



Charakterisierung der Stoffströme vorbehandelter Siedlungsabfälle in Deponiebioreaktoren

Franziska Wilk



ibvt-Schriftenreihe

Schriftenreihe des Instituts für Bioverfahrenstechnik
der Technischen Universität Braunschweig

Herausgegeben von Prof. Dr. Christoph Wittmann

Band 67

Cuvillier-Verlag
Göttingen, Deutschland



Herausgeber
Prof. Dr. Christoph Wittmann
Institut für Bioverfahrenstechnik
TU Braunschweig
Gaußstraße 17, 38106 Braunschweig
www.ibvt.de

Hinweis: Obgleich alle Anstrengungen unternommen wurden, um richtige und aktuelle Angaben in diesem Werk zum Ausdruck zu bringen, übernehmen weder der Herausgeber, noch der Autor oder andere an der Arbeit beteiligten Personen eine Verantwortung für fehlerhafte Angaben oder deren Folgen. Eventuelle Berichtigungen können erst in der nächsten Auflage berücksichtigt werden.

Bibliographische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. – Göttingen: Cuvillier, 2012

© Cuvillier-Verlag · Göttingen 2012
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten

Dieses Werk – oder Teile daraus – darf nicht vervielfältigt werden, in Datenbanken gespeichert oder in irgendeiner Form – elektronisch, fotomechanisch, auf Tonträger oder sonst wie – übertragen werden ohne die schriftliche Genehmigung des Verlages.

1. Auflage, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN: 978-3-95404-281-4

ISSN: 1431-7230



Charakterisierung von Stoffströmen vorbehandelter Siedlungsabfälle in Deponiebioreaktoren

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Franziska Wilk
aus Halle (Saale)



Die vorliegende Arbeit wurde an der technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau als Dissertation angefertigt.

Eingereicht am: 24.08.2012

Mündliche Prüfung am: 16.11.2012

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr. C. Wittmann

1. Referent: Prof. Dr. R. Krull

2. Referent: Prof. Dr. R. Kreuzig



Danke!

Ich bedanke mich zunächst bei Herrn Prof. Dr. Haarstrick und Herrn Dr. Franco-Lara dafür, dass sie mich nach Braunschweig holten und es mir ermöglichten, am ibvt meine Arbeit zu beginnen. Besonders danke ich Herrn Prof. Dr. Wittmann für Möglichkeit mein Projekt beenden zu können sowie für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Prof. Dr. Krull danke ich außerordentlich für die Übernahme des Erstprüfers und das fachliche Interesse an meiner Arbeit. Des Weiteren möchte ich mich besonders Herrn Prof. Dr. Kreuzig für die Übernahme des Zweitreferats bedanken.

Viele Kollegen erleichterten mir den Weg bis zum Ende meiner Dissertation. Besonders möchte ich mich hier bei Cord, Elena, Sandra, Theresa und Yvonne für die wahn-sinnig tolle Unterstützung und Zusammenarbeit im Labor bedanken. Nicole danke ich für die Erleichterung des Einstiegs im Müllprojekt sowie für die vielen Tipps und Rat-schläge zu Beginn meiner Arbeit. Besonders danke ich meinem Hiwi Alex, der mich über all die Jahre tatkräftig im Labor unterstützte sowie Jan und Manuel die mir in dieser Zeit äußerst behilflich waren.

Ich danke meinen zahlreichen Korrekturlesern, außerordentlich Steffi, René und Guido für die anregenden Diskussionen beim Zusammenschreiben meiner Arbeit!

Weiterhin möchte ich meinen Raumis Fritzi, Christoph, Manely und Thomas für die angenehme Atmosphäre im Büro sowie allen aktuellen und ehemaligen Kollegen für das ausgezeichnete Arbeitsklima sowie für die tolle Zeit am ibvt danken.

Einen leeren Akku wieder aufladen hilft oft im Kreise seiner liebsten. Somit danke ich außerordentlich meinen Freunden aus der Heimat, besonders meinen besseren Hälften Franzi und Thomas, für die seelische und moralische Unterstützung während der gesamten Zeit!!! Zu guter Letzt danke ich ausgesprochen meiner Familie für die Unterstützung in jeglicher Hinsicht!!

Franziska Wilk



Kurzzusammenfassung

Bei bisherigen Untersuchungen des Abbauverhaltens von Siedlungsabfällen in Deponiebioreaktoren traten häufig Probleme beim Vergleich verschiedener Reaktorgrößen sowie bei Simulationen für eine Übertragung in den Deponiemaßstab auf. Um diesen Problemen entgegenzuwirken, wurden in der vorliegenden Arbeit für die Charakterisierung mechanisch-biologisch vorbehandeltem Siedlungsabfalls, dessen Abbauverhalten und der damit verbundenen Biogasproduktion in verschiedenen großen Reaktionssystemen drei Reaktoren mit unterschiedlichen Größen (1,3 l; 18,8 l; 78,8 l), geometrisch ähnlichem Reaktoraufbau und gleichem H:D-Verhältnis von 1,7:1 konstruiert, gebaut und betrieben.

Zur Gewährleistung einer größtmöglichen Vergleichbarkeit erfolgte die Verwendung einer repräsentativen Abfallprobe bestehend zu 49,3 % aus einer Feinfraktion mit einer Partikelgröße < 5 mm und zu 50,7 % aus einer Grobfraktion mit einer Partikelgröße > 5 mm, die weiterhin in biologisch abbaubare (5,8 %) und biologisch schwer abbaubare (13,5 %) Substanzen sowie inerte Stoffe (31,4 %) klassifiziert wurde. Die Charakterisierung der Abfallschüttungen ergab mit steigendem Reaktorvolumen abnehmende Abfallporositäten zwischen $\epsilon_{RK}=0,69$ und $\epsilon_{RG}=0,55$ und abnehmende Wasserhaltekapazitäten zwischen $WHK_{RK}=0,25$ und $WHK_{RG}=0,16$.

Untersuchungen zum Abbauverhalten des Abfalls bei 40 °C zeigten, dass nach erfolgter Stagnierung der Gasbildung, eine künstliche Erhöhung der Temperatur auf 60 °C ein erneutes Einsetzen der Gassynthese bewirkte. Weiterhin wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Wassergehalte (40, 60, 70 % w/w) auf die Gasemissionen evaluiert, wobei in allen durchgeführten Versuchen und bei jeder Reaktorgröße bei einem Wassergehalt von 60 % w/w ein deutliches Optimum der Biogassynthese nachgewiesen wurde.

Mit Hilfe eines Künstlichen Neuronalen Netzes (KNN) konnten die für die Gasemission verantwortlichen chemischen und biochemischen Prozesse in den unterschiedlichen Reaktorgrößen und unter den abweichenden Einflussparametern mit sehr hoher Genauigkeit simuliert werden. Es konnte gezeigt werden, dass es mit ein und demselben Netz möglich ist, die Gasbildung der unterschiedlichen Skalen mit Hilfe experimentell gewonnener instationärer On- und Offlineprozessdaten zu simulieren. Damit ist die technische Grundlage für prädikative Vorhersagen der Gasemissionen von Siedlungsabfall in verschiedenen Skalen von Depo-niereaktoren gegeben.



Summary

In recent years, the degradation behavior of municipal solid waste in laboratory bioreactors was thoroughly investigated. Thereby, a comparison of different scales and the transfer of the acquired data from lab scale to large landfills displayed a challenging task. In order to handle these problems, three laboratory bioreactors with different volumes (1.3 l, 18.8 l, 78.8 l), equal geometry and a H:D ratio of 1.7:1, were investigated in the present study, particularly dealing with characterization of mechanically-biologically treated municipal waste, its degradation behavior as well as the associated biogas production.

To ensure maximum reproducibility of the analysed waste, a representative sample was generated consisting of a fine fraction (49.3 %) with a particle size < 5 mm and a coarse fraction (50.7 %) with a particle size > 5 mm. The coarse fraction was further divided in an organic (5.8 %), plastic (13.5 %) and an inert fraction (31.4 %). After carrying out experiments aiming on characterization of the different waste beds, it was found that with increasing reactor size, the porosities and water holding capacities decreased from $\epsilon_{RK}=0.69$ to $\epsilon_{RG}=0.55$ and $WHK_{RK}=0.25$ to $WHK_{RG}=0.16$, respectively.

Furthermore, investigations of the degradation behaviour of the municipal solid waste showed an increase in temperature from 40 °C to 60 °C after stagnation of gas synthesis leads to reinsertion of gas synthesis. Moreover, the effects of different water contents (40, 60, 70 % w/w) on gas emission were evaluated. During all experiments and in each reactor size an optimum of biogas production, at a water content of 60 % w/w, could be observed.

With an artificial neural network (ANN) it was possible to accurately simulate the chemical and biochemical processes which lead to the production of biogas in different scales. It was shown that the ANN facilitates the simulation of the gas production in different scaled laboratory bioreactors with the help of experimental non steady state on- and offline process data. For this reason the basis for predictive forecasts of gas emissions of municipal solid waste in different scales of landfill reactors was established.



Vorveröffentlichungen

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit der Genehmigung der Fakultät für Maschinenbau, vertreten durch den Mentor der Arbeit, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

Tagungsbeitrag

Wilk, Franziska: Investigation of gas emissions of mechanically and biologically treated municipal solid waste in different scaled laboratory bioreactors. (Vortrag) 1st International Conference of Biogas, Leipzig (Juni 2011).



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen.....	7
2.1 Deponierung von Abfällen	7
2.1.1 Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	7
2.1.2 Deponie als Bioreaktor	10
2.1.3 Phasen der Deponiegasentstehung	12
2.1.4 Charakterisierung der Abbauprozesse innerhalb der Abfallmatrix	15
2.1.5 Charakterisierung der Stoffströme in Deponien	18
2.1.6 Einflussfaktoren auf die Reaktionsprozesse und Transportvorgänge	20
2.1.7 Abbauprozesse in unterschiedlichen Skalen.....	24
2.2 Künstliche Neuronale Netze.....	25
2.2.1 Anwendungsbereiche Künstlicher Neuronaler Netze.....	25
2.2.2 Aufbau und Funktionsweise Künstlicher Neuronaler Netze	26
2.2.3 Training und Validierung	29
3 Materialien und Methoden	32
3.1 Abfallcharakterisierung.....	32
3.1.1 Sortierung und Klassierung	32
3.1.2 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung.....	32
3.1.3 Bestimmung der Dichte.....	33
3.1.4 Bestimmung der Porosität.....	35
3.1.5 Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität	36
3.2 Bestimmung des Wassergehalts	37
3.3 Bestimmung des Kohlenstoffgehalts im Feststoff	37
3.4 Elution des Abfalls	38
3.4.1 Elution im Überkopfschüttler	38
3.4.2 Elution in der Säule.....	38
3.5 Anaerobe Kultivierung in Deponiebioreaktoren.....	39
3.5.1 Reaktoraufbau	39



3.5.2 Reaktorgeometrien	41
3.6 Bestimmung physikochemischer Parameter	42
3.7 Analyse des Biogases.....	42
3.7.1 Quantitative Bestimmung des Biogases.....	42
3.7.2 Qualitative Bestimmung des Biogases	44
3.8 Analyse des Sickerwassers	44
3.8.1 Quantifizierung des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC).....	45
3.8.2 Quantifizierung des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB).....	45
3.8.3 Quantifizierung der Anionen	45
3.8.4 Quantifizierung der Kationen	46
3.8.5 Quantifizierung der organischen Säuren.....	47
4 Ergebnisse und Diskussion	49
4.1 Charakterisierung des Abfalls.....	49
4.1.1 Charakterisierung des Feststoffs	49
4.1.2 Charakterisierung wasserlöslicher Bestandteile	55
4.2 Stoffströme und Reaktionen im Deponiebioreaktor	61
4.2.1 Reproduzierbarkeitsversuche.....	63
4.2.2 Charakterisierung der Prozessparameter	65
4.2.3 Einfluss der Temperatur	70
4.2.4 Einfluss des Wassergehalts und des Reaktionsvolumens	77
4.3 Simulation der Gasbildung mittels Künstlicher Neuronaler Netze (KNN)	85
4.3.1 Struktur und Aufbau des Künstlichen Neuronalen Netzes	85
4.3.2 Training und Validierung	88
4.3.3 Simulation der Biogasbildung mittels Künstlicher Neuronaler Netze	90
5 Zusammenfassung	94
Symbolverzeichnis.....	97
Literaturverzeichnis	101



1 Einleitung und Zielsetzung

Menschliche Siedlungstätigkeit hat eine Anhäufung verschiedenster Abfälle zur Folge, woraus ein kontinuierlicher Anstieg der abgelagerten Abfallmenge resultiert. Bis in die 1980er Jahre erfolgte keine geregelte Ablagerung der anfallenden Siedlungsabfälle. Aufgrund der stetigen Zunahme und der unkontrollierten Aufhäufung wurde 1993 die erste Verordnung - Technische Anleitung für Siedlungsabfall (TASi) - erstellt. Diese beinhaltete die Auferlegung umfangreicher technischer Maßnahmen für die Ablagerung von Siedlungsabfällen in einem geordneten Deponiebetrieb (TA Siedlungsabfall, 1993). Mit der neuen Methode der konzentrierten Abfallsammlung traten jedoch auch neue Probleme auf. Es bildeten sich große geballte Emissionen durch Sickerwasser und Deponiegas. Des Weiteren wies der Abfall eine sehr starke Heterogenität durch unterschiedliche Abfallzusammensetzung, Größe, Alter und Inhaltsstoffe auf. Ferner kam es zu starken Variationen der Emissionen je nach Lage und Betriebsbedingungen der Deponie. Insgesamt wurden bis zu 13 % der globalen anthropogenen Methanemissionen durch Treibhausgase von Mülldeponien verursacht (Lenz und Cozzarini C., 1998). Zum Lösen dieser Problematik sollte es eine erneute Vereinheitlichung geben, woraufhin 2001 in Deutschland die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) zur Ergänzung der TASi eingeführt wurde, welche sowohl die Vorbehandlung als auch die anschließende Ablagerung der Siedlungsabfälle festlegt und beschreibt (AbfAbIV, 2001). Damit ist seit 2005 eine Ablagerung unbehandelter Abfälle auf Deponien untersagt und somit eine Verbrennung oder Vorbehandlung zwingend erforderlich. Die Vorbehandlung besteht aus diversen mechanischen Behandlungsstufen, wie dem Zerkleinern, Sortieren oder dem Separieren und einer Trocknung oder einer biologischen Vorbehandlung, welche mehrere Schritte der Fermentation (Rotte, Vergärung) beinhaltet und zu einer kontrollierten Biogasproduktion führt (AbfAbIV, 2001).

Durch die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) kommt es zum einen zu einer Verringerung der abzulagernden Abfallmenge, was eine Verkleinerung der be-



nötigten Ablagerungsflächen impliziert, zum anderen führt sie zu einer Reduzierung des Gehalts von biologisch abbaubaren Substanzen (Knappik, 2011). Weiterhin wird durch die Vorbehandlung eine größere Homogenität des abgelagerten Abfalls realisiert. Ein zusätzlicher Vorteil ist das Erreichen höherer Einbaudichten von bis zu 18 kN/m^3 (Bräcker, 2010). Diese führen wiederum zu einer Reduzierung der Makroporenvolumina, woraus geringere Wasser- und Gasdurchlässigkeiten resultieren. Folglich kann durch die Abfallvorbehandlung eine Abnahme des Schadstoffausstoßes, der Sickerwasserbelastung und eine effektive und kontrollierte Biogasproduktion erzielt werden, was schließlich zu einer Verringerung und Minimierung des Risikopotentials von Deponien führt.

Seit der Einführung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung sind nur noch 5 bis 10% der Gasemissionen von Deponien im Vergleich zu unbehandelten Siedlungsabfällen zu verzeichnen (Bräcker, 2010; Ritzkowski, 2000). Trotz der erzielten Verringerung des Schadstoffaustritts durch die Abfallvorbehandlung sind weiterhin ausgeprägte Gasbildungspotentiale vorhanden (Ritzkowski, 2000), da in der Abfallmatrix immer noch biologische, chemische und physikalische Abbauprozesse allgegenwärtig sind. Demzufolge besteht fortwährend ein Restrisiko durch den Abfallkörper, welches geeignete Monitoring-Maßnahmen unerlässlich macht.

Mülldeponien sind aufgrund ihres Aufbaus als verkapselte Konstruktionen und somit auch als übergroße Bioreaktoren zu betrachten, die sowohl durch äußere Einflüsse (Witterungsbedingungen und mechanische Beanspruchung) als auch durch biologische und chemische Reaktionen innerhalb des Konstrukts stark beansprucht werden. Die Geschwindigkeit der Abbauprozesse und der auftretenden Emissionen hängt sehr stark von diesen biologischen, chemischen und physikalischen Prozessen und deren gegenseitigen Wechselwirkungen ab. Aus diesem Grund ist die Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Gasbildung von Methan und Kohlendioxid, der hauptsächlichen Treibhausgase, von großem Interesse. Bisherige Untersuchungen zeigen einen direkten Einfluss von Temperatur, pH-Wert, Pufferkapazität, Wassergehalt (Fischer, 2011) und Ansammlungen diverser Stoffe, die inhibierende Auswirkungen auf die Reaktionsprozesse innerhalb des Deponiekörpers und auf die mikrobielle Aktivität sowie