

SCHRIFTENREIHE

des Bauhaus-Instituts für
zukunftsweisende
Infrastruktursysteme (b.is)

33

Herausgeber

Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infratsruktursysteme (b.is)

Coudraystraße 7, D-99423 Weimar

RHOMBOS-VERLAG • BERLIN

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet abrufbar über [http:// dnb.d-nb.de](http://dnb.d-nb.de)

© 2016 RHOMBOS-VERLAG, Berlin
Alle Rechte vorbehalten

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeisung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Impressum

Schriftenreihe des Bauhaus-Instituts für zukunftsweisende
Infrastruktursysteme an der Bauhaus-Universität Weimar (b.is)
17. Jahrgang 2016

Herausgeber der Schriftenreihe

Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen,
Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme (b.is)
Coudraystraße 7, D-99423 Weimar

Verlag

RHOMBOS-VERLAG
Fachverlag für Forschung, Wissenschaft und Politik
Kurfürstenstr. 15/ 16, 10785 Berlin
Internet: www.rhombos.de
eMail: verlag@rhombos.de
VK-Nr. 13597

Druck

PRINT GROUP Sp. z o.o.
Printed in Poland

Papier: Munken Print White ist alterungsbeständig, mit dem EU Ecolabel ausgezeichnet und FSC™ sowie PEFC zertifiziert.

ISBN 978-3-944101-59-0

ISSN 1862-1406

**Bauhaus-Institut für
zukunftsweisende Infrastruktursysteme
(b.is)**



Das Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme (b.is) verfolgt das Ziel, die Kooperation der derzeit beteiligten Professuren Siedlungswasserwirtschaft, Biotechnologie in der Ressourcenwirtschaft und Urban Energy Systems zu intensivieren sowie die Honorarprofessur Urbanes Infrastrukturmanagement, um Lehr-, Forschungs- und Beratungsaufgaben auszubauen. So werden beispielsweise die Weiterentwicklung von Studiengängen, gemeinsame Doktorandenkolloquien oder gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsaufgaben durchgeführt.

Das b.is will sich deutlich sichtbar im Bereich der Infrastrukturforschung aufstellen. Die Forschung und Lehre in diesem Bereich orientiert sich am medienübergreifenden Modell der nachhaltigen Gestaltung von Stoff- und Energieflüssen sowie ressourcenökonomisch ausgerichteten Systemen, die verbindendes Konzept der Kernprofessuren des Instituts sind. Die Professur Betriebswirtschaftslehre im Bauwesen ist mit dem b.is assoziiert.

**Bauhaus-Institute for
Infrastructure Solutions
(b.is)**



The Bauhaus-Institute for Infrastructure Solutions (b.is) aims to strengthen the cooperation of the university's research teams in Urban Water Management and Sanitation, Biotechnology in Resources Management and Urban Energy Systems in the areas of teaching, research and consultancy work. This encompasses the further development of degree programmes, joint doctorate colloquia and joint research and development activities.

Currently the chair of urban water management and sanitation, the chair of biotechnology in resources management and the chair of urban energy systems as well as the honorary professorship for urban infrastructure management are members of the institute. The chair of construction economics is associated with the institute.

The b.is will increase its visibility in infrastructure research. Education and research are geared to the comprehensive model of sustainable material and energy flows and resource economy oriented systems, which are the linkage of the institute's chairs.

Substratspezifische Leistungsfähigkeit der batchbetriebenen Feststoffvergärung

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor - Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Haupt
aus Leipzig

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft, Weimar
2. Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong, Weimar
3. Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert, Stuttgart

Tag der Disputation: 27.11.2015

Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	VII
	Abkürzungsverzeichnis	XI
	Tabellenverzeichnis	XIII
1	Einleitung	1
2	Zielsetzung und Vorgehensweise	5
3	Vergärung von Feststoffen	7
	3.1 Systemausprägungen	10
	3.2 Anforderungen an den technischen Betrieb	17
	3.2.1 Verweilzeit und Raumbelastung	18
	3.2.2 Mischungsverhältnisse	20
	3.3 Einflussfaktoren auf den anaeroben Abbau	23
	3.3.1 Milieubedingungen	23
	3.3.2 Anaerobe Verfügbarkeit der Substrate	25
4	Physikalische Grundlagen zu Festbetten	29
	4.1 Systembeschreibung	29
	4.2 Charakterisierung disperser Systeme	34
	4.3 Mehrphasige Durchströmung poröser Medien	39
5	Material und Methoden	45
	5.1 Substrate	45
	5.2 Charakterisierung	48
	5.2.1 Wassergehalt und Trockensubstanz	49
	5.2.2 Schüttdichte und Verdichtungsfähigkeit	49
	5.2.3 Wasserkapazität	51
	5.2.4 Korndichte	53
	5.2.5 Korngrößenverteilung	54
	5.2.6 Durchlässigkeitsbeiwerte	55
	5.3 Halbtechnische Untersuchungen zur Feststoffvergärung	57
	5.3.1 Versuche mit Impfmateriale ohne Perkolation	57
	5.3.2 Versuche mit Monosubstraten und Perkolation	60
	5.4 Berechnungsmethoden	61
6	Physikalische Charakterisierung	63
	6.1 Wassergehalt, Trockensubstanz und organische Trockensubstanz	64
	6.2 Schüttdichte und Verdichtungsverhalten	69
	6.3 Wasserkapazität	79
	6.4 Korndichte und Porenraum	84

6.5	Korngrößenverteilung	92
6.6	Durchlässigkeitsbeiwerte	101
6.7	Fazit Charakterisierung	109
7	Biogasentwicklung in Abhängigkeit der Einbaudichte	119
7.1	Biogaserträge	122
7.1.1	Grasschnitt	126
7.1.2	Maissilage	128
7.1.3	Rübenschnitzel	130
7.1.4	Stroh	132
7.1.5	Fazit	134
7.2	Dichteabhängigkeit, Setzungen und Dichteänderung	137
7.3	Einfluss der Dichte auf die Perkolation	144
7.4	Schlussfolgerungen	148
8	Zusammenfassung	151
	Literaturverzeichnis	155
	Anhang	179

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1:	Schema des mikrobiellen anaeroben Abbaus, modifiziert nach [14, 96, 132, 196]	8
Abb. 3-2:	Idealisierte Gasproduktion diskontinuierlicher Perkulationsverfahren, nach [250]	13
Abb. 3-3:	Feststofffermenter, nach [112]	14
Abb. 3-4:	Schematischer Zusammenhang von Impfmateriale und Perkolation, nach [101].	20
Abb. 3-5:	Dissoziationsgrad von Säuren und Hemmung der Methanbildung durch Essigsäure in Abhängigkeit vom pH-Wert, nach [124]	25
Abb. 3-6:	Abbaubarkeit verschiedener organischer Komponenten, nach [186, 246] mit Zuordnung der Hydrolysekonstanten (1 [151], 2 [108], 3 [36])	26
Abb. 3-7:	Typische Verläufe von Gasbildungskurven, nach [243]	28
Abb. 4-1:	Boden Dreiphasenstoff, modifiziert nach [127].	30
Abb. 4-2:	Lösemittelaufnahme (Wasser) kettenförmiger Polymere und Netzwerke, nach [113].	34
Abb. 4-3:	Zweidimensionale Darstellung eines dreidimensionalen Zweiphasenflusses im porösen Medium, nach [63].	40
Abb. 4-4:	Möglichkeiten der Phasenverteilung im Haufwerk, nach [183]	41
Abb. 4-5:	Relative Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Sättigung, nach [160, 261]	41
Abb. 5-1:	Versuchszylinder und Fallgewicht [45]	50
Abb. 5-2:	Typische Proctorkurve eines Bodens, nach [197]	51
Abb. 5-3:	Versuchsaufbau Wasserkapazität, nach [118]	52
Abb. 5-4:	Links: Weithalspyknometer [60], Rechts: Luftpyknometer [127].	54
Abb. 5-5:	Versuchszylinder mit konstantem hydraulischen Gefälle (Versuch ZY-MS-MZ) [226], Proctortopf	56
Abb. 5-6:	Schema des Versuchsaufbaus	58
Abb. 5-7:	Trommelgaszähler, MilliGascounter, Gasanalyse	58
Abb. 5-8:	Perkolatkreuzlauführung	61
Abb. 6-1:	Vergleich und Spanne der Wassergehalte	66
Abb. 6-2:	Vergleich der Schüttdichten und max. erreichten Feuchtdichten im Ausgangszustand	73
Abb. 6-3:	Proctorkurven für ausgewählte Substrate im Vergleich	75
Abb. 6-4:	Trockendichtenverlauf von getrocknetem und unverändertem Rinderfestmist [195]	76
Abb. 6-5:	Exemplarische Darstellung der Proctorkurven für Gemische aus Rinderfestmist und Anwelk-/Grassilage	78

Abb. 6-6:	Vergleich der Wassergehalte mit den Wasserkapazitäten	80
Abb. 6-7:	Trockensubstanzgehalte im Vergleich mit der Wasserzahl	82
Abb. 6-8:	Gegenüberstellung von Wassergehalt und Korndichte	87
Abb. 6-9:	Vergleich der Wassergehalte von Maissilage nach den einzelnen Kornfraktionen im unveränderten Zustand sowie nach der Korngrößenanalyse	93
Abb. 6-10:	Unterschiedliche Kornverteilungskurven für Maissilage je nach Wassergehalt.	93
Abb. 6-11:	Körnungslinien der untersuchten Substrate	96
Abb. 6-12:	Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Einbauwassergehalt, nach [138].	108
Abb. 7-1:	Gasbildungsrate von Triticale mit Rinderfestmist als Impfmaterail, nach [100]	120
Abb. 7-2:	Grasschnitt - Spezifischer Gasertrag (Netto-Summenparameter)	127
Abb. 7-3:	Maissilage - Spezifischer Gasertrag (Netto-Summenparameter)	129
Abb. 7-4:	Rübenschnitzel - Spezifischer Gasertrag (Netto-Summenparameter)	131
Abb. 7-5:	Stroh - Spezifischer Gasertrag (Netto-Summenparameter)	133
Abb. 7-6:	Substratbezogene Gaserträge in Abhängigkeit der Einbaufeuchtdichte	139
Abb. 7-7:	Gegenüberstellung der Ein- und Ausbaufeuchtdichten	143
Abb. 7-8:	Maissilage - Gasentwicklung bei unterschiedlichen Einbaudichten	145
Abb. A-1:	Korrelation von Wasserzahl und TS-Gehalt	179
Abb. A-2:	Gasbildungsrate und Entwicklung des Methangehaltes von Rinderfestmist	181
Abb. A-3:	Grasschnitt - Gasbildungsrate und Methangehalt	182
Abb. A-4:	Stroh - Gasbildungsrate und Methangehalt	182
Abb. A-5:	Grasschnitt - Gaserträge des Gesamthaufwerks in Abhängigkeit der Dichte	183
Abb. A-6:	Maissilage - Gaserträge des Gesamthaufwerks in Abhängigkeit der Dichte	183
Abb. A-7:	Rübenschnitzel - Gaserträge des Gesamthaufwerks in Abhängigkeit der Dichte	184
Abb. A-8:	Stroh - Gaserträge des Gesamthaufwerks in Abhängigkeit der Dichte	184
Abb. A-9:	Substratbezogene Gaserträge in Abhängigkeit der Einbautrockendichte	185
Abb. A-10:	Gegenüberstellung der Ein- und Ausbautrockendichten	185

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
B_R	[kg/m ³ · d]	Raumbelastung
BtL	[-]	Biomass to Liquid
C_u	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
C_k	[-]	Krümmungszahl
d_{10}	[mm]	Korngröße bei 10 % Siebdurchgang
d_{60}	[mm]	Korngröße bei 60 % Siebdurchgang
d_w	[mm]	wirksamer Korndurchmesser
D_{Pr}	[-], [%]	Verdichtungsgrad
e	[-]	Porenzahl
FM	[kg]	Frisch- oder Feuchtmasse
γ	[kg/m ² · s ²]	Wichte, spezifisches Gewicht, Gewichtskraft/Volumen
GV	[Gew.-%]	Glühverlust
GVE	[GV]	Großvieheinheit
η	[%]	Abbaugrad
HRT	[d]	Verweilzeit (Hydraulic Retention Time)
i	[-]	hydraulisches Gefälle
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
K	[m ²]	Permeabilität
l_N	[l]	Normliter
m_f	[g], [kg]	Masse des feuchten Materials
m_w	[g], [kg]	Masse des Wassers
oTS	[% TS]	organische Trockensubstanz ermittelt durch den Glühverlust
oTM	[kg]	organische Trockenmasse
n	[-]	Porenanteil, Porosität
n_a	[-]	Porenanteil, luft- oder gasgefüllt
n_w	[-]	Porenanteil, wassergefüllt

NawaRo		Nachwachsende Rohstoffe
Ψ	[-]	Sphärizität
REF		Referenz- oder Nullansatz Vergärungsversuche
REV		repräsentatives Elementarvolumen
RFM		Rinderfestmist
$\rho_b / \rho / \rho_f$	[g/cm ³]	Schüttdichte / Einbaudichte / Feuchtdichte
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ_{Pr}	[g/cm ³]	Proctordichte
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
S_r	[-]	Sättigungszahl
TS	[% FS]	Trockensubstanzgehalt in Gew.-%
TOC	[% TS], [g/l]	Total Organic Carbon, gesamter organischer Kohlenstoff
TKN	[mg/l]	Total Kjeldahl Nitrogen, gesamter Kjeldahl-Stickstoff (Summe organischer Stickstoff + Ammonium-Stickstoff)
v	[m ³ /s · m ²]	Filter- oder Fließgeschwindigkeit
v_a	[m/s]	Abstandsgeschwindigkeit
V_k	[cm ³]	Feststoff- oder Kornvolumen
V_p	[cm ³]	Porenvolumen
$w_A(w_{Af})$	[%]	Wasseraufnahmemvermögen nach DIN 18132 (modifiziert)
w	[-]	Wassergehalt, gravimetrisch, bezogen auf die Trockenmasse, (m_w/m_d)
WG	[% FS]	Wassergehalt, gravimetrisch, bezogen auf die Feuchtmasse
WK	[% FS]	Wasserkapazität
WZ	[-]	Wasserzahl

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Perkolationsdaten einiger Praxisanlagen (Anhaltswerte)	15
Tab. 3-2:	Übersicht Feststofffermenter (Stand 08/2015), Eigenrecherche und Herstellerangaben	16
Tab. 3-3:	Aufenthaltszeiten der unterschiedlichen Verfahren (Herstellerangaben, Befragung)	19
Tab. 3-4:	Auswahl an Mischungsverhältnissen auf Basis der Feuchtmassen (FM)	21
Tab. 3-5:	Hemmstoffe anaerober Gärprozesse [179]	24
Tab. 3-6:	Generationszeiten verschiedener Mikroorganismen	26
Tab. 3-7:	Zusammensetzung ausgewählter NawaRo	27
Tab. 5-1:	Substratüberblick	46
Tab. 5-2:	Übersicht der zugrundeliegenden bodenphysikalischen Standards	48
Tab. 5-3:	Überblick Messprogramm	60
Tab. 6-1:	Wassergehalte untersuchter NawaRo	65
Tab. 6-2:	Trockensubstanzgehalte bei 105 °C der untersuchten NawaRo im Literaturvergleich	67
Tab. 6-3:	Wassergehalte und organische Trockensubstanz von Impfmaterialien	68
Tab. 6-4:	Wassergehalte und Trockensubstanz von Bioabfall	69
Tab. 6-5:	Schüttdichten, Feuchtdichten und zugehörige Trockendichten . . 70	
Tab. 6-6:	Literaturangaben zu Schüttgutkennwerten	71
Tab. 6-7:	Proctordichten ausgewählter Substrate	75
Tab. 6-8:	Proctordichten unterschiedlicher Mischungen von Substrat mit Rinderfestmist [195].	77
Tab. 6-9:	Wasserkapazitäten untersuchter NawaRo-Schüttungen	80
Tab. 6-10:	Wasseraufnahmevermögen in Anlehnung an DIN 18132 [57] . . 83	
Tab. 6-11:	Korndichten ausgewählter NawaRo bei unterschiedlichen Bestimmungsmethoden	85
Tab. 6-12:	Porenräume bei Schüttdichte	89
Tab. 6-13:	Porengrößenbereiche mineralischer und organischer Böden [203]	90
Tab. 6-14:	Gegenüberstellung von Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahlen von Maissilage	94
Tab. 6-15:	Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahlen der Substrate . . . 95	
Tab. 6-16:	Durchlässigkeitsbeiwerte aus der Kornverteilung	99
Tab. 6-17:	Wirksame Korndurchmesser nach Kozeny-Köhler, Durchlässigkeitsbeiwerte	100

Tab. 6-18:	Literaturangaben zum Durchlässigkeitsbeiwert verschiedener Bodenarten	102
Tab. 6-19:	k-Werte bei Schüttdichte [195]	104
Tab. 6-20:	Charakteristik und k-Werte bei verdichteter Probe.	105
Tab. 6-21:	Übersicht zur Eignung der untersuchten Parameter	116
Tab. 6-22:	Substratspezifische Übersicht zur Größenordnung untersuchter Parameter	117
Tab. 7-1:	Übersicht der erzielten substratspezifischen Gaserträge nach 60 Tagen	123
Tab. 7-2:	Literaturangaben zu Biogasausbeuten der einzelnen Substrate .	124
Tab. 7-3:	Vergleich maximal erzielter und theoretisch möglicher Gaserträge	125
Tab. 7-4:	Grasschnitt - Einbauparameter, Gaserträge und Methangehalte der Einzelreaktoren	126
Tab. 7-5:	Grasschnitt - Parameter Prozesswasser	128
Tab. 7-6:	Maissilage - Einbauparameter, Gaserträge und Methangehalte der Einzelreaktoren	128
Tab. 7-7:	Maissilage - Parameter Prozesswasser	129
Tab. 7-8:	Rübenschnitzel - Einbauparameter, Gaserträge und Methangehalte der Einzelreaktoren	130
Tab. 7-9:	Rübenschnitzel - Parameter Prozesswasser.	131
Tab. 7-10:	Stroh - Einbauparameter, Gaserträge und Methangehalte der Einzelreaktoren	133
Tab. 7-11:	Stroh - Parameter Prozesswasser	134
Tab. 7-12:	Gegenüberstellung der Dichten mit Minimal- und Maximalerträgen	138
Tab. 7-13:	Grasschnitt - Dichteänderung und Setzungen.	140
Tab. 7-14:	Maissilage - Dichteänderung und Setzungen	141
Tab. 7-15:	Rübenschnitzel - Dichteänderung und Setzungen	142
Tab. 7-16:	Stroh - Dichteänderung und Setzungen	142
Tab. 7-17:	Gegenüberstellung von Dichten und Gasentwicklung perklierter Substrate	146
Tab. A-1:	Porenraum bei maximaler Verdichtung	179
Tab. A-2:	Korrekturfaktoren nach Beyer [197].	180
Tab. A-3:	Rauhigkeitsgrad nach Hütte [140]	180
Tab. A-4:	Reihenfolge der Versuche zur Dichteabhängigkeit	180