

- Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um -40% bis 2020 (Bezugsjahr 1990)
- Halbierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Einwohner bis 2030 (Bezugsjahr 1990)
- Klimaneutrale Stadt Berlin bis 2050

Zur Erreichung dieser Ziele sind neben anderen Aktivitäten auch die öffentlichen Unternehmen Berlins aufgefordert, einen entsprechenden Beitrag zu leisten. Die Berliner Wasserbetriebe haben in der Vergangenheit schon Zielvereinbarungen mit dem Senat zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgemacht (Klimaziele 2010<sup>2</sup>). Eine Fortführung dieser Strategie zur Reduktion von Energieverbrauch und damit verbundenem Treibhauseffekt ist daher von öffentlicher Seite erwünscht und geboten.

Somit ist eine gemeinsame Betrachtung von Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz und gleichzeitiger Absenkung der Treibhausgasemissionen unerlässlich. Da sich im Berliner Klärschlamm zudem ein beträchtlicher Anteil des endlichen und essentiellen Pflanzennährstoffs Phosphor befindet (KWB-Studie P-POT<sup>3</sup>), sollte im Zuge einer ressourcenschonenden Strategie auch die mögliche Integration einer P-Rückgewinnung für die verschiedenen energetischen Verwertungswege für Klärschlamm geprüft werden. Gesetzliche Vorgaben zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm werden zurzeit auf politischer Ebene diskutiert und sind mittelfristig zu erwarten<sup>4</sup>.

Bei der Entwicklung eines zukunftsfähigen Klärschlammkonzepts für Berlin aus Sicht des Umwelt- und Ressourcenschutzes stehen deshalb folgende Ziele im Mittelpunkt:

- Steigerung der Energieeffizienz
- Senkung der Treibhausgasemissionen
- Rückgewinnung von Phosphor

---

<sup>1</sup> Haberkern, B., Maier, W. and Schneider, U. (2008): *Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen*. **Forschungsbericht 205 26 307**, Umweltbundesamt, Dessau.

<sup>2</sup> Kooperationsvereinbarung zwischen dem Land Berlin und den Berliner Wasserbetrieben vom 16.07.2008 im Rahmen des Landesenergieprogramms Berlin 2006-2010, des Luftreinhalteplans 2005-2010 sowie des Abfallwirtschaftskonzepts 2005-2015

<sup>3</sup> Studie „Phosphorpotentiale des Landes Berlin P-POT“, Projektnr. 11400UEPII/2

<sup>4</sup> Referentenentwurf des BMU „Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“ vom 18. August 2015

In aktuellen Studien zur klimafreundlichen Abfallentsorgung in Berlin der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt<sup>5</sup> wird das Verfahren der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) als mögliche Variante zur verbesserten Energierückgewinnung und Senkung der Treibhausgasemissionen vorgeschlagen. Bei diesem Verfahren werden die mechanisch entwässerten Klärschlämme bei hoher Temperatur (160-220°C) in einem Druckbehälter behandelt und können anschließend mit Kammerfilterpressen zu einem festen Filterkuchen mit sehr geringem Wassergehalt entwässert werden. Durch diese effiziente Abtrennung des Wassers liefert der entstehende Filterkuchen einen hohen Heizwert (vergleichbar mit Braunkohle), so dass bei einer anschließenden thermischen Entsorgung in einer Verbrennungsanlage der Energiegehalt der Klärschlämme effizient genutzt werden kann.

**Vorrangiges Ziel dieser wissenschaftlichen Studie ist die Konkretisierung des Klima- und Ressourceneffizienzpotentials des HTC-Verfahrens im Land Berlin insbesondere zur Optimierung der Klimabilanz bei der Berliner Klärschlamm Entsorgung.**

Neben einer verbesserten Klimateffizienz wird auch die Ressourcennutzung aus dem Klärschlamm in Bezug auf Phosphor weiterhin ermöglicht, da der im Klärschlamm enthaltene Phosphor weitgehend in der HTC-Kohle verbleibt. Zu prüfen ist, ob sich durch Einstellung geeigneter Bedingungen in der HTC auch eine Phosphorrückgewinnung über die flüssige Phase (Filtrat) ermöglichen lässt.

Während die prinzipielle Machbarkeit der HTC-Behandlung von Klärschlämmen bereits vielfach im Labor und auch in halbtechnischen Versuchsanlagen nachgewiesen wurde, lassen sich die dabei entstehenden Produkte durch die große Heterogenität der Klärschlämme relativ schlecht vorhersagen. Neben dem Filterkuchen entsteht beim HTC-Prozess ein hochbelastetes Filtrat, weil ein erheblicher Teil der organischen Substanz des Klärschlammes in die flüssige Phase übergeht. Abbauprobeversuche mit diesem Filtrat haben gezeigt, dass ein Teil seiner organischen Inhaltsstoffe durch anaerobe Behandlung im Faulreaktor gut zu nutzbarem Faulgas umgewandelt werden kann. Durch eine Rückführung dieses Filtrats in den Faulraum einer Kläranlage kann damit ein Teil des darin enthaltenen Energiepotentials auf diese Weise genutzt werden. Gleichzeitig entsteht jedoch bei den hohen Reaktionstemperaturen der HTC auch ein nicht-abbaubarer („refraktärer“) Anteil der gelösten Organik, der per Definition weder im Faulraum noch in der biologischen Stufe der Kläranlage entfernt werden kann. Wenn dieser refraktäre organische Anteil die Kläranlage durchläuft und letztlich im Ablauf auftaucht, wird sich die Ablaufqualität der Kläranlage (gemessen als chemischer Sauerstoffbedarf (CSB in mg O<sub>2</sub>/L) voraussichtlich verschlechtern. Auch wenn dieser refraktäre CSB nach bisherigen Erkenntnissen nicht umweltschädlich ist, erhöht er doch die organische Belastung des Kläranlagenablaufs. Sollte diese Belastung dann über oder nahe der erlaubten Grenzwerte zur Einleitung liegen, kann eine aufwändige Behandlung des Filtrats der HTC-Stufe erforderlich sein, um diesen refraktären CSB mit speziellen Verfahrensstufen gezielt zu entfernen.

Zudem stellt sich bei Einführung eines Hochtemperaturverfahrens wie der HTC generell die Frage, ob die Energiebilanz der Klärschlamm Entsorgung damit nachhaltig verbessert werden

<sup>5</sup> IFEU und IFU (2012): Maßnahmenplan zur Umsetzung einer vorbildhaften klimafreundlichen Abfallentsorgung im Land Berlin, Studie im Auftrag von SenStadtUm, Referat Abfallwirtschaft.

IFEU und IFU (2013): Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz 2012 für die Nutzung von Berliner Abfällen als Resource, Studie im Auftrag von SenStadtUm, Referat Abfallwirtschaft. <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfall/entsorgung/index.shtml>

kann. Dem potentiellen Energiegewinn aus der effizienten Verbrennung des hochentwässerten Schlammes steht natürlich der Energiebedarf des HTC-Prozesses selber gegenüber, vor allem in Form von Wärme. Wichtige Punkte bei der Beurteilung der ganzheitlichen Energie- und Treibhausgasbilanz eines HTC-Prozesses betreffen u.a.:

- **Energiebilanz der HTC-Anlage** (Bedarf an Strom und Wärme für den HTC-Prozess, Konzept der Wärmerückführung in der Anlage)
- **Verfügbarkeit von geeigneter Abwärme** auf der Kläranlage, z.B. aus der Biogasverstromung in Blockheizkraftwerken
- **Genauere Eigenschaften der entstehenden Produkte** (Heizwert des Filterkuchens, Biogaspotential im Filtrat ohne/mit Prozesswasserbehandlung, refraktärer CSB-Anteil)
- **Wirkungsgrad der Nutzung** des Energiepotentials im Filterkuchen bei der anschließenden Verbrennung
- **Rückwirkungen auf den Betrieb** der Kläranlage (Anteile an refraktärem CSB, erhöhte Rückbelastung mit Nährstoffen Stickstoff und Phosphor)
- **Verwertung/Entsorgung der HTC-Kohle** (Preise, gesetzliche Rahmenbedingungen)

Daher kann die Bewertung des Nettoeffekts eines HTC-Prozesses auf die Energie- und Treibhausgasbilanz der Klärschlamm Entsorgung nur mit einer übergreifenden Betrachtung unter Einbeziehung aller oben genannten Aspekte erfolgen. Dabei sind für alle genannten Punkte möglichst realitätsnahe Daten zu erheben, um eine eindeutige und gesicherte Aussage zur Wirkung des HTC-Prozesses auf die Treibhausgasbilanz zu machen.

Im Projekt „HTC-Berlin“ sollen daher die entsprechenden Grundlagen für eine umfassende Energie- und Treibhausgasbilanz erarbeitet werden, die spezifisch für die Berliner Situation (Eigenschaften der Klärschlämme und HTC-Produkte, Randbedingungen auf den Kläranlagen und den Anlagen zur Schlammverbrennung) eine Bewertung des HTC-Verfahrens in Bezug auf seine Wirkung auf die energetische Nutzung der Berliner Klärschlämme erlaubt. Ausgehend von einem Screening der verschiedenen Berliner Klärschlämme in Laborversuchen werden die Produkte des HTC-Prozesses so weit charakterisiert, dass in einer ersten Bilanzierung die optimalen Varianten zur Einführung eines HTC-Verfahrens identifiziert werden können. In einer zweiten Phase wird unter ausgewählten optimalen Bedingungen ein kurzer Probetrieb in einer halbtechnischen HTC-Anlage durchgeführt, um die Ergebnisse der Laborversuche in größerem Maßstab zu bestätigen und damit auch die Grundlagen der Treibhausgasbilanz entsprechend zu untermauern.

Insgesamt besteht das Projekt „HTC-Berlin“ aus 3 inhaltlichen Arbeitspaketen, die im folgenden Bericht beschrieben werden:

- 1) Arbeitspaket 1: Laborversuche (Kapitel 2)
- 2) Arbeitspaket 3: Technischer Pilotversuch (Kapitel 3)
- 3) Arbeitspaket 2: Stoffstrom- und Treibhausgasbilanz (Kapitel 4)
- 4) Zusammenfassung und Schlussfolgerungen (Kapitel 5)

## Prinzip der hydrothermalen Karbonisierung

Unter der hydrothermalen Karbonisierung versteht man die Behandlung eines Substrats mit einem organischen Anteil bei Temperaturen um 180°C in einem Druckreaktor. In der Regel ist dieser mit einem Rührwerk ausgerüstet, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung sicherzustellen. Bei einem Batchreaktor stellt sich ein Druck von etwa 10 bar ein. Bei diesen Bedingungen wird der organische Anteil des Substrats unter Abspaltung von Wasser in einen braunkohleähnlichen Stoff umgesetzt, vereinfacht kann folgende Summenformel angenommen werden:  $C_6H_2O$ . Bei ausreichend langen Reaktionszeiten (>12 h, abhängig vom Substrat) kann ein Umsetzungsgrad des Kohlenstoffes von 90-99 % erreicht werden. Das bedeutet, dass 90-99 % des Kohlenstoffes in dem gebildeten Kohleprodukt gebunden sind. Die restlichen 1-10 % liegen entweder gelöst in der Prozessflüssigkeit vor oder wurde in  $CO_2$  umgewandelt, welches beim Öffnen des Reaktors ausgast. In Abbildung 1 sind die Schritte der Batchversuche dargestellt.

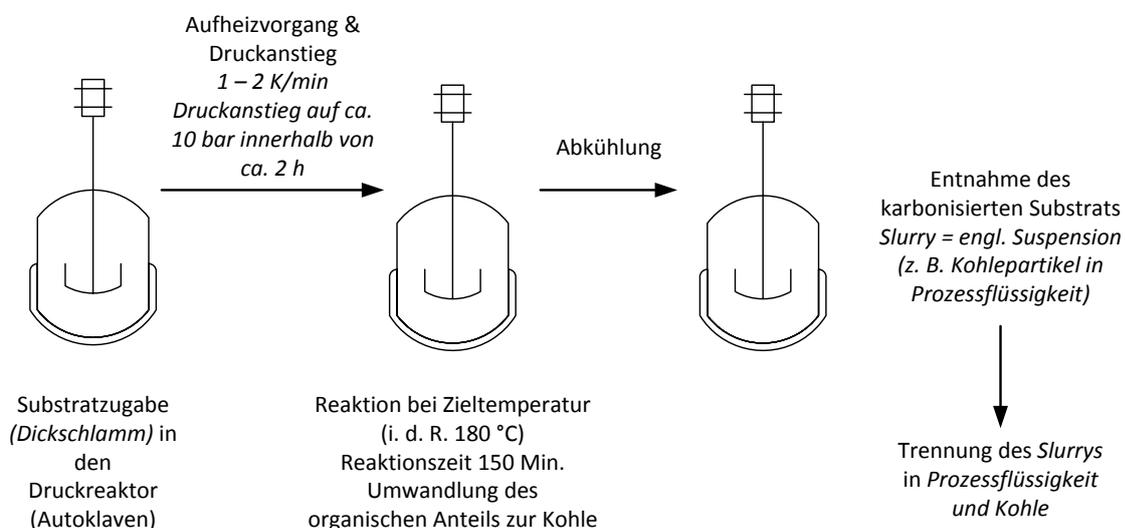


Abbildung 1: Hydrothermale Karbonisierung - Durchführung im Druckreaktor (Batchbetrieb) - Die angegebenen Betriebsparameter wurden im Laufe des Projektes realisiert

Die in diesem Bericht verwendeten Begriffe sind wie folgt definiert:

- **Substrat:** Das Stoffgemisch, welches karbonisiert wird. In vorliegendem Bericht der Entwässerter Klärschlamm der Berliner Klärwerke
- **Entwässerter Klärschlamm (auch Dickschlamm):** Durch Zentrifugen der BWB entwässerter Faul-/ oder Rohschlamm. Hierbei werden Trockenrückstandswerte von 22 – 33 % erreicht.
- **Slurry:** Suspension von feinen Kohlepartikeln nach der Karbonisierung
- **HTC-Kohle:** Feststoff nach der Fest/Flüssig-Trennung des Slurrys. Je nach Eigenschaften, kann dies als wertvoller Brennstoff angesehen werden.
- **Prozessflüssigkeit/Filtrat:** Flüssigkeit nach der Fest/Flüssig-Trennung des Slurrys. Durch die Karbonisierung weist diese Flüssigkeit eine hohe Konzentration an Organik auf, welche in einem Faulbehälter zu Faulgas umgewandelt werden kann.
- **Zentrat:** Bei der Entwässerung mit Zentrifugen anfallende Flüssigkeit. Im Projekt HTC-Berlin wurde die Zentrates gesammelt, um Analysen durchzuführen (z.B. Zahn-Wellens-Test).

## Chapter 2

### Arbeitspaket 1: Laborversuche

Um den verschiedenen Prozessen der Berliner Kläranlagen gerecht zu werden und bestimmen zu können, ob diese Verfahren auf die Produkte der HTC einen Einfluss nehmen, wurden die Schlämme der vier Berliner Kläranlagen (Ruhleben RUH, Waßmannsdorf WAS, Schönerlinde SCHÖ und Münchehofe MÜN) in Laborversuchen hydrothermal behandelt. Ziel der Laboruntersuchung war es, die anfallenden Produkte, Kohle und Prozessflüssigkeit, zu charakterisieren, sowie über die Massenbilanzen erste Informationen zu den Stoffströmen zu ermitteln. Hierfür wurden neben den Standardparametern wie TR, CSB, Phosphor auch Schwermetalle und refraktärer CSB bestimmt. Die Laborversuche wurden am Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) im Biokohletechnikum durchgeführt.

#### 2.1 Material und Methoden

##### 2.1.1 Hydrothermale Karbonisierung und Produkttrennung

Die Laborversuche wurden als Batchversuche in einem Autoklaven (18,6 L Fassungsvermögen) durchgeführt, der mit einer Temperatur von 180°C und einer minimalen Haltezeit von 150 min betrieben wurde. Der entwässerte Klärschlamm wurde in Chargen von 5 kg im Autoklaven in Doppelversuchen behandelt. Der pH-Wert wurde für einige Versuche abgesenkt, um dessen Einfluss auf die Rücklösung von Schwermetallen und Phosphor zu analysieren.

Die Trennung der Produkte wurde im Labormaßstab durch eine zweistufige Filtration durchgeführt, um die Entwässerung in der Pilotanlage durch eine Kammerfilterpresse nachzubilden. Einer Entwässerung in einer Spindelpresse und einem Filtersack mit einer Maschenweite von 200 µm folgte eine weitere Filtration über einen Filterstrumpf mit 100 µm.

##### 2.1.2 Biologisches Methanbildungspotenzial (BMP)

Zur energetischen Bewertung der HTC Produkte wurde das biologische Methanbildungspotenzial (BMP) des entwässerten Klärschlammes, der Prozessflüssigkeit und des Slurrys nach VDI 4630<sup>6</sup> gemessen. Das biologische Methanbildungspotenzial (BMP) gibt die Methanausbeute an, die bei einer anaeroben Behandlung der Produkte zu erwarten sind. Die BMP Versuche wurden nach 20 Tagen ausgewertet, um die Faulzeit der Berliner Kläranlagen nachzubilden.

---

<sup>6</sup> VDI (2006) VDI-Richtlinie 4630:2006-04: Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche (VDI guideline 4630:2006-04: Fermentation of organic materials, Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. VDI Verlag

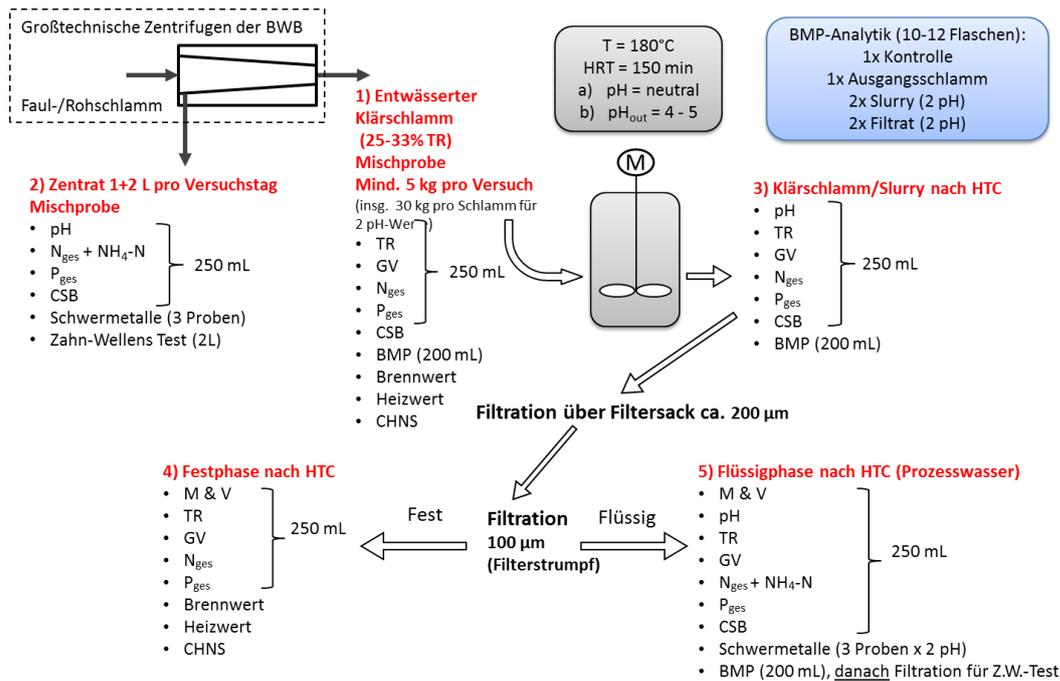


Abbildung 2: Übersicht Versuchsdurchführung und Probennahmen

### 2.1.3 Refraktärer CSB

Da bei der hydrothermalen Karbonisierung davon ausgegangen werden muss, dass refraktärer CSB gebildet wird und dieser bei der weiteren Behandlung in der Kläranlage zu einer Erhöhung des CSB-Ablaufwertes führen kann, wurde die Prozessflüssigkeit auf diesen Parameter hin besonders untersucht. Bei einer Implementierung des HTC-Verfahrens auf einer Kläranlage wird die Prozessflüssigkeit sowohl anaerob (Faulbehälter) als auch aerob (Belebungsbecken) behandelt. Der anaerobe Abbau wird durch den BMP Test, der aerobe Abbau durch den Zahn-Wellens-Test abgebildet.

Durch Kombination der Ergebnisse von BMP und Zahn-Wellens-Test kann der refraktäre CSB berechnet werden. Hierbei waren die Verdünnungen in den jeweiligen Tests zu berücksichtigen. Da das Inokulum des BMP Test auch einen Anteil biologisch schwer abbaubarer Kohlenstoffverbindungen aufweist, wurde das Inokulum ebenfalls im Zahn-Wellens-Test vermessen und die hierbei gewonnenen Ergebnisse bei der Berechnung des refraktären CSBs der HTC Prozessflüssigkeiten berücksichtigt.

### 2.1.4 Brennwertbestimmung und Schwermetalle

Die Brennwertbestimmung der produzierten Kohle wurde am ATB nach DIN 51900 und des Heizwertes nach DIN14918 in Dreifachbestimmung durchgeführt. Eine Elementaranalyse auf Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Schwefel ermöglichte eine theoretische Überprüfung der Ergebnisse. Schwermetalle wurden mit ICP-OES bzw. AAS in der Prozessflüssigkeit und in der Kohle gemessen.

## 2.1.5 Ergebnisse entwässerter Klärschlamm

## 2.1.6 Van-Krevelen-Diagramm

In Abbildung 3 ist die Veränderung des H:C-Verhältnisses gegenüber dem O:C-Verhältnis durch die Behandlung der Klärschlämme mit dem HTC-Verfahren im Van-Krevelen-Diagramm dargestellt. Charakteristisch für eine Karbonisierung sind die Abnahmen sowohl des H:C-Verhältnisses als auch des O:C-Verhältnisses. Der Rohschlamm wies bei den Versuchen generell höhere Verhältnisse als die Faulschlämme auf, was durch den höheren Anteil an Organik zu erklären ist. Selbst der karbonisierte Rohschlamm beinhaltet einen größeren Anteil an C gegenüber von H und O als der Faulschlamm.

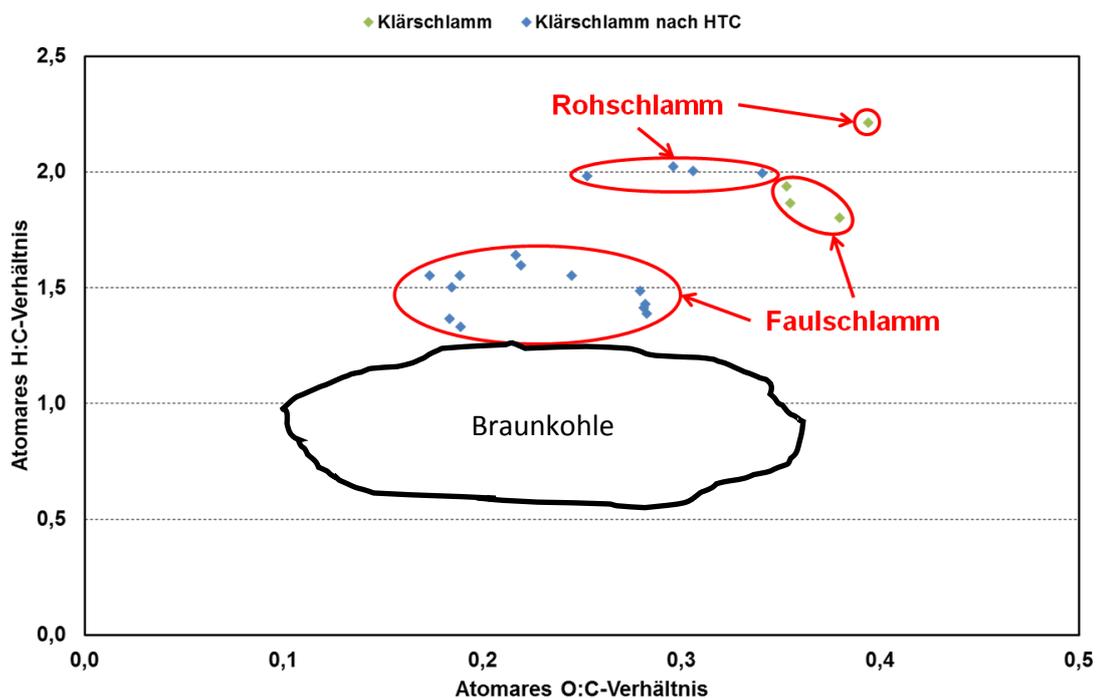


Abbildung 3: Inkohlungsdiagramm - alle Versuche

## 2.1.7 Massenbilanzen

Abbildung 4 zeigt die Massenbilanzen der Klärschlammbehandlung für die einzelnen Versuche mit jeweils ca. 5 kg Ausgangsmaterial. Nach der Filtration des Slurrys wurden die Massen der beiden Produkte (Prozessflüssigkeit und HTC-Kohle) bestimmt. Die Verluste liegen dabei bei maximal 8 % und können durch die Versuchsdurchführung, z.B. Probenahme für Analysen, Materialverlust in den Filterstrümpfen oder auch CO<sub>2</sub>-Produktion während der Karbonisierung, erklärt werden.

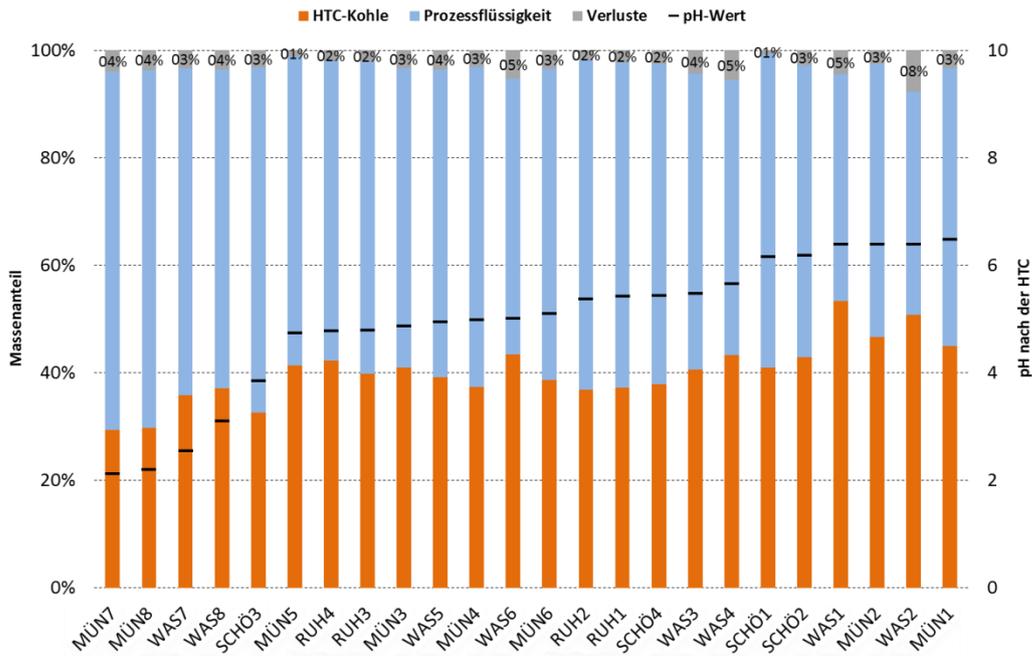


Abbildung 4: Massenbilanz in Abhängigkeit des pH-Wertes nach der HTC

### 2.1.8 Phosphor und Stickstoff

Abbildung 5 zeigt die Verteilung des Phosphors auf die HTC-Produkte in Abhängigkeit des pH-Wertes nach der HTC-Behandlung. Hier ist der pH Wert der Prozessflüssigkeit angegeben, da dieser am Ende der Reaktion vorliegt und damit maßgebend für die Verteilung des Phosphors ist. Der Phosphoranteil in der Prozessflüssigkeit steigt mit sinkendem pH-Wert an. Im Hinblick auf eine mögliche Phosphorrückgewinnung aus der Prozessflüssigkeit liegt bei einem pH-Wert unter 3 die maximale Ausbeute bei ca. 40 - 50%.

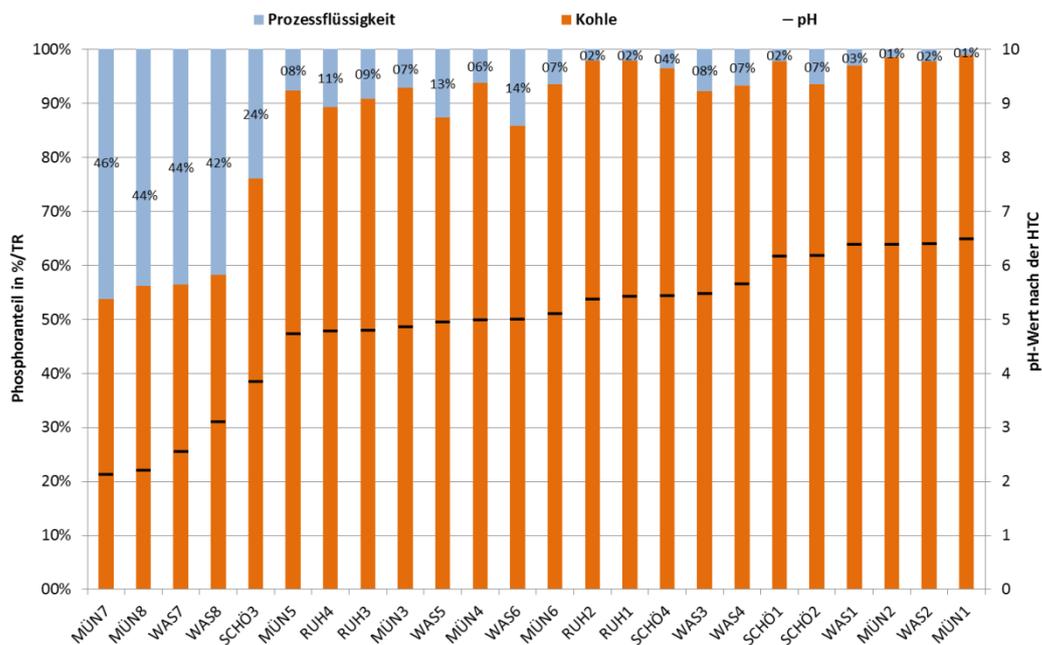


Abbildung 5: Phosphoranteil in der Prozessflüssigkeit und der Kohle in Abhängigkeit des pH-Wertes nach der HTC

Der maximale Phosphoranteil am Trockenrückstand von 2 % für eine Co-Verbrennung laut Referentenentwurf der neuen Klärschlammverordnung (z.B. in Kraftwerken) konnte bei den Versuchen nicht unterschritten werden. Wie in Abbildung 6 zu sehen, wurde auch bei den Versuchen mit sehr geringen pH-Werten die Marke von 2 % überschritten.

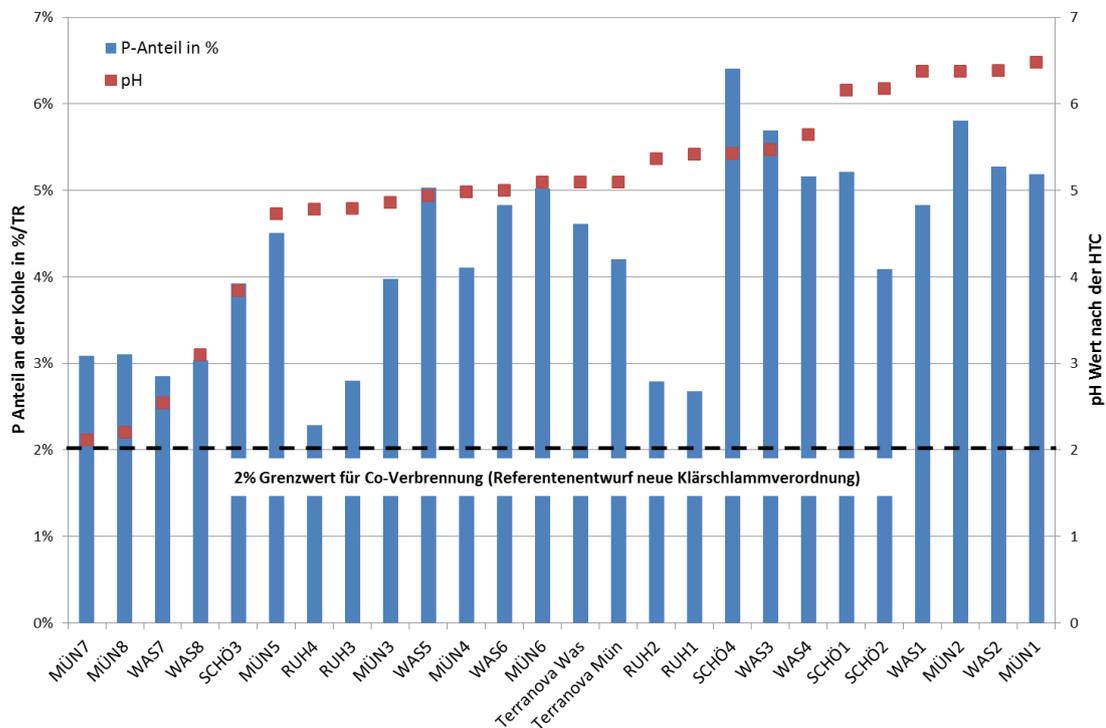


Abbildung 6: Phosphoranteil an der Kohle

Der Stickstoffanteil in der Prozessflüssigkeit liegt zwischen 31 % und 68 % (nicht gezeigt). Der Einfluss des pH-Wertes ist im Vergleich zum Phosphor nicht ausgeprägt, so erhöht sich der Stickstoffanteil in der Prozessflüssigkeit bei pH-Werten unter 4 von 45 auf 52 %.

### 2.1.9 Schwermetalle

Die Schwermetalle liegen bei allen Versuchen zum größten Teil in der festen Phase (Kohle) vor (> 96%, bei Fe/Co > 87%). Nur bei den stark angesäuerten Versuchen mit einem Ziel pH-Wert von 3 lösten sich einige Schwermetalle, z. B. Eisen und Mangan, vermehrt in der Prozessflüssigkeit (> 70%).

### 2.1.10 Biologisches Methanbildungspotenzial (BMP)

Das biologische Methanbildungspotenzial (BMP) wurde bei den Laborversuchen sowohl für das Eingangsmaterial (entwässertes Klärschlamm), das Ausgangsmaterial (Slurry), als auch für das flüssige Produkt (Prozessflüssigkeit) bestimmt. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die spezifische Biogas- und Methanproduktion für den entwässerten Klärschlamm des KW WAS. Die Prozessflüssigkeiten zeigen einen hohen Anteil an gut vergärbaren Substanzen und die Ergebnisse beweisen, dass bei einer anschließenden Faulung der Prozessflüssigkeiten von einem hohen Methanertrag ausgegangen werden kann, welcher im BHKW Strom und Abwärme zum Betrieb der HTC erzeugen kann.

## Klärschlamm 1 - Waßmannsdorf

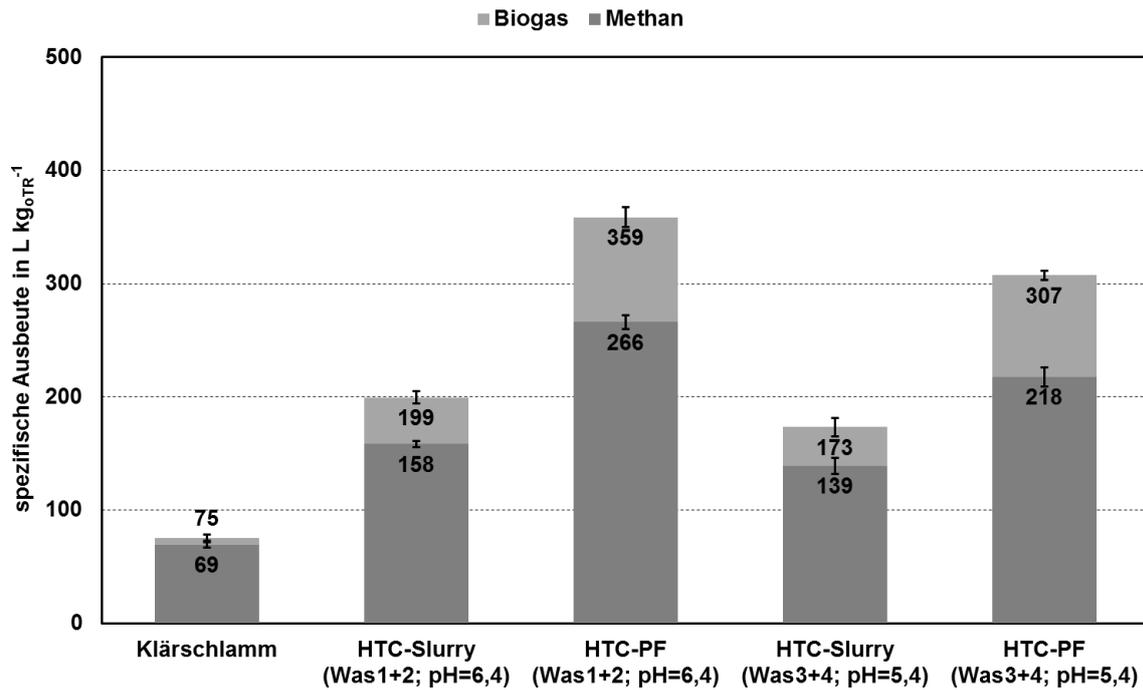


Abbildung 7: Spezifisches Methanbildungspotenzial – Waßmannsdorf

### 2.1.11 Refraktärer CSB - Laborversuche

Abgesehen von der Versuchsreihe WAS3+4 liegt der refraktäre Anteil des CSB im Filtrat bei 4 – 14 % (8974 – 14469 mg/L) des Gesamt-CSB (Abbildung 8). Im Vergleich hierzu wurden für die Zentrale der Berliner Klärwerke refraktäre Anteile von 10 bis 41 % (118 – 367 mg/L) gemessen.

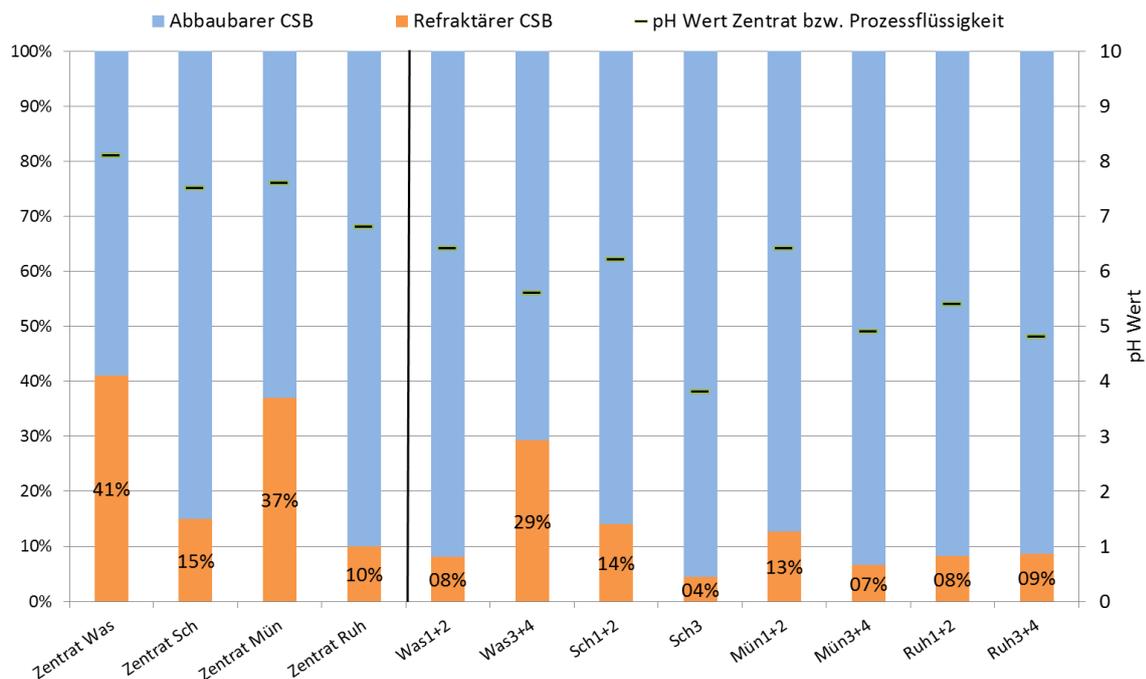


Abbildung 8: Refraktärer CSB - Laborversuche

## Chapter 3

### Arbeitspaket 3: technischer Pilotversuch

Die Firma Terranova energy betreibt eine Pilotanlage zur hydrothermalen Karbonisierung. Die Anlage ist mobil ausgeführt und wurde schon an vielen Kläranlagen erfolgreich installiert und getestet. Zum Zeitpunkt der Versuche war die Anlage auf dem Gelände der Kläranlage Düsseldorf installiert, so dass die beiden zu untersuchenden Schlämme an den Versuchsstandort transportiert wurden. Geplant war für den Schlamm aus WAS und MÜN jeweils ein Bilanzzeitraum von mindesten 19 h, um die Stoff- und Energiebilanzen für einen repräsentativen Zeitraum auswerten zu können.

#### 3.1 Material und Methodik

Die entwässerten Klärschlämme der Kläranlagen WAS und MÜN wurden am selben Tag in Berlin verladen und dann getrennt voneinander nach Düsseldorf geliefert. Die Lagerung der entwässerten Klärschlämme bis zum Versuchsstart fand auf dem Gelände der Kläranlage Düsseldorf statt. Die entwässerten Klärschlämme wurden gegenüber Sonne und Regen mit Planen abgedeckt.

Mit dem Betreiber Terranova energy wurde ein Bilanzzeitraum von mindestens 19 h vereinbart. Da während Inbetriebnahme der Anlage und dann später bei der Umstellung auf den zweiten Schlamm die Verfahrensparameter nicht definiert sind, wurden die Produkte dieser Phasen nicht untersucht. Das bedeutet, dass bei einer geplanten Verweilzeit im Reaktor von 2:40 h der Bilanzzeitraum erst nach 8 h begann, also das Reaktionsvolumen 3-mal ausgetauscht wurde. Vor den Probenahmen für den zweiten Schlamm wurde ebenfalls 8 h gewartet, um den ersten Schlamm vollständig aus dem System zu spülen.

In Abbildung 9 ist ein vereinfachtes Grundfließbild der Anlage aufgeführt. Der Schlamm wird über einen Eintragswärmestauscher durch Nutzung der Wärme am Austragswärmestauscher vorgewärmt. Diese Prozessführung verringert den nötigen Wärmebedarf, um den Schlamm im Reaktor auf 180°C zu erwärmen.

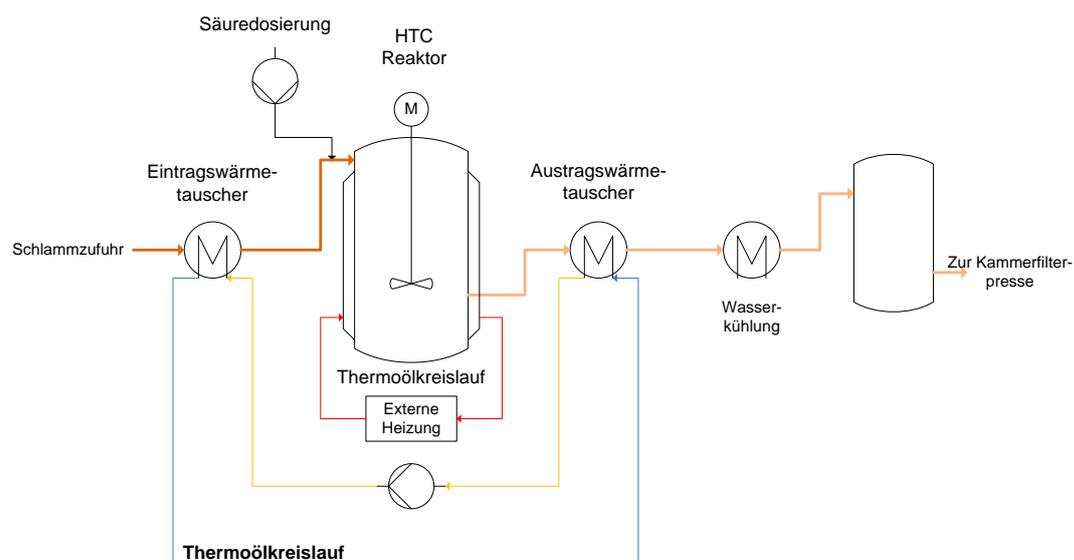


Abbildung 9: HTC-Verfahren Terranova energy

Die Entwässerung der produzierten Kohle findet in einer Kammerfilterpresse statt. In der Regel werden 800 – 900 L Slurry gesammelt, um dann bei einem Druck zwischen 9 – 11 bar über Filtertücher mit einer nominellen Maschenweite von 25 µm entwässert zu werden. Mehrere Proben von unterschiedlichen Platten aus der Kammerfilterpresse wurden genommen, um einen repräsentativen Wert des Entwässerungsergebnisses zu bestimmen.

### 3.2 Versuchsplanung und Durchführung

Um die Ergebnisse der ersten Laborversuche zu validieren, wurden parallel zu den Pilotversuchen ebenfalls Laborversuche unter vergleichbaren Betriebsparametern durchgeführt (Tabelle 1). Im Fall der Pilotanlage ist die Beschickung semi-kontinuierlich, das bedeutet, dass die Beschickungspumpe bei einem Füllstand im Reaktor von 74 % startet und bei 76 % stoppt. Das Reaktionsvolumen entspricht daher ca. 75 % = 600 L. Der Austrag geschieht auch bei der Pilotanlage kontinuierlich.

Zu Beginn der Versuche zeigte sich schnell, dass das Eintragungssystem der Pilotanlage den angestrebten Durchsatz von 220 L/h nicht konstant leisten konnte. Der Durchsatz wurde daher auf 190 – 200 L/h reduziert. Die Probleme wurden durch einen vergleichsweise hohen TR von 26,7 % und 26,8 % verursacht. Allerdings ist das Eintragungssystem der Pilotanlage nicht für Klärschlämme optimiert, da möglichst viele verschiedene Substrate in dieser Anlage karbonisiert werden sollten. Es ist davon auszugehen, dass ein für Klärschlamm ausgelegtes Eintragungssystem, z.B. mit gegenläufigen Eintragungsschnecken, die Beschickung der HTC Anlage mit entwässertem Klärschlamm gewährleisten kann.

Durch die Probleme im Eintragungssystem wurden die Versuche verkürzt gefahren, d. h. es konnten für beide Schlämme jeweils nur ein Zeitraum von 3,5 h bzw. 4 h getestet werden, im Gegensatz zu den geplanten 19 h. Ein kontinuierlicher Testbetrieb über einen längeren Zeitraum war nicht möglich.

In Tabelle 1 sind die Betriebsparameter der Pilotversuche und der Laborversuche zusammengefasst.

Tabelle 1: Pilotversuche - geplant und durchgeführt

	Pilotversuche		Laborversuche	
	geplant	durchgeführt		
<b>Temperatur</b>	180°C	180°C	180°C	180°C
<b>Mittlere Verweilzeit bei Zieltemperatur</b>	150 Min.	150 Min.	150 Min.	150 Min.
<b>Druck</b>	Stellt sich durch Dampfdruck und Gaserzeugung ein	~25 bar	9 – 10 bar	9 – 10 bar
<b>pH-Wert nach HTC</b>	5	4,9 – 5,1	4,7 – 5,1	3
<b>Bilanzzeitraum</b>	19 h	3,5 – 4 h	(Batch Versuch)	(Batch Versuch)
<b>Säurebedarf kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t TR WAS</b>		55,9	73,6	234,3
<b>Säurebedarf kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t TR MÜN</b>		123,8	101,6	305,9

### 3.3 Ergebnisse

#### 3.3.1 CSB Prozessflüssigkeit, Trockenrückstand, Stickstoff und Phosphor

Zum Vergleich der Versuche werden zunächst die Ergebnisse der Prozessflüssigkeiten heran gezogen. In Abbildung 10 ist der CSB für die Prozessflüssigkeit beider Schlämme angegeben. Durch den verkürzten Bilanzzeitraum konnte nur eine Probe pro entwässerten Klärschlamm in der Pilotanlage genommen werden. Für die Laborversuche sind die beiden gemessenen Werte angegeben.

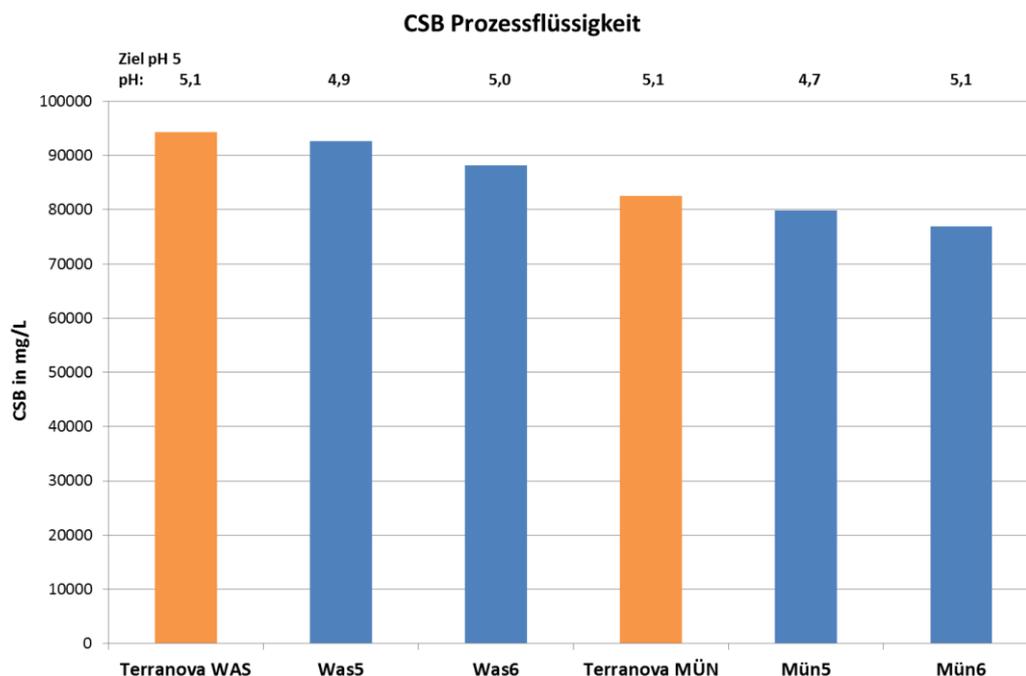


Abbildung 10: CSB in den Prozessflüssigkeiten - Vergleich Pilot & Labor

Die Abweichung der CSB Werte liegt für WAS im Mittel bei 4,2 % und für MÜN bei 5,1 %. Die größte Abweichung lag bei 6,9 %. Die TR-Werte im Filtrat sowie die Stickstoffwerte (nicht gezeigt) waren ebenfalls vergleichbar zwischen Pilot- und Laborversuchen (Abweichung < 10%).

In Abbildung 11 sind die Ergebnisse für Phosphor dargestellt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen für CSB, TR und TN wurden hier Unterschiede zwischen den Verfahren festgestellt. Die Konzentrationen waren für die Laborversuche höher bis zu 175 % höher. Um den Einfluss der Filtration mit unterschiedlichen Maschenweiten zu bestimmen, wurde für diese Proben auch der gelöste Anteil bestimmt (Filtration über 0,2 µm Membranfilter).

Für WAS konnte gezeigt werden, dass bei der Prozessflüssigkeit der Pilotanlage der gelöste Anteil bei 96 % lag. 93 % des Phosphors lag als ortho-Phosphat vor. Für die Laborversuche lag der gelöste Anteil leicht über den Wert des Gesamtphosphors, was mit Messungenauigkeiten zu erklären ist. Auch hier war der Anteil des ortho-Phosphors mit 98 % vergleichbar hoch. Bei MÜN lagen die gelösten Anteile mit 81 % und 90 % ebenfalls in derselben Größenordnung. Die ortho-Phosphat-Werte für die Versuche mit Schlamm aus Münchehofe wurden nicht ermittelt. Die Abweichung zwischen Labor- und Pilotversuch für Phosphor kann mit den vorliegenden Ergebnissen nicht gänzlich geklärt werden.

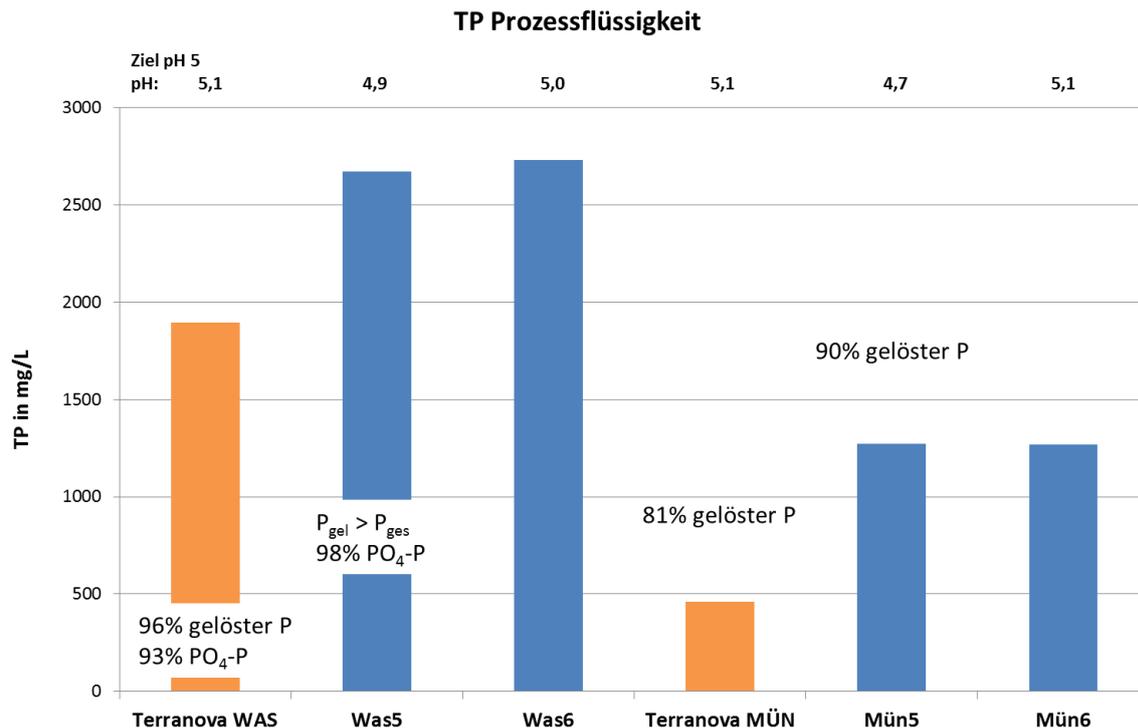


Abbildung 11: Phosphorgehalte Prozessflüssigkeit - Vergleich Pilot & Labor

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Ergebnisse für CSB, TR und TN für Pilot- und Laborversuche eng zusammen lagen und dass die Laborversuche die Karbonisierung in der Pilotanlage sehr gut abbilden. Die Phosphorergebnisse allerdings weisen einen signifikanten Unterschied auf, der mit den vorliegenden Ergebnissen nicht geklärt werden konnte. Ein Erklärungsansatz sind die verschiedenen Verfahren, ein kontinuierlicher Prozess (Pilot) im Vergleich zu einem Batch-Verfahren. Die Verweilzeit im Batch-Verfahren entspricht genau der vorgegebenen Reaktionszeit (hier 150 Min.), während im kontinuierlich beschickten Rührreaktor eine Verweilzeitverteilung vorliegt und somit der Slurry auch Anteile kürzer karbonisiertem Klärschlamm beinhaltet.

### 3.3.2 Biologisches Methanbildungspotenzial (BMP) – Prozessflüssigkeiten

In Abbildung 12 sind die Ergebnisse der BMP Versuche für die Prozessflüssigkeiten der Pilot und Laborversuche dargestellt. Angezeigt werden die auf den zugeführten oTR bezogenen Biogas- und Methanausbeute. Während die Ausbeuten der Prozessflüssigkeit des entwässerten Klärschlammes WAS in einem vergleichbaren Bereich liegen, liegt die Abweichung der Biogasbildung bei MÜN bei über 20 %.

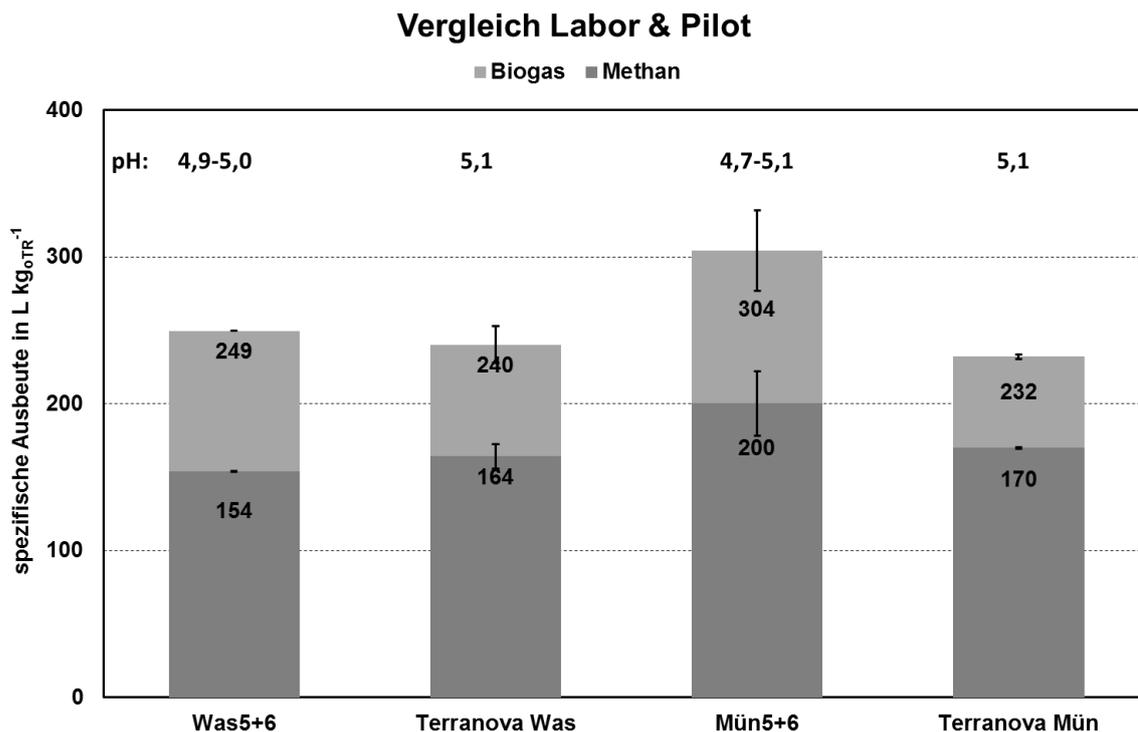


Abbildung 12: Biologisches Methanbildungspotenzial – Vergleich Pilot & Labor

Diese Abweichung konnte innerhalb des Projektes nicht geklärt werden. Auch ein Vergleich aller BMP Ergebnisse mit Prozessflüssigkeiten aus der Karbonisierung der entwässerten Klärschlämme aus WAS und MÜN zeigte erhebliche Unterschiede.

Bei den Versuchen mit pH-Werten < 3 kann dieser abweichende Parameter als Erklärung dienen. Bei den Versuchen mit einem pH um 5 liegen die Abweichungen auch bei den Messungen, die beim ATB durchgeführt wurden teilweise bei > 20 %. Ob saisonale Effekte hier eine Rolle spielten oder das Inokulum sich über den Projektzeitraum stark änderte, kann nicht abschließend geklärt werden. Es bleibt darauf hinzuweisen, dass bei biologischen Messverfahren eine stärkere Streuung der Ergebnisse vorkommt. Aus diesem Grund werden diese Untersuchungen in der Regel in Mehrfachbestimmung durchgeführt und mit Referenzsubstraten abgeglichen. Diese Kontrollen zeigten aber bei den hier dargestellten Ergebnissen keine Auffälligkeiten.

### 3.3.3 Refraktärer CSB – Pilotversuche

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse des refraktären CSBs für die Pilot- und Laborversuche gegenübergestellt. Zusätzlich sind die stark angesäuerten Versuche ebenfalls aufgeführt. Während die Versuche mit einem pH Wert um 5 sich um 4-5 % Punkte unterscheiden, ist bei den stark angesäuerten Versuchen auffällig, dass der refraktäre Anteil geringer ausfällt.

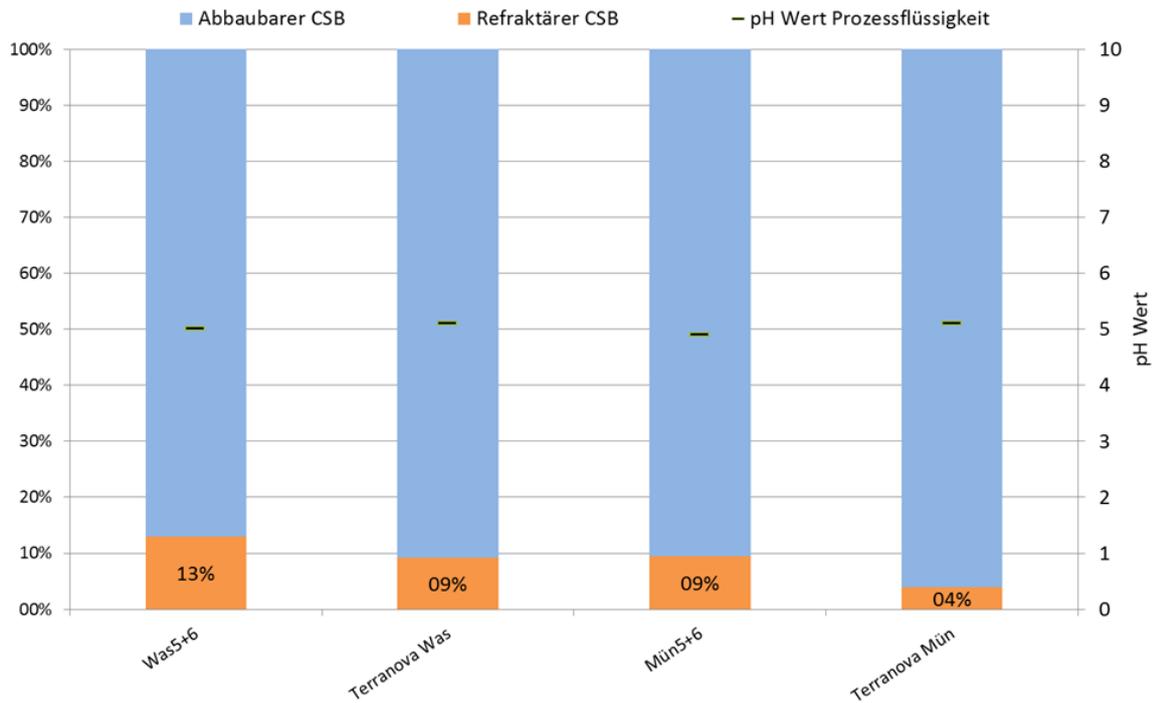


Abbildung 13: Refraktärer CSB - Pilotversuche

### 3.3.4 Entwässerungsergebnisse und Energiebedarf

Die Pilotversuche wurden unter anderem auch mit dem Ziel durchgeführt, die sehr gute Entwässerbarkeit und den Energiebedarf zu überprüfen. In Abbildung 14 ist die entwässerte HTC-Kohle der beiden entwässerten Klärschlämme abgebildet.

Pressung WAS



Pressung MÜN



Abbildung 14: HTC Kohle der Pilotanlage

Die Kammerfilterpresse der Pilotanlage produziert eine Reihe der gezeigten Platten. Um den erreichten TR zu bestimmen wurden daher pro Pressung mehrere Proben genommen. Die einzelnen Ergebnisse und der Mittelwert sind in Abbildung 15 zusammengefasst.

Die TR Werte lagen für WAS bei 44,2 %, während im Mittel für MÜN 51,0 % bestimmt wurde. Dies weicht stark von den prognostizierten Werten von 65 % ab. Die Kammerfilterpresse arbeitet mit einem Betriebsdruck zwischen 9 und 11 bar, der bei den Versuchen auch erreicht wurde. Ein Abgleich mit Ergebnissen vorangegangener Versuche mit Klärschlamm konnte keine Erklärung für das schlechtere Entwässerungsergebnis liefern. Die entscheidenden Prozessparameter, wie z. B. pH-Wert, Temperatur und Verweilzeit,

waren die gleichen. Nur der Eingangstrockenrückstand war mit Werten um 20 % niedriger. Beim Öffnen der Kammerfilterpresse konnte beobachtet werden, dass die Verteilung des Slurrys in den Kammern nicht gleichmäßig geschah und die Platten sehr inhomogen gepresst wurden. Dies ist auch an den großen Unterschieden innerhalb einer Pressung zu erkennen, z. B. erreichten einige Platten der MÜN Pressung Werte >60 %. Ob diese ungleichmäßige Beschickung auf den abweichenden Eingangstrockenrückstand zurückzuführen ist, kann nicht abschließend geklärt werden. Da die Inkohlungsdiagramme für alle Versuche die zu erwartenden Verschiebung der HTC Produkte zeigten, kann davon ausgegangen werden, dass die Karbonisierung ordnungsgemäß durchgeführt wurde.

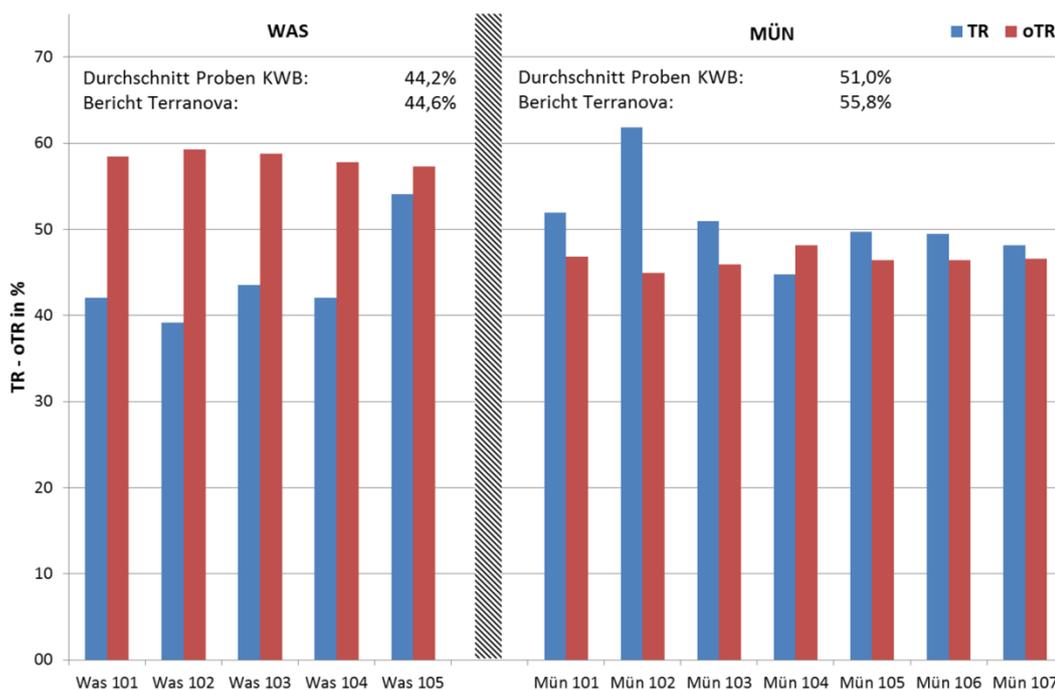


Abbildung 15: Entwässerungsergebnisse Pilotanlage - Mehrfachbestimmung beider Pressungen

### 3.3.5 Energiebedarf

In Tabelle 2 ist der während der Pilotversuche gemessene Energiebedarf, aufgeteilt in Wärme und elektrische Energie, aufgezeigt. Die Abweichung des Wärmebedarfs und des Säurebedarfs zwischen den beiden Klärschlämmen ist nicht nachvollziehbar, da beide Schlämme einen ähnlichen TR hatten. Allerdings sind die verkürzten Bilanzzeiträume von 3,5 – 4 h anfällig für Fehlmessungen, da kleinere Messungenauigkeiten größere Auswirkungen haben.

Tabelle 2: Säure-, Wärme- und Energiebedarf der Pilotanlage

	Säurebedarf H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96%) L/t Klärschlamm	Spezifischer Säurebedarf H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96%) kg/t TR Klärschlamm	Wärmebedarf kWh/t Klärschlamm	Strombedarf kWh/t Klärschlamm
WAS (Bio-P)	7,9	55,9	106	16
MÜN (Chem-P)	17,5	123,8	121	17

## Chapter 4

### Arbeitspaket 2: Stoffstrom- und Treibhausgasbilanz

Die Stoffströme auf der Kläranlage und die Treibhausgasbilanz werden mit einem lebenszyklusbasierten Ansatz erfasst, der sich auf die Grundlagen der Ökobilanz nach ISO 14040/44<sup>7</sup> stützt. Dabei werden neben den direkten Emissionen auf der Kläranlage auch der Ressourcenverbrauch und die Emissionen aller vor- und nachgelagerten Prozesse mit einbezogen, die für die Schlammbehandlung und –entsorgung relevant sind. Analog zur Ökobilanz erfolgt zunächst die Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen (Systemgrenzen, funktionelle Einheit, Szenarien, Indikatoren, Datenqualität), dann die Erhebung der Sachbilanzdaten auf Grundlage der Ergebnisse der Labor- und Pilotversuche, sowie abschließend die Berechnung von Umweltindikatoren für die Energie- und Treibhausgasbilanz sowie die Zusammenfassung der Ergebnisse.

#### 4.1 Methodik der Bilanzierung

Die Funktion der beschriebenen Systeme umfasst die Behandlung und thermische Entsorgung von eingedicktem Klärschlamm von ausgewählten Berliner Klärwerken. Als Bezugseinheit wird daher zum Vergleich die „Behandlung und Entsorgung einer Tonne Trockensubstanz im Rohschlamm [t TS]<sup>-1</sup>“ gewählt.

Die vorliegende Bilanzierung beschreibt die komplette Prozesskette der Behandlung und Entsorgung von kommunalem Klärschlamm, vom Anfall des Rohschlammes (Mischung aus Primär- und Überschussschlamm) über die Stabilisierung, Entwässerung und Verbrennung bis zur Deponierung der Aschen (Abbildung 16). Dabei werden folgende Prozesse berücksichtigt:

- Anaerobe Stabilisierung im Faulurm (wenn vorhanden)
- Nutzung des anfallenden Faulgases im Blockheizkraftwerk (BHKW)
- MAP-Fällung (wenn vorhanden)
- Entwässerung mit Zentrifugen
- Behandlung der Rückbelastung in der Prozesswasserbehandlung bzw. im Hauptstrom des Klärwerks (vereinfachtes Modell für Strombedarf und Treibhausgasemissionen)
- Transport des entwässerten Klärschlammes per LKW
- Verbrennung des entwässerten Klärschlammes in Mono- oder Mitverbrennungsanlagen
- Deponierung der Aschen
- Gutschriften für substituierte Produkte (Strom, ggf. Mineraldünger bei MAP oder NH<sub>3</sub>-Stripper)
- Alle Hintergrundprozesse, die für den Betrieb dieser Prozesskette benötigt werden (Bereitstellung von Strom, Chemikalien und Hilfsstoffen, sowie Brennstoffen)

---

<sup>7</sup> ISO 14040 (2006): *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework*. International Standardisation Organisation, Geneva, Switzerland

ISO 14044 (2006): *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. International Standardisation Organisation, Geneva, Switzerland

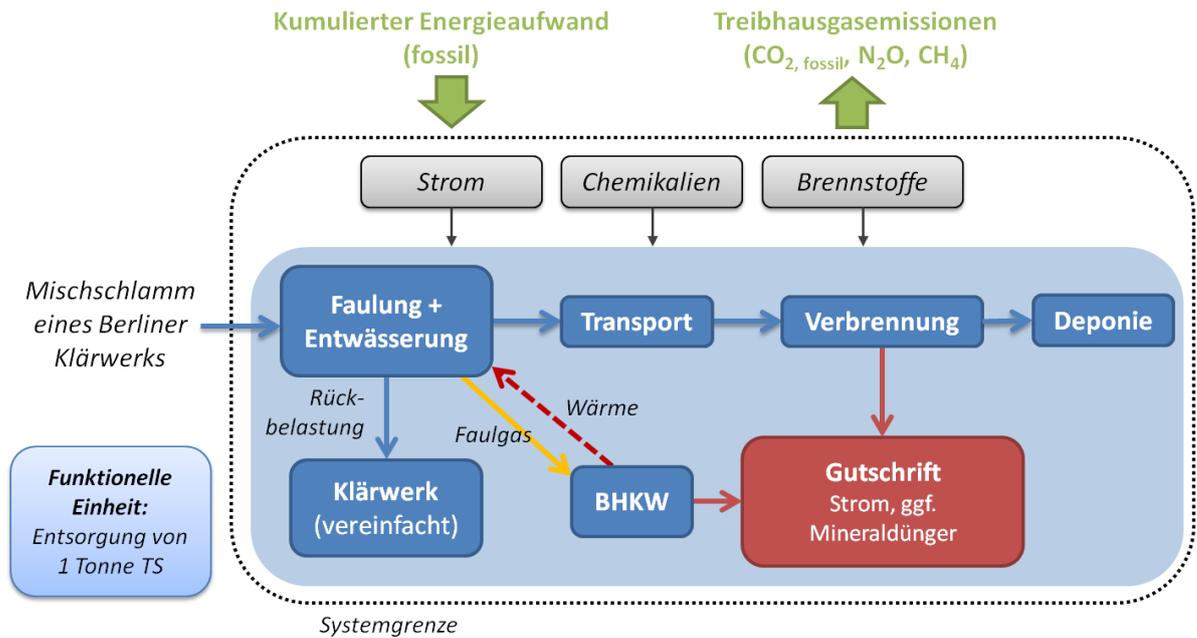


Abbildung 16: Systemgrenzen der Energie- und Klimabilanz

Folgende Aspekte sind aus Gründen der Vereinfachung in dieser Bilanzierung nicht abgebildet:

- Aufwendungen für Infrastruktur
- Gasreinigung des anfallenden Faulgases (Trocknung, Entschwefelung)
- Kleinere Aggregate z.B. für Schlammtransport (Pumpen), Zwischenspeicherung

Die Auswahl der betrachteten Szenarien wurde in Absprache mit den BWB und SenStadtUm getroffen (Tabelle 3). Prinzipiell wird als Referenzzustand für den Vergleich die bestehende Klärschlammbehandlung und –entsorgung für vier Klärwerke der BWB (Ruhleben/RUH, Waßmannsdorf/WAS, Schönerlinde/SCHÖ, Münchehofe/MÜN) bilanziert. Für alle Klärwerke werden dabei verschiedene mögliche Entsorgungswege für den entwässerten Klärschlamm dargestellt (Mono- bzw. Mitverbrennung), auch wenn nicht jeder Entsorgungsweg für jedes Klärwerke der momentanen Praxis entspricht.

Bei der Definition der Szenarien sind folgende Aspekte berücksichtigt:

- Die Datenabfrage der BWB bezieht sich auf das Jahr 2013
- Mögliche Entsorgungswege für entwässerten Klärschlamm im Referenzzustand sind die bestehende Klärschlammverbrennungsanlage Ruhleben (KSPA Ruh), eine neu zu errichtende KSPA (KSPA neu) in Berlin sowie die Mitverbrennung im Braunkohlekraftwerk (Kraftwerk).
- Mögliche Entsorgungswege für den hochentwässerten Filterkuchen nach HTC sind eine zu konzipierende Monoverbrennungsanlage für diesen Brennstoff (HTC Mono) oder die Mitverbrennung im Braunkohlekraftwerk (HTC Kraftwerk)
- Für das Klärwerk RUH, das momentan den entwässerten Rohschlamm direkt verbrennt, wird zum Vergleich ebenfalls ein Referenzszenario mit Faulung berechnet (Faulgasenergieertrag aus den Laborversuchen). Für die HTC-Szenarien in RUH wird eine Variante mit und ohne separaten Faulreaktor („Methanizer“) für das HTC-

Prozesswasser untersucht, um den Einfluss der Nutzung dieses Gaspotentials zu untersuchen. Dem Methanizer wird zur Stabilisierung ein NH<sub>3</sub>-Stripper vorgeschaltet, da die hohen NH<sub>4</sub>-N-Gehalte des Prozesswassers eine Faulung behindern würden.

- Für das Klärwerk SCHÖ wird zur besseren Vergleichbarkeit keine Trocknung des entwässerten Klärschlammes abgebildet. Das gesamte Faulgas wird daher im Modell in einem herkömmlichen BHKW genutzt.
- Für alle Klärwerke mit Faulung wird eine Behandlung des Zentrats aus der Entwässerung angenommen (Prozesswasserbehandlung). Diese Erweiterung zur Absenkung der Rückbelastung des Hauptstroms (vor allem NH<sub>4</sub>-N) wird perspektivisch in diesen Klärwerken installiert werden.
- Eine mögliche Ansäuerung des entwässerten Klärschlammes vor der HTC wird für die Laborversuche beispielhaft nur für die Klärschlämme aus WAS und SCHÖ berechnet.

Tabelle 3: Szenarien der Energie- und Klimabilanz

Klärwerk	Abk.	Referenzzustand			mit HTC		
		Entsorgungsweg	KSVA Ruh	KSVA neu	Kraftwerk	HTC Mono	HTC Kraftwerk
<b>Ruhleben</b>	RUH		X	X	X	X*	X*
mit Faulung	RUHf		X	X	X		
<b>Wassmannsdorf</b>	WAS		X	X	X	X	X
<b>Schönerlinde</b>	SCHÖ		X	X	X	X	X
<b>Münchehofe</b>	MÜN		X	X	X	X	X

KSVA: Klärschlammverbrennungsanlage

HTC Mono: Monoverbrennungsanlage für HTC-Kohle

\* Varianten ohne und mit Methanizer zur Faulgasgewinnung aus Prozesswasser

Zur Bewertung der Szenarien werden zwei Indikatoren zur Beschreibung des nicht-erneuerbaren Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen herangezogen:

- Kumulierter Energieaufwand fossiler Ressourcen (KEA fossil) (VDI 4600)<sup>8</sup> in der Einheit [MJ]
- Treibhauspotential über 100a (IPCC 2007)<sup>9</sup> in der Einheit [kg CO<sub>2</sub>-eq], wobei die Bewertung über fossiles CO<sub>2</sub> (Faktor 1), N<sub>2</sub>O (Faktor 298) und CH<sub>4</sub> (Faktor 25) erfolgt.

<sup>8</sup> VDI (2012): VDI-Richtlinie 4600: 2012-01: Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Berechnungsmethoden. Beuth Verlag, Berlin.

<sup>9</sup> IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva, Switzerland

Die Datenquellen für die Eingabedaten der Bilanzierung sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Während der Referenzzustand überwiegend auf den Betriebsdaten 2013 beruht und durch Literaturangaben ergänzt wurde, sind die HTC-Szenarien über die Daten der Labor- und Pilotversuche modelliert. Für die Prozessparameter der HTC-Verfahren (Bedarf an Strom und Wärme, Entwässerungsergebnis) werden Angaben der Anbieter oder, wenn verfügbar, Daten der Pilotversuche genutzt.

**Tabelle 4: Datenquellen für die Stoffstrom- und Treibhausgasbilanz**

Daten	Quelle	Bemerkungen
Referenzzustand der Klärwerke	BWB	Stand 2013: Rohschlammengen und –qualität, Zentratqualität, Gasertrag und Heizwert, Wirkungsgrade BHKW, Entwässerung, ..., ergänzt durch Literaturangaben <sup>1</sup> (Strom/Wärmebedarf für Faultürme, Zentrifugen)
Überschusswärme	BWB	Zeitliche Auflösung der vorhandenen Überschusswärme in WAS und MÜN
Wirkung der Rückbelastung	KWB	Vereinfachte Berechnung des Strombedarfs über O <sub>2</sub> -Bilanz (DWA A131) <sup>2</sup> und Kennzahlen <sup>1</sup>
Prozesswasserbehandlung	BWB	Zusammenstellung aus Literaturangaben für Deammonifikation
KSVA Ruh	BWB	Betriebsdaten 2013, N <sub>2</sub> O-Werte nach IPCC <sup>3</sup> abgeschätzt
KSVA neu	BWB	Planungsdaten, N <sub>2</sub> O-Werte nach IPCC <sup>3</sup> abgeschätzt
Braunkohlekraftwerk	KWB	Abschätzung der Emissionswerte <sup>4</sup> für N <sub>2</sub> O
Transportentfernungen	KWB	Abschätzung anhand der realen Standorte
HTC-Produkte	Labor-/Pilotversuch	TR-Ausbeute, Qualität Prozesswasser, Gasertrag, Heizwert der TR, refraktärer CSB
HTC-Prozess	Anbieter	Strom-/Wärmebedarf nach Herstellerangaben (Terranova, AVA-CO2) bzw. Daten des Pilotversuchs
Entwässerungsergebnis	Anbieter, Pilotversuch	Prognose der TR des Filterkuchens nach HTC durch Hersteller bzw. Daten des Pilotversuchs
HTC Mono	KWB	Abschätzung von Wirkungsgrad und N <sub>2</sub> O-Emission
Hintergrundprozesse	Ecoinvent <sup>5</sup>	Ökobilanz-Datenbank für Strom, Chemikalien und Hilfsstoffe, Brennstoffe, Aschedeponierung und Transporte

<sup>1</sup> MUNLV (1999): *Handbuch Energie in Kläranlagen*. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf

<sup>2</sup> ATV-DVWK (2000): *A131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Abwassertechnische Vereinigung e.V., Hennef

<sup>3</sup> IPCC (2006): *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories -Volume 5: Waste, Chapter 5: Incineration and open burning of waste*. IGES, Japan

<sup>4</sup> Svoboda, K., Baxter, D. and Martinec, J. (2006): *Nitrous oxide emissions from waste incineration*. *Chemical Papers* 60 (1), 78-90

<sup>5</sup> Ecoinvent (2010): *Ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-26*, Swiss Center for Life Cycle Inventories, [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org). Dübendorf, Switzerland.

## 4.2 Eingabedaten der Bilanzierung

### Referenzzustand

Der Referenzzustand der vier Berliner Klärwerke wird über die Betriebsdaten der BWB abgebildet. Die Eigenschaften der Rohschlämme (voredickter Mischschlamm aus Primär- und Überschussschlamm) finden sich in Tabelle 5. Die Schlämme unterscheiden sich in den Parametern Trockenrückstand (TR) und Glühverlust (GV) durch betriebliche Unterschiede in den Klärwerken sowie die unterschiedliche Prozessführung und Abwasserzusammensetzung. Für das Szenario RUH mit Faulung wurden Annahmen zur weiteren Voreindickung des Rohschlammes auf 5% TR getroffen. Die ausgewiesenen N- und P-Frachten im Rohschlamm ergeben sich aus einer Rückrechnung der gemessenen Nährstofffrachten in Zentrat und entwässertem Klärschlamm.

Tabelle 5: Eigenschaften der Rohschlämme

		RUH	RUH mit Faulung	WAS	SCHÖ	MÜN
<b>Menge</b>	Mg OS/a	1.346.000	942.200	650.000	750.000	230.000
<b>TR</b>	%	3,5	5,0 <sup>1</sup>	5,8	2,9	3,7
<b>GV</b>	%	74,7	74,7	82,1	77,5	71,5
<b>TS</b>	Mg/a	47.110	47.110	37.700	21.750	8.510
<b>CSB<sup>2</sup></b>	Mg/a	51.027	51.027	44.880	24.442	8.823
<b>N<sup>3</sup></b>	Mg/a	2.333	2.333	1.956	1.011	343
<b>P<sup>3</sup></b>	Mg/a	1.176	1.176	986	593	219

<sup>1</sup> Schätzung BWB

<sup>2</sup> Umrechnung: 1 kg oTR = 1,45 kg CSB

<sup>3</sup> berechnet aus Messungen im Laborversuch

Die Schlammfäulung findet in allen Klärwerken (wenn vorhanden) bei mesophilen Temperaturen statt. Der Abbaugrad der organischen Substanz in der Faulung liegt bei 46,5 bis 52,6% und die Faulgasausbeute zwischen 406 und 470 NL/kg oTR<sub>in</sub>. Der Methangehalt liegt bei 60 Vol-% (SCHÖ, MÜN) bzw. 55 Vol-% (WAS durch Zumischung von Luft für die biologische Gasreinigung). Die anschließende Nutzung des Faulgases findet in BHKWs statt, von denen die moderneren Aggregate in WAS und SCHÖ (Annahme: nur BHKW) einen höheren elektrischen Wirkungsgrad und Gesamt-Wirkungsgrad haben. Der Strombedarf der Faultürme (Umwälzung) wird für alle Klärwerke über Literaturwerte abgeschätzt. Der Wärmebedarf der Faultürme wird aus vorhandenen Wärmebilanzen abgeschätzt.

Bei der Faulung löst sich CH<sub>4</sub> im Faulschlamm (Annahme: 100% Sättigung bei 38°C = 18 mg/L CH<sub>4</sub>), das bei der anschließenden Entwässerung freigesetzt wird.

Die klimawirksamen Emissionen der BHKWs werden mit 80 mg N<sub>2</sub>O und 125 mg CH<sub>4</sub> je kg verbranntem CH<sub>4</sub> abgeschätzt, Leckageverluste werden pauschal mit 0,75% des Faulgases angenommen<sup>10</sup>.

Im Klärwerk Wassmannsdorf wird im Modell die separate MAP-Fällung im Faulschlamm berücksichtigt. Dabei werden die Prozessparameter aus vorhandenen Bilanzmodellen (EU-Projekt P-REX<sup>11</sup>) übernommen. Der Strom- und Polymerbedarf der Zentrifugen zur Entwässerung sowie das Entwässerungsergebnis (% Trockenrückstand im entwässerten Klärschlamm) wird nach Angaben der BWB berechnet. Die Qualität des Zentrats (CSB, N, P) entspricht den Mittelwerten der BWB, während der refraktäre Anteil des CSB aus den Ergebnissen der Laborversuche ermittelt wurde. Für das Szenario RUHF werden entsprechende Werte abgeschätzt.

Für die Prozesswasserbehandlung über Deammonifikation wird nach Angaben der BWB ein Wirkungsgrad der N-Elimination von 85% angenommen, eine mögliche Elimination von CSB wird vernachlässigt. Für das Verfahren werden 2 kWh/kg N<sub>elim</sub> Strom und 1,6 kWh/m<sup>3</sup> Wärmebedarf angesetzt.

Bei der Rückführung des behandelten Prozesswassers in den Hauptstrom der Kläranlage wird der Abbau von CSB (95% Elimination), Stickstoff (83%) und Phosphor (97%) berücksichtigt. Der Strombedarf wird über eine Bilanzierung des Sauerstoffbedarfs errechnet (1 kg O<sub>2</sub>/kg CSB, 4,3 kg O<sub>2</sub>/kg N für die Nitrifikation und -2,9 kg O<sub>2</sub>/kg N für den Rückgewinn durch Denitrifikation<sup>12</sup>) bei einem Strombedarf für den Sauerstoffeintrag von 0,5 kWh/kg O<sub>2</sub>. Für die Denitrifikation wird zusätzlich ein Strombedarf von 1 kWh/kg N<sub>denitrifiziert</sub> für die Rezirkulationspumpen angesetzt, während für die biologische P-Elimination ein Strombedarf von 0,37 kWh/kg P<sub>elim</sub> angenommen wird. Die N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der Belebung werden pauschal mit 0,6% des denitrifizierten N abgeschätzt<sup>13</sup>.

### **HTC-Prozess auf Basis der Laborversuche / Herstellerangaben**

Für die Modellierung des HTC-Prozesses werden die Ergebnisse der Laborversuche für TR-Ausbeute, Filtratqualität und Faulgasertrag angesetzt (Tabelle 6). Angaben zum Strom- und Wärmebedarf werden vom HTC-Anbieter Terranova übernommen, ebenso die Annahmen zum TR im hochentwässerten Klärschlamm. Der Strombedarf der Kammerfilterpresse ist aus der Literatur abgeschätzt. Die Varianten mit Ansäuerung durch Dosierung von Schwefelsäure (WAS, SCHÖ) unterscheiden sich im Entwässerungsgrad (Annahme: Verbesserung auf 70% TR) und in der Filtratqualität sowie der Faulgasausbeute. Für die Behandlung des HTC-Filtrats im Faulturm oder Methanizer wird durch die hohe Temperatur kein weiterer Wärmebedarf angenommen, die Umwälzung wird pauschal mit 1 kWh/m<sup>3</sup> Strom angesetzt.

<sup>10</sup> Ronchetti, C., Bienz, P. and Pridal, R. (2002): *Ökobilanz Klärgasverstromung*. Bundesamt für Energie, Bern, Schweiz

<sup>11</sup> Remy, C. and Jossa, P. (2015): *Deliverable 9.2: Life Cycle Assessment of selected processes for P recovery from sewage sludge, sludge liquor, or ash* (available for download at: [www.p-rex.eu](http://www.p-rex.eu)). Kompetenzzentrum Wasser Berlin

<sup>12</sup> ATV-DVWK (2000): *A131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Abwassertechnische Vereinigung e.V., Hennef

<sup>13</sup> Wicht, H. (1996): N<sub>2</sub>O-Emissionen durch den Betrieb biologischer Kläranlagen. Dissertation, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig.

Tabelle 6: Parameter der HTC-Szenarien basierend auf den Ergebnissen der Laborversuche

		RUH	RUH mit Methanizer	WAS	SCHÖ	MÜN
<b>Strombedarf HTC<sup>1</sup></b>	kWh/m <sup>3</sup>	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
<b>Wärmebedarf HTC<sup>1</sup></b>	kWh/m <sup>3</sup>	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7
<b>TR-Ausbeute</b>	%	76,6	76,6	68,9	73,4	72,3
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (96%)</b>	kg/Mg TS	-	-	(234,3)	(153,2)	-
<b>Strombedarf Kammerfilterpresse</b>	kWh/m <sup>3</sup>	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
<b>TR im entwässerten Klärschlamm<sup>1</sup></b>	% TR	75	75	65 (70)	65 (70)	65
<b>CSB im Filtrat</b>	kg/m <sup>3</sup>	112	112	111 (79)	103 (81)	93
<b>CSB refraktär im Filtrat</b>	kg/m <sup>3</sup>	8,7	8,7	11,7	14,5	7,4
<b>N im Zentrat</b>	kg/m <sup>3</sup>	9,6	9,6	11,4 (12,9)	10,0 (10,3)	9,0
<b>P im Zentrat</b>	g/m <sup>3</sup>	223	223	664 (6713)	696 (3420)	297
<b>CH<sub>4</sub>-Ertrag Filtrat</b>	NL/kg CSB <sub>in</sub>	-	207	206 (113)	220 (189)	204
<b>Abbaugrad CSB im Filtrat</b>	%	-	56	56	60	55

Werte in Klammern: Varianten mit Ansäuerung

<sup>1</sup> Abschätzung nach Herstellerangaben

Falls die verfügbare Abwärme des BHKW den Wärmebedarf des HTC-Reaktors nicht vollständig abdeckt, wird ein Spitzenlastkessel mit Erdgas (95% Wirkungsgrad thermisch) eingesetzt. N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktoren des Brenners sind mit dem BHKW gleichgesetzt, zudem führt das Erdgas zu einer Emission von fossilem CO<sub>2</sub> (2,75 kg/kg Erdgas). Beim Szenario RUH mit Methanizer wird aus ökonomischen Erwägungen das BHKW zusätzlich mit Erdgas beschickt, um die Abwärme für den HTC-Prozess zu liefern.

Für die Variante mit separater Faulstufe („Methanizer“) für das HTC-Filtrat in RUH ist ein NH<sub>3</sub>-Stripper vorgeschaltet, um eine mögliche Hemmung der Faulung durch erhöhte NH<sub>4</sub>-N-Gehalte zu vermeiden. Es wird angenommen, dass der Stripper bei einem Strombedarf von 1,6 kWh/m<sup>3</sup> und einem Wärmebedarf von 9 kWh/m<sup>3</sup> hat, sowie 90% des NH<sub>4</sub>-N entfernt<sup>14</sup>. Nur 50% dieser Wärme müssen extern bereitgestellt werden, da das Filtrat schon mit erhöhter Temperatur aus der Kammerfilterpresse kommt. Der Bedarf an NaOH (50%) zur

<sup>14</sup> DWA (2005): Arbeitsbericht: Rückbelastung aus der Schlammbehandlung - Verfahren zur Schlammwasserbehandlung. Korrespondenz Abwasser, Abfall 52 (6), 737.

pH-Anpassung wird auf 4 kg/kg NH<sub>4</sub>-N geschätzt, der Bedarf an H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (37,5%) zur Aufnahme des NH<sub>3</sub> auf 3,8 kg/kg NH<sub>4</sub>-N. Das entstehende Ammoniumsulfat kann als Mineraldünger verwendet werden.

### **HTC-Prozess auf Basis der Pilotversuche und für alternative Verfahren (AVA-CO2)**

Zum Vergleich mit den Bilanzen der Laborversuche werden die Daten der großtechnischen Pilotversuche mit den Klärschlämmen aus WAS und SCHÖ genutzt (Tabelle 7). Strom- und Wärmebedarf, TR-Ausbeute, TR des hochentwässerten Klärschlammes und Filtratqualität sowie Faulgasertrag sind aus den Versuchsdaten übernommen.

**Tabelle 7: Parameter der HTC-Szenarien basierend auf den Ergebnissen der Pilotversuche WAS und MÜN und für alternative Verfahren in WAS (nach Herstellerangaben AVA-CO2)**

		WAS Pilot	MÜN Pilot	WAS AVA-CO2 <sup>1</sup>
<b>Strombedarf HTC</b>	kWh/m <sup>3</sup>	16	17	21
<b>Wärmebedarf HTC</b>	kWh/m <sup>3</sup>	106	121	133
<b>TR-Ausbeute</b>	%	68	83,1	86,4
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (96%)</b>	kg/Mg TS	55,2	119,6	11,5
<b>Strombedarf Kammerfilterpresse</b>	kWh/m <sup>3</sup>	1,6	1,6	1,6
<b>TR im entwässerten Klärschlamm</b>	% TR	44,2	51,0	70
<b>CSB im Filtrat</b>	kg/m <sup>3</sup>	94	83	6,3
<b>CSB refraktär im Filtrat</b>	kg/m <sup>3</sup>	23,6	19,0	k.A.
<b>N im Zentrat</b>	kg/m <sup>3</sup>	12,9	10,8	1,0
<b>P im Zentrat</b>	g/m <sup>3</sup>	6553	460	1,6
<b>CH<sub>4</sub>-Ertrag Filtrat</b>	NL/kg CSB <sub>in</sub>	151	145	333
<b>Abbaugrad CSB im Filtrat</b>	%	40,8	39,2	90

<sup>1</sup> Herstellerangaben

Für einen Verfahrensvergleich sind ebenfalls Daten des Anbieters AVA-CO2 bilanziert worden (Tabelle 7). Diese Daten beruhen auf einer Prognose des Herstellers für den Klärschlamm WAS und sind nicht im Versuch nachgewiesen worden.

### **Wärmebilanzen**

Die Wärmebilanzen der Klärwerke sind für die Energiebilanz des HTC-Prozesses entscheidend, da die verfügbare Abwärme aus dem BHKW für den HTC-Prozess genutzt

wird. Dabei ist zu beachten, dass die BHKW-Abwärme sowohl über den Kühlkreislauf (90°C, ca. 55% der Abwärme) als auch im Abgas (450°C, 45% der Abwärme) anfällt. Während einige Verbraucher auf der Kläranlage beide Temperaturniveaus nutzen können, ist der HTC-Prozess auf Abwärme im Hochtemperaturbereich >200°C angewiesen.

Aus dem Faulgasanfall (Klärschlamm + HTC-Filtrat) wird über den thermischen Wirkungsgrad die verfügbare Abwärme auf beiden Temperaturniveaus berechnet. Nach Abzug der sonstigen Verbraucher (Faulturmheizung, Prozesswasserbehandlung, Stripper, sonstige Verbraucher) wird die Überschusswärme für den HTC-Prozess genutzt, sofern sie theoretisch auf Hochtemperaturniveau verfügbar ist. Für die Klärwerke WAS und MÜN liegen tagesgenaue Angaben zur relativen Häufigkeit einer bestimmten verfügbaren Überschusswärme der BWB vor. Daraus lässt sich unter Einbeziehung der zusätzlichen Abwärme durch das Faulgas des Filtrats ("mit HTC") die tatsächlich nutzbare Abwärme für den HTC-Prozess berechnen. Für das Klärwerk SCHÖ gibt es keine Angaben zur anfallenden Überschusswärme im Referenzzustand, da hier das Faulgas in der Praxis überwiegend zur Schlamm-trocknung eingesetzt wird (hier nicht betrachtet).

Die Abdeckung des Wärmebedarfs der HTC-Anlage beträgt je nach Klärwerk zwischen 91-97%. Der restliche Wärmebedarf wird über Erdgas gedeckt. Für RUH wird 100% der Wärme für den HTC-Prozess über Erdgas bereitgestellt, entweder über Erdgasbrenner oder über BHKW (mit Methanizer und Erdgas)

#### **Entsorgung des entwässerten Klärschlamm**

Der entwässerte Klärschlamm wird per LKW zur Verbrennungsanlage transportiert (Transportentfernung geschätzt nach Tabelle 8) und anschließend verbrannt. Die entstehende Asche und der Gips der Rauchgasreinigung werden per LKW auf die Deponie verbracht (52km für KSVa Ruh, 28km für KSVa neu, 30km für Kraftwerk). Standorte der Verbrennungsanlagen sind RUH (KSVa Ruh), WAS (Annahme für KSVa neu und HTC Mono) und Lippendorf (Kraftwerk).

Mengen, TR-Gehalt und Heizwerte der entwässerten Schlämme im Referenzzustand und in den HTC-Szenarien sind in Tabelle 9 aufgeführt. Die aufgeführten Heizwerte stellen den nutzbaren Energiegehalt der Klärschlämme dar, wobei der Wassergehalt schon einberechnet ist. Für die theoretische Berechnung des Szenarios WAS mit dem AVA-CO<sub>2</sub>-Verfahren ergibt sich eine Klärschlammmenge von 28351 Mg/a (70% TR, 63,9% GV) mit einem Heizwert von 9,9 MJ/kg.

**Tabelle 8: Transportentfernung zur Verbrennung**

Entsorgungsweg		RUH	WAS	SCHÖ	MÜN
<b>KSVa Ruh</b>	km	0	33	28	34
<b>KSVa neu</b>	km	33	0	42	22
<b>Kraftwerk</b>	km	189	181	215	217
<b>HTC Mono</b>	km	50	0	50	50
<b>HTC Kraftwerk</b>	km	200	200	200	200

Tabelle 9: Berechnete Mengen und Heizwerte des entwässerten Klärschlammes

		RUH	RUH mit Faulung <sup>1</sup>	WAS	WAS Pilot	SCHÖ	MÜN	MÜN Pilot
<b>Referenzzustand</b>								
Menge	Mg OS/a	162.556	110.967	85.071	85.071	54.259	19.120	19.120
TR	%	28,4	26,0	27,0	27,0	24,7	26,9	26,9
Glühverlust	%	74,2	58,7	70,6	70,6	63,5	52,8	52,8
Heizwert H <sub>u</sub>	MJ/kg	3	1,6	2,5	2,5	1,7	1,4	1,4
<b>HTC-Szenarien</b>								
Menge	Mg OS/a	47.151	-	24.309 (21.755)	35.337	15.118 (14.037)	5.709	8.381
TR	%	75	-	65 (70)	44,2	65 (70)	65	51
Glühverlust	%	73,3	-	63,9 (62,1)	58,3	55,6 (55,6)	45,5	46,4
Heizwert H <sub>u</sub>	MJ/kg	11,3	-	8,9 (9,3)	4,6	8,5 (9,1)	7,5	4,7

Werte in Klammern: Varianten mit Ansäuerung

<sup>1</sup> Annahmen

Die Nutzung des verfügbaren Heizwerts der Klärschlämme geschieht über eine Produktion von Strom mit den definierten Netto-Wirkungsgraden für Mono- und Mitverbrennung (Tabelle 10). Für die KSVa Ruhleben wird abhängig vom Heizwert des Klärschlammes eine Stützfeuerung benötigt, die nach Angaben der BWB abgeschätzt wird mit der Annahme, dass die Summe des Brennstoffeintrags (Heizwert Klärschlamm + Heizwert Heizöl) konstant sein muss. Daraus ergibt sich für die Klärschlämme eine spezifische Heizölmenge zwischen 20 und 147 kg/Mg TS. Für die Entsorgung in der neuen KSVa wird nur ein geringer konstanter Erdgasbedarf zum An- und Abfahren des Prozesses angesetzt. Es ist zu beachten, dass momentan noch keine geeignete Anlage zur Monoverbrennung von HTC-Produkt existiert und auch die Kraftwerke ihre Annahmesysteme ggf. an die Brennstoffeigenschaften der HTC-Produkte anpassen müssen.

Die N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktoren für Monoverbrennung<sup>15</sup> und Mitverbrennung<sup>16</sup> sind aus der Literatur entnommen (Tabelle 10). Die tatsächlichen N<sub>2</sub>O-Emissionen in der KSVa Ruh werden derzeit in einem Forschungsvorhaben des UBA geprüft und sind Ende 2016

<sup>15</sup> IPCC (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories -Volume 5: Waste, Chapter 5: Incineration and open burning of waste. IGES, Japan.

<sup>16</sup> Svoboda, K., Baxter, D. and Martinec, J. (2006): Nitrous oxide emissions from waste incineration. Chemical Papers 60 (1), 78-90.

verfügbar. Für die Rauchgasreinigung fällt für die Monoverbrennung ein Bedarf an CaO, Harnstoff (40%) und Aktivkohle an (Angaben der BWB), der auch für die Monoverbrennung der HTC-Produkte angesetzt wird. Für die Kraftwerke wird vereinfacht ein Bedarf an CaO angesetzt.

**Tabelle 10: Eingabedaten für die Entsorgungswege für Brennstoffbedarf, Stromproduktion, N<sub>2</sub>O-Emissionen, und Abgasreinigung**

		KSVA Ruh	KSVA neu	Kraftwerk	HTC Mono	HTC Kraftwerk
<b>Bedarf Heizöl</b>	kg/Mg TS	20-147 <sup>1</sup>	-	-	-	-
<b>Bedarf Erdgas</b>	MJ/Mg TS	-	50 <sup>2</sup>	-	-	-
<b>Wirkungsgrad elektrisch (netto)</b>	% des H <sub>u</sub>	4,8	9,7	33,1	20 <sup>2</sup>	33,1
<b>N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktor<sup>3</sup></b>	g/Mg TS	990	990	100	100	100
<b>Bedarf CaO (100%)</b>	kg/Mg TS	21	17	17	17	17
<b>Bedarf Aktivkohle</b>	kg/Mg TS	1,2	0,8	-	0,8	-
<b>Bedarf Harnstoff (40%)</b>	kg/Mg TS	-	15	-	15	-

<sup>1</sup> Berechnung über Schlammheizwert (H<sub>w</sub>) und Mindestheizwert des Gesamtinputs Klärschlamm + Heizöl

<sup>2</sup> Schätzung

<sup>3</sup> nach Literaturangaben (siehe Text)

### **Hintergrunddaten und Gutschriften**

Alle relevanten Hintergrundprozesse werden über Datensätze aus der ecoinvent-Datenbank v2.217 abgebildet (Tabelle 11). Für einzelne Produkte sind nur Datensätze ähnlicher Produkte verfügbar, die als Näherung benutzt werden. Für den Strommix in Deutschland ist der Energiemix 2010 angesetzt worden (24,5% Braunkohle, 22,6% Kernkraft, 18,3% Steinkohle, 12,9% Erdgas, 6,3% Windkraft, 4,2% Biomasse, 3,2% Wasserkraft, 2,1% Heizöl, 1% Photovoltaik, 4,9% sonstige), der im Modell ein Treibhauspotential von 620 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh erzeugt (zum Vergleich: der Strommix 2014 hatte ein geschätztes Treibhauspotential von 569 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh<sup>18</sup>). Im Vergleich hat der Strom aus Braunkohle mit 1,22 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh ein deutlich höheres Treibhauspotential.

Für die Gutschriften des erzeugten Stroms in der Monoverbrennung wird der Strommix D2010 angesetzt, während für die Mitverbrennung im Braunkohlekraftwerk der Strom aus Braunkohle ersetzt wird. Dies folgt der Argumentation, dass bei Verbrennung des Klärschlammes im Braunkohlekraftwerk direkt der Brennstoff Braunkohle durch den

<sup>17</sup> Ecoinvent (2010): *Ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-26, Swiss Center for Life Cycle Inventories, www.ecoinvent.org*. Dübendorf, Switzerland.

<sup>18</sup> UBA (2015): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2014. Umweltbundesamt, Dessau.

Brennstoff Klärschlamm ersetzt wird<sup>19</sup>. Hinsichtlich dieser Gutschrift wird für die Mitverbrennung eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der sowohl Braunkohlestrom (Referenz) als auch der Strommix D2010 gutgeschrieben wird, um die Auswirkungen dieser Annahme auf das Gesamtergebnis zu untersuchen.

**Tabelle 11: Datensätze für Hintergrundprozesse und Gutschriften**

Module	Datensatz	Bemerkung
<b>Strom</b>	Strommix in Deutschland 2010	Modellierung <sup>1</sup>
<b>Erdgas</b>	Erdgas, Hochdruck, an Abnehmer [DE]	Für Erdgasbrenner, BHKW und KSVa neu
<b>Heizöl</b>	Heizöl EL, ab Regionallager [RER]	Für KSVa Ruh
<b>Polymer</b>	Acrylonitril, Sohioprozess, ab Werk [RER]	Näherung
<b>MgCl<sub>2</sub></b>	Nutzwärme, Erdgas, ab Industriefeuerung, LowNOx>100kW [RER]	1'100 MJ/m <sup>3</sup> MgCl <sub>2</sub> (30%) zur Eindampfung
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Schwefelsäure, flüssig, ab Werk [RER]	
<b>NaOH</b>	Natriumhydroxid, 50% in H <sub>2</sub> O, Produktionsmix, ab Werk [RER]	Für Stripper
<b>Harnstoff</b>	Harnstoff, als N, ab Regionallager [RER]	Für Abgasreinigung
<b>CaO</b>	Kalk, gebrannt, gemahlen, lose, ab Werk [CH]	Für Abgasreinigung
<b>Aktivkohle</b>	Holzkohle, ab Werk [GLO]	Für Abgasreinigung (Näherung)
<b>Transport LKW</b>	Transport, Lkw 16-32t, EURO4 [RER]	
<b>Deponie Asche</b>	Entsorgung, Sonderabfall, 0% Wasser, in Untertagedeponie [DE]	
<b>Deponie Gips</b>	Entsorgung, Gips, 19.4% Wasser, in Inertstoffdeponie [CH]	
<b>Gutschriften</b>		
Strom	Strommix D2010	Modellierung <sup>1</sup>
Strom aus Braunkohlekraftwerk	Braunkohle, in Kraftwerk [DE]	Gutschrift Mitverbrennung
P als Mineraldünger	Triple-Superphosphat, als P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ab Regionallager [RER]	Für Struvit
N als Mineraldünger	Ammoniumnitrat, als N, ab Regionallager [RER]	Für Struvit und NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>

<sup>1</sup> eigene Berechnungen nach BMWi (2010): Energiedaten. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin,

<sup>19</sup> IFEU (2002): Ökobilanzielle Betrachtung von Entsorgungsoptionen für Klärschlamm im Land Schleswig-Holstein. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein, Heidelberg, Germany.

### 4.3 Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanz

Dieser Abschnitt beschreibt die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanz in folgender Reihenfolge:

- 1) Auswirkungen eines HTC-Prozesses mit und ohne Ansäuerung am Beispiel der Klärwerke WAS und SCHÖ (Daten Laborversuche)
- 2) Gesamtbilanzen der Klärwerke RUH, WAS, SCHÖ und MÜN (Daten Laborversuche)
- 3) Sensitivitätsanalyse: gleiche Stromgutschrift für Mono- und Mitverbrennung
- 4) Vergleich der Verfahren Terranova und AVA-CO<sub>2</sub> am Beispiel WAS
- 5) Vergleich der Bilanzen aus Labor- und Pilotversuchen für WAS und MÜN
- 6) Zusammenfassung

#### 4.3.1 Auswirkungen der HTC mit und ohne Ansäuerung

Um die Auswirkungen des HTC-Prozesses auf die Energie- und Klimabilanz der Klärwerke prinzipiell darzustellen, ist eine Differenzbetrachtung nützlich. Dazu werden die Ergebnisse von Referenzzustand und den jeweiligen HTC-Szenarien für Mono- bzw. Mitverbrennung verglichen, damit nur die zusätzlichen Auswirkungen des HTC-Prozesses sichtbar werden. Dabei werden die folgenden Szenarien miteinander verglichen:

- (Referenzzustand + KSWA neu) mit (HTC + HTC Mono)
- (Referenzzustand + Kraftwerk) mit (HTC + Kraftwerk)

Diese Veränderungen in der Energiebilanz durch Einführung des HTC-Prozesses sind beispielhaft für die Klärwerke WAS und SCHÖ in Abbildung 17 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Einführung des HTC-Prozesses auf beiden Klärwerken zu einer Verbesserung der Energiebilanz führt. Das liegt sowohl am zusätzlich erzeugten Faulgas (Gutschrift Strom BHKW) als auch an dem besseren Heizwert des hochentwässerten Klärschlammes (Gutschrift Strom Verbrennung bzw. Gutschrift Kohle). Der verbesserte Heizwert macht sich vor allem bei der Monoverbrennung bemerkbar, der Vorteil bei der Mitverbrennung ist nicht so deutlich. Dafür spielt bei der Mitverbrennung der eingesparte Transport des Klärschlammes (> 180km) durch die verringerte Transportmasse nach HTC eine größere Rolle.

Die zusätzlichen Aufwendungen für den HTC-Prozess sind im Vergleich zu den Gutschriften relativ gering. Hier ist vor allem die zusätzliche Rückbelastung des Klärwerks von Bedeutung, sowohl bei der separaten Prozesswasserbehandlung als auch nachfolgend im Hauptstrom der Kläranlage. Der Energieverbrauch des HTC-Prozesses spielt nur eine untergeordnete Rolle für die Bilanz. Insgesamt führt die Einführung des HTC-Prozesses auf diesen Klärwerken zu einer Energieeinsparung im Gesamtsystem von -1250 bis -3071 MJ/Mg TS je nach Klärwerk und Entsorgungsweg.

Die Ansäuerung während des HTC-Prozesses beeinflusst die Qualität des HTC-Filtrats und damit vor allem den zusätzlichen Faulgasertrag. Nach den Ergebnissen der Laborversuche ist mit Ansäuerung eine geringere CSB-Belastung des Filtrats und vor allem ein geringerer relativer Faulgasertrag zu erwarten (vgl. Tabelle 6). Dadurch verschlechtert sich für alle Varianten die Energiebilanz der Varianten mit Ansäuerung, da zusätzlich noch die benötigte Säure bereitzustellen ist.

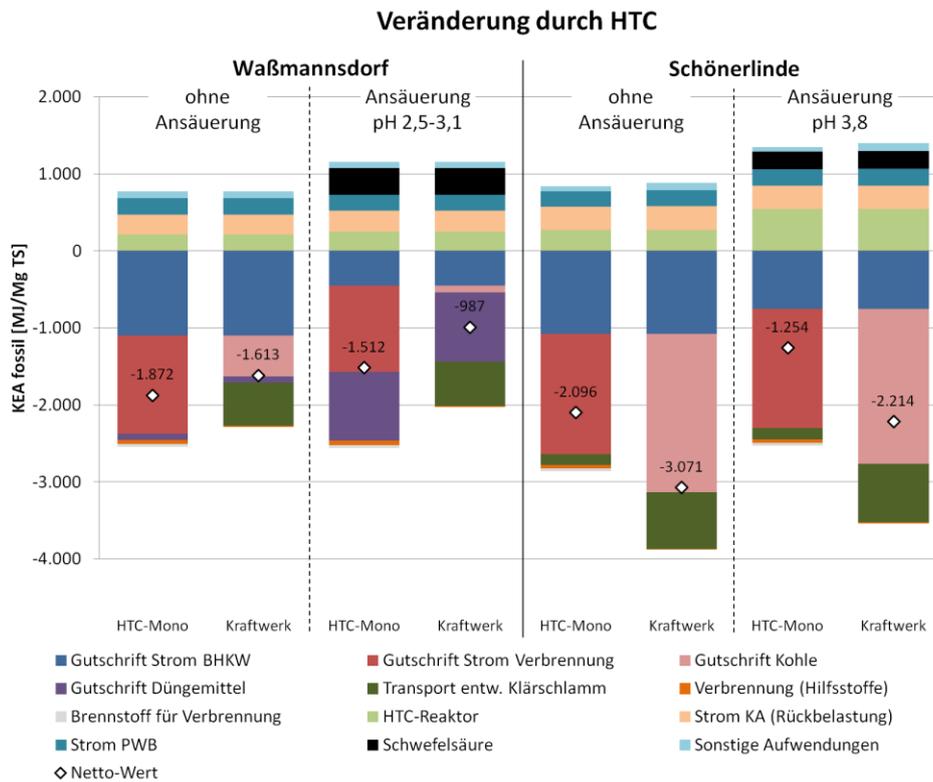
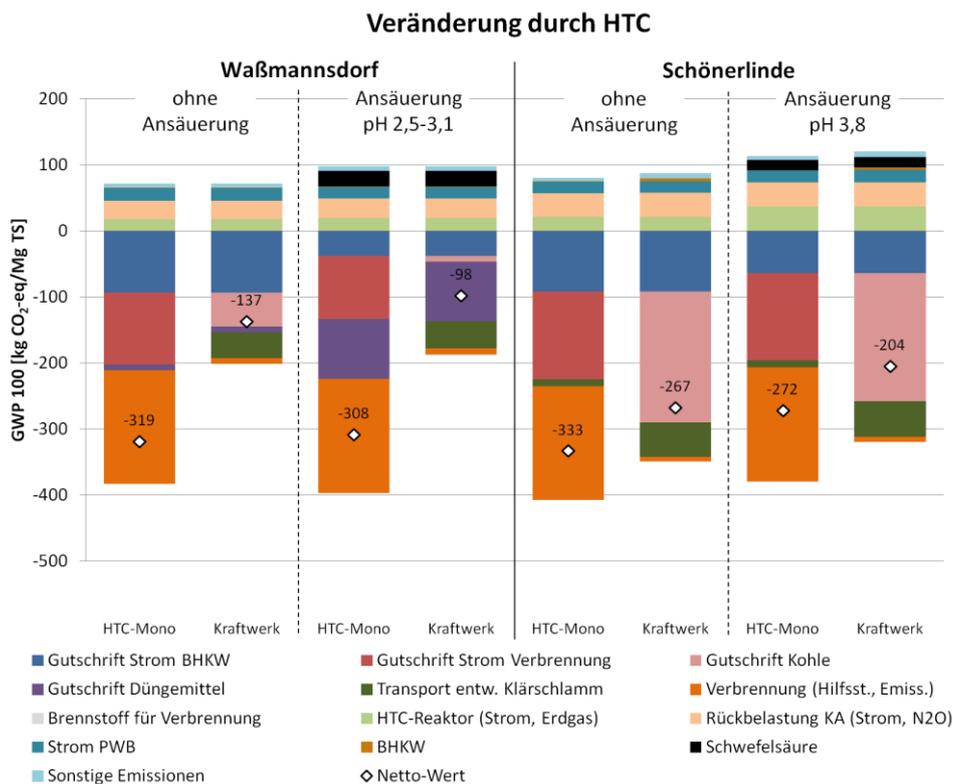


Abbildung 17: Auswirkungen einer HTC-Behandlung auf die Energiebilanz der KW WAS und SCHÖ (Differenz zum Grundzustand) mit und ohne Ansäuerung im Prozess

Vergleichbare Effekte sind auch in der Klimabilanz zu erkennen (Abbildung 18): hier sind die Vorteile der HTC neben dem zusätzlichen Faulgas und der verbesserten Gutschrift in der Verbrennung auch durch reduzierte N<sub>2</sub>O-Emissionen besonders bei der Monoverbrennung gekennzeichnet. Daher sind diese Varianten im Nettoeffekt deutlich positiver (-271 bis -333 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS) als die Varianten mit Mitverbrennung (-137 bis -267 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS). Im Klärwerk SCHÖ macht sich zudem die hohe TR-Ausbeute im HTC-Prozess bemerkbar, die zu einer hohen nutzbaren Gesamtheizwert in der Verbrennung führt.

Erneut zeigen die Varianten mit Ansäuerung, dass die Klimabilanz durch diesen Verfahrensschritt vergleichbar ist (WAS) oder sogar verschlechtert wird (SCHÖ). In SCHÖ führt die Ansäuerung dazu, dass durch den niedrigeren Faulgasertrag aus dem Filtrat auch die zusätzlich verfügbare Abwärme für den HTC-Prozess absinkt, so dass mehr Erdgas genutzt werden muss und der Energieverbrauch für den HTC-Prozess ansteigt.

Die Bilanzen des Klärwerks MÜN zeigen im Prinzip die gleichen Effekte. Aufgrund dieser Analyse und dem Vergleich von HTC-Varianten mit und ohne Ansäuerung werden im Folgenden nur noch die nicht angesäuerten Varianten aufgeführt, da sie eine vergleichbare oder bessere Energie- und Klimabilanz aufweisen als die Varianten mit Ansäuerung. Die positiven Effekte der Ansäuerung (höherer TR in der Kammerfilterpresse) werden durch die negativen Effekte (geringerer Faulgasertrag aus dem Filtrat, Bedarf an Schwefelsäure) überlagert, so dass eine Ansäuerung im Hinblick auf Energie- und Klimabilanz nicht vorteilhaft erscheint.



**Abbildung 18: Auswirkungen einer HTC-Behandlung auf die Klimabilanz der KW WAS und SCHÖ (Differenz zum Grundzustand) mit und ohne Ansäuerung im Prozess**

#### 4.3.2 Gesamtbilanzen auf Basis der Laborversuche

Zum Vergleich aller untersuchten Klärwerke und Varianten werden die Nettowerte der Energie- und Treibhausgasbilanz in einer Übersicht gezeigt (Abbildung 19 und Abbildung 20). Folgende Punkte können daraus abgelesen werden:

- Bei den Entsorgungswegen der Referenz wird deutlich, dass sich die Energie- und Klimabilanzen in folgender Reihenfolge verbessern: KSWA Ruh < KSWA neu < Kraftwerk. Diese Einordnung beruht auf den ansteigenden Netto-Wirkungsgraden der Stromerzeugung und in der Klimabilanz auf den geringeren N<sub>2</sub>O-Emissionen der Mitverbrennung im Kraftwerk.
- Alle HTC-Varianten führen zu einer Verbesserung der Energie- und Klimabilanz der jeweiligen Klärwerke und Entsorgungswege, wobei die spezifischen Annahmen dieser Studie (Entwässerungsgrad, Energierückgewinnung der Entsorgungswege, N<sub>2</sub>O-Emissionen) zu beachten sind. Bei nicht vorhandener Faulung (RUH) zeigt sich der Vorteil erst deutlich mit Einführung einer separaten Faulstufe für das Filtrat der HTC. In der Klimabilanz ist der Vorteil der HTC gerade bei der Monoverbrennung sehr ausgeprägt, da die N<sub>2</sub>O-Emissionen für eine HTC-Monoverbrennung deutlich geringer angesetzt wurden (vgl Tabelle 10).
- Im Vergleich der Klärwerke mit Faulung schneidet WAS am besten ab, danach folgen SCHÖ und MÜN. Diese Unterschiede lassen sich vor allem auf den organischen Anteil des Klärschlamm zurückführen, der sowohl den Faulgasertrag als auch den Heizwert des entwässerten Klärschlamm beeinflussen. Das Klärwerk RUH ohne Faulung liegt bei der Monoverbrennung im unteren Bereich, bei der Mitverbrennung ist es vergleichbar mit WAS.

- Die Einführung einer Faulung im Klärwerk RUH bietet Vorteile bei einer anschließenden energieeffizienten Monoverbrennung des Klärschlammes, bei einer Mitverbrennung ergeben sich hier keine Vorteile gegenüber der Referenz ohne Faulung.

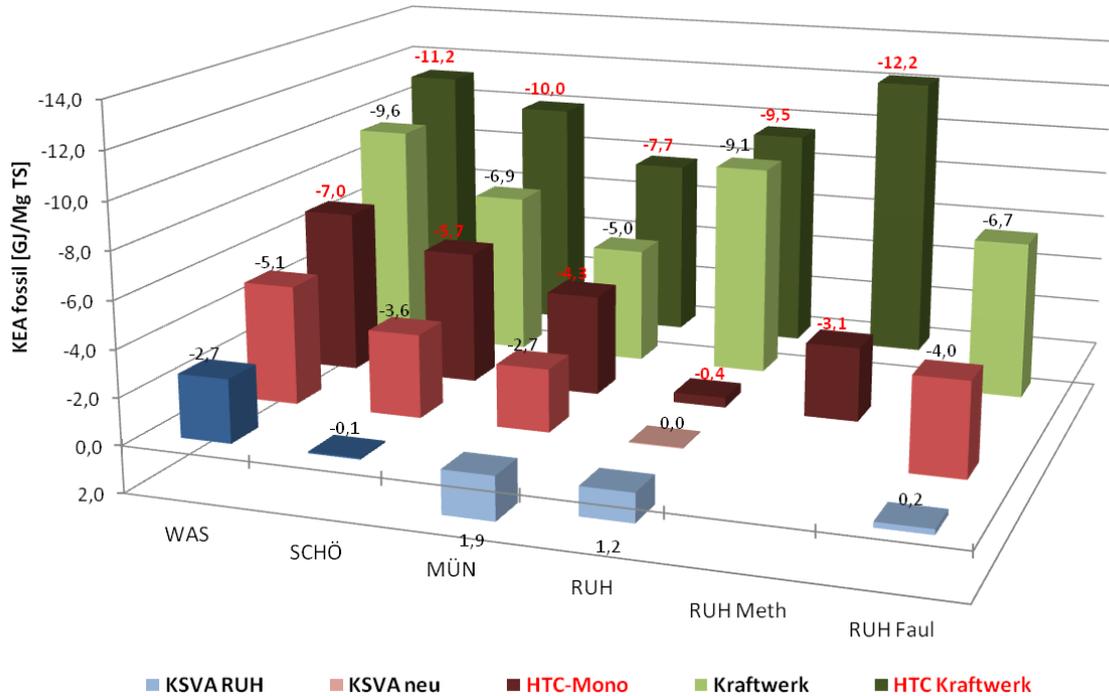


Abbildung 19: Netto-Energiebilanz der Klärschlamm Entsorgung aller Klärwerke für verschiedene Entsorgungswege (invertierte Achse)

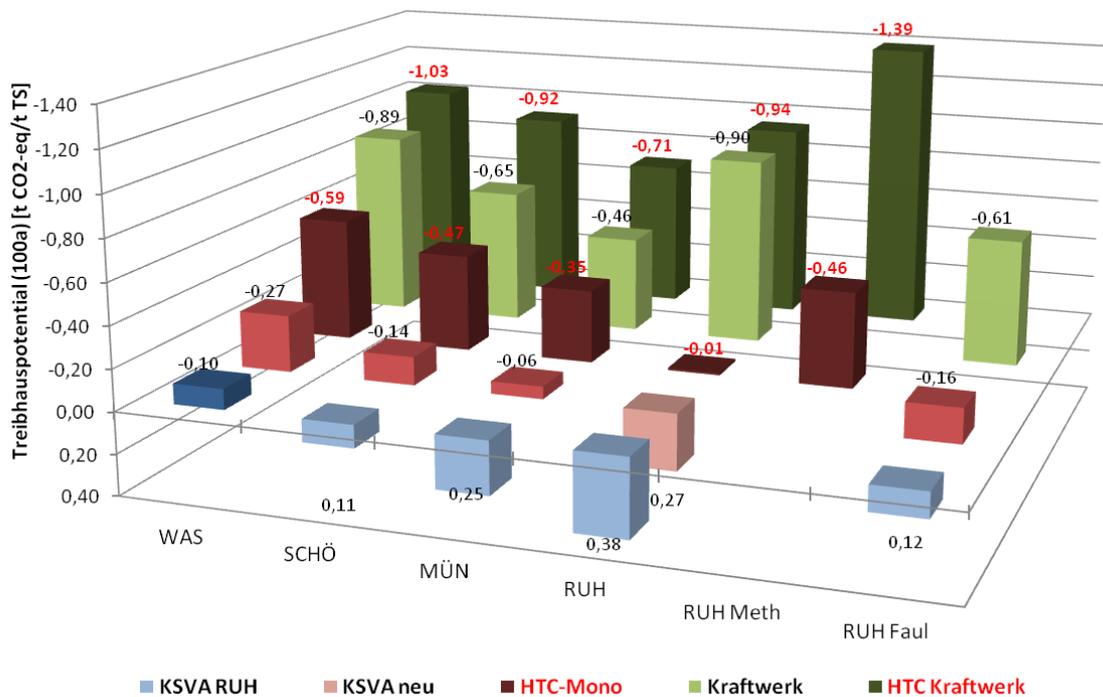


Abbildung 20: Netto-Klimabilanz der Klärschlamm Entsorgung aller Klärwerke für verschiedene Entsorgungswege (invertierte Achse)

### 4.3.3 Sensitivität der Stromgutschrift in der Mitverbrennung

In der gezeigten Bilanzierung wird der produzierte Strom bei der Klärschlammverbrennung mit unterschiedlichen Gutschriften belegt: während der produzierte Strom in der Monoverbrennung den Strommix D2010 ersetzt, wird für die Mitverbrennung im Braunkohlekraftwerk direkt der Braunkohlestrom angesetzt (vgl. Kapitel 4.2). Dieser Braunkohlestrom hat einen hohen fossilen Energieaufwand und ein hohes Treibhausgaspotential, wodurch die Mitverbrennung in der Energie- und Klimabilanz besser abschneidet.

Wenn für beide Verbrennungswege die gleiche Gutschrift des Strommixes D2010 angesetzt wird, wird die Energie- und Klimabilanz der Varianten mit Mitverbrennung entsprechend schlechter. Die Klimabilanz wird durch die veränderte Gutschrift schlechter, um +0,17 bis +0,33 t CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS für die Klärwerke mit Faulung und +0,57 bis +0,68 t CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS für das Klärwerk RUH ohne Faulung (Abbildung 21).

Trotz der verringerten Gutschrift der Mitverbrennung zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass bei Ansatz gleicher Stromgutschriften für Mono- und Mitverbrennung der Vorteil der Mitverbrennung in Energie- und Klimabilanz bestehen bleibt. Durch den höheren Netto-Wirkungsgrad der Mitverbrennung (33,1%) im Vergleich zu bestehender (4,8%) oder neuer KSWA (9,6%) ist die Mitverbrennung immer noch der beste Weg aus Energie- und Klimasicht. Bei der Klimabilanz kommt der Mitverbrennung der Vorteil einer Vermeidung von hohen N<sub>2</sub>O-Emissionen in der Monoverbrennung zusätzlich zugute.

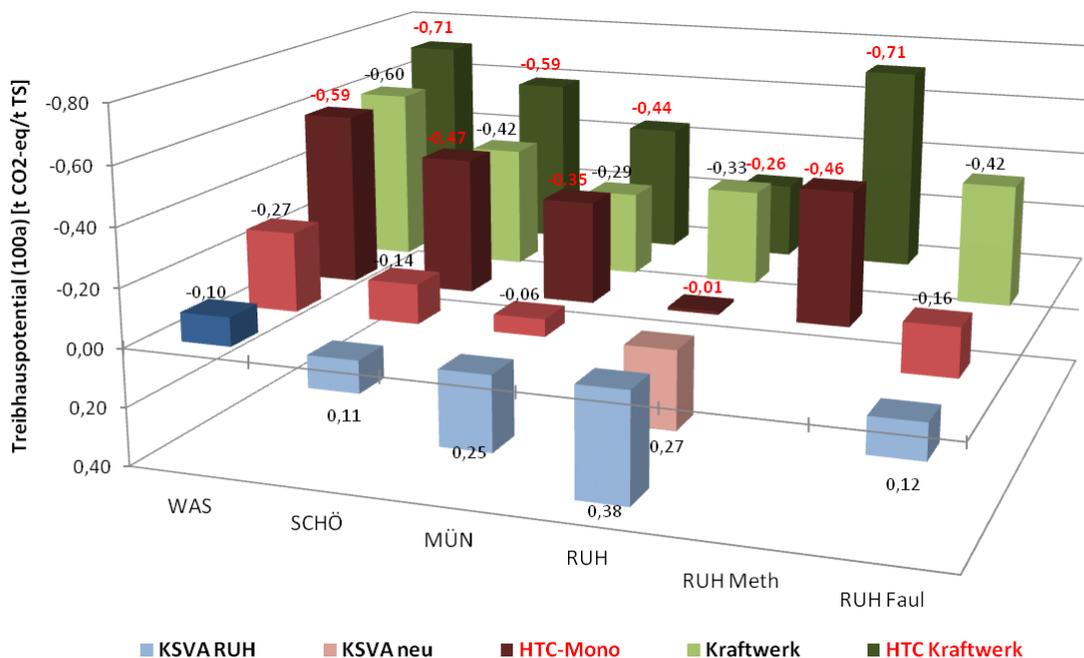


Abbildung 21: Netto-Klimabilanz der Klärschlamm Entsorgung aller Klärwerke für verschiedene Entsorgungswege (invertierte Achse) mit Gutschrift von gleichem Strommix für Mono- und Coverbrennung

### 4.3.4 Vergleich der HTC-Verfahren von Terranova und AVA-CO2

Die Bilanzierung des HTC-Prozesses erfolgt in dieser Studie mit dem Verfahren des Anbieters Terranova. Dieses Verfahren zeichnet sich durch seine kontinuierliche Prozessführung, die Wärmeübertragung über Wärmetauscher und die Wärmerückführung aus (Tabelle 12). Ein

alternatives Verfahren ist der Prozess des Anbieters AVA-CO<sub>2</sub>, der diskontinuierlich im Multi-Batch-Verfahren abläuft. Hier wird die erforderliche Wärme für den Prozess mittels Dampf-injektion übertragen, der nach Abschluss der HTC-Reaktion teilweise rückgewonnen und zum nächsten Batch übertragen wird. Zudem arbeitet das AVA-CO<sub>2</sub>-Verfahren mit einer mehrstufigen Membranfiltration des HTC-Filtrats, um so die Rückbelastung möglichst gering zu halten und die TR-Ausbeute zu erhöhen.

**Tabelle 12: Vergleich der Verfahren Terranova und AVA-CO<sub>2</sub> nach Herstellerangaben**

	Verfahren Terranova	Verfahren AVA-CO <sub>2</sub>
<b>Prozess</b>	Kontinuierlich	Multi-Batch
<b>Prozessbedingungen</b>	T = 180°C, t = 150 min	T = 210-220°C, t = 120-240 min
<b>TR im HTC-Reaktor</b>	bis 30%	ca. 12%
<b>Strombedarf<sup>1</sup> [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	12	21
<b>Wärmebedarf<sup>1</sup> [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	88	133
<b>Wärmequelle</b>	Wärmetauscher, Heizmantel mit Thermo-Öl	Dampf-injektion (150 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Wärmerückgewinnung</b>	Wärmetauscher mit Thermo-Öl (30-35%)	Abdampf von Reaktor 1 in Reaktor 2
<b>Prozesswasser</b>	Ableitung zum Faulturm	Mehrstufige Membranfiltration (UF + Nano), Rückführung in nächsten Batch
<b>Prozesswasser<sup>1</sup> (Beispiel)</b>	CSB: 92.500 mg/L NH <sub>4</sub> -N: 5.000 mg/L P: 1.650 mg/L	CSB: 5.400 mg/L NH <sub>4</sub> -N: 800 mg/L P: 1,6 mg/L
<b>TR-Ausbeute<sup>1</sup></b>	69%	86%
<b>TR der HTC-Kohle<sup>1</sup></b>	65%	70%

<sup>1</sup> Schätzung nach Hersteller

Im Vergleich der beiden HTC-Verfahren (hier beispielhaft mit den Daten des Klärwerks WAS) zeigt die Klimabilanz in der Differenzbetrachtung (Abbildung 22), dass beim AVA-CO<sub>2</sub>-Verfahren der Vorteil der HTC vor allem in dem erhöhten Heizwert des hochentwässerten Klärschlammes liegt. Durch die Membranfiltration des HTC-Filtrats wird der zusätzliche Faulgasertrag dieses Verfahrens deutlich verringert. Zudem wird für den Betrieb des HTC-Reaktors deutlich mehr Energie (Strom, aber auch Erdgas für Wärme) benötigt. Insgesamt führt das dazu, dass bei Entsorgung des HTC-Produkts in der Monoverbrennung das Terranova-Verfahren besser abschneidet (-319 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS) als AVA-CO<sub>2</sub> (-288 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS), während es für die Mitverbrennung umgekehrt ist. Hier hat AVA-CO<sub>2</sub> die höhere Gutschrift (-214 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS) im Vergleich mit Terranova (-137 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS), was an der hohen TR-Ausbeute und demzufolge dem hohen nutzbaren Heizwert liegt. Das AVA-CO<sub>2</sub>-Verfahren hat auch Vorteile durch den deutlich geringeren Aufwand für die Behandlung

der Rückbelastung im Klärwerk, verliert aber gleichzeitig den Bonus des zusätzlichen Faulgases aus dem HTC-Filtrat.

Insgesamt zeigt der Vergleich der beiden Verfahren die unterschiedlichen Vor- und Nachteile der Prozesse:

- Terranova bietet niedrigen Strom- und Wärmebedarf und hohes Faulgaspotential im Filtrat. Gleichzeitig liegt die TR-Ausbeute relativ niedrig, und die Rückbelastung zur Kläranlage ist vergleichsweise hoch.
- AVA-CO<sub>2</sub> hat höheren Strom- und Wärmebedarf und nur ein sehr geringes Faulgaspotential. Dieses Verfahren liefert aber eine hohe TR-Ausbeute und sehr geringe Rückbelastung zur Kläranlage, vermutlich auch geringeren refraktären CSB.

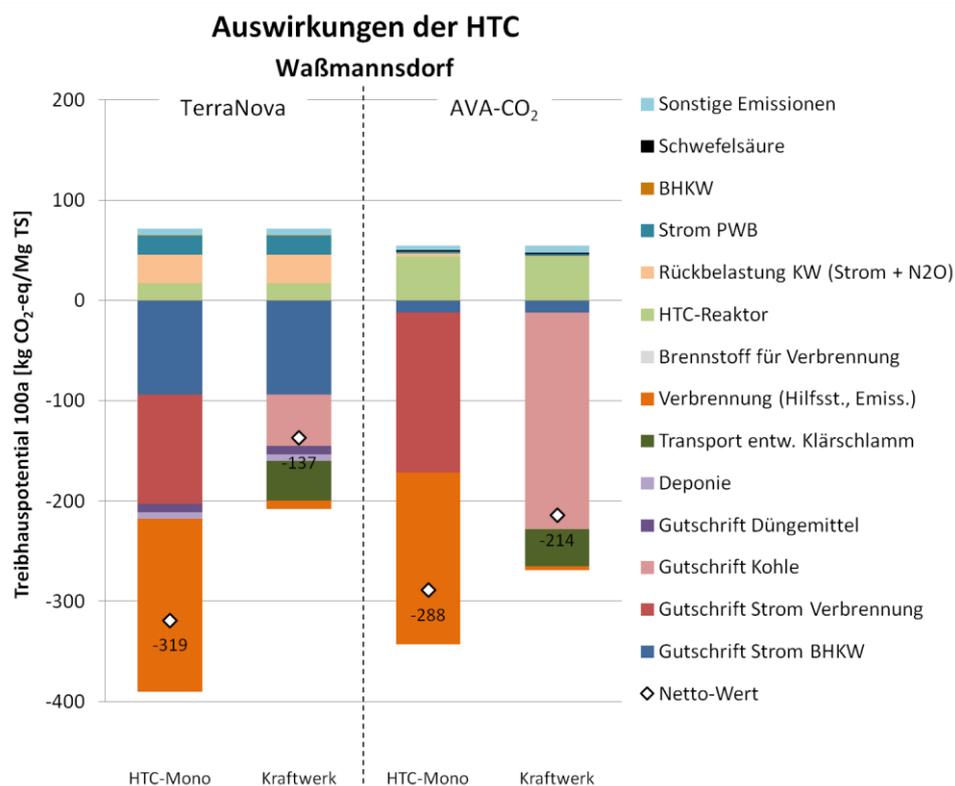


Abbildung 22: Auswirkungen eines HTC-Verfahrens im KW WAS auf die Klimabilanz (Differenz zum Grundzustand) für die Verfahren von Terranova und AVA-CO<sub>2</sub>

#### 4.3.5 Bilanzen für WAS und MÜN auf Basis des Pilotversuchs

Für die Klärwerke WAS und MÜN wurden neben den Laborversuchen auch ein technischer Pilotversuch auf der Versuchsanlage von Terranova realisiert. Dabei wurden erneut Daten für die wichtigen Bilanzparameter erhoben (vgl. Kapitel 3.3).

Zum Vergleich der Bilanzen aus Labor- und Pilotversuch werden die Ergebnisse der Differenzbetrachtung für die Klärwerke WAS und MÜN verglichen (Abbildung 23). Es wird deutlich, dass die Ergebnisse der Pilotversuche erheblich geringere Vorteile für den HTC-Prozess zeigen als durch die Laborversuche prognostiziert. In WAS sinkt der Vorteil der HTC bei Monoverbrennung auf -817 MJ/Mg TS um mehr als 50% gegenüber der Laborbilanz, während bei der Mitverbrennung sogar eine schlechtere Energiebilanz als im Referenzzustand erreicht wird (+494 MJ/Mg TS). Das liegt vor allem am schlechten Entwässerungsergebnis (44% TR) im Pilotversuch und an den niedrigeren Faulgaserträgen,

aber auch am gestiegenen Energiebedarf des HTC-Prozesses. Dieser macht sich im Klärwerk MÜN noch deutlicher bemerkbar, hier sind nur noch -345 MJ/Mg TS bei Monoverbrennung bzw. -1228 MJ/Mg TS bei Mitverbrennung zu erzielen. Durch den geringeren Wärmeüberschuss in MÜN ist die Einführung eines HTC-Prozesses mit geringem Faulgasertrag und hohem Wärmebedarf mit hohen Aufwendungen an Erdgas verbunden.

Gleiche Tendenzen lassen sich auch in der Klimabilanz wiederfinden (Abbildung 24): der Vorteil der HTC sinkt in WAS auf -235 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS bei Monoverbrennung, bei Mitverbrennung zeigt die Klimabilanz sogar eine deutliche Erhöhung (+51 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS) mit HTC. In MÜN bleiben auf Basis der Pilotversuche noch Gutschriften von -202 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS bei Monoverbrennung und -132 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg TS bei Mitverbrennung übrig.

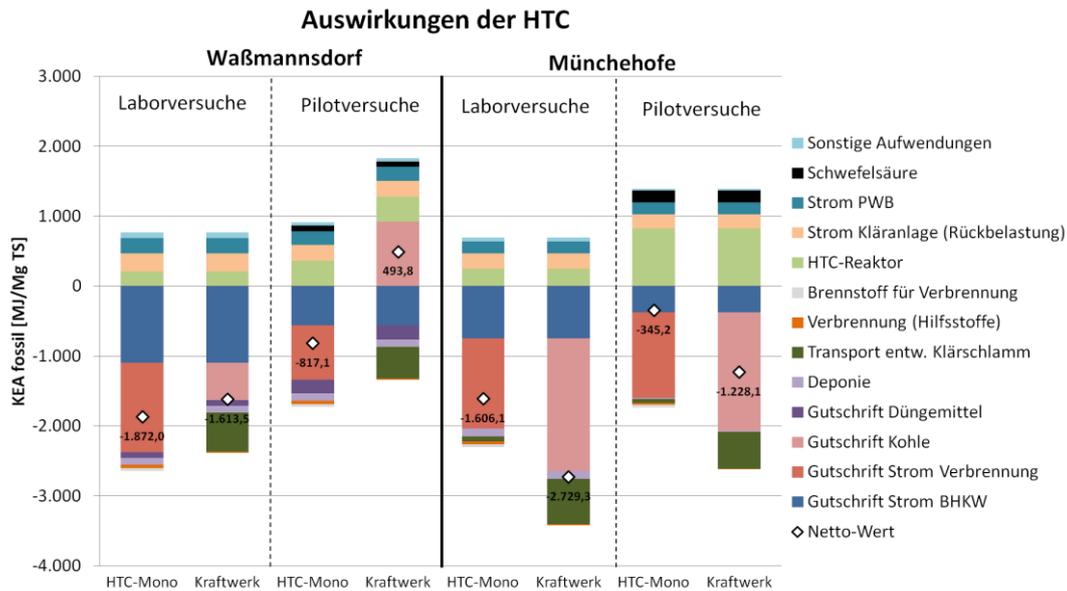


Abbildung 23: Auswirkungen eines HTC-Verfahrens in den KW WAS und MÜN auf die Energiebilanz (Differenz zum Grundzustand) mit Eingangsdaten der Labor- oder Pilotversuche

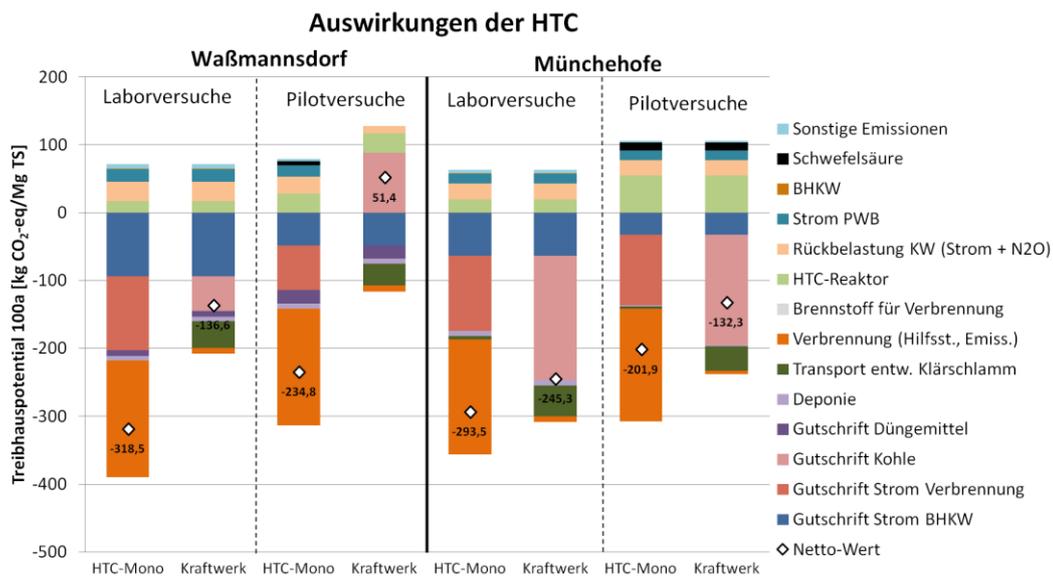


Abbildung 24: Auswirkungen eines HTC-Verfahrens in den KW WAS und MÜN auf die Klimabilanz (Differenz zum Grundzustand) mit Eingangsdaten der Labor- oder Pilotversuche

#### 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Energie- und Klimabilanz

Aus den vorgestellten Ergebnissen der Energie- und Klimabilanz lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die betrachteten Varianten der Verwertung und Entsorgung der Berliner Klärschlämme zeigen prinzipiell die Möglichkeit einer substantiellen Gutschrift der Energie- und Klimabilanz auf.
- Bei den Entsorgungswegen ist im Referenzzustand die Mitverbrennung der beste Weg, um Energie und Treibhausgasemissionen einzusparen. Das liegt am hohen Netto-Wirkungsgrad der Stromerzeugung im Braunkohlekraftwerk, aber auch an den niedrigeren N<sub>2</sub>O-Emissionen dieser Verbrennungstechnik. Die hohen N<sub>2</sub>O-Emissionen der Monoverbrennung müssen noch durch entsprechende Messungen validiert werden. Auch bei gleicher Stromgutschrift von Mono- und Mitverbrennung bleibt der Vorteil der Mitverbrennung bestehen.
- Die Einführung einer Faulung im Klärwerk Ruhleben bietet Vorteile in der Energie- und Klimabilanz bei anschließender Monoverbrennung (besonders bei hohem energetischem Wirkungsgrad in der KSWA neu). Für die Mitverbrennung ergeben sich keine Vorteile der Faulung.
- Die Einführung eines HTC-Verfahrens bietet für alle Szenarien Vorteile in der Energie- und Klimabilanz, wenn in der Bilanzierung die Laborergebnisse und die Herstellerangaben zu Energieverbrauch und Entwässerungsergebnis und die spezifischen Annahmen dieser Studie (N<sub>2</sub>O-Emissionen, Wirkungsgrad der Verbrennung) berücksichtigt werden. Dabei spielen vor allem das zusätzlich erzeugte Faulgas und der verbesserte Heizwert eine Rolle. Der Energiebedarf für den HTC-Prozess und die erhöhten Aufwendungen zur Behandlung der Rückbelastung werden durch die Gutschriften vollständig ausgeglichen. Der Wirkungsgrad der Monoverbrennung von hochentwässertem Klärschlamm nach der HTC muss noch validiert werden.
- Im Klärwerk RUH ohne Faulung erzielt die Einführung eines HTC-Prozesses nur mit separater Faulstufe für das HTC-Filtrat („Methanizer“) einen substantiellen Gewinn in Energie- und Klimabilanz.
- Der Vergleich der Verfahren von Terranova und AVA-CO<sub>2</sub> nach Herstellerangaben zeigt einen Vorteil des Terranova-Verfahrens für die Monoverbrennung (hoher Faulgasertrag), während das AVA-CO<sub>2</sub>-Verfahren für die Mitverbrennung vorteilhafter ist (hohe TR-Ausbeute, hoher Heizwert, geringe Rückbelastung).
- Die Ergebnisse der Pilotversuche liefern in der Energie- und Klimabilanz für die Klärwerke WAS und MÜN deutlich geringere Verbesserungen durch HTC, teilweise sogar Verschlechterungen (Mitverbrennung WAS). Das liegt vor allem am niedrigeren Faulgasertrag und am schlechteren Entwässerungsergebnis, aber auch am höheren Energieverbrauch des HTC-Prozesses im Vergleich zu den Herstellerangaben. Insgesamt zeigt die Bilanz auf Basis des Pilotversuchs, dass der HTC-Prozess noch nicht das prognostizierte Potential zur Verbesserung der Energie- und Klimabilanz liefern kann.

## Chapter 5

### Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden die grundlegenden Erkenntnisse der Studie zusammengefasst und diskutiert. Neben den Ergebnissen der Labor- und Pilotversuche und der Energie- und Klimabilanz werden auch weitere betriebliche Aspekte der Implementierung eines HTC-Verfahrens (refraktärer CSB, Phosphorrückgewinnung, Betriebskosten) anhand der gewonnenen Erkenntnisse erläutert. Abschließend werden Schlussfolgerungen aus der Studie gezogen.

#### 5.1 Ergebnisse der Labor- und Pilotversuche

Aus den Laborversuchen zur HTC und dem Pilotversuch mit der HTC-Anlage des Anbieters Terranova konnten folgende Ergebnisse abgeleitet werden:

- Die Laborversuche bestätigten die prinzipielle Wirkung der HTC-Behandlung auf die Berliner Klärschlämme. Die Qualität der entstehenden Produkte (hochentwässerter Klärschlamm, HTC-Filtrat) und die Massenbilanz liegen im erwarteten Bereich.
- Das Filtrat der HTC-Behandlung ist mit CSB und N hoch belastet. Im anaeroben Abbaubersuch zeigte sich eine gute Abbaubarkeit dieses CSB (39-60%) und ein entsprechend hoher Faulgasertrag ( $199-307 \text{ NL CH}_4/\text{kg oTR}_{\text{in}}$ ), der bei abgesenktem pH-Wert während der HTC signifikant niedriger ist als bei neutralem pH.
- Der verbleibende CSB im Filtrat nach anaerobem Abbau ist nachfolgend noch aerob abbaubar (Zahn-Wellens-Test). Als letztlich refraktärer Anteil verbleibt nach anaerobem und aeroben Abbau 7-14% des Anfangs-CSB im HTC-Filtrat (5,4-14 g/L)
- Durch Absenkung des pH-Werts in den Bereich  $\text{pH} = 4-6$  wird nur ein Teil des gebundenen Phosphors im Klärschlamm bei der HTC gelöst. Erst bei deutlich geringerem pH-Wert  $< 3$  kann bis zu ca. 50% des Phosphors rückgelöst werden.
- Schwermetalle gehen bei neutralem und leicht saurem pH-Wert ( $\text{pH} > 5$ ) während der HTC nur geringfügig in Lösung. Bei  $\text{pH} < 3$  lösen sich vermehrt Fe und Mn aus dem Klärschlamm sowie einige Schwermetalle.
- Der Vergleich von Labor- und Pilotversuchen hinsichtlich der Produkte bestätigt überwiegend die Vergleichbarkeit der Laborergebnisse mit den Ergebnissen der HTC-Pilotanlage. Einzelne Abweichungen (Phosphorrücklösung, Gasertrag) ließen sich nicht erklären. Damit können die Ergebnisse der Laborversuche für die Bilanzierung genutzt werden.
- Die Pilotversuche konnten weder die Betriebsstabilität noch die prognostizierte hohe Entwässerbarkeit nachweisen. Ein kontinuierlicher Betrieb war nicht gegeben, und die Entwässerbarkeit lag nur zwischen 44-55% TR.

#### 5.2 Ergebnisse der Energie- und Klimabilanz

Die Energie- und Klimabilanz der Klärschlamm Entsorgung der vier Berliner Klärwerke im Referenzzustand und mit Einführung eines HTC-Verfahrens hat folgende Ergebnisse aufgezeigt:

- Die Behandlung und thermische Entsorgung von Klärschlamm kann zu deutlichen Gutschriften in der Energie- und Klimabilanz führen.
- Mitverbrennung schneidet in der Energie- und Klimabilanz deutlich besser ab als Monoverbrennung, wobei die hohen N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktoren der Monoverbrennung zu überprüfen sind.
- Die Einführung eines HTC-Verfahrens bietet für alle geprüften Szenarien Vorteile in der Energie- und Klimabilanz sofern die betrachteten Entsorgungswege vorhanden sind (Daten der Laborversuche und Prozessdaten der Hersteller), vor allem durch das zusätzlich erzeugte Faulgas aus dem HTC-Filtrat (+16-19% zum Referenzzustand) und den verbesserten Heizwert des hochentwässerten Klärschlammes.
- Der Energiebedarf für den HTC-Prozess sowie die höhere Rückbelastung werden durch die Gutschriften vollständig ausgeglichen, auch weil der HTC-Prozess zu >90% durch vorhandene Abwärme betrieben werden kann. Der Wirkungsgrad der Monoverbrennung von hochentwässertem Klärschlamm nach der HTC muss noch validiert werden.
- Die Bilanz auf Basis der durchgeführten Pilotversuche zeigt, dass die hohen Potenziale der HTC hier nicht vollständig nachgewiesen werden konnten. Durch den schlechteren Faulgasertrag und die schlechte Entwässerbarkeit sind die Vorteile der HTC deutlich geringer geworden.

### 5.3 Weitere betriebliche Aspekte

#### 5.3.1 Refraktärer CSB

Bei der hohen Temperatur im HTC-Reaktor bilden sich vermehrt biologisch nicht-abbaubare organische Verbindungen, die als refraktärer CSB im HTC-Filtrat nach anaerobem und aerobem Abbau gemessen wurden (vgl. Kapitel 2.1.11). Wenn dieser refraktäre CSB über die Rückbelastung zum Klärwerk geleitet wird, kann er teilweise oder vollständig in den Klärwerksablauf gelangen und so die Ablaufqualität des Klärwerks hinsichtlich des Überwachungsparameters CSB verschlechtern. Wichtig ist in dieser Hinsicht, inwieweit die zusätzliche Belastung des Ablaufs möglicherweise zu einer Überschreitung behördlich festgelegter Grenzwerte führen kann.

Für eine Prognose dieses Effekts des refraktären CSB wird eine Abschätzung vorgenommen. Dazu werden die Frachten des refraktären CSB im HTC-Filtrat ermittelt und auf den gesamten Kläranlagenablauf umgerechnet, um so den Aufstockungseffekt zu ermitteln. Konservativ wird hier angenommen, dass 100% des refraktären CSB die Kläranlage ohne Entfernung (z.B. durch Adsorption am Klärschlamm oder Adaption der Biozönose) durchlaufen und im Ablauf der Kläranlage auftreten.

Wenn man die Jahresmittelwerte des CSB-Ablaufwerts der Klärwerke als Grundzustand ansetzt und die zusätzliche Fracht aus dem HTC-Filtrat hinzurechnet, ergeben sich Erhöhungen von 7-12 mg/L CSB je nach Klärwerk. Im Vergleich mit den gesetzlichen Überwachungswerten zeigt sich, dass für die Klärwerke WAS und RUH diese Zusatzbelastung zu einer deutlichen Überschreitung des Überwachungswerts führt. Für die Klärwerke SCHÖ und MÜN führt die Zusatzbelastung in dieser Abschätzung nicht zu einer Überschreitung des Überwachungswerts.

Zu beachten ist bei dieser Betrachtungsweise, dass die CSB-Ablaufwerte der Klärwerke betriebsbedingten Schwankungen unterliegen. Die Einführung eines HTC-Verfahrens ist nach dieser Betrachtung mit einer maximalen Zusatzbelastung von 7-12 mg/L refraktärem CSB im Ablauf der Klärwerke verbunden (+16-29% der Jahresmittelwerte). Dadurch kann es durch diese Zusatzbelastung zu einer Überschreitung der Überwachungswerte kommen. Dieser Aspekt muss bei der weiteren Diskussion über eine Einführung des HTC-Verfahrens unbedingt berücksichtigt werden, da er die gesetzlich vorgeschriebenen Funktionen der Kläranlage beeinflusst.

### 5.3.2 Kombination mit Phosphorrückgewinnung

Zukünftig wird die gezielte Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm der Großkläranlagen vom Gesetzgeber gefordert werden<sup>20</sup>. Daher sind mögliche Auswirkungen des HTC-Verfahrens auf die Optionen zur Phosphorrückgewinnung zu prüfen.

Hinsichtlich einer möglichen Phosphorrückgewinnung lassen sich aus den Labor- und Pilotversuchen und der Herstellerbefragung folgende Erkenntnisse ziehen:

- Prinzipiell bleibt der Phosphor bei normalen und leicht sauren Reaktionsbedingungen (pH > 4) zu über 90% im hochentwässerten Klärschlamm. Nur ein geringer Teil geht ins Filtrat in Lösung.
- Erst bei sehr niedrigem pH-Wert (pH < 3) konnte eine substantielle Rücklösung des Phosphors ins Filtrat (bis zu 54%) festgestellt werden.
- Der Anbieter Terranova<sup>21</sup> verfolgt zur Phosphorrückgewinnung den Weg der starken Ansäuerung während der HTC-Reaktion (pH < 2,9). Danach kann der gelöste Phosphor im Filtrat als MAP oder CaP gefällt werden. Diese Verfahrensweise wurde bisher nur im Labor getestet und wird durch hohe CSB-Werte > 10 g/L erschwert.
- Der Anbieter AVA-CO<sub>2</sub><sup>22</sup> bietet ein separates Konzept zur Phosphorrückgewinnung mit HTC an („AVA-cleanphos“). Dazu wird der Ablauf des HTC-Reaktors bei pH 1,5 einem Leaching unterzogen, um den Phosphor quantitativ zu lösen (>99%). Nach Abtrennung über Kammerfilterpresse und Nanofiltration kann der Phosphor als MAP/CaP gefällt werden oder über eine weitere Aufreinigung mit Umkehrosiose direkt als Phosphorsäure gewonnen werden. Auch dieses Verfahren ist bisher nur in Laborversuchen getestet worden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse und unter Einbeziehung von Vorarbeiten des KWB im Projekt P-REX<sup>23</sup> lassen sich folgende mögliche Varianten einer Phosphorrückgewinnung mit HTC beschreiben:

- 1) **Monoverbrennung** des hochentwässerten Klärschlammes aus der HTC und nachfolgende **Rückgewinnung aus der Asche** (>95% P), z.B. Tetraphos, Ecophos, ICL
- 2) **P-Extraktion aus Faulschlamm** (ca. 50% P, z.B. Budenheim-Verfahren), danach HTC und **Mitverbrennung**. Entscheidend ist ggf. die Unterschreitung des maximalen P-Gehalts für die Mitverbrennung (< 20 g P/kg TS<sup>19</sup>), wenn die 50%-Quote<sup>19</sup> nicht

<sup>20</sup> Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit „Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“ vom 18. August 2015

<sup>21</sup> Auskunft Herr Buttman per email vom 07.05.2015

<sup>22</sup> Auskunft Herr Kläusli telefonisch am 18.09.2015

<sup>23</sup> EU-Projekt P-REX (#308645), www.p-rex.eu

erreicht werden kann. Die Auswirkungen einer P-Extraktion aus Faulschlamm auf die Schlammigenschaften und auch die HTC wäre in weiteren Versuchen zu prüfen.

- 3) Hochentwässerter Klärschlamm nach HTC als Input in den Mephrec-Schmelzofenprozess (80% P), niedrige Energierückgewinnung, Machbarkeit fraglich (Ergebnisse des BMBF-Projekts KRN-Mephrec in Nürnberg zur Pilotierung sind abzuwarten)

Dabei bietet die HTC-Behandlung keine Vorteile für die P-Rückgewinnung gegenüber der herkömmlichen Klärschlammbehandlung.

### 5.3.3 Abschätzung der Betriebskosten

Zur Abschätzung der Betriebskosten eines HTC-Verfahrens werden beispielhaft für das Klärwerk WAS die jährlichen Aufwendungen für den Betrieb auf Basis der Laborversuche hochgerechnet. Die Annahmen zu Einzelpreisen (netto) für Strom, Erdgas, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Personal und Wartung sind aus vorherigen UEP-Projekten übernommen<sup>24</sup>. Für den Betrieb der HTC ergeben sich damit Nettokosten von 1,914 Mio €/a, die aber durch die vermehrte Stromproduktion teilweise ausgeglichen werden (-1,044 Mio €/a).

Zusätzlich verändern sich die Entsorgungskosten für den entwässerten Klärschlamm durch die geringere Menge (-61.000 t/a) und die spezifischen Entsorgungskosten für den hochentwässerten Klärschlamm (noch unbekannt). Dieser Einsparungseffekt kann ggf. die kompletten Betriebskosten der HTC-Anlage ausgleichen und ist spezifisch für die jeweiligen Randbedingungen zu bestimmen.

Noch unbekannt ist auch die Höhe der notwendigen Investitionskosten der HTC-Anlage, die die Gesamtwirtschaftlichkeit entscheidend beeinflussen können. Dazu sind weitere Betrachtungen und Beispiele einer großtechnischen Umsetzung notwendig.

### 5.4 Schlussfolgerungen aus der Studie

Abschließend können aus den Erkenntnissen in dieser Studie die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Prinzipiell kann das HTC-Verfahren ein deutliches Potential für die Verbesserung der Energie- und Klimabilanz der Klärschlamm Entsorgung der betrachteten vier Berliner Klärwerke RUH, WAS, SCHÖ und MÜN bieten, wenn die Laborergebnisse, Herstellerangaben und spezifische Annahmen dieser Studie zugrundeliegen.
- Dieses Potential wurde aufgrund der Laborversuche mit Berliner Klärschlämmen und den Herstellerangaben zum Prozess und zur Entwässerbarkeit ermittelt. Zu prüfende Annahmen in weiteren Untersuchungen umfassen insbesondere die tatsächlich erreichbare Entwässerbarkeit, den Energienutzungsgrad der thermischen Entsorgung des hochentwässerten Klärschlammes sowie die N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktoren für Monoverbrennung von entwässertem Klärschlamm.
- Die kurzen Pilotversuche mit dem Hersteller Terranova konnten weder den kontinuierlichen Betrieb des Prozesses noch das prognostizierte

---

<sup>24</sup> Remy, C. (2013): *Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of tertiary treatment schemes*. Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH ([www.kompetenzwasser.de/Abschlussberichte-des-Projektes-OXE.572.0.html](http://www.kompetenzwasser.de/Abschlussberichte-des-Projektes-OXE.572.0.html)), Berlin.

Entwässerungsergebnis bestätigen. Weitere Pilotversuche über einen längeren Zeitraum, eine technische Anpassung der Pilotanlage und letztlich der großtechnische Nachweis des Verfahrens in einer ersten HTC-Großanlage erscheinen notwendig, um die bestehenden erheblichen Zweifel an der technischen Reife und Stabilität des Verfahrens auszuräumen.

- Geeignete Entsorgungswege für den hochentwässerten Klärschlamm stehen heute nicht zur Verfügung. Für eine entsprechende Monoverbrennung des hochentwässerten Klärschlammes gibt es bis heute keine Referenzanlage. Auch die Mitverbrennung müsste den Eigenschaften dieses Brennstoffs angepasst werden.
- Die Rückbelastung des Klärwerks mit nicht abbaubarem CSB kann zu einer erheblichen Verschlechterung der Ablaufqualität führen (+7-12 mg/L CSB). Bei Klärwerken mit geringem Abstand der Ablaufwerte zum Überwachungswert kann dieser Umstand die Einführung eines HTC-Prozesses verhindern, weil sonst die Überwachungswerte überschritten werden können.
- Eine Realisierung der Phosphorrückgewinnung in Kombination mit dem HTC-Verfahren lässt sich über eine Monoverbrennung mit anschließender Ascheaufbereitung bzw. über eine P-Extraktion aus dem Faulschlamm vor der HTC erreichen. Das HTC-Verfahren bietet keine Vorteile für eine P-Rückgewinnung.
- Die Kosten des HTC-Verfahrens lassen sich heute mangels valider Daten nur abschätzen. Möglichen Einsparungen bei den Betriebskosten stehen noch unbekannte Investitionskosten gegenüber, die ggf. für die Gesamtwirtschaftlichkeit des Verfahrens entscheidend sind.

Diese Studie konnte damit das prinzipielle Potential, aber auch die möglichen Probleme bei Einführung eines HTC-Verfahrens für die Klärschlammbehandlung aufzeigen. Durch die fehlende großtechnische Erfahrung bei der Umsetzung der HTC kann auf Grundlage dieser Erkenntnisse noch keine Empfehlung für eine weitere Erprobung oder Implementierung des HTC-Verfahrens auf Berliner Klärwerken gegeben werden. Es ist im Einzelfall abzuwägen, ob die möglichen Vorteile durch das HTC-Verfahren eine weitere Betrachtung dieses Prozesses rechtfertigen und die aufgezeigten Probleme zu lösen sind.