

Bericht

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

Endversion: 19.02.2013

Kurzfassung

Projekt: CoDiGreen

Optimierung der Energie- und
Nährstoffrückgewinnung in der
Abwasserbehandlung



von Christian Remy und Boris Lesjean
Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH
Cicerostr. 24, 10709 Berlin

Die Erstellung dieses Berichts wurde finanziert durch Veolia Water und Berliner
Wasserbetriebe



Berlin, Germany

2013

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.

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 fulfil 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.

Imprint

Titel

Kurzfassung – Projekt CoDiGreen.

Optimierung der Energie- und Nährstoffrückgewinnung in der Abwasserbehandlung

Projektkürzel: CoDiGreen

Autoren

Christian Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Boris Lesjean, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Qualitätssicherung

Jan Waschnewski, Berliner Wasserbetriebe

Christoph Siemers, Stadtentwässerung Braunschweig

Prof. Thomas Dockhorn, TU Braunschweig

Veröffentlichung / Verbreitung genehmigt durch die Mitglieder des technischen Komitees:

Regina Gnirss, Berliner Wasserbetriebe

Christine Mesek, Stadtentwässerung Braunschweig

Bernhard Teiser, Abwasserverband Braunschweig

Andreas Hartmann, Kompetenzzentrum Wasser Berlin

Norbert Dichtl, ISWW der TU Braunschweig

Christophe Sardet, Veolia Wasser

Emmanuelle Trouvé, Veolia Eau

Ergebnisnummer

D 2.5.2

Endversion

Datum: 19.02.2013

Zusammenfassung (Deutsch)

Das Forschungsprojekt CoDiGreen (2010-2012) zielt auf eine Optimierung der Rückgewinnung von Energie und Nährstoffen in der Abwasserbehandlung in Braunschweig und Berlin. Dafür werden in Pilotversuchen die Auswirkungen einer Zugabe von Co-Substraten (Grassilage, Topinambur) und einer thermischen Druckhydrolyse des Überschussschlamms auf den Biogasertrag der Faulung untersucht. Zusätzlich wird die Co-Vergärung von Grassilage im großtechnischen Maßstab in einem Faulturm des Klärwerks Braunschweig-Steinhof getestet. Neben dem experimentellen Teil wird über eine Ökobilanz der ökologische Fußabdruck des Abwassersystems in Braunschweig und der Schlammbehandlung im Klärwerk Berlin-Wassmannsdorf analysiert, um Optimierungspotential zu erfassen und anhand ausgewählter Szenarien zu bewerten. Abschließend werden vergleichbare Konzepte der landwirtschaftlichen Wiederverwendung von Klarwasser und Schlamm in einer Marktstudie ermittelt und über eine Risikobewertung potentielle Gefahren dieses Systems identifiziert.

Die Pilotversuche zeigen, dass sowohl die Zugabe von Co-Substraten als auch die thermische Hydrolyse einen substantiellen Gewinn an Biogasmenge und –qualität (CH_4 -Gehalt) in einer mesophilen Faulung (Verweilzeit: 20d) ermöglichen kann. Die Methanerträge können um 10%, 9% und 13% durch thermische Hydrolyse von Überschussschlamm, Zugabe von Grassilage (+10% FS) und eine Kombination beider Maßnahmen gesteigert werden (sofern der Methanertrag lediglich auf den oTR des zugeführten Schlamms bezogen wird, betrug die Steigerung 10%, 31% und 38%). Eine zweistufige Faulung mit zwischengeschalteter Hydrolyse („DLD“) erbringt +19% CH_4 . Für anorganische und organische Schadstoffe werden dabei vorgeschriebene Grenzwerte der aktuellen Klärschlammverordnung nicht überschritten. Weiter zeigen Laboranalysen einen positiven Effekt auf die Entwässerbarkeit des Schlamms und den Bedarf an Polymeren. Leider können die vielversprechenden Ergebnisse der Co-Vergärung mit Gras in der Großtechnik nicht bestätigt werden.

Für eine großtechnische Realisierung einer Co-Vergärung lässt sich abschätzen, dass für 100.000 EW ca. 30 ha extensiv bewirtschafteter Fläche erforderlich sind, um 10% oTR an Gras in Bezug zum oTR des Rohschlammes zu erzeugen. Leider können die vielversprechenden Ergebnisse der Co-Vergärung mit Gras in der Großtechnik nicht bestätigt werden, in der nur -8% Biogasertrag gemessen werden (+2% wenn der Methanertrag lediglich auf den oTR des zugeführten Schlammes bezogen wird). Obwohl die technische Machbarkeit der Graszugabe gezeigt werden kann, scheinen betriebliche Probleme (Größe der Fasern, hydraulische Durchmischung, niedrige Verweilzeit) die Umsetzung des maximalen Potentials der Graszugabe in der Großtechnik zu verhindern.

Die Bewertung der Umweltwirkungen der Systeme in Berlin und Braunschweig zeigt eine hohe Eigenenergieerzeugung in beiden Systemen, so dass dadurch der Treibhauseffekt und andere relevante Umweltwirkungen vermindert werden. Dennoch kann noch Optimierungspotential bei der Energie- und Nährstoffrückgewinnung aufgezeigt werden, zu dessen Erschließung auf der Grundlage einer Szenarienanalyse Empfehlungen

formuliert werden. Die Umweltvorteile der Wiederverwendung in Braunschweig zeigen sich vor allem in einer verminderten Emission von Nähr- und Schadstoffen in die Gewässer. Die Normalisierung der Umweltwirkungen unterstreicht die Bedeutung der Primärfunktion der Kläranlage (= Schutz der Oberflächengewässer), die durch Optimierung von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen nicht eingeschränkt werden sollte.

Die Risikobewertung der Braunschweiger Systems folgt dem HACCP-Konzept und quantifiziert Risiken für die menschliche Gesundheit durch Krankheitserreger und Schwermetalle in der Landwirtschaft und ökologische Risiken durch Schwermetalle. Potentielle Risiken der Wiederverwendung werden auf Grundlage quantitativer Modelle von Umweltverhalten und Exposition identifiziert (Viren, Cadmium für Menschen, Zink für Ökosystem) und sollten durch entsprechende Messprogramme überwacht werden.

Schließlich werden basierend auf den Projektergebnissen Empfehlungen zur Optimierung der Energie- und Nährstoffrückgewinnung in der Abwasserbehandlung in Berlin und Braunschweig formuliert, um letztlich die negativen Umweltwirkungen zu minimieren und potentielle Risiken im Betrieb zu vermeiden.

Zusammenfassung (Englisch)

The research project CoDiGreen (2010-2012) targets the optimisation of energy and nutrient recovery in the wastewater treatment schemes of Braunschweig and Berlin. Therefore, pilot experiments are conducted to test the effect of addition of co-substrates (grass silage, topinambur) and the thermal hydrolysis of excess sludge on the biogas yield of anaerobic digestion. In addition, co-digestion of grass silage is also tested in a full-scale digester of the wastewater treatment plant (WWTP) Braunschweig-Steinhof. Beside the experimental part, the environmental footprint of the wastewater treatment scheme in Braunschweig and the sludge treatment line in WWTP Berlin-Wassmannsdorf is analysed with Life Cycle Assessment (LCA) to identify potentials for optimisation and assess selected technical options in their effects on the environmental profile. Finally, a market review of the concept of agricultural reuse of effluent and sludge in Braunschweig is conducted to get an overview of the market situation, and a risk assessment is initiated to identify potential risks associated with this practice.

The results of the pilot experiments show that both the addition of co-substrates and thermal hydrolysis can substantially increase the biogas yield and quality (CH₄ content) during mesophilic digestion (HRT = 20d). Methane yields can be increased by 10%, 9% and 13% for thermal hydrolysis of excess sludge, addition of grass silage (+10% FS), and the combination of both (if the methane yield is only related to the VS of the sludge, the increase was 10%, 31% and 38%). A two-step digestion with intermediate hydrolysis ("DLD") yields +19% CH₄. No exceedance of legal requirements for inorganic and organic pollutants can be detected, whereas lab-analysis indicate positive impacts on sludge dewaterability and polymer demand for dewatering.

For a full scale realisation of co-digestion it can be estimated that a 100.000 PE WWTP would require approximately 30 ha of extensively cultivated area to add +10% VS of grass substrate. However, the promising results of co-digestion with grass cannot be confirmed in full-scale trials, where only -8% of biogas yield can be measured (+2% if related to the VS of the sludge only). Even though the technical feasibility of grass addition can be shown, operational difficulties (fibre size, hydraulic mixing, low HRT) seem to prevent the realisation of the maximum potential of grass addition in full-scale.

The environmental assessment of the systems in Berlin and Braunschweig reveals a high degree of energy production in both systems, lowering associated impacts of carbon footprint and other environmental impacts. However, potentials for optimisation are identified in terms of energy production and nutrient recovery, and recommendations for the future testing of technical options are given based on the scenario analysis within the LCA. Environmental benefits of the reuse approach in Braunschweig are quantified and relate mostly to the lower discharge of nutrients and other pollutants into surface waters. The normalised environmental profile underlines the primary functions of wastewater treatment (= protection of surface waters), which should not be compromised while optimising energy demand and carbon footprint.

The risk assessment of the Braunschweig system follows the HACCP concept and quantifies risks for human health associated with pathogens and heavy metal input into agricultural soils, as well as ecological risks from heavy metal emission into the environment. Potential risks of agricultural reuse are successfully identified (viruses, Cadmium for humans, Zinc for ecosystems) based on quantitative modelling of fate and exposure, and results should now be validated by extended monitoring of these substances.

Finally, recommendations for system optimisation are given to increase energy and nutrient recovery in the wastewater schemes of Berlin and Braunschweig and lower the environmental footprint and risk associated with their operation.

Zusammenfassung (Französisch)

Le projet de recherche CoDiGreen (2010-2012) a pour but l'optimisation énergétique et la récupération de nutriments dans les systèmes d'assainissement de Braunschweig et Berlin. Pour cette raison, des expériences en pilote sont effectuées pour tester l'effet de l'addition de co-substrats (herbe ensilée, topinambour) et de l'hydrolyse thermique sur le rendement en biogaz de la digestion anaérobie. De plus, la co-digestion de l'herbe ensilée est testée à grande échelle dans un digesteur de la station d'épuration (STEP) de Braunschweig-Steinhof. A côté de la partie expérimentale, l'empreinte environnementale du système d'assainissement de Braunschweig et de la filière de traitement des boues de la STEP Berlin-Waßmamsdorf est évaluée par l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) pour identifier les potentiels d'optimisation et déterminer les effets de certaines options techniques sur le profil environnemental. Finalement, une étude de marché sur les concepts de réutilisation des effluents et boues de Braunschweig pour l'agriculture est réalisée pour obtenir une vue d'ensemble de la situation du marché, et une évaluation des risques est initiée pour identifier les risques potentiels associés avec cette pratique.

Les résultats des expériences en pilote montrent qu'à la fois l'addition de co-substrats et l'hydrolyse thermique peuvent substantiellement augmenter le rendement et la qualité du biogaz (teneur en CH₄) pendant la digestion mésophile (TDS = 20 j). Les taux de méthane peuvent être améliorés de 10%, 9% et 13% pour l'hydrolyse thermique de la boue en excès, l'ajout d'herbe ensilée (+10% FS), et la combinaison des deux (si le taux de méthane est relié seulement à la MV de la boue, l'augmentation atteint 10%, 31% et 38%). Une digestion en deux étapes avec hydrolyse intermédiaire (« DLD ») produit +19% CH₄. Pas de dépassement des impératifs légaux de polluants inorganiques et organiques ne peut être détecté, tandis que les analyses en laboratoire indiquent des impacts positifs sur la déshydratabilité des boues et sur la demande en polymère pour la déshydratation.

Pour une réalisation à grande échelle de la co-digestion, il peut être estimé qu'une STEP de 100 000 EH nécessiterait environ 30 ha de surface cultivée de manière extensive pour un ajout de 10% de MV en substrat herbe. Cependant, les résultats prometteurs de la co-digestion avec de l'herbe ne peut être confirmé dans des essais à grande échelle, où seulement -8% du rendement du biogaz peut être mesuré (+2% si relié seulement au MV de la boue). Même si la faisabilité technique de l'addition d'herbe peut être démontrée, les difficultés opérationnelles semblent empêcher la réalisation du potentiel maximum de l'addition d'herbe à grande échelle.

L'évaluation environnementale des systèmes de Berlin et de Braunschweig révèlent un haut degré de production énergétique dans les deux systèmes, diminuant les impacts associés à l'empreinte carbone et aux autres impacts environnementaux. En outre, les potentiels d'optimisation sont identifiés en termes de production énergétique et de récupération des nutriments, et les recommandations d'options techniques pour les futurs essais sont effectuées, basées sur l'analyse de scénario inclus dans l'ACV. Les

bénéfices environnementaux de l'approche « reuse » in Braunschweig sont quantifiés et liés surtout au faible renvoi de nutriments et autres polluants dans les eaux de surface. Le profil environnemental normalisé souligne les fonctions primaires du traitement des eaux (=protection des eaux de surface), qui ne doivent pas être compromis lors de l'optimisation de la demande énergétique et de l'empreinte carbone.

L'évaluation des risques du système de Braunschweig suit le concept HACCP et quantifie les risques pour la santé humaine associée à l'introduction des pathogènes et des métaux lourds dans les sols agraires, ainsi que les risques d'émission des métaux lourds dans l'environnement. Les risques potentiels du « reuse » dans l'agriculture sont identifiés (virus, Cadmium pour les humains, Zinc pour les écosystèmes) basé sur un modèle quantitatif du devenir et de l'exposition de ces substances, et les résultats devraient maintenant être validés par une surveillance étendue de ces substances.

Finalement, les recommandations pour l'optimisation du système sont émises pour augmenter le rendement énergétique et la récupération des nutriments dans les systèmes d'assainissement de Berlin et Braunschweig et pour diminuer l'empreinte environnementale et les risques associés à leur opération.

Danksagung

Das Forschungsprojekt CoDiGreen (2010-2012) wurde finanziert durch Veolia Wasser und die Berliner Wasserbetriebe. Dieser Bericht basiert auf den Ergebnissen von Teilstudien des folgenden Projektteams (in alphabetischer Reihenfolge):

- Thomas Dockhorn (ISWW)
- Karsten Füllung (ISWW)
- Sonia Graja (VERI)
- Daniel Klein (ISWW)
- Boris Lesjean (KWB)
- Robert Mieske (ISWW)
- Christian Remy (KWB)
- Wolfgang Seis (KWB)
- Christoph Siemers (SE/BS)
- Jan Waschnewski (BWB)

Die komplette Liste der Publikationen aus diesem Projekt ist in Kapitel 8 aufgeführt. Die Berichte sind zum Download verfügbar unter www.kompetenz-wasser.de

Die Steuerung des Forschungsprojekts CoDiGreen wurde durchgeführt vom Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB).

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Einführung	1
Kapitel 2 Marktübersicht (KWB).....	3
Kapitel 3 Pilotversuche zur Co-Vergärung und thermischen Hydrolyse (ISWW).....	5
Kapitel 4 Großtechnische Versuche zur Co-Vergärung (ISWW, SE/BS, AVB).....	8
Kapitel 5 Ökobilanz (KWB, BWB, SE/BS).....	11
Kapitel 6 Risikoanalyse (KWB, AVB).....	14
Kapitel 7 Fazit und Aussichten	17
Kapitel 8 Veröffentlichungen.....	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des Braunschweiger Abwasserverwertungskonzept.	1
Abbildung 2: Vergärungsreaktoren im Labormaßstab (40L) für Pilotversuche und Geräte für die thermische Hydrolyse.....	5
Abbildung 3: Systemgrenzen der Ökobilanz des Braunschweiger Abwassersystems 2010 (Produkte sind unterstrichen)	11
Abbildung 4: Normalisierter ökologischer Fußabdruck des Braunschweiger Systems...	12
Abbildung 5: Kumulativer Energiebedarf und Kohlenstoffbilanz der Schlammbehandlung und –Entsorgung in Berlin-Wassmannsdorf 2009	13
Abbildung 6: Jährliches Risiko für das Feldarbeiterszenario (gestrichelte Linie ist WHO Standard = 1 μ DALY; Bestehendes Ansteckungsrisiko für Rotavirus und Norovirus liegt in Deutschland bei 110 bzw. 14 μ DALY pro Person und Jahr)	15
Abbildung 7: Überwachungsdaten von verschiedenen, mit Klarwasser und Schlamm behandelten Flächen in Braunschweig.....	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erhöhung des Biogas-Ertrags durch die Co-Vergärung und thermische Hydrolyse in der Pilotversuchsphase	6
Tabelle 2: Betriebseinstellungen der Faultürme	8
Table 3: Spezifische Gaserträge für Referenzturm und Co-Vergärung in der IMP Phase	9
Tabelle 4: Möglichkeiten und Barrieren der Großtechnischen Ausführung und dazugehörige Anforderungen an die Forschung und Entwicklung.....	18

Abkürzungen

BHKW	-	Blockheizkraftwerk
CSB	-	chemischer Sauerstoffbedarf
VLV	-	“Vergärung / Lyse / Vergärung”
TS	-	Trockensubstanz
HACCP	-	Hazard Analysis and Critical Control Points
IMP	-	Intensive Monitoring Phase (intensive Überwachungsphase)
LCA	-	Life Cycle Assessment
LV	-	“Lyse / Vergärung”
ORC	-	Organic Rankine Cycle
EW	-	Einwohnergleichwerte
RTD	-	Retention Time Distribution (Verweilzeitverteilung)
SE/BS	-	Stadtentwässerung Braunschweig
FS	-	Gesamtfeststoffgehalt
VS	-	organische Trockensubstanz
WHO	-	Weltgesundheitsorganisation

Kapitel 1

Einführung

Ziel des europäischen "Energiepaketes" ist die Absenkung der Kohlendioxidemissionen bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien im Netz und einer Reduktion des allgemeinen Stromverbrauchs. Dabei sollen die Emissionen bis 2020 um 20% bis 40% im Vergleich zu 1990 reduziert werden. Für städtische Wassersysteme wurde Abwasserbehandlung als der Bereich mit dem höchsten Potential für Energieeinsparung identifiziert.

Ein Ziel des Berliner Senats ist es den Energieverbrauch im Vergleich zum Jahr 2000 insgesamt um 40% bis 2020 zu verringern. Dieses Ziel bezieht sich auch auf die Berliner Wasserbetriebe, die geeignete Strategien identifizieren müssen, um den Energieverbrauch der Abwasserbehandlung zu optimieren und/oder erneuerbare Energie zu erzeugen und damit Treibhausgasemissionen zu verringern. Die standardisierte Methodik der Ökobilanz kann hier genutzt werden, um den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen von Kläranlagen zu beurteilen. Eine integrierte Ökobilanz der gesamten Anlage (Abwasser- und Schlammbehandlung) kann genutzt werden, um die gesamten Umwelteinwirkungen zu beurteilen und durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren.

Die Stadt Braunschweig nutzt ein Abwasserbehandlungskonzept, welches der Kläranlage ermöglicht, quasi energieautark zu sein (Abbildung 1). Seit Jahrzehnten nutzt das "Klärwerk Steinhof" behandeltes Abwasser und Schlamm in der Landwirtschaft durch (i) die Bewässerung mit Klarwasser (2/3 des Durchflusses) von Feldern wo Nähr- und Energiepflanzen angebaut werden; (ii) die Verwertung thermophil vergärter Schlämme als zertifizierter Dünger für die Landwirtschaft und (iii) Nutzung der Rieselfelder und Teiche (1/3 des Durchflusses) als nachträgliche biologische Reinigungsstufe.

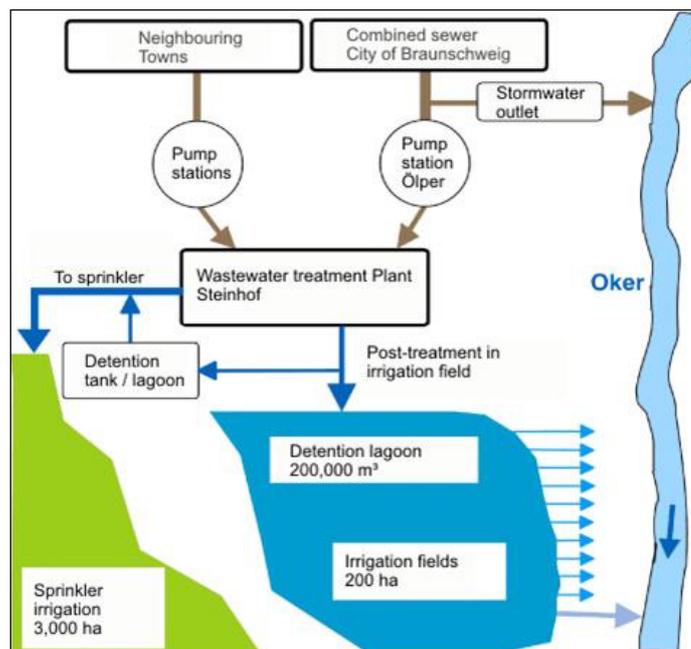


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des Braunschweiger Abwasserverwertungskonzept.

Das KWS produziert bis heute etwa 2/3 des Eigenbedarfs an Energie durch die Schlammfäulung und hat eine neutrale Energiebilanz, wenn man das Biogas von der Deponie and Bioabfallanlage mit einbezieht. Die Biogasproduktion der Deponie nimmt jedoch stetig ab und die zweite externe Quelle von Biogas ist an Verträge gebunden, die gekündigt werden könnten. Der Anlagenbetreiber (SE|BS) interessiert sich daher für jede weitere Möglichkeit, die Abhängigkeit der Kläranlage von externen Energiequellen zu reduzieren

Ziel des zweijährigen Projektes "CoDiGreen" war es, die Energieeffizienz der Abwassersysteme in Berlin und Braunschweig zu optimieren, die Abhängigkeit von externen Energiequellen zu verringern und gleichzeitig die Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen zu verbessern. Folgende Aktivitäten wurden innerhalb der Projekts durchgeführt:

1. Erstellung einer Marktübersicht für Abwassersysteme mit Nutzung der Abwässer und des Schlammes in der Landwirtschaft, kombiniert mit dem Anbau von Energiepflanzen. (Kapitel 2)
2. Durchführung von Laborversuchen, um die Eignung verschiedener Co-Substrate und die thermische Vorbehandlung des Überschussschlammes vor der Vergärung zu untersuchen. (Kapitel 3)
3. Durchführung von großtechnischen Versuchen in einem der Faultürme des KWS, um die Eignung von Grassilage aus den Rieselfeldern für die Co-Vergärung zu prüfen. (Kapitel 4)
4. Erstellung einer Energie- und Treibhausgasbilanz der Schlammbehandlung des Klärwerks Wassmannsdorf (Berlin) sowie einer vollständigen Ökobilanz zur Ermittlung aller Umweltauswirkungen der Abwasserbehandlung in Braunschweig. Dazu wurden auch Optimierungsszenarien identifiziert und untersucht, um die Abhängigkeit von externen Energiequellen zu verringern und gleichzeitig die Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen zu verbessern. (Kapitel 5)
5. Erstellung einer Umwelt- und Gesundheitsrisikoanalyse der landwirtschaftlichen Wiederverwendung von Klarwasser und Schlämmen in der Braunschweiger Abwasserbehandlung. (Kapitel 6)

Aus den Ergebnissen dieser Studie werden abschließend Handlungsempfehlungen abgeleitet und mögliche Optimierungsmaßnahmen für Braunschweig und Berlin identifiziert und bewertet. (Kapitel 7). Eine Liste von Veröffentlichungen ist diesem Bericht angehängt. (Kapitel 8).

Kapitel 2

Marktübersicht (KWB)

Die Marktübersicht bietet einen Überblick über europäische Vorhaben im Abwasserbereich, die die drei Eigenschaften der Abwasserbehandlung in Braunschweig vorweisen:

1. Die Nutzung von Klärschlamm in der Landwirtschaft
2. Die Nutzung von Klarwasser in der Landwirtschaft
3. Den Anbau von Energiepflanzen auf Flächen, auf denen Klärschlamm und Klarwasser aufgebracht wird.

In der Marktübersicht wurde die verfügbare Fachliteratur des Abwassersektors und des Internets systematisch nach Abwassersystemen durchsucht, die alle drei Aspekte vorweisen. Allgemein wurden viele Systeme gefunden, die zwei der drei Methoden anwenden (z.B. Nutzung von Schlamm und Klarwasser; Nutzung von Energiepflanzen und Klärschlamm) da die Nutzung von Schlamm und Klarwasser in Zentral- und Südeuropa (Frankreich, Spanien, Italien) weit verbreitet ist. Dennoch wurde die explizite Kombination aller drei Methoden nur in wenigen Systemen wiedergefunden.

Vorhandene Systeme in Deutschland

In Deutschland konnte nur eine weitere großangelegte Anwendung des Braunschweiger Systems im nahegelegenen Wolfsburg identifiziert werden. Beide Systeme wurden in den 1950er Jahren in vergleichbaren historischen und technischen Bedingungen aufgebaut. Ähnlich wie Braunschweig hat die Gegend um Wolfsburg Eigenschaften, die die landwirtschaftliche Wiederverwertung von Klarwasser und Klärschlamm befürworten:

- Beträchtliches klimatisches Wasserdefizit der Landwirtschaft (>100 mm/a)
- Begrenztes Grundwasser für Bewässerung
- Sandige Böden mit geringer hydraulischen Pufferkapazität, die beträchtliche Mengen an Bewässerungswasser aufnehmen können
- Ebene Fläche mit einem niedrigen Grundwasserspiegel (>1.5 m) für gleichmäßige Versickerung
- Geringe Bevölkerungsdichte in den landwirtschaftlichen Gebieten
- Feldgrößen sind optimal für den Einsatz von Bewässerungsmaschinen ausgelegt

Das Wolfsburger System behandelt Siedlungsabwasser mit 170.000 Einwohnergleichwerten mit einem geringen Anteil von Industrieabwasser in einer herkömmlichen Abwasseraufbereitungsanlage. Im Gegensatz zu Braunschweig wird 100% des Klarwassers zur landwirtschaftlichen Bewässerung auf einer 1500 ha Fläche genutzt, jedoch ohne erhöhten Stickstoffabbau durch Denitrifikation in der Kläranlage. Auf diesen Feldern wird auf 300ha Mais angebaut, der in der Biogasanlage des Klärwerks vergoren wird, um die Anlage mit Strom und Wärme zu versorgen. Im Winter wird das Abwasser denitrifiziert und lokal in das Grundwasser infiltriert. Der Rohschlamm wird entwässert und über das gesamte Jahr durch die Abwärme des BHKWs getrocknet, bevor er in einem nahegelegenen Kraftwerk verfeuert wird. Weitere Details zum Wolfsburger Konzept sind im Anhang zu finden.

Vorhandene Systeme in Europa

In der relevanten Fachliteratur wird keine vergleichbare großflächige Nutzung von Klarwässern, Schlamm und Energiepflanzen explizit beschrieben. Es gibt in Europa viele Systeme, in denen Klarwasser und Schlamm landwirtschaftlich genutzt werden, aber wenig Information zu den Pflanzen, die in den dazugehörigen Feldern angebaut werden. Berichte der systematischen Kombination der drei Eigenschaften der Abwasserbehandlung in Braunschweig konnten für folgende Systeme gefunden werden:

- **Enköping (Schweden):** 20,000 Einwohner, Anbau von Weiden auf 200ha (Kurzumtriebsplantagen zur Verfeuerung in einem BHKW) die mit Klarwasser (~ 200,000 m³/a) und Schlamm bewässert werden. Für die Stickstoffrückgewinnung wird auch Schlammwasser (10000 m³/a) aufgebracht.
- **BioPros (EU Projekt 2005-2008):** Dieses Forschungsvorhaben hat Richtlinien zur sicheren Düngung von hocheffizienter und schnellwachsender Biomasse mit Abwässern und Schlämmen aufgestellt. (www.biopros.info).
- **WaterRenew (England):** Dieses Forschungsvorhaben hat die Bewässerung von schnellwachsenden Pflanzen (Weide, Eukalyptus) mit Abwässern und Schlämmen zur Rückgewinnung von Wasser und Nährstoffen geprüft. (Feldversuche in 5 kleinen Versuchsgebieten).

Als Fazit der Marktübersicht konnten die Abwassersysteme von Braunschweig (350000 EW) und Wolfsburg (170000 EW) als die einzigen Großanlagen identifiziert werden, die Klarwasser und Schlamm landwirtschaftlich verwerten und Energiepflanzen anbauen. Im europäischen Raum läuft ein kleineres Projekt in Enköping (Schweden), wo Kurzumtriebsplantagen als Energiepflanzen angebaut werden. Alle anderen Anwendungen dieses Konzeptes finden entweder in einem kleinen Maßstab im ländlichen Bereich (<100 EW) statt oder sind Forschungsvorhaben, die dieses Konzept in Feldversuchen prüfen, wobei die Anzahl solcher Forschungsvorhaben in den letzten Jahren gestiegen ist.

Kapitel 3

Pilotversuche zur Co-Vergärung und thermischen Hydrolyse (ISWW)

Ziel dieser Versuche war es, den Einfluss der Co-Vergärung und thermischen Hydrolyse auf den Ertrag von Biogas und auf den Abbau von organischer Trockensubstanz zu untersuchen. Im Weiteren wurden organische und anorganische Schadstoffe gemessen, um den Effekt von Co-Vergärung oder thermischer Hydrolyse auf die Schlammqualität zu prüfen. Schließlich wurden die Entwässerungseigenschaften des vergorenen Schlammes gemessen und das entstehende Zentrat untersucht.

Die Pilotversuche wurden in zwei Versuchsreihen durchgeführt, beide mit einer Anpassungsphase und einem intensiven Beobachtungsprogramm von jeweils vier Wochen. In der Versuchsreihe wurden verschiedene Co-Substrate zugefügt: Grassilage, auf 3mm geschnitten, und Topinambur-Grünschnitt. Der thermische Abbau wurde als vorgeschaltetes Verfahren (Lyse + Vergärung, LV) sowie als Zwischenstufe (Vergärung + Lyse + Vergärung, VLV) eingesetzt. Die Vergärung wurde parallel in vier Faulbehältern im Labormaßstab mit einem Volumen von jeweils 40 Liter unter mesophilen Bedingungen (38 °C) durchgeführt. Die thermische Zersetzung erfolgte in einer labormaßstäblichen Hydrolyseanlage bei 160 °C für 30 Minuten. Die Leistung der Faulbehälter wurde anhand von Massenbilanzen für CSB, TC, N und P gemessen, welche mit annehmbarer Genauigkeit abgeschlossen wurden (Differenz Input/Output <10%).



Abbildung 2: Vergärungsreaktoren im Labormaßstab (40L) für Pilotversuche und Geräte für die thermische Hydrolyse

Einfluss der Co-Vergärung und thermischen Hydrolyse auf Biogasertrag und -qualität

Der Vergleichsfaulbehälter wurde mit 50% Primärschlamm und 50% Überschussschlamm des Klärwerks Braunschweig unter mesophilen Bedingungen für eine hydraulische Verweilzeit von 20 Tagen betrieben. Für den Vergleichsfaulbehälter wurde ein Biogasertrag von 528-575 L/kg oTS_{input} mit einem CH₄-Gehalt von 64-66%

gemessen. Die Ergebnisse zeigen dass durch Hydrolyse der CH₄-Ertrag um 10% in der LV und um 19% in der VLV Konfiguration erhöht werden kann (Tabelle 1). Co-Vergärung mit Zugabe von Grassilage (+10% FS) erzeugte eine Erhöhung von 9% des CH₄-Ertrags (31% mit Bezug auf die organische Trockensubstanz im Schlamm). Die Kombination von Hydrolyse und Grassilage erhöhte den Methanertrag um 13% (38% im Vergleich zu der oTS im Schlamm). Für die VLV-Konfiguration wurde ein maximaler Abbau von 76% der oTS_{input} erzeugt. Im Bezug auf die Kinetik der Biogasproduktion konnten durch Zugabe von Co-Substraten keine negativen Einflüsse in der Ganglinie der Biogasproduktion nach der Reaktorbeschickung beobachtet werden.

Tabelle 1: Erhöhung des Biogas-Ertrags durch die Co-Vergärung und thermische Hydrolyse in der Pilotversuchsphase

Szenario	Prozess	Biogasertrag	CH ₄ -Ertrag
“LV”	PS + ÜS(160°C)	+8%	+10%
“VLV”	V + 160°C + V	+18%	+19%
Co-Vergärung	PS + US + 10% Grass	+2% (+23%*)	+9% (+31%*)
“LV” + Co-V	PS + (ÜS + 10% Grass)160°C	+5% (+27%*)	+13% (+38%*)

PS: Primärschlamm, ÜS: Überschussschlamm, V: Vergärung, Verweilzeit: 20d bei 38 °C

*bezogen auf oTS im Schlamm

Organische und Anorganische Schadstoffe

In Stichproben wurden organische Schadstoffe (AOX, Nonylphenole, DEHP, PAH₁₆, Dioxine, Furane, PCB, PFT) untersucht, um negative Einwirkungen der Hydrolyse oder Co-Vergärung auf Schlämme zu ermitteln. Bestimmte Schadstoffe (NP, DEHP, PAH₁₆) zeigten geringfügige Zunahmen, sind allerdings noch deutlich unter den heutigen rechtlichen Grenzwerten zur landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlämmen. 15 pharmazeutische Verbindungen wurden in einer Probe von Rohwasser und Abfluss der 4 Reaktoren analysiert. Zehn waren über der Bestimmungsgrenze (5-10 ng/gFS) vorhanden und drei Verbindungen (Diclofenac, Carbamazepin und Metoprolol) wurden in den meisten Proben in Konzentrationen über 100 ng/g FS und bis zu 500ng/g FS nachgewiesen. Zu beachten ist allerdings, dass in vielen Proben die Wiederfindungsrate nicht befriedigend war (26% bis 228%). Lediglich bei Propanolol wurde mit Werten zwischen 8-27 ng/gFS eine annehmbare Wiederfindung erreicht (75%-125%).

Bei den anorganischen Schadstoffen wurde Schwermetalle durch thermische Hydrolyse in die gelöste Phase überführt und erreichten zudem höhere Konzentrationen im Vergleich zu der FS nach Vergärung. Dies wird durch den erhöhten Abbau von oTS in der Hydrolyse verursacht. Dennoch wurden auch hier die Grenzwerte für Schwermetalle und organische Mikroschadstoffe nicht überschritten.

Entwässerbarkeit und Rückbelastung

Die gelöste Phase der Reaktorabläufe wurde auf CSB, N und P untersucht, um mögliche Einflüsse der thermischen Hydrolyse und der Co-Substrate auf die Rückbelastung aus der Entwässerungsstufe festzustellen. Nach der thermischen

Hydrolyse waren die CSB-Konzentrationen im Schlammwasser deutlich erhöht (+100-120% für LV, +400% für VLV), wobei die N- und P-Gehalte relativ konstant geblieben sind. Versuche zur biologischen Abbaubarkeit (angepasster Zahn-Wellens Test für 72h) zeigten, dass der refraktäre CSB um 110-140% für LV und 250% für VLV erhöht wurde. Der Zusatz von Co-Substraten hatte nur geringen Einfluss auf den CSB (+50%), zudem wurden keine negativen Auswirkungen für P oder N beobachtet.

Die Entwässerbarkeit des vergorenen Schlammes wurde mit einer thermogravimetrischen Analyse (TR(A)) des Reaktoablaufs bewertet. Hierdurch wurde die theoretische Menge an freiem Wasser ermittelt, welche durch mechanische Entwässerung entfernt werden kann. Die Ergebnisse der TR(A)-Messung zeigen, dass die Entwässerbarkeit eines Vergleichsschlammes (TR(A) = 20-24%) durch Grasszugabe (TR(A) = 31%) und thermische Hydrolyse (TR(A) = 33-40%) deutlich erhöht werden kann.

Kapitel 4

Großtechnische Versuche zur Co-Vergärung (ISWW, SE/BS, AVB)

Die großtechnischen Versuche zur Co-Vergärung wurden in Faultürmen des Klärwerks Braunschweig zwischen Nov 2010 und Aug 2011 durchgeführt (IMP: Juni 13-Juli 31). Alle drei Faultürme wurden vor den Versuchen von thermophile auf mesophile (38 °C) Bedingungen abgekühlt, um die Vergleichbarkeit der Großversuche zu sichern. Das Gras für die Co-Vergärung wurde von den Rieselfeldern geerntet und vor der Dosierung mindestens 6 Wochen in Silageschläuchen gelagert.

Alle Faultürme wurden durch eine zeitgesteuerte Beschickungseinheit mit dem gleichen Rohschlamm (Mischung aus Primär und Überschussschlamm) beschickt. Entsprechend der Größe der Faultürme erhielten sie 20% (Turm 1) und 40% (Türme 2&3) des Gesamtschlammvolumens. Faulturm 1 wurde zusätzlich mit Grassilage beschickt; 5-10% zusätzlicher FS entsprechend 600-1.000kg Substrat aus Grassilage pro Tag ($FS_{\text{grass}} = 55\%$, $oTS_{\text{grass}} = 95\%$ des FS). Faulturm 2 erhielt keine Co-Substrate und wurde als Referenz genutzt. Faulturm 3 wurde mit Fett als Co-Substrat beschickt, welches auch vor dem Versuch als Co-Substrat verwendet wurde (Tabelle 2). Standardparameter zur Charakterisierung des zu- und ablaufenden Schlammes wurden mindestens einmal wöchentlich gemessen, während die Schlammvolumina und die Biogasproduktion kontinuierlich gemessen wurden.

Tabelle 2: Betriebseinstellungen der Faultürme

Faulturm	Volumen	Mittlere Verweilzeit* (min – max) [d]	Verweilzeit (20d-Mittelwert) während IMP	Substrattyp	Anteil der Co-Substrate, Mittelwerte	
					%FS	%Volumen
1	2,100 m ³	17.5 (14.9 - 21.4)	16.5	Rohschlamm + Grassilage	9	15.3**
2	4,450 m ³	21.8 (18.6 - 26.4)	20.5	Rohschlamm	-	-
3	4,450 m ³	20.3 (17.5 - 23.9)	19.2	Rohschlamm + Fett	1.9	5.9

* im Versuchszeitraum (20d-Mittelwerte)

** incl. Spülwasser (0,9% zusätzliches Volumen an Grass ohne Spülwasser)

Ernte, Silage und Dosierung von Gras.

Gras wurde im Juni (11t/ha) und September (5t/ha) geerntet, getrocknet und mechanisch zerkleinert, bevor es in den Silageschläuchen gelagert wurde. Das Zerkleinern oder Schreddern erzeugte Fasern von 2-3cm Länge (erwartet waren 8mm), was möglicherweise einen negativen Einfluss auf die Abbaukinetik im Vergärungsprozess wegen der verringerten Oberfläche hatte. Während der Versuchen konnten keine negativen Einflüsse (z.B. Schimmel) auf die Grasqualität beobachtet werden. Die Beschickung erfolgte durch einen Quickmix (Vogelsang GmbH) Feststoffdosierer für Biogasanlagen mit Vorlagebehälter (landwirtschaftlicher Mischer/Beschicker von 12m³). Täglich wurde diese Vorlage durch einem Radlader aus den Silageschläuchen gefüllt. Einmal am Tag wurde dann 600-1000kg Grassilage mit 15-30 m³ Klarwasser des

Klärwerks in das Faulturmbeschickungsrohr gespült. Gelegentlich hat das Gras im Faulturm eine Schwimmschicht gebildet, aber es wurden hierdurch in der Versuchsperiode keine negativen Effekte beobachtet. Im Winter wurde ein wärmeisoliertes Gehäuse aufgestellt, um ein Einfrieren der Beschickungseinrichtung zu verhindern.

Einfluss des Co-Substrats auf Biogasertrag und –qualität

Die Massenbilanz der Faultürme für CSB, P und N konnte mit annehmbarer Genauigkeit (<10% Unterschied zwischen Input und Output) geschlossen werden. Die volumenbezogene Belastung der Faultürme wurde von 1.76 kg oTS/(m³*d) für den Vergleichsfaulturm auf 2.04 kg oTS/(m³*d) mit Grassilage erhöht. Wegen der Nutzung von Spülwasser zur Beschickung des Co-Substrats hatte Faulturm 1 eine verringerte Verweilzeit von 16,5d während der IMP. Alle Faultürme wurden während der IMP unter stabilen Bedingungen betrieben mit einem niedrigen Anteil an organischen Säuren (<100 mg/L HAc_{eq}).

Im Vergleich zum Referenzfaulturm konnte durch die Zugabe von Grassilage der Biogasertrag nur um 2% während der IMP Phase erhöht werden (Tabelle 3). Das in den Pilotversuchen beobachtete Potential zur Erhöhung des Biogasertrags (+23% Gasproduktion) konnte im Großversuch nicht nachgewiesen werden. Gründe für den geringen Einfluss der Grassilagezugabe im Großversuch könnten die geringere Verweilzeit (wegen Spülwasser), schlechte Mischungsbedingungen im Faulturm oder eine zu geringe Zerkleinerung der Grassilage durch den Schredder sein. Dadurch könnte der Abbau der größeren Faser in der verringerten Verweilzeit nur zum Teil abgelaufen sein (siehe auch Diskussion in Kapitel 7). Zusätzlich könnte eine eingeschränkte Genauigkeit der Gasmessung oder der Massenbilanz auf einen zu niedrig gerechneten Biogasertrag hindeuten.

Für die anlagenweite Umsetzung der Co-Vergärung kann angenommen werden, dass für eine Kläranlage mit 100.000 EW ca. 30 ha intensive bewirtschaftete Fläche (Grasertrag 7t oTS/ha*a) erforderlich sind, um 10% oTS Grassilage als Substrat der Faulung zuzuführen (Annahme: 2700t oTS/100.000 EW).

Table 3: Spezifische Gaserträge in der IMP Phase

Reaktor	Verweilzeit	CH ₄ Gehalt	Gasertrag	Erhöhung durch Co-Vergärung	Abbau der oTS
	[d]	[%]	[NL/kg oTS _{input}]*	[%]	[%]
Faulturm 1 (+ 10% FS Gras)	16.5	61.8	589	2	45
Faulturm 2 (Referenz)	20.5	62.5	578	-	48
Faulturm 3 (+ Fett)	19.2	63.7	565	-2	45.4

* bezogen auf oTS im Schlamm

Organische und anorganische Schadstoffe

Durch die Zugabe von Grassilage konnten keine negativen Effekte beobachtet werden, und der Gehalt an organischen und anorganischen Schadstoffen lag während der Versuchsphase deutlich unter den Grenzwerten.

Entwässerbarkeit und Rückbelastung

In der flüssigen Phase des Co-Vergärungsschlammes konnte keine Erhöhung des filtrierten CSB, N oder P nachgewiesen werden. Wie im Pilotversuch war es nicht möglich, die N-Gehalte im Schlammwasser für die vermehrte Rückgewinnung von Stickstoff durch Zugabe von Grassilage zu erhöhen. Entwässerungsversuche mittels TR(A) Analyse zeigten keine deutliche Auswirkung der Zugabe von Grassilage auf den freien Wassergehalt des Schlammes. Die vielversprechenden Ergebnisse der Pilotversuche (deutlich erhöhte TR(A)) konnten nicht reproduziert werden.

Kapitel 5

Ökobilanz (KWB, BWB, SE/BS)

Ökobilanz des Abwassersystems in Braunschweig

Dieser Teil des Projekts bewertet die Umweltauswirkungen des Abwassersystems in Braunschweig mittels der Methodik der Ökobilanzierung. Alle relevanten Stoffflüsse der Abwasserbehandlung im Jahr 2010 sind in einem Stoffstrommodell bilanziert und durch Angaben aus der Fachliteratur ergänzt, um die Gesamtemissionen und den Rohstoffverbrauch des Systems zu berechnen (Abbildung 3). Produkte des Systems (z.B. Strom aus der Biogasnutzung, Nährstoffe und Verregnungswasser) sind durch Gutschriften für die entsprechend substituierten Produkte angerechnet. Zuzüglich zum Status Quo des Klärwerks Braunschweig in 2010 werden verschiedene Optimierungsszenarien bewertet, um eine erhöhte Energie- und Nährstoffrückgewinnung zu erzielen.

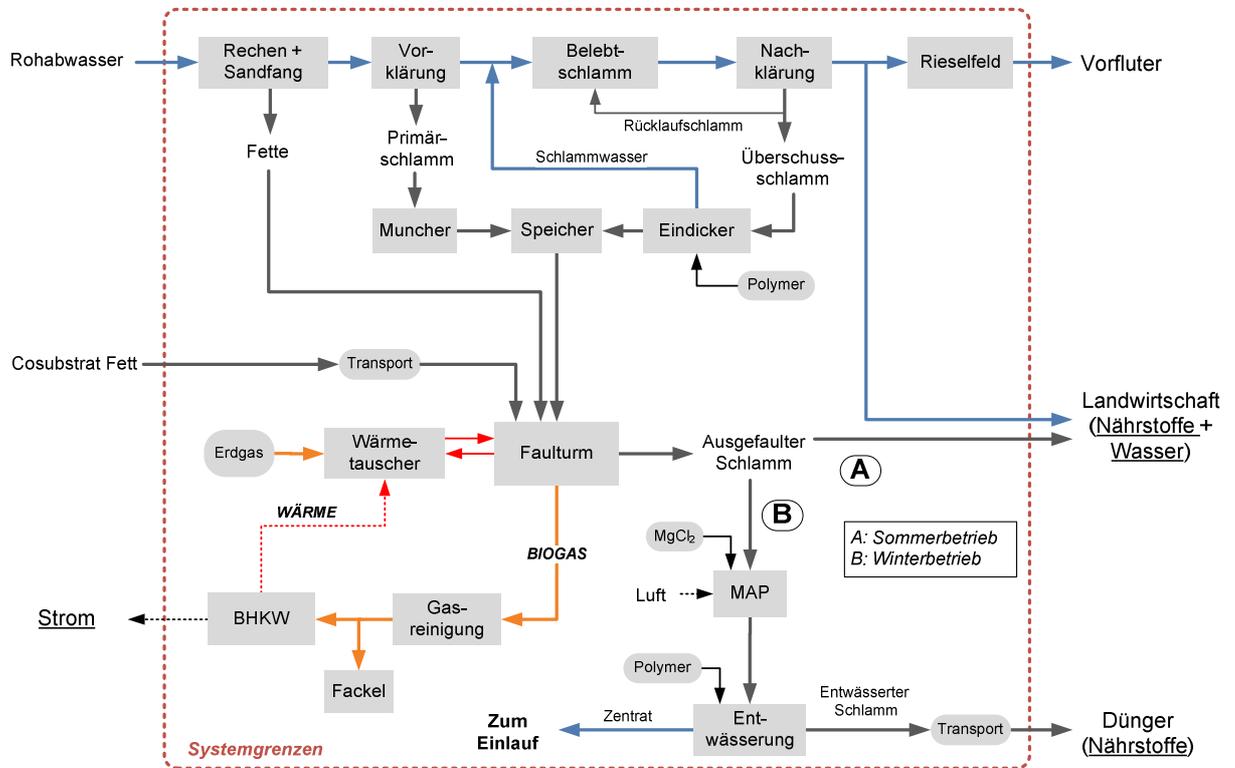


Abbildung 3: Systemgrenzen der Ökobilanz des Braunschweiger Abwassersystems 2010 (Produkte sind unterstrichen)

Die Energiebilanz des Systems fällt vergleichsweise gut aus, da 79% des kumulierten Energieaufwandes durch Sekundärprodukte ausgeglichen werden können, hauptsächlich durch Biogas (58%) oder Ersatz von Mineraldünger (14%). In der Optimierung des Nährstoff- und besonders des Wassermanagements liegt erhebliches Potenzial zu Verbesserung der Energiebilanz, da erhebliche Strommengen zur Förderung des Klarwassers auf die landwirtschaftlichen Flächen erforderlich sind. Die Nettobilanz an Treibhausgasemissionen ergibt $10 \text{ kg CO}_2\text{-Äq}/(\text{EW}_{\text{CSB}} \cdot a)$ und wird hauptsächlich durch die energieintensiven Prozesse verursacht, obwohl direkte Emissionen von N_2O und CH_4 auch einen Beitrag bilden. Die Nährstoffemissionen in

Oberflächengewässer sind verhältnismäßig gering (29 g P und 80 g N/(EW_{CSB}*a)) wegen des Nährstofftransfers in die Landwirtschaft und der Nachreinigung des Klarlaufs durch die Rieselfelder. Während die humantoxischen Emissionen nach der Normalisierung einen geringen Beitrag haben, können Cu- und Zn- Emissionen erhebliche ökotoxische Wirkungen in Gewässer und Boden haben (organische Schadstoffe wurden nicht betrachtet). Die Normalisierung der Umwelteinwirkungen verdeutlicht die Hauptfunktion der Kläranlage, nämlich den Schutz der Oberflächengewässer vor organischen und anorganischen Schadstoffen sowie vor exzessivem Nährstoffzugabe. (Abbildung 4). Der quantitative Beitrag des Systems zur Eutrophierung und Ökotoxizität ist relativ hoch, während der Energieverbrauch und damit verknüpfte Indikatoren wie der Treibhauseffekt, Versauerung und Humantoxizität nur geringfügig zu den Gesamtumweltauswirkungen in Deutschland beitragen. Infolgedessen sollte die Optimierung von Energieverbrauch und Treibhauseffekt nur angestrebt werden, wenn dadurch die Hauptfunktion der Kläranlage und damit verbundene Umweltwirkungen nicht beeinträchtigt werden.

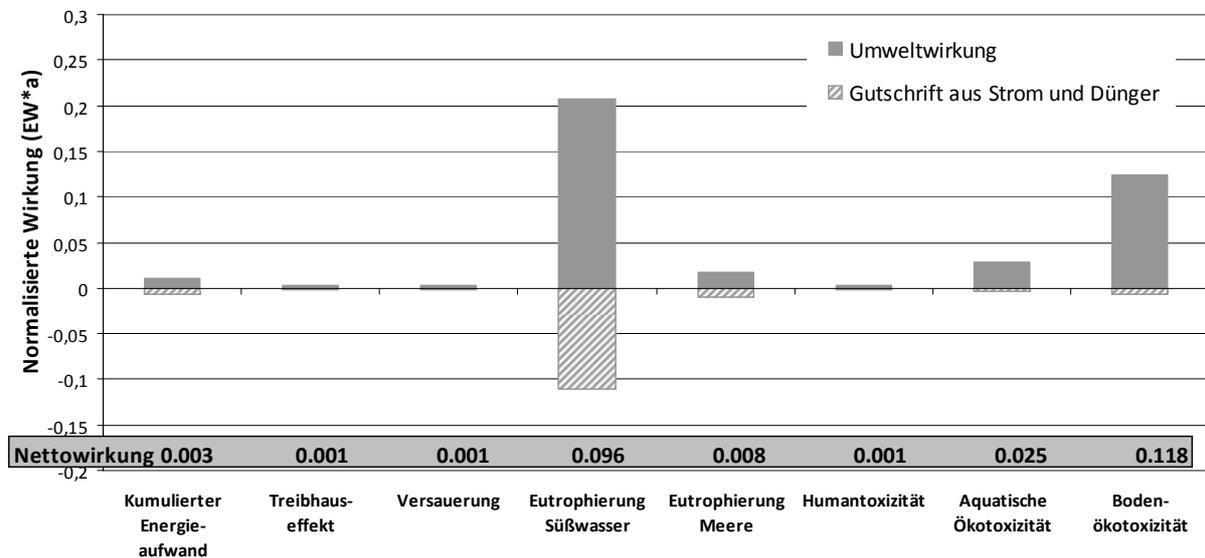


Abbildung 4: Normalisierter ökologischer Fußabdruck des Braunschweiger Systems

In der Szenarienanalyse haben die Zugabe von Co-Substraten und die thermische Hydrolyse zur Erhöhung der Biogasausbeute in der Faulung beide einen deutlich positiven Effekt auf die Energie- und Treibhausgasbilanz, ohne andere Umweltauswirkungen zu verschlechtern. Nach den Ergebnissen der Pilotversuche in CoDiGreen kann der Energiebedarf durch Co-Vergärung und thermische Hydrolyse um bis zu 80% reduziert werden (Daten sind noch durch Großversuche zu bestätigen). Ein zweistufiges Vergärungsverfahren mit einer zwischengeschalteter Entwässerung und Hydrolyse (VLV-Konfiguration mit EXELYS™) scheint im Hinblick auf Energie- und Treibhausgasbilanz vielversprechend. Die Rückgewinnung von Stickstoff und Phosphor aus dem Schlammwasser ergibt keine ökologischen Vorteile (im Fall von NH₃ Strippung mit erheblichen Einsatz von NaOH), während der Einsatz eines ORC (Organic Rankine Cycle) Verfahren zur Energierückgewinnung aus ökologischer Sicht empfohlen werden kann.

Die Methodik und Ergebnisse dieser Ökobilanz wurden einem kritischen Review unterzogen (Prof. Matthias Finkbeiner, TU Berlin, Fachgebiet Sustainable Engineering) und entsprechen den Anforderungen der ISO 14040/44.

Ökobilanz der Schlammbehandlung im Klärwerk Berlin-Wassmannsdorf

Zweck dieser Studie ist die Erprobung der Methodik der Ökobilanz zur Systemanalyse am Beispiel der Schlammbehandlung und –entsorgung im Klärwerk Berlin-Wassmannsdorf mit den Schwerpunkten auf Energie- und Treibhausgasbilanz darzustellen. Zusätzlich zur Analyse des Status Quo für 2009 wurden Maßnahmen zur energetischen Optimierung des Systems auf ihre Auswirkungen auf die Energiebilanz und auf die Treibhausgasemissionen bewertet. Das Systemmodell enthält alle relevanten Prozesse der Schlammbehandlung und –entsorgung inkl. der Stromversorgung, Chemikalierversorgung, Transport und Verbrennung des Schlammes und Behandlung der Rückbelastung im Hauptstrom des KW. Gewonnene Produkte der Schlammbehandlung (Biogas aus der Faulung und MAP-Dünger) und Verbrennung (Elektrizität oder der Ersatz von fossilen Brennstoffen) werden durch Gutschriften der entsprechend substituierten Produkte angerechnet.

Insgesamt fällt die Energiebilanz der Schlammbehandlung in Berlin Wassmannsdorf positiv aus: 162 MJ pro Einwohnergleichwert und Jahr (EW*a) können netto erzeugt werden. Dies wird hauptsächlich durch das in der Faulung produzierte Biogas und durch den Ersatz von fossilen Brennstoffen geleistet. Gleichermäßen ergibt die Treibhausgasbilanz vermiedene Emissionen von 11.6 kg CO₂-äq/(EW*a) und stellt damit die positive Umweltauswirkung der Energiegewinnung aus Klärschlamm dar. Allerdings wurden die Emissionen der wirkungsvollen Treibhausgase CH₄ und N₂O anhand von generischen Emissionsfaktoren aus Fachliteratur berechnet. Es ist daher dringend notwendig, diese Ökobilanz mit realen Messdaten der Emissionen zu bestätigen und ggf. zu ergänzen.

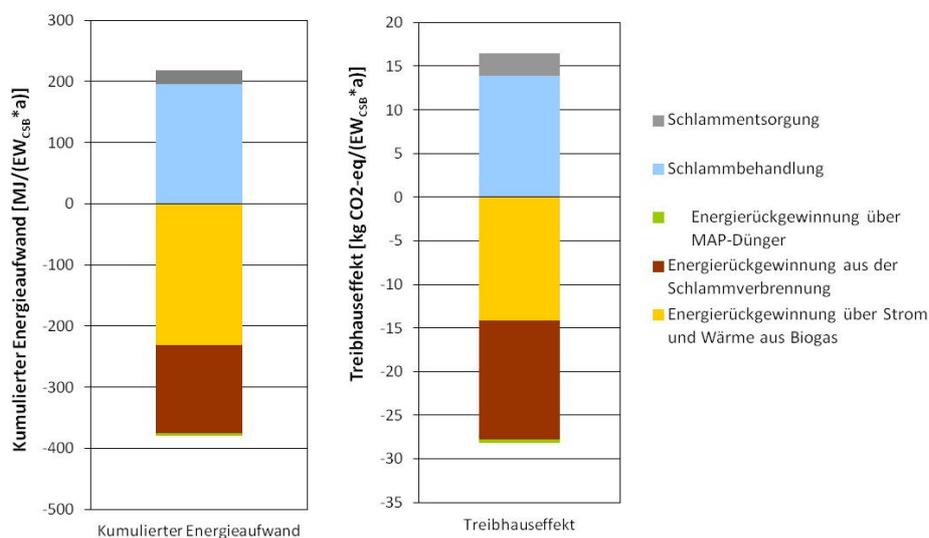


Abbildung 5: Kumulativer Energiebedarf und Treibhauseffekt der Schlammbehandlung und –Entsorgung in Berlin-Wassmannsdorf 2009

Die Bewertung der Optimierungsmaßnahmen zeigt, dass die verschiedenen Entsorgungswege für entwässerten Klärschlamm sich stark in ihrem ökologischen Profil unterscheiden und offenbart besonders in der Monoverbrennung des ausgefaulten Schlammes ein großes Potential zur Optimierung. Bestimmte Maßnahmen verbessern die Energie- und Treibhausgasbilanz, können aber gleichzeitig die Emissionen von wirkungsvollen Treibhausgasen wie N₂O erhöhen (Behandlung von Schlammwasser durch Deammonifikation).

Kapitel 6

Risikoanalyse (KWB, AVB)

In diesem Arbeitsabschnitt wurde für die Braunschweiger Abwasserbehandlung eine Risikobewertung in Anlehnung an die Methodik des Water Safety Plans (WSP) durchgeführt, eine Methodik zum prozessorientierten, risikobasierten Management von Trinkwassersystemen nach dem HACCP Konzept. Als erster Schritt eines integrierten Risikomanagements wurden folgenden Risikobereiche analysiert:

- Risiken für die menschliche Gesundheit durch Krankheitserreger in dem zur Bewässerung genutzten Klarwasser
- Risiken für die menschliche Gesundheit durch in den landwirtschaftlichen Flächen enthaltenen und aufgetragenen Schwermetalle
- Risiken für terrestrische und aquatische Ökosysteme durch den Eintrag von Schwermetallen in Oberflächengewässer und auf landwirtschaftliche Flächen

Nachdem Gefahren identifiziert und charakterisiert wurden, wurde für im Klärschlamm und Klarwasser enthaltene Krankheitserreger und Schwermetalle eine Risikobewertung durchgeführt. Andere Gefahren (z.B. organische Schadstoffe, Nitrat im Grundwasser) wurden im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet.

Risiken für die menschliche Gesundheit durch Krankheitserreger

Für diesen Abschnitt wurde eine quantitative mikrobiologische Risikobewertung (QMRA) durchgeführt. Nach der Identifikation relevanter Krankheitserreger, wurden auf Basis von Literaturinformationen Annahmen für die Gehalte an Krankheitserregern im Zulauf der Kläranlage, für die Reduktionsperformance der Anlage, sowie für die Eckdaten der Expositionsabschätzung getroffen. Mikrobiologische Risiken wurden in Szenarien für Feldarbeiter, Anwohner und die orale Aufnahme von Boden durch Kleinkinder mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen (1000-Runs) quantifiziert. Als tolerierbares Risiko wurde der von der WHO für Wasserwiedernutzung festgesetzte Wert von einem zusätzlichen μ DALY (disability adjusted life years) pro Person und Jahr herangezogen. Dies entspricht einem zusätzlichen Risiko einer leichten Durchfallerkrankung von 1:1000.

Dieses von der WHO festgesetzte tolerierbare Infektionsrisiko wird für die Referenzpathogene Norovirus und Rotavirus in den Szenarien für Feldarbeiter und Kinder deutlich überschritten. Das zusätzliche Infektionsrisiko ist mit dem allgemeinen Infektionsrisiko in Deutschland von 110 und 14 μ DALY pro Person und Jahr für Rotavirus bzw. Norovirus zu vergleichen. Um die WHO Richtlinien zu erfüllen wäre eine zusätzliche Minderung der Pathogenkonzentration um 1,5 logarithmische Einheiten nötig. Da diese Ergebnisse jedoch auf Basis von Literaturdaten generiert wurden, bedürfen sie, wie jedes Modell, der Validierung. Diese sollte durch die Etablierung eines regelmäßigen Monitorings von Referenzorganismen im Standort Braunschweig erfolgen.

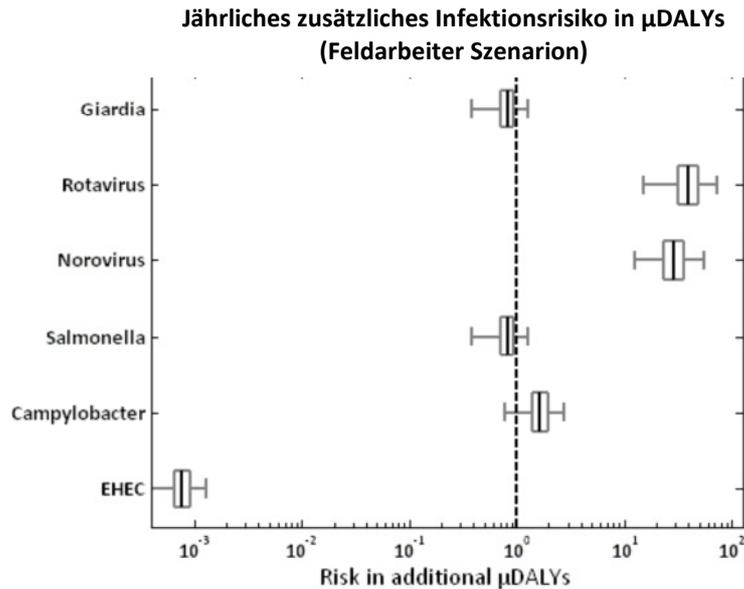


Abbildung 6: Jährliches Risiko für das Feldarbeiterszenario (gestrichelte Linie ist WHO Standard = 1 μ DALY; Bestehendes Ansteckungsrisiko für Rotavirus und Norovirus liegt in Deutschland bei 110 bzw. 14 μ DALY pro Person und Jahr)

Risiken für die menschliche Gesundheit und der Umwelt durch Schwermetalle

Die Bewertung von Risiken für terrestrische und aquatische Ökosysteme sowie derjenigen für die menschliche Gesundheit durch Schwermetalle erfolgte auf Basis des *European Union Technical Guidance Document on Risk Assessment* (TGD). Tolerierbare Schwermetallkonzentrationen im Boden wurden bezüglich möglicher Gesundheitsbeeinträchtigungen von den jeweiligen metallspezifischen ADI-Werten (acceptable daily intake) abgeleitet, die die tolerierbare tägliche Aufnahmemenge eines Stoffes definieren, die Beurteilungswerte für etwaige Ökosystemschäden (PNECs) aus den Ergebnissen ökotoxikologischer Tests.

Bezüglich der menschlichen Gesundheit stellt die Anreicherung von Cadmium in Weizen für Menschen das größte Risiko dar. Die auf Basis der ADI Werte abgeleiteten kritischen Bodenkonzentrationen liegen zwischen 0.5-0.8 mg Cd/kg TS, in Abhängigkeit des mathematischen Ansatzes zur Beschreibung der Beziehung zwischen Boden- und Pflanzenkonzentration. Die Modellergebnisse prognostizieren leicht fallende Bodenkonzentrationen. Dieses Ergebnis unterliegt jedoch großen Unsicherheiten und kann durch die erhobenen Überwachungsdaten nicht eindeutig verifiziert werden (Abbildung 7). Darum wird es empfohlen auch zukünftig die Cd Gehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden zu überwachen, v.a. auf denjenigen Flächen auf denen die Bodenkonzentrationen über dem dargestellten Mittelwert liegen.

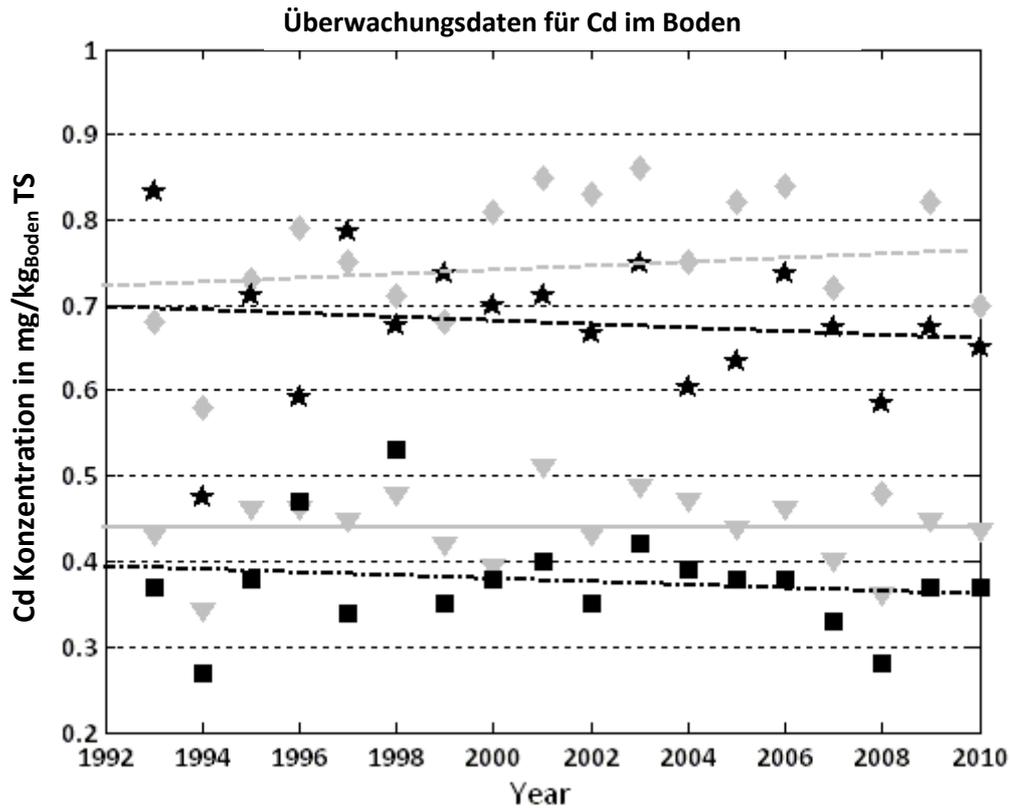


Abbildung 7: Überwachungsdaten (Mittelwerte) von verschiedenen, mit Klarwasser und Schlamm behandelten Flächen in Braunschweig

Bezüglich ökotoxischer Effekte konnten keine Risiken für terrestrische oder aquatische Systeme festgestellt werden, die sich auf die aktuelle Praxis zurückführen ließen. Auch diesbezüglich sollte die Entwicklung der Konzentrationen an Schwermetallen im Boden auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen weiterhin überwacht werden um frühzeitig mögliche Risiken zu identifizieren.

Kapitel 7

Fazit und Aussichten

Pilot- und Großversuche der Co-Vergärung und thermischen Hydrolyse

Pilotversuche der Vergärung in Laborreaktoren lieferten für Co-Vergärung mit Grassilage (+31% zu oTS) und thermischer Hydrolyse (+10-20% zu oTS im Schlamm, abhängig von der Konfiguration) vielversprechende Ergebnisse zur Erhöhung des CH₄-Ertrags. Die Laborversuche werden durch die hohe Genauigkeit der Massenbilanzen bestätigt. Es wird keine kritische Anreicherung oder Entstehung organischer oder anorganischer Schadstoffe nachgewiesen. Thermogravimetrische Analysen zeigen bei beiden Verfahren eine Verbesserung der Entwässerbarkeit des Faulschlammes. Die Rückbelastung nimmt bezüglich CSB für Co-Vergärung und thermische Hydrolyse zu, wobei letztere aufgrund der erhöhten Temperatur auch refraktären CSB bildet.

Großtechnische Versuche der Co-Vergärung mit Grassilage im Klärwerk Braunschweig zeigen, dass die technische Durchführung der Zugabe von Co-Substrat mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Allerdings können die vielversprechenden Ergebnisse der Laborversuche nicht im Großversuch reproduziert werden. Trotz einer FS-Zugabe von 10% konnte im Vergleich zu einem Referenzfaulturm nur eine geringfügige Erhöhung (+2%) der Biogasproduktion erreicht werden. Mögliche Ursachen sind wie folgt zu vermuten:

- Verkürzung der Verweilzeit im Faulturm durch Zufuhr von Spülwasser bei der Dosierung der Grassilage
- Verkleinerung der Grassilage war nicht ausreichend (Fasern von 2-3cm), was den biologischen Abbau verzögert hat
- Schlechte Vermischung im Faulturm → Trennung von Gras und Schlamm (Bildung einer Grasschicht?) → Bildung toter Zonen mit Grassilage, geringe effektive Verweilzeit.

Nach einer ausführlichen Untersuchung der Versuchsergebnissen (Abbau von FS und oTS) konnte der Unterschied zwischen Labor- und Großversuchen auf schlechte Hydrodynamik und schlechte Phasenvermischung zwischen Grassilage und Faulschlamm zurückgeführt werden (Hydrodynamik und Phasenvermischung wurden nicht untersucht, können aber einen großen Einfluss auf Biogasproduktion haben). Die Zugabe von Spülwasser und größere Fasergrößen können ebenfalls zu der geringeren Biogausausbeute der Großversuche geführt haben. Außer den technischen Aspekten kann angenommen werden, dass unterschiedliche Probenahmemethoden (1-2 Proben pro Woche im Großversuch im Gegensatz zu einer kontinuierlichen Beprobung aller Versuchsreihen im Laborversuch) auch die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinflusst haben.

In den Pilotversuchen der Co-Vergärung und der thermischen Hydrolyse wurde ein großes Potential zur Erhöhung des Biogasertrages und dadurch eine Verbesserung der Energie- und Treibhausgasbilanzen der Abwasserbehandlung in Braunschweig entdeckt. Im großtechnischen Versuch wurden verschiedene Hemmnisse beobachtet, die die Umsetzung der Laborergebnisse in die Praxis verhinderten. Diese sollten in zukünftigen Forschungsarbeiten entsprechend berücksichtigt werden (Tabelle 4). Eine ökonomische

Analyse wird empfohlen, um die Kosten und Vorteile der Co-Vergärung mit Grassilage inkl. der Ernte, Silage, Personalkosten des Klärwerks sowie den Schlamm Entsorgungskosten zu prüfen.

Tabelle 4: Möglichkeiten und Hemmnisse der großtechnischen Realisierung sowie entsprechende Anforderungen an Forschung und Entwicklung

Verfahren	Potential für CH ₄ Erhöhung	Hemmnisse bei der Umsetzung in die Praxis	Anforderungen an zukünftige F&E
Status quo	?	- Verbesserte Durchmischung in Faultürmen	- Analyse der Verweilzeitverteilung
Co-Vergärung (+10% FS Gras)	+31%	- Fasergröße - Hydrodynamik in Faultürmen - Beschickung/Mischen von Gras und Schlamm	- Pilotversuche mit verschiedenen Fasergrößen - Analyse der Verweilzeitverteilung - Systemanalyse
VLV (Exelys™)	+19%	- Einfluss auf Entwässerbarkeit - Energiebilanz - Zentrat: refraktärer CSB	- Versuchsanlage von Hilerod (Ergebnisse von Krüger), Daten verfügbar - Trübwasserbehandlung
VLV + Co-Vergärung (+10% FS Gras)	> 38%?	- Nicht geprüft	- Pilotversuche

Ökobilanz der Umweltauswirkungen in Berlin + Braunschweig

Die Methodik der Ökobilanz wurde erfolgreich angewandt, um die Umweltauswirkungen der Abwasserbehandlung in Braunschweig und der Schlammbehandlung in Berlin-Wassmannsdorf zu bewerten. Zusätzlich zur Erfassung des Status Quo von beiden Systemen, um Teilprozesse mit großer Umwelteinwirkung zu identifizieren, wurden auch mehrere Optimierungsmaßnahmen analysiert, die die Umweltauswirkungen verringern könnten. Die Analyse der Schlammbehandlung in Berlin zeigt, dass durch die Vergärung und die anschließende Verbrennung der Schlämme beachtliche Gutschriften in der Energie- und Treibhausgasbilanz erreicht werden. Dies wird hauptsächlich durch die Wärme- und Energieerzeugung und durch den Ersatz von fossilen Brennstoffen erreicht.

Positive Umweltauswirkungen in Braunschweig wurden quantifiziert und beziehen sich hauptsächlich auf den verringerten Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in die Oberflächengewässer. Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen, wie wichtig es ist, die Primärfunktion eines Klärwerks (Schutz der Oberflächengewässer) zu erhalten, bevor nachgelagerte Themen wie Energie- oder Treibhausgasbilanzen betrachtet werden. Die Methodik der Ökobilanz für Braunschweig wurde nach ISO 14040/44 von unabhängiger Stelle geprüft.

Risikoanalyse des Braunschweiger Systems

Um die Methodik des Water Safety Plans auf den Abwasserbereich zu übertragen und somit ein auf dem HACCP Konzept beruhendes Management zu initiieren wurde für das Braunschweiger Wiedernutzungskonzept eine Bewertung ausgewählter Risiken durchgeführt. Mittels validierter und anerkannter Modelle und Methoden zur Risikoabschätzung wurden etwaige Risiken sowohl für die menschliche Gesundheit als die Umwelt quantifiziert. Es wurden sowohl hygienische Risiken (Krankheitserreger) als auch chemische Risiken (Schwermetalle) betrachtet. Die auf Basis vorhandener Systemdaten und Literaturannahmen erhaltenen Ergebnisse sollten nun verifiziert werden. Dies gilt insbesondere für Viren im Klärwerksablauf und im Klärschlamm, sowie für die Bodenkonzentrationen von Cd und Zn auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Empfehlungen zur Systemoptimierung

Aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens CoDiGreen können Empfehlungen zur Systemoptimierung der Abwasserbehandlung in Braunschweig und Berlin abgeleitet werden.

Für die Braunschweiger Abwasserbehandlung wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Einführung einer VLV-Demonstrationsanlage mit EXELYS™ Prozess
- Einführung des Organic Rankine Cycle (ORC) Verfahrens, um den Wärmeüberschuss in Strom umzuwandeln
- Analyse der hydraulischen Mischungsverhältnisse in den bestehenden Faultürmen
- Pilotversuche, um Hemmnisse für die Co-Vergärung mit Grassilage zu überwinden (Fasergröße, Mischung im Faulturm)
- Großversuche der Co-Vergärung mit Gras unter thermophilen Bedingungen
- Ökonomische Studie der Co-Vergärung und Entwicklung von Szenarien, um Einschränkungen und mögliche Potentiale zu identifizieren
- Weitere Untersuchungen, um die Auswirkungen der Co-Vergärung und der thermischen Hydrolyse auf die Entwässerbarkeit der Schlämme zu identifizieren und quantifizieren
- Überwachung möglicher Risiken durch landwirtschaftliche Wiederverwertung: Beprobieren der Schlämme und der Zu- und Abläufe des Klärwerks für ein Jahr auf pathogene Viren, regelmäßige Bodenproben von repräsentativen landwirtschaftlich genutzten Flächen auf Cd-Gehalt untersuchen und entsprechende Massenbilanzen erstellen

Für die Berliner Abwasserbehandlung wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Erweiterung der Ökobilanz auf die gesamte Kläranlage, um dadurch mögliche Nebenwirkungen der Schlammbehandlung zu bewerten
- Ergänzung der bestehenden Energie- und Treibhausgasbilanzen mit anderen Umweltindikatoren (z.B. Human- und Ökotoxizität), um eine umfassende Umweltbewertung der Optimierungsmaßnahmen zu erstellen
- Optimierung der Energiebilanz und Minderung der N₂O Emissionen der Mono-Verbrennung (Vorgeschaltete Trocknung der Schlämme?)
- Erweiterte Nutzung von Co-Substraten in der Faulung mit Überwachung der Nebenwirkungen (Entwässerbarkeit, Rückbelastung)
- Nutzung der Überschusswärme z.B. durch ein Organic Rankine Cycle Verfahren

Kapitel 8

Veröffentlichungen

Konferenzbeiträge

Klein D (2011): Improving biogas production on wastewater treatment plants by co-digestion of grass. Presentation at conference “Progress in Biogas”, 30 Mar-1 Apr, Stuttgart, Germany

Mieske R, Füllung K, Dockhorn T, and Dichtl N (2011): Influence of thermal disintegration in terms of biogas production and sludge properties in co-fermentation. Presentation at symposium “ReWater 2011”, 21-22 Nov 2011, Braunschweig, Germany.

Remy C, Lesjean B, and Waschnewski J (2011): Sustainable sewage treatment plant of the future: identifying global warming and energy optimization potentials with Life Cycle Assessment. Presentation at IWA conference “Cities of the Future”, 22-25 May 2011, Stockholm, Sweden, paper accepted for publication in *Water Science & Technology*

Remy C, Lesjean B, and Siemers C (2011): Evaluation and optimisation of the environmental footprint of the Braunschweig sanitation concept with Life Cycle Assessment. Presentation at symposium “ReWater 2011”, 21-22 Nov 2011, Braunschweig, Germany.

Remy C and Siemers C (2012): Environmental assessment of the Braunschweig system of agricultural reuse of effluent with Life Cycle Assessment. Presentation to be held at conference “45. Essener Tagung 2012”, 14-16 Mar 2012, Essen, Germany.

Remy C, Siemers C, and Lesjean B (2012): Assessing the environmental sustainability of agricultural reuse of WWTP effluent and biosolids in Braunschweig/Germany with Life Cycle Assessment. Presentation to be held at conference “IWA World Congress on Water, Climate and Energy”, 14-18 May 2012, Dublin, Ireland.

Projektberichte

D 1.1 B. Lesjean and C. Remy “Optimisation of energy and nutrient recovery in wastewater treatment schemes – Executive Summary of Project CoDiGreen”

D 2.2 C. Remy: “LCA study in Berlin-Wassmannsdorf”

D 2.4 C. Remy: “LCA study of Braunschweig system”

D 2.6 W. Seis: “Risk assessment of the wastewater-reuse strategy of Braunschweig” (diploma thesis)

D 3.3+3.5: T. Dockhorn, D. Klein, K. Füllung and R. Mieske: “Optimisation of energy and nutrient recovery in wastewater treatment schemes: pilot and full-scale trials”

Alle Berichte sind online verfügbar www.kompetenz-wasser.de

Anhang A

Information zur Kläranlage Wolfsburg (19 Jan 2011) von B. Lesjean + C. Remy

Kontakt: Marc Stueben, marc.stueben@web.wolfsburg.de, Tel. +49 5361 281220

Betriebsbedingungen in Wolfsburg

- **Einzugsgebiet** Stadt Wolfsburg + kleinere Gemeinden (insgesamt: 170000 Einwohnergleichwerte), Trennkanalisation (kein Regenwasser), geringe Zugabe aus der Industrie
- **Pumpen** des Abwassers bis zum Kläranlage (~ 10 km)
- **Abwasserbehandlung:**
 - Mechanische Reinigung (Rechen + Sandfang)
 - Keine Vorklärung
 - 6 Belebungsbecken (Bio-P + Nitrifikation/Denitrifikation im Kaskadenverfahren), Kein Stickstoffabbau im Sommer (Maximierung der N-Rückgewinnung in der Landwirtschaft)
 - Nachklärung
- **Schlammbehandlung** (nur Überschussschlamm!):
 - Statischer Eindicker
 - Entwässerung in Zentrifugen → TS = 20%
 - Trocknung → TS > 90%
 - Schlamm zur Verbrennung (VW)
- **Abläufe:**
 - Pufferteiche (~ 1-2d)
 - Förderung als Verregnungswasser auf landwirtschaftlich genutzte Flächen
 - Im Winter: Infiltration in das Grundwasser
 - Hochwasser → Oberflächengewässer (Fluss Aller)
- **Landwirtschaft:**
 - Betrieb der Bewässerung durch WEB (~ 1500 ha)
 - Druckleitungssystem zur Verteilung
 - Trockenwetter(Sommer): Zusätzlich Grundwasserförderung
- **Biogasanlage:**
 - Nur Mais (~ 700 ha)
 - Stabiler Vollzeitbetrieb
 - Elektrizität → 17 Mio. kWh/a zum Netz(Vergütung nach EEG)
 - Hitze → Schlammrocknung

Betrieb der Kläranlage

- Zufluss: ~ 8 Mio. m³/a, ca. 170000 EW,
- Kontinuierliche CSB Entfernung, Grenzwert im Abfluss: < 20 mg/L um Abwasserabgabe zu vermeiden
- Kontinuierliche Phosphoreliminierung nur im Winter (Grenzwert im Abfluss 1mg/L) durch Bio-P (mit Fe-Dosierung als Sicherheitsmaßnahme), im Sommer keine Eliminierung. Phosphorbedarf in der Landwirtschaft zu 100% gedeckt. (angereicherte P-Gehalte im Boden durch 70 Jahre Klärschlammdüngung)

- Stickstoffeliminierung nur im Winter (Grenzwert 18 mg/L N_{total} , 5 mg/L NH_4). Sehr gute Stickstoffeliminierung mit Werten unter 5 mg/L. Im Sommer: keine Stickstoffeliminierung um Nährstofftransfer in die Landwirtschaft zu maximieren.
- Schlamm (~ 10 t TS/d, keine anaerobe Stabilisation im Faulturm) muss entwässert werden (Zentrifuge + Polymere), getrocknet (Bandrockner mit Abwärme der Biogasanlage) und verbrannt (VW-Kraftwerk) wegen Bedenken der Verbraucher (Lebensmittelindustrie) → keine P-Rückgewinnung aus Schlamm! Könnte sich in Zukunft verändern (Kompost? Landwirtschaftliche Nutzung?)
- Normalerweise kein direkter Abfluss in Oberflächengewässer, nur bei Hochwasser. (< 10% des Volumens)
- Stromverbrauch 10-11 Mio. kWh (inkl. Pumpen, Klärwerk, Verregnung), Biogasanlage liefert 17 Mio. kWh → energieautarkes System.

Landwirtschaftliche Nutzung des Abwassers

- Zwei Verregnungsflächen (Brackstedt + Jembke), ~ 1500 ha
- Verregnete Wassermenge ~ 6 Mio m^3/a (= 390 mm, ~ 40 mm pro Monat)
- Landwirte werden verpflichtet, Abwasser zur Verregnung abzunehmen, manchmal mehr als notwendig
- Gebühr für Landwirte: ~ 45 Euro/ha*a
- WEB betreibt Verregnungssystem (Leitungssystem, Technik, 15 Mitarbeiter)
- Tägliche Erfassung der Wetterbedingungen (eigene Wetterstation)
- Felder haben teilweise Drainagen, um Überflutung zu verhindern
- WEB garantiert, dass Grundwasserqualität nicht durch Verregnung beeinträchtigt wird.
- Falls Wassermangel eintritt (trockener Frühling und Sommer), kann eingespeistes Grundwasser zum Teil zur Verregnung genutzt werden.
- Falls Felder nicht mehr landwirtschaftlich genutzt werden (Siedlungs- oder Straßenbau usw.) werden Sie durch neue Flächen ersetzt, ggf. mit entsprechender Vorbereitung:
 - Ausbau des Verregnungssystems
 - Untersuchung der Bodeneigenschaften
 - Beobachtungsbrunnen
- WEB muss gewährleisten, dass keine Aerosole verbreitet werden (30 ha Hecken) falls Siedlungen oder Straßen in der Nähe sind

Grundwasserneubildung

- Fläche von 300 ha (hauptsächlich Wald) mit Gräben. Infiltration in Kiesschicht
- Zwei Grundwasserleiter durch undurchlässige Schicht geteilt → keine hydraulische Verbindung (unterer Grundwasserleiter wird zur Trinkwasserversorgung genutzt!)
- Einleitung von Klarwasser in den oberen Grundwasserleiter im Winter (~ 1.800.000 m^3/a)
- Förderung von Grundwasser im Sommer für landwirtschaftliche Bewässerung ist möglich (trockener Sommer), aber im Durchschnitt < 0.6 Mio m^3 Überschuss pro Jahr → andauernde Wiederauffüllung der Grundwasserressourcen!
- Förderbrunnen befinden sich stromabwärts, Mindestverweilzeit im Boden > einige Monate
- Überwachung der Grundwasserqualität und des Grundwasserspiegels durch viele Beobachtungsbrunnen
- Modellierung der Grundwasserströme mit hydrodynamischen Modellen

Kosten

- 0.63 Euro/ m^3 für Abwasserbehandlung und Verregnung (ohne Kanalisation und Erfassung!)
- 0.18 Euro/ m^3 für Verregnung (Infrastruktur + Pumpkosten + Wartung)