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

© 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 Infratsruktursysteme (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 Beratungssaufgaben 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

Zum Geleit

Fast 15 Jahre stimulierte das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) die Nutzung nachwachsender Rohstoffe zur Gewinnung regenerativer Energie. Finanzielle Anreize erzeugten dabei ein beachtlich anwachsendes Interesse an Vergärungstechnologie im landwirtschaftlichen Bereich.

Zur Verbreiterung der technologischen Basis beinhaltete das EEG zunächst auch einen Technologiebonus für Trockenvergärungsverfahren. Und dies obwohl schon seit Anfang der 1990iger Jahre Patentschriften für Verfahren mit stapelbarer Biomasse existieren. Leider kam es zu Fehlentwicklungen, die die Verbreitung der Trockenvergärung in der Landwirtschaft bremsten. Dies zeigt sich nun maßgeblich in einem Mangel an belastbaren Parametern zur physikalischen Charakterisierung von nachwachsenden Rohstoffen.

Es ist das Verdienst von Herrn Haupt, sich dieser Herausforderung anzunehmen. Exemplarisch wird eine Systematik für den Zusammenhang von physikalischer Substratbeschreibung und der zugehörigen Biogasbildung bei unterschiedlich ausgeformten Festbetten erarbeitet.

Seine exakte Arbeitsweise öffnet der Wissenschaft erstklassige Anknüpfungspunkte für weiterführende Untersuchungen. Die Praxis wird die vorliegende Arbeit als grundlegenden Baustein für zu erwartende Bemessungsregeln für teilperkolierte Trockenvergärungsverfahren und stapelbare Biomassen würdigen.

Dies ist umso bemerkenswerter, als im Bereich der Abfallwirtschaft wiederum sehr beachtliche Anteile biologischer Abfallbehandlung durch Trockenvergärungsverfahren geleistet werden. Gleichzeitig wird der nicht subventionierte Betrieb landwirtschaftlicher Vergärungsanlagen nur mit optimierten Bemessungs- und Betriebsstrategien wirtschaftlich zu gestalten sein. Hier leistet die Arbeit Grundlegendes.

Weimar, im Dezember 2015

Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft

Danksagung

Die Grundlagen zur vorliegenden Arbeit wurden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Juniorprofessur Biotechnologie in der Abfallwirtschaft sowie den Professuren Abfall- und Siedlungswasserwirtschaft der Bauhaus-Universität Weimar gelegt. Die Erstellung erfolgte letztlich an der Professur Biotechnologie in der Ressourcenwirtschaft. An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich auf dem Weg zur Promotion begleitet und unterstützt haben.

In erster Linie gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft. Diese Arbeit wäre ohne seinen ausdauernden Zuspruch, die Diskussionen und fortwährende Motivation sowie die gleichzeitig finanzielle Unterstützung nicht zustande gekommen. Ich danke sowohl für die Überlassung des Forschungsthemas als auch für den fachlichen und menschlichen Rückhalt während der gesamten Bearbeitungszeit. Sein Vertrauen in die geleistete Arbeit, kritische Auseinandersetzungen mit Inhalten sowie Inspirationen haben in vielen Bereichen zum Gelingen beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil Werner Bidlingmaier danke ich aufrichtig für die wertvollen Impulse, die zwischenzeitliche Übernahme der Betreuung sowie die fortwährenden Hinweise und Gespräche.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong möchte ich für die Bereitschaft danken, die Arbeit zu begutachten.

Unter meinen Kollegen, denen allen Dank gebührt, möchte ich Tonia Annick Schmitz, Tobias Wätzel, Stefan Sebök, Dr.-Ing. Jan Liebetrau und insbesonders Dr.-Ing. Christian Springer hervorheben, die mir jederzeit mit Rat und mentaler Aufbauarbeit zur Seite standen. Hinsichtlich der Versuchsdurchführung danke ich Laura Weitze (mittlerweile geschätzte Kollegin), Falk Bothe und Sebastian Herffurth, die im Rahmen studentischer Tätigkeiten bereit waren, auch Unangenehmes zu verrichten. Ferner danke ich den projektimmanenten Kollegen Dörthe Luxemburger und Andreas Bauwe (damals S.I.G. - DR.-ING. STEFFEN GmbH) für die fruchtbare Zusammenarbeit. Die Betreuung der studentischen Arbeiten von Tobias Rocktäschel und Stefan Vedder, aber auch von Falk Bothe und Cornelia Viehmann, gab mir die Möglichkeit, Lücken zu schließen. Vielen Dank an alle, dass sie sich der Themen angenommen haben.

Meinen Freunden danke ich für Rückhalt und Anteilnahme an meiner Arbeit.

Zu guter Letzt danke ich Jeannette und meinen Kindern für ihr Verständnis bzw. ihre Geduld und die immense mentale, disziplinarische und entlastende Unterstützung.

Weimar, im Oktober 2015

Thomas Haupt

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 Impfmaterial 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 Perkolationsverfahren, nach [250] 13
Abb. 3-3: Feststofffermenter, nach [112] 14
Abb. 3-4: Schematischer Zusammenhang von Impfmaterial 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: Perkolatkreuzlaufführung 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 Impfmaterial, 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/m³ · 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/m² · s²]	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	[m²]	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
ρ_b / ρ / ρ_f	[g/cm³]	Schüttdichte / Einbaudichte / Feuchtdichte
ρ_d	[g/cm³]	Trockendichte
ρ_{Pr}	[g/cm³]	Proctordichte
ρ_s	[g/cm³]	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 Sticktoff + Ammonium-Stickstoff)
v	[m³/s · m²]	Filter- oder Fließgeschwindigkeit
v_a	[m/s]	Abstandsgeschwindigkeit
V_k	[cm³]	Feststoff- oder Kornvolumen
V_p	[cm³]	Porenvolumen
$w_A(w_{Af})$	[%]	Wasseraufnahmevermögen 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 perkolierter 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

1 Einleitung

In Reaktion auf Veröffentlichungen und Mahnungen des im Deutschen oft als Weltklimarat bezeichneten Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) unternimmt die Bundesregierung Anstrengungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen auf nationaler Ebene. Eines der wichtigsten Instrumente im Interesse dieses Klima- und Umweltschutzes ist im Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (kurz Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) zu sehen, dessen elementare Ziele sich wie folgt zusammenfassen lassen [69]:

- Förderung einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung,
- Verringerung der volkswirtschaftlichen Kosten auf lange Frist und
- Schonung fossiler Energieträger und Förderung der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien.

Zusätzlich werden auch konkrete Ziele definiert, u.a. bis zum Jahr 2020 mind. 18 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus erneuerbaren Energien zu decken.

Unter den "Regenerativen" spielt die Erzeugung von Energie aus Biomasse eine besondere Rolle, da sie neben der Wasserkraft die einzige ist, die witterungsunabhängig Energie liefern und sogar systemintern speichern kann. Somit können Schwankungen, die bei der Energiebereitstellung durch Sonnen- und Windkraft auftreten, ausgeglichen und ebenso jene beim Energiebedarf abgefangen werden. Die Nutzung von Biomasse kann durch verschiedene Verfahren erfolgen. Die Energieumwandlung der in der Biomasse gespeicherten chemischen Energie wird dabei durch verschiedene chemische, physikalische oder biologische Prozesse ermöglicht [110].

Bei der Methangärung nachwachsender Rohstoffe (NawaRo), landwirtschaftlicher Abprodukte sowie organischer Abfälle, als eine Möglichkeit der Umwandlung von Energie aus Biomasse, werden chemische (Hydrolyse) und biologische (Methanbildung) Vorgänge gekoppelt. Erste Schritte zur energetischen Nutzung dieses natürlichen Abbauprozesses wurden Mitte des 20. Jahrhunderts unternommen. Spätestens seit Mitte der Neunziger Jahre kann die Vergärung als etabliertes Verfahren und Stand der Technik angesehen werden. Das Verfahren der Feststoff- oder Trockenvergärung konnte sich zunächst allerdings nur im Bereich der kommunalen Bio- oder Restabfallbehandlung als Bestandteil einer sehr variablen Behandlungskette etablieren.

Mit der Novellierung des EEG im Jahr 2004 rückte aufgrund starker Anreize beim Einsatz von NawaRo sowie einer Innovationsförderung die Errichtung von Feststofffermentationsanlagen auch im landwirtschaftlichen Bereich ins Blickfeld. Heute, drei Novellierungen später gibt es angesichts der geltenden politischen Rahmenbedingungen in diesem Bereich keine Zuwächse mehr. Der Anlagenzubau ist vielmehr gedeckelt (auch für nassfermentative Biogasanlagen) und praktisch auf den Bereich Abfall- und Reststoffe begrenzt. Die Forschungsaktivitäten richten ihren Fokus deshalb verstärkt auf Substrate dieser Kategorie.

Die meisten wissenschaftlichen Erhebungen zur Feststofffermentation in den letzten 15 Jahren stammen aus dem Zeitraum der Innovationsförderung durch das EEG 2004 - 2009 und beziehen sich damit auf eine Zeit, in der NawaRo die mehrheitlich eingesetzten Substrate waren. Die Ergebnisse lassen sich heute gewinnbringend für die Vergärung von landwirtschaftlichen Abprodukten und biologischen Abfällen nutzen.

Prinzipiell ist ein stabil verlaufender, anaerober Abbauprozess durch die gesicherte Umsetzung vom eingesetzten Substrat gekennzeichnet, die im Rahmen des gewählten Verfahrens zu reproduzierbaren Gaserträgen führt. Im Idealfall ist diese Substratverfügbarkeit zudem durch eine optimale Substratausnutzung gekennzeichnet. Das setzt voraus, dass die Milieubedingungen (Wassergehalt, Temperatur, hemmungsfreie Umgebung) für anaerobe Mikroorganismen konstant im Optimum gehalten werden können. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Mediums (Flüssigphase oder Festbett) übernehmen hierbei die Aufgabe, die anvisierten Bedingungen aufrechtzuerhalten. Sollte dies nicht möglich sein, kann die alleinige Beeinflussung der Biologie den anaeroben Abbau nicht sichern. Damit ergeben sich hinsichtlich der verfahrenstechnischen Optimierung drei relevante Betrachtungsfelder:

1. biologische Verfügbarkeit der Substrate,
2. biologische Einflussfaktoren auf die komplexe und symbiotisch lebende Biozönose, bspw. Konzentrationen hemmend wirkender Intermediate und/oder Mikronährstoffversorgung sowie
3. physikalische Zustandsbedingungen im System und ggf. deren Änderung im Verlauf.

Während die ersten beiden Punkte für alle Verfahren der Anaerobtechnik nahezu identisch sind, bestehen hinsichtlich des physikalischen Zustandes Unterschiede. Im Falle der Flüssigvergärung liegt in den Submersreaktoren (Rührkessel respektive CSTR) idealerweise eine homogen durchmischte Suspension vor, in der an jedem Punkt der Kulturbrühe adäquate Bedingungen herrschen, die es zu optimieren gilt. Physikalisch gestört wird dies bspw. durch die Bildung von Schwimmdecken (Ausgasungsproblematik) oder Sinkschichten (Volumenreduzierung des Reaktionsraumes). Diese Ausprägungen können als suboptimaler Anlagenbetrieb gewertet werden, verursacht durch unsachgemäße Substratzufuhr oder -aufbereitung.

Bezüglich der Feststoffvergärung liegen anlagenseitig divergierende Ansätze vor. Neben kontinuierlich betriebener Pfropfenstromverfahren (horizontal oder vertikal) existiert eine Reihe von Anlagen im diskontinuierlichen Betrieb. Allen gemein ist eine hohe Raum-Zeitausbeute. Da Durchmischungsaggregate zur Homogenisierung adäquat der Nassvergärung nur in seltenen Fällen eingesetzt werden, dient häufig die Beaufschlagung der Substratmatrix mit Prozessflüssigkeit, dem sogenannten Perkolat, als dynamisches Element, welches mikrobielle Aktivitäten unterstützt. Physikalisch kritisch ist demzufolge eine ungleich verteilte Durchströmung, bspw. durch Kanalbildung, oder das Verschließen von

Porenräumen durch Transportprozesse respektive Auflast anzusehen. Parameter die in diesem Zusammenhang die Zustandsform im Fermenter hinreichend beschreiben, sind themenbezogen bis dato noch nicht erhoben worden. Der Mangel an diesbezüglichem Wissen erschwert den Praxiseinsatz.

Potential kann der Feststoffvergärung bei Verwendung nicht pumpfähiger, dafür aber stapelbarer Substrate zugesprochen werden. Speziell für organische Abfälle zeichnet sich das System dadurch aus, dass Störstoffe nicht zwingend ausgeschleust werden müssen. Ebenso für landwirtschaftliche Betriebe ohne Tierhaltung respektive mit Tierhaltung nach den Grundsätzen des ökologischen Landbaus oder in Festmistwirtschaft können die Verfahren als Alternative zur Nassvergärung gesehen werden. Ein geringerer technischer Aufwand sowie die oftmals modulare Bauweise mit hoher Anpassungsfähigkeit, sind als Vorteil zu werten. Allerdings verlangen Trockenfermentationsanlagen - egal welche Bauweise - höhere Investitionen. Aus diesen Gründen sind Effizienz und Störungsfreiheit zwingend zu gewährleisten und Möglichkeiten zur Optimierung der Prozessführung auszuschöpfen [93, 220, 238].

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel der Arbeit besteht darin, über qualitative Aussagen zur Festbettbeschreibung sowie zur Abhängigkeit der Gasbildung bei unterschiedlicher Ausformung des Festbettes zu einem stabilen Betrieb mit reproduzierbaren Gaserträgen beizutragen. Der Schwerpunkt liegt demnach auf den physikalischen und nicht den biologischen Einflussfaktoren. Es gilt, diejenigen Bedingungen zu eruieren und einzugrenzen, welche das Festbett charakterisieren, wobei die folgenden Fragestellungen Beachtung finden sollen:

- Anhand welcher Parameter lässt sich die Festbettmatrix zielführend beschreiben?
- Sind existente Methoden der Parameterbestimmung auf den Bereich der potentiell einsetzbaren Substrate übertragbar?
- Sind diesbezüglich eventuell Anpassungen vorzunehmen und gewinnbringend?
- Lassen sich charakteristische Werte so miteinander verknüpfen, dass die Ableitung einer optimalen Festbettgestaltung möglich ist?

Bei der Überführung dieser Aspekte auf den anaeroben Abbau in Feststofffermentern stehen vor dem Hintergrund der räumlichen Belastung differente Festbettcharakteristiken und deren Einfluss auf die Biogasentwicklung im Fokus. Hier besteht die Arbeitshypothese, dass unterschiedliche Einbaudichten, die durch differente physikalische Größen gekennzeichnet sind, Einfluss auf die Biogasentwicklung ausüben.

Zur Bearbeitung der Teilziele wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Substratcharakterisierung über die Erhebung physikalischer Eigenschaften unter Zuhilfenahme bodenkundlicher Untersuchungen sowie
- Evaluierung der Biogasentwicklung bei differenten Festbettdichten.

3 Vergärung von Feststoffen

Die Trockenfermentation oder auch Feststofffermentation kann als die ursprüngliche Form der technischen Vergärung angesehen werden. Nach ersten Entwicklungen im Jahre 1942 in Algerien zur Faulung von Stallmist sowie deren Verbreitung in Europa existierten weitere Entwicklungsschübe vor allem in Zeiten der Krise (Ölkrise, Golfkrieg, Asienkrise). Mit dem Aufkommen von Spaltenböden und Gitterrosten und dem entsprechenden Anfall an Flüssigmist bzw. Gülle fand dann die Umorientierung zu kontinuierlichen Anlagensystemen statt. Ziel war jederzeit die Substitution von Erdgas. Begründet in der Materialbeschaffenheit konnte sich die Trockenvergärung in der Abfallwirtschaft eine feste Position erarbeiten. Seit Mitte der 1990er Jahre ist ein stetiger Ausbau in dem Bereich zu verzeichnen [67, 112, 207]. In der Landwirtschaft stieg das Interesse am Verfahren erst wieder mit der Novellierung des EEG im Jahr 2004, da zunehmend feste Substrate (NawaRo) in den Fokus rückten [250].

Die Ausgangsprodukte der Biogassynthese bilden primär und sekundär anfallende Biomassen, also Stoffe organischer Herkunft (d.h. kohlenstoffhaltige Materie), die entweder durch photosynthetische Ausnutzung der Sonnenenergie entstehen oder durch Ab- und Umbau in höheren Organismen gebildet werden. Die Palette umfasst somit neben Produkten aus dem Energiepflanzenanbau auch pflanzliche Rückstände und Nebenprodukte der Land- und Forstwirtschaft, der weiterverarbeitenden Industrie, Zoomasse, deren Exkremente, Klärschlamm und organische Abfälle. Die Abgrenzung gegenüber fossilen Energieträgern beginnt bspw. beim Torf, als fossilem Sekundärprodukt der Verrottung [87, 110].

Der mikrobielle Abbau organischer Substanzen unter anaeroben Bedingungen lässt sich als Nahrungskette beschreiben, die in vier Hauptschritte unterteilt ist - Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese. Mikroorganismen (Bakterien, Archaeen) reduzieren zunächst energiereiche Stoffe in organische Zwischenprodukte, die anschließend zu Methan und Kohlendioxid umgesetzt werden. Dieser Prozess ist durch syntrophe Beziehungen mit mono- und bidirektionaler Substratübertragung der beteiligten Organismen geprägt. Durch das Fehlen von Sauerstoff als Elektronenakzeptor wird der gebundene Kohlenstoff nicht vollständig zu CO_2 oxidiert und es bleibt Energiepotential im Methan erhalten. Der geringere Energiegewinn zwingt Anaerobier mehr Substrat für die gleiche zellwachstumsbezogene Energiemenge umzusetzen, als unter aeroben Bedingungen benötigt wird [90, 148, 177]. Die komplexe, ineinandergreifende Prozesskette wird in Abbildung 3-1 schematisch dargestellt, innerhalb derer Gujer und Zehnder [96] sechs maßgebliche Reaktionen hervorheben:

1. Hydrolyse der polymeren Verbindungen (Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette),
2. Fermentation von Aminosäuren und Zucker,
3. Anaerobe Oxidation längerkettiger Fettsäuren und Alkoholen,
4. Anaerobe Oxidation von Zwischenprodukten,
5. Umsetzung von Essigsäure zu Methan,
6. Umsetzung von Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan.

Die ebenfalls getätigten prozentualen Angaben zum Substratfluß (stöchiometrisch in Form von CSB- bzw. CH_4-Äquivalenten) sind insbesondere hinsichtlich des letzten Schrittes - der Methanbildung - mit Vorbehalt zu betrachten, wobei die generelle Umsetzung in Methan über Essigsäure mit einer Beteiligung von etwa 2/3 nicht prinzipiell in Frage gestellt wird. Neuere Erkenntnisse zeigen jedoch, dass bei höherer Raumbelastung, mesophil mehrheitlich der hydrogenotrophe, also wasserstoffverwertende Reaktionsweg über den Zwischenschritt einer syntrophen Acetat-Oxidation zum Tragen kommt. Acetoclastische, also essigsäurespaltende Methanbildner reagieren sensitiver auf steigende Konzentrationen organischer Säuren und insbesondere Ammonium, so dass sie gehemmt werden. Über die Konvertierung von Acetat zu Wasserstoff und Kohlendioxid und die Nutzung des hydrogenotrophen Pfades ist die methanogene Population dann in der Lage, sich zu akklimatisieren. Damit kann i.T. die Fähigkeit von Prozessen erklärt werden, sich an suboptimale Bedingungen zu adaptieren [14, 208].

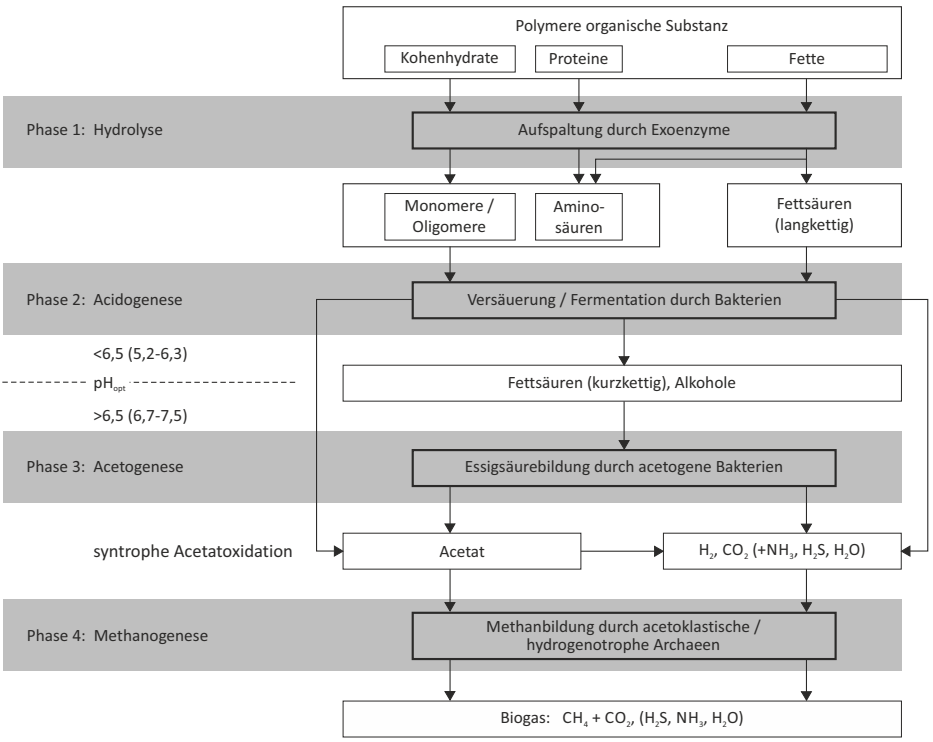

Abb. 3-1: Schema des mikrobiellen anaeroben Abbaus, modifiziert nach [14, 96, 132, 196]

"Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt innerhalb der anaeroben Abbaukette ist grundsätzlich von der Art der eingesetzten Substrate abhängig" [248]. Bei feststoff-, fett- und faserreichen Substraten stellt diesen i.d.R. die Hydrolyse unlöslicher Polymere dar, bei gelösten Substanzen die Acetogenese und Metha-

nogenese, da deren Bakterien wesentlich höhere Generationszeiten aufweisen (siehe auch Kapitel 3.3) [146, 162].

Der Erkenntniszugewinn über die Zeit hinsichtlich der Abbauphasen bei Abwasser bzw. Abfall als Ausgangssubstrat, lässt sich z.B. bei Mudrack und Kunst [177], über Braun [27], Mata-Alvarez [165] und Bischofsberger et al. [23] bzw. aktueller Rosenwinkel et al. [196] nachvollziehen. Detaillierte Beschreibungen mikrobiologischer Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen liefern z.B. Bauer et al. [14] bzw. der ALB Bayern e.V. [6].

Die technische Umsetzung der biologischen Prozesse verfolgt zwei Ziele [148]:

- die Reduzierung der organischen Fracht oder
- die Erzeugung von Biogas zur Energiebereitstellung.

Im Falle der biologischen Behandlung von Bioabfall tritt die Sicherstellung der Unbedenklichkeit an erste Stelle und die Energiegewinnung ist nachgeschaltet. Im landwirtschaftlichen Bereich liegt der Fokus alleinig auf der maximalen Ausnutzung des BHKWs. Erzielbare Abbauleistungen werden durch das gewählte Verfahren, die Dimensionierung der Reaktoren und Milieubedingungen, die Eigenschaften des Substrates sowie die Biozönose festgelegt.

Prinzipiell wird in die Verfahrenskonzepte der Trocken- und Nassvergärung unterschieden, wobei letztere in Form von voll durchmischten Rührkesselreaktoren (CSTR) zwar den überwiegenden Anteil der Praxisanlagen darstellen, im Rahmen dieser Arbeit aber lediglich zu Vergleichszwecken herangezogen und daher nicht näher beleuchtet werden.

Eine klare, in der Fachwelt allgemein anerkannte und abgesicherte Definition des Begriffs Trockenfermentation bzw. Feststoffvergärung existiert bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht. Im Allgemeinen wird zur Abgrenzung der Trockensubstanzgehalt der Gärsubstrate herangezogen, wobei unterschiedliche Bezugshorizonte kursieren. Zum einen ist dies der TS-Gehalt des Substrates vor Einbringung und zum anderen der TS-Gehalt im Fermenter. Die Grenze flüssiger, pumpfähiger Substrate wird traditionell bei 15 % TS gesehen und als Feststoffe stapelbare bzw. stichfeste Substrate zwischen 20 - 35 % definiert [21, 22, 110]. Die Angaben sind laut Postel et al. [190] allerdings auch qualitativ zu werten, da feindisperse Partikelverteilungen, wie z.B. dispergierte Speisereste, bei TS-Gehalten von 20 % immer noch pumpfähig sind und andere Substrate, wie Obstschalen, bereits bei 10 % stapelfähig. Bischofsberger et al. [23] nennen für Flüssigsubstrate $\leq$ 13 % TS. Kaltschmitt et al. [110] reduzieren nochmals auf $\leq$ 6 % und führen zwischen 6 - 15 % TS den Begriff der Schlämme ein, mit großen Mengen freien Wassers und hoher Viskosität. Sie weisen Substraten mit mehr als 15 % TS, meist ohne freies Wasser, den Begriff Feststoff zu. Liegen mehr als 40 % TS vor, ist zu bewässern, da der anaerobe Abbauprozess ein wässriges Milieu benötigt. Eine Unterscheidung nach TS- oder Wassergehalt erscheint deshalb aus biologischer Sicht zunächst unzweckmäßig, da die Mikroorganismen die Nährstoffe aus der Flüssigphase beziehen und lokal ausreichend Wasser vorhan-

den sein muss. Global, d.h. bezogen auf den Fermenter, können aber bei der Feststofffermentation niedrigere Wassergehalte realisiert werden [84]. Wird also hinsichtlich des Reaktorraumes unterschieden, lassen sich 10 % TS für Prozesse der Nassvergärung (CSTR) finden, da sich die eingesetzte Technik oberhalb des Wertes nur noch beschränkt eignet [21, 110, 186]. Für Trockenvergärung werden 20 - 35 % TS ausgewiesen [21, 23]. Daneben existieren weitere Begriffsbestimmungen, bspw. die des EEG in der novellierten Fassung von 2004 [68], die stapelbares Material > 30 % TS, eine Raumbelastung > 3,5 kg/m³ · d und ein Essigsäureäquivalent < 2000 mg/l im Ausgang der letzten aktiven Fermenterstufe vorgibt. Dies führte in der Folge zur Deklaration von CSTR-Anlagen als Trockenfermentation, wenn sie ausschließlich mit NawaRo und rezirkulierter Flüssigphase betrieben wurden. Einhalt gebot die EEG-Novellierung im Jahr 2009, in der die Technologie als ausgereift und nicht mehr bonusfähig eingestuft wurde.

Kusch [132] vermeidet den Bezug zu einem speziellen Wassergehalt ganz und spricht von "Verfahren [...], bei denen der stapelfähige Feststoff mit hohem TS-Gehalt in den Reaktionsraum eingebracht wird." Dies schließt die Flutung des Feststoffs während der Reaktion ein. Der Fokus liegt auf "speziellen Feststofffermentern", die quasi- bzw. semikontinuierlich arbeiten (Menge Eintrag = Austrag) oder absatzweise befüllt und entleert werden (Batchbetrieb) und auf eine Methanisierung im Festbett selbst abzielen. Als Festbett ist in diesem Sinne der Feststoffstapel bzw. das Haufwerk und kein inertes Trägermaterial zu verstehen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird im Grundsatz dieser Definition gefolgt, erweitert um einen Zusatz aus der Theorie poröser Medien. Unter Feststoffvergärung ist demnach der anaerobe Abbau von stapelbarer Biomasse höherer TS-Gehalte zu verstehen, bei dem das sich ausbildende Haufwerk durch ein oder mehrere Fluide durchströmt wird. Die beteiligten Mikroorganismen können dabei sowohl trägerfixiert, also auf dem Feststoff immobilisiert, als auch suspendiert vorliegen.

3.1 Systemausprägungen

Wie bereits angedeutet, existieren für die Systeme der Feststoffvergärung adäquat der Flüssigvergärung differente Betriebsweisen, wobei primär nach Prozessführung respektive Art der Beschickung unterschieden wird. Diese teilt sich in diskontinuierliche - auch benannt als batchbetriebene, stufen- oder absatzweise - und (quasi-)kontinuierliche Verarbeitung auf. Erstere nutzen unter Verzicht einer mechanischen Durchmischung mehrheitlich Garagen oder Boxen als Reaktionsbehälter (Fermenter). Als dynamisches Element kann das Perkolat gesehen werden, welches das Haufwerk durchdringt und so den Transport von gelösten und suspendierten Partikeln bewerkstelligt, d.h. rein diffusiven Stoffaustausch um konvektive Mechanismen ergänzt [164]. Diesem Aspekt widmet sich in vertiefender Form Kapitel 4.1. Die dafür notwendige Technik ist häufig als störungsanfällig zu betrachten. Kontinuierliche Verfahren arbeiten nach dem Durchflussprinzip in liegenden, seltener in stehenden Pfropfenstromfermentern.

Die Durchmischung bzw. Strömung wird entweder durch Axial- bzw. quer zur Strömungsrichtung angeordnete Paddelrührwerke, Einpressen von Biogas oder die Schwerkraft aufrecht erhalten. Eine Vorstellung der Verfahren inklusive Beschreibungen der Fermenter- und Anlagentechnik lassen sich in unterschiedlichem Detaillierungsgrad in [238], Fricke et al. [85], Kusch [132], Rosenwinkel et al. [196] oder Weiland [250] finden.

Neben der Beschickungsart bestehen ferner Unterschiede in der Anzahl der Prozessphasen und der Temperaturführung. Eine Trennung nach Phasen wird als zweiphasiges Verfahren bezeichnet (Hydrolyse /Acidogenese sowie Acetogenese/Methanogenese) [196]. Diese lässt sich im Vergleich zur Nassvergärung besser realisieren [263, 264]. Es ist darauf zu achten, dass es zu keiner Verwechslung mit mehrstufigen Prozessen kommt, in denen Vor- und ein oder mehrere Nachgärer einphasig betrieben werden, da die Begrifflichkeiten in der Literatur oft synonym Verwendung finden. Mehrstufige Prozesse kommen bei der Feststoffvergärung mit o.g. Definition nicht vor. Die Unterscheidung nach Temperatur gliedert sich in mesophilen (35 - 42 °C) und thermophilen (53 - 60 °C) Betrieb, wobei ersterem höhere Stabilität und letzterem höhere Abbauraten zugesprochen werden [4, 21, 90, 162, 170, 248]. Vergleichende Untersuchungen dazu hat Liebeneiner [146] angestellt. In den diskontinuierlichen Verfahren überwiegen planungsseitig mesophile Temperaturen. Die Pfropfenstromfermenter werden, zumindest im Bereich der Bioabfallvergärung, nahezu ausschließlich thermophil gefahren.

Da der Fokus auf der batchbetriebenen Feststoffvergärung liegt, wird nachfolgend auf einige Besonderheiten eingegangen, die im Laufe der fortwährenden Entwicklung aufgetreten sind. Neben den genannten Perkolationsfermentern, die sowohl mit als auch ohne Impfmaterial arbeiten, können diese wie folgt benannt werden:

- unbeheizte Substratreaktoren und Monosubstratvergärung sowie
- Aufstau- und Siloschlauch- bzw. Haufwerksverfahren.

Unbeheizte Reaktoren finden sich z.T. im Trocken-Nass-Simultan (TNS)-Verfahren. Die Temperatur im Fermenter soll über das eingebrachte Perkolat aufrecht erhalten und die mitgeführte organische Fracht anteilig in einem Prozesswasserspeicher - ähnlich einem Flüssigfermenter - methanisiert werden. Problematisch gestalten sich Temperaturschwankungen der Prozessflüssigkeit sowie eine unzureichende Durchströmung des Haufwerks, da somit für den anaeroben Umsatz weder stabile Milieubedingungen noch genügend organische Anteile im Perkolattank vorliegen. Fehlende Gaserträge können über die untemperierten Garagen nicht ausgeglichen werden. Eine adaptierte Form der Verfahrensvariante, in der sie mit einer Füllkörperkolonne als Festbettmethanreaktor kombiniert wird, stellt den fließenden Übergang zur Monosubstratvergärung dar. Im Haufwerk selbst soll demnach lediglich die Hydrolyse mit anschließender Extraktion der angereicherten Flüssigphase stattfinden, weshalb auf Impf- oder Altmaterial verzichtet werden kann. Dieser Schritt muss nicht zwingend anaerob sein. Hier stehen sich

Teilmethanisierung und wesentlich schnellere Hydrolyse durch Luftzufuhr gegenüber. Ansteigende Stoffwechselaktivitäten hydrolysierender Mikroorganismen führen darüber hinaus zur Selbsterhitzung des Substrates [132, 191]. Neben Bestandsanlagen kommt das Verfahren auch als Nachrüstung in Kompostierungsanlagen mit vorhandenen Rotteboxen zum Einsatz. Im Bereich der NawaRo wurden erste Erfahrungen mit Mais-, Gras- bzw. Roggensilage im halbtechnischen Maßstab (anaerober Leach Bed Reaktor + Festbettmethanreaktor) an den Universitäten Cottbus und Hohenheim sowie dem Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) gesammelt. Sowohl Grundlagen als auch einige Erfahrungen sind bei Burkhardt [30] und Zielonka [263] nachzuvollziehen. Im Praxismaßstab ist derzeit eine Anlage mit Maissilage bekannt (GICON, Schöllnitz).

Aufstauverfahren weisen im Vergleich zur Perkolation den Unterschied auf, dass das Gärgut mit Prozessflüssigkeit periodisch überstaut wird. Hintergrund ist das Vermeiden ungleicher Flüssigkeitsverteilung sowie einer unzureichenden Durchdringung des Haufwerks. Um Aufschwimmeffekte zu unterbinden, müssen nach Befüllen spezielle Vorrichtungen in Form von abnehmbaren Gittern eingebracht werden [156, 196]. Praxisseitig ist momentan eine Anlage in Betrieb (Ratzka, Clausnitz), die abweichend vom anfänglichen Konzept um einen Anaerobfilter zur Regeneration der Einstauflüssigkeit erweitert wurde. Siloschlauch- oder auch Haufwerksverfahren ohne Gegenwart einer Flüssigphase, die damit hohe Anteile an Impfmaterial verlangen, wurden im Pilotmaßstab getestet, haben sich aber nicht bewährt. Problematisch war in erster Linie - trotz beheizter Bodenplatte - die Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Temperierung, vor allem in Wintermonaten. In der Folge traten mindere Gaserträge auf. Begründet wurde dies durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Feststoffe, zu trockenes Substrat und unzureichende Isolierung [109, 250].

Wie den Ausführungen zu entnehmen ist, handelt es sich bei den Ausprägungen um Einzelfälle oder technische Randerscheinungen. In diese Kategorie fallen zudem Systeme mit Festbettbeteiligung sowie Fusionen aus Pfropfenstrom und Perkolation, die zwar in der Literatur beschrieben werden, bspw. in Kusch [132], aber entweder den Schritt zum oder über den Pilotmaßstab hinaus nicht geschafft haben (z.B. 3A, Anacom, ATF) bzw. bereits vom Markt verschwunden sind (z.B. ISKA, Bioperkolat) [13, 153, 199, 214, 230, 253]. Sie werden schlussfolgernd keinen Untersuchungsgegenstand darstellen, wodurch sich die Verfahren auf Perkolationsfermenter einschränken. Dahingehend haben sich in der Praxis zwei Betriebsweisen etabliert, die im Folgenden als interne und externe Entfrachtung bezeichnet werden. Intern muss das Substrathaufwerk selbst in der Lage sein, die organische Belastung des Perkolats zu methanisieren, bewerkstelligt über einen stabilen Prozess durch ausreichend Impfmaterial, i.d.R. Gärrest des vorangegangenen Durchlaufs. Die anteilige Abreicherung der Flüssigphase erfolgt über Mischungs- bzw. Verdünnungsvorgänge im Perkolatsammeltank, in welchem stark belastetes Perkolat mit weniger belastetem zusammenfließt. Dies impliziert, dass mehrere Fermenter parallel und zeitver-

setzt betrieben werden. Hintergrund ist der ausgeprägte Verlauf der Biogasproduktion, so dass zur Vergleichmäßigung des Gasflusses mehrere Fermenter in Reihe geschalten werden, wiedergegeben in Abbildung 3-2. Der Zielparameter des minimalen, konstanten Gasflusses ist substratspezifisch festzulegen. Die Perkolattemperatur wird i.d.R. der Gärtemperatur angepasst und konstant gehalten.

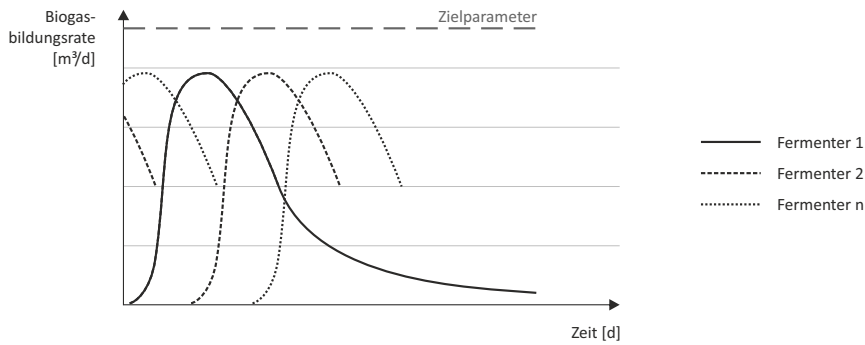

Abb. 3-2: Idealisierte Gasproduktion diskontinuierlicher Perkolationsverfahren, nach [250]

Eine Sonderform stellt die Perkolatkreuzlaufführung dar. Prozesswasser eines frisch angesetzten, versäuernden Reaktors wird über einen Fermenter mit stabiler Methanphase geleitet. Das entfrachtete Perkolat mit niedrigen Gehalten an organischen Fettsäuren und hoher Dichte an Mikroorganismen wird anschließend rezirkuliert. Weiterhin kann es in kleineren Anlagen notwendig sein, eine Eigenperkolation durchzuführen, d.h. die freie Flüssigphase innerhalb eines Fermenters im Kreislauf zu fahren. Dies trifft insbesondere auf exponierte Lagen, die Haushaltsebene - vor allem im ländlichen Raum in Ländern geringerer Einkommen - sowie Laborfermenter zu [33, 178]. Letztere werden in erster Linie unter dem Aspekt der Bilanzierbarkeit so betrieben [122, 132].

Der erste Schritt einer externen Entfrachtung ist der Auswaschungsprozess der Organik aus dem Substratstapel adäquat einer Sickerlaugung, wie bereits unter Monosubstratvergärung beschrieben. Hinsichtlich der Methanisierung als zweitem Schritt stehen mit klassischer Nassfermentationstechnik (CSTR, UASB) und Festbettreaktoren respektive Anaerobfilter in Verbindung mit einem Flüssigkeitsspeicher zwei Optionen zur Verfügung. Unterschiede der Festbettreaktoren hinsichtlich Betriebsweise (Up- oder Downflow), Füll- und Trägermaterial sowie Anforderungen an Substrat und Technik werden in Bischofsberger et al. [23] oder Metcalf & Eddy [170] beschrieben. Da diese zweite Stufe den kontinuierlichen Verfahren zuzuordnen ist und zudem die Feststoffe nicht mehr im Vordergrund stehen, fällt sie aus den Betrachtungen heraus.

Damit verbleiben, bezogen auf das eingesetzte Substrat, Boxen oder Garagen als Reaktionsbehälter und die zugrunde gelegte Zielstellung zwei zu verfolgende Ansätze:

1. Hydrolysereaktoren mit Mono- oder Mischsubstrathaufwerken (Perkolatoren) sowie
2. Feststofffermenter mit Substrathaufwerken inklusive Impf- oder Altmaterial.

In beiden Fällen muss die Substratmatrix eine gute Durchströmbarkeit für die Flüssigphase sicherstellen, weshalb auf grobe Strukturen mit ausreichend Porenvolumen über den gesamten Prozessverlauf zu achten ist. Richtet sich der Blick auf den vollständigen Ablauf der anaeroben Umsetzung und deren Leistungsfähigkeit in Festbetten, schränken sich die Untersuchungen auf die Feststofffermenter ein. Der prinzipielle Aufbau einer solchen einphasigen Anlage ist schematisch in Abbildung 3-3 dargestellt, wobei Details, wie bspw. Tor oder Perkolattank, in anderen Ausführungen vorliegen können.

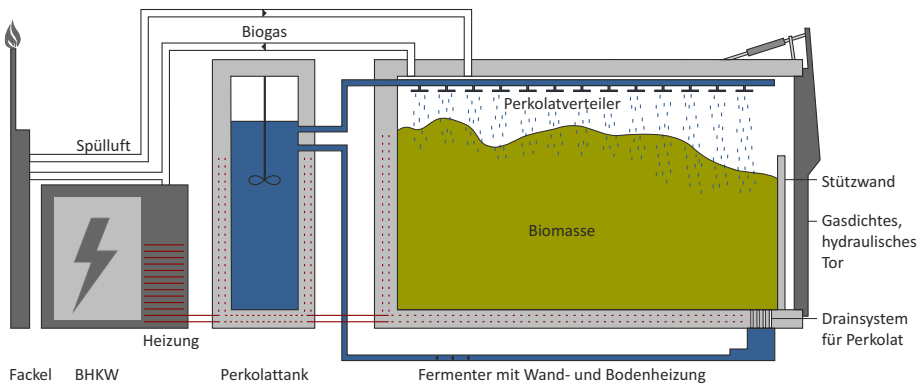

Abb. 3-3: Feststofffermenter, nach [112]

Das zu vergärende Substrat wird mit Gärrückstand gemischt, mehrheitlich mittels Radlader, und unmittelbar in die Fermenter verbracht. Diesbezüglich auftretende Unzulänglichkeiten können im Verfahrensverlauf nicht korrigiert werden, da keine nochmalige Durchmischung vorgesehen ist. Die Schüttguthöhen sind auf 2 - 3 m zu begrenzen, anderfalls sind zu hohe Verdichtungen in den unteren Schichten zu erwarten. Exakte Angaben zu vorliegenden Lagerungsdichten in Bodennähe lassen sich in der Literatur jedoch nicht finden. Eine kurzzeitige Belüftung von 12 bis 24 Stunden zur Initiierung der Eigenerwärmung bis zur gewünschten Temperatur ist optional. Neben der Verstoffwechselung leicht abbaubarer Bestandteile wird dabei bereits ein hydrolytischer Aufschluss eingeleitet. In Summe ist abzuwägen, inwiefern die Verluste an schnell verfügbaren Substanzen die Einsparungen an aufzubringender Wärmeenergie rechtfertigen. Energetisch gerechnet sollten entzogene Abbauwärme und Reduktion der Gasausbeute in der gleichen Größenordnung liegen, so dass sich Vorteile nur über

geringere Aufenthaltszeiten oder höhere Gesamtabbaugrade ergeben. Der Minderertrag an Gas wird von Wurm [259] für Gülle mit 5 - 15 % angegeben. Für Abfall stellte Santen [199] innerhalb von zwei Tagen im mesophilen Betrieb einen aeroben Biomasseabbau von 4,1 - 5,5 % oTS Input fest. Zur Anregung des Anaerobprozesses erfolgt die Berieselung mit Perkolat - im Belüftungsfall nachgeschaltet, andernfalls nach Schließen des Tores - entweder periodisch oder kontinuierlich. Sie wird einige Tage bis zu zwei Wochen vor Fermenteröffnung abgeschaltet. Ziel ist die statische Entwässerung, deren Effektivität jedoch qualitativ noch nicht nachgewiesen bzw. nicht publiziert ist [85, 105, 250].

Perkolationsmenge und Dauer gestalten sich individuell bzw. substratspezifisch, werden in der Literatur so gut wie nie genannt und weichen oftmals von den Planungswerten ab, da sie über stetigen Zuwachs an Erfahrungswissen einer Anpassung unterliegen. Einige Anhaltswerte aus der Praxis finden sich in Tabelle 3-1.

Tab. 3-1: Perkolationsdaten einiger Praxisanlagen (Anhaltswerte)

Verfahren / Quelle	Arbeits-volumen	Substrat (Inputmenge)	Perkolatmenge pro		Dauer / Intervall
	[m³]	[Mg]	Füllung [m³]	Leistung [m³/h]	[min] / [h]
Bekon [105]	550	Bioabfall (400)	90 - 110	-	-
Bekon [247]	670	Bioabfall + organische Monochargen (410)	120	10	1. Woche: 10 / 5 2. Woche: 10 / 7 3. Woche: 10 / 11
TNS [180]	150	Maissilage, Putenmist (134)	-	15	4 / 0,5

Im Vergleich zur Flüssigvergärung fallen die Anlagenzahlen im Feststoffbereich gering aus. Für Garagen oder Boxen inklusive der Hydrolysereaktoren können derzeit in Summe etwa 75 etablierte Anlagen in Deutschland angegeben werden. In Tabelle 3-2 sind diesbezüglich die Hauptvertreter und die eingesetzten Substrate wiedergegeben. Einzelheiten zu Bioabfallvergärungsanlagen lassen sich Kern und Raussen [112] entnehmen. Im landwirtschaftlichen Bereich nennt das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) acht Anlagen bei 777 auswertbaren Rückmeldungen der letzten Betreiberbefragung, also 1 % [149]. Eine Hochrechnung auf den Gesamtbestand von ca. 8000 Anlagen, ist jedoch unzulässig, da eine überrepräsentative Beantwortung nicht ausgeschlossen werden kann. Wird den Herstellerangaben gefolgt, liegt die Größenordnung bei etwa 35 landwirtschaftlichen Anlagen, wobei mit Ausnahme von Erweiterungen nach 2010 keine neueren zu verzeichnen sind. Anlagen der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) wurden nicht einbezogen.

Tab. 3-2: Übersicht Feststofffermenter (Stand 08/2015), Eigenrecherche und Herstellerangaben

Verfahren	Anlagen-zahl	Eingesetzte Substrate (anlagenspezifisch unterschiedlich)
BASD	2	Bioabfall, Landschaftspflege- und Begleitgrün
	2	Maissilage, Grassilage, Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS), Pferdemist
Bekon	9	Bioabfall
	5	Rindermist, Grasschnitt, Grassilage, Maissilage, Putenmist, Hühnertrockenkot
Eggersmann Kompoferm	12	Bioabfall
GICON	1	Bioabfall
(Perkolatoren)	2	Maissilage, Grassilage
Helector Herhof (Loock) TNS	6	Bioabfall
	10	Rindermist, Stroh, GPS, Grünschnitt, Grassilage, Maissilage, Geflügelmist, Panseninhalt
Viessmann Bioferm	7	Bioabfall
(keine Herstellerangaben möglich)	15	Rindermist, Hühnermist, Maissilage, Grassilage, GPS

Demgegenüber stehen 110 Pfropfenstromvergärer (Dranco, Eisenmann mit ca. der Hälfte der Anlagen, Hitachi Zosen Inova - Kompogas, Strabag - Linde KCA, Thöni, Valorga, ...), die mit Ausnahme von Eisenmann überwiegend mit Bioabfall betrieben werden. NawaRo als Eingangssubstrat spielen auch hier aktuell keine Rolle mehr. Es bleibt zu vermerken, dass angesichts der Marktdynamik kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird. Vor dem Hintergrund der Relevanz geht es eher um die Einordnung in Betrieb befindlicher Anlagen.

Es stellt sich die Frage, warum kein deutlicherer Zuwachs im landwirtschaftlichen Bereich zu verbuchen war bzw. ist, obschon die Verfahren lange am Markt sind und für Landwirte ohne intensive Viehhaltung durchaus eine Alternative zur Nassvergärung darstellen könnten. Neben den höheren Investitionskosten, einer hohen punktuellen Arbeitsbelastung bei Substratwechsel im Falle des Batchbetriebs sowie dem Wegfall des Technologiebonus, haben Gespräche mit Anlagenbetreibern gezeigt, dass große Unsicherheiten im Zusammenhang mit den Prozessabläufen bestehen. Aufgrund fehlender Handlungsanweisungen müssen sie über langwierige, empirische Wege Kenntnisse sowohl zur Einfahrphase als auch zum stabilen Betrieb ihrer Anlage generieren. Dieser unbefriedigende Zustand, der durchaus einen Zeitraum von über einem Jahr ohne gesicherte Erlöse einnehmen kann, bremst die Marktentwicklung erheblich und zieht im

Hinblick auf die Nassvergärung bisweilen eine Diskreditierung der Technologie nach sich. Als wesentlicher Forschungsbedarf wurden in Bezug auf das Substrat - über das Potential generell einsetzbarer Stoffe hinaus - bereits in den Jahren 2006 bis 2008 folgende Punkte identifiziert [102, 238, 167, 220]:

- qualitative Aussagen zu optimalen Substratstrukturen,
- geeignete Ansätze zur Animpfproblematik, d.h. optimale Rückführungsmengen und
- vertiefende Kenntnisse zum Perkolatverhalten bzw. zur Perkolatführung.

Da die Entwicklung des nassfermentativen Marktes deutlich überwog und damit der Fokus auf diesem Segment lag, ergab sich diesbezüglich nur begrenzt Wissenszuwachs. Die Zugehörigen Fragestellungen sind im Wesentlichen also noch unbeantwortet. Der bisherige Stand wird nachfolgend aufgegriffen, wobei das Augenmerk auf den ersten beiden Aspekten liegt.

3.2 Anforderungen an den technischen Betrieb

Gegenüber der Flüssigvergärung ist die Feststoffvergärung zwar anlagentechnisch einfacher aufgebaut, aufgrund höherer Energiedichten und dem stärkeren Einfluss der Materialeigenschaften prozesstechnisch jedoch anspruchsvoller. Substratspezifische Unterschiede wirken sich hierbei wesentlich stärker aus und entscheiden über den Erfolg [133]. Das Optimum im Betrieb lässt sich allgemein vereinfacht wie folgt darstellen: Höchstmögliche Ausnutzung des eingesetzten Substrates und gleichzeitig Maximierung des resultierenden Energieertrages auf einer ökonomisch vertretbaren Zeitachse. Es ist somit eine Abwägung zwischen Substrat, Raumbelastung (B_R), Verweilzeit (HRT) und biologischem Abbaugrad vorzunehmen. Dies gilt auch im Falle eines landwirtschaftlichen Feststofffermenters.

Um eine vollständige Beteiligung des Reaktorraumes an der Vergärung zu erreichen, ist eine Substratmatrix bereitzustellen, die auch in der Mikrostruktur eine gärfähige Beschaffenheit aufweist. Dies setzt neben einer ausreichenden Menge an Impfmaterial die sorgfältige Durchmischung der Einzelelemente voraus. Als einfache Technik stehen dafür der erwähnte Radlader, evtl. mit Mischschaufel ausgestattet, sowie Mietenumsatzgeräte zur Verfügung. Ein Einbau in Schichten ist nicht zielführend, da der direkte Vergleich signifikant niedrigere Methanproduktionen zeigte [132]. Neben Homogenität spielen Faktoren wie Einbaudichte, Partikelgröße (Struktur) und hydraulische Leitfähigkeit eine tragende Rolle. Belastbare und präzise Angaben zu diesen Parametern sind allerdings vakant.

Werden strukturarme Substrate vergoren, wird die Zusetzung von Strukturmaterial vorgeschlagen. Linke et al. [157] geben bspw. zur Stabilisation von Grasschnitt im Folienschlauch einen Strohanteil von 5 % an. Kusch et al. [134] nennen für Rindermist 50 Vol.-% gehäckselten Grünschnitt mit hohem Holzanteil und Schön [211] für Bioabfälle wiederum 10 Gew-% Holzhäcksel. Die Aussagen beruhen auf empirischen Erkenntnissen, wobei zu hinterfragen ist, woran die Strukturarmut der genannten Stoffe oder auch Maissilage festgemacht

wurde. Parameter zu deren Bewertung wurden nicht abgeleitet. In den meisten Fällen erschöpfen sich die Aussagen in der Feststellung, dass Strukturmaterial notwendig ist bzw. sich positiv auswirkt, z.B. [95, 119, 153, 256].

3.2.1 Verweilzeit und Raumbelastung

Als einer der wichtigsten Leistungsparameter für den Betreiber kann die Biogasausbeute angesehen werden, die einen substratspezifischen Wert darstellt. Sie steht in engem Zusammenhang mit Temperatur und Raumbelastung, welche als Quotient des organischen Trockenmasseeintrags (oTM) pro Kubikmeter effektivem Nutzvolumen und Tag definiert ist. Als durchflussbezogener Parameter anzusehen, besitzt sie eher für die Pfropfenstromverfahren Relevanz. Die täglich zugeführte Menge wird an den TS-Gehalt gekoppelt und bewahrt den Fermenter vor Über- oder Unterlast. Höhere Temperaturen und geringere Belastungen resultieren meistens in höheren Biogasausbeuten [l/kg]. Steigt die Belastung, sind demzufolge geringere Ausbeuten zu verzeichnen. Bei Überschreiten eines kritischen Wertes treten Übersäuerungserscheinungen auf, die den Prozess hemmen. Da Optimalbereiche von zahlreichen biologischen, chemischen sowie physikalischen Faktoren abhängen, lassen sich Pauschalangaben nicht tätigen. Es sind vielmehr experimentell substratspezifische Optima zu ermitteln, die dann die Ableitung der mittleren hydraulischen Verweilzeit (HRT) im Reaktor zulassen, welche umgekehrt proportional ist [15, 70, 155]. Die Abhängigkeit von Raumbelastung, Verweilzeit und Substratkonzentration (oTS) wird eingehend in Leitfäden zum Thema Biogas, z.B. [83, 158], beschrieben, wobei die Rezirkulation von Gärresten unberücksichtigt bleibt. Da Garagen-/Boxenfermenter keiner täglichen Zufuhr unterliegen, ist die Ermittlung der Raumbelastung wenig gewinnbringend bzw. lediglich eine theoretische Angabe. Schlussfolgernd wird bei gegebener Durchsatzmenge die Verweil- oder Aufenthaltszeit herangezogen, weshalb für die vorliegende Arbeit eine Fokussierung auf diese stattfindet.

Bezogen auf HRT nehmen Biogasausbeuten oder -erträge mit steigender Dauer stetig zu. Im Gegensatz dazu durchläuft die Gasbildungsrate [l/kg · d] ein Maximum und fällt danach sukzessive ab. In diesem Zusammenspiel nimmt der Abbaugrad η eine wesentliche Rolle ein, wobei in biologischen und technischen Abbaugrad zu unterscheiden ist. Während ersterer als maximale Umwandlung des organischen Anteils des eingesetzten Substrates unter Praxisbedingungen zu verstehen ist, gibt letzterer den tatsächlichen Umsatz am Ende der gegebenen Verweilzeit an. Wird also der vollständige Abbau angestrebt, ist mitunter mit sehr langen Aufenthaltszeiten im Fermenter zu rechnen, welche wiederum in entsprechend großen Behältervolumina resultieren [66, 83, 155].

Eder und Schulz [67] nennen unter Beachtung eines wirtschaftlich vertretbaren Aufwandes einen anzustrebenden Abbaugrad von 40 - 60 % oTS, für NawaRo-Anlagen 80 % oTS. Die DWA [66] empfiehlt mit Blick auf die Reduzierung von klimarelevanten Treibhausgasen ein $\eta > 80$ % der eingesetzten Organik. In Summe lässt sich konstatieren, dass ein möglichst kleiner Reaktorraum mit hohem Stoffumsatz, d.h. der Anreicherung einer großen, aktiven Biomasse, anzu-

visieren ist [186]. Als Maß der Mindestverweilzeit sind Generationszeiten der Mikroorganismen in Kombination mit schneller oder langsamer Substratverfügbarkeit anzusehen (Reaktionsgeschwindigkeit, siehe Kapitel 3.3).

Linke [154] stellt für ungehemmte Prozesse von Maissilage und Gehaltsrübe bereits nach 20 bis 25 Tagen 90 % des maximal möglichen Biogasertrages fest, welcher durch Hill-Kinetik oder Exponentialfunktion errechnet wurde. Gräser benötigen hingegen 60 Tage. In Rosenwinkel et al. [196] werden für eine Mischung aus Mais- und Grassilage sowie Rinderfestmist 25 - 30 Tage genannt, allerdings mit der Folge, dass der Gärrest nach einmaligem Durchlauf ca. 20 % TS und 70 % oTS aufweist, d.h. es liegt ein unvollständiger Substratabbau sowie ein hohes Restgaspotential vor. Aufgrund einer hohen Rückführrate (siehe Kapitel 3.2.2) steigt die Verweilzeit jedoch auf durchschnittlich etwa 70 Tage. Allgemein gesehen, findet sich eine Angabe von drei bis sechs Wochen für garagenförmige Boxen bzw. mobile Container (Rückführung von 40 % bis 60 % des Gärrestes). Baserga et al. [13] haben Rindermist mit Aufenthaltszeiten zwischen 16 und 34 Tagen untersucht. Sie empfehlen für den mesophilen Betrieb 28 - 30 Tage. Bei längeren HRT ist nur noch eine unbedeutende Mehrausbeute zu verzeichnen. Die Größenordnung lässt sich durch andere Autoren bestätigen, bspw. Ten Brummeler et al. [236] oder Gronauer und Aschmann [95]. Der Entwurf eines Merkblattes der DWA M 389 [66] zur Trockenvergärung gibt für diskontinuierliche Perkolationsverfahren je nach Substrateigenschaften eine Dauer zwischen vier und acht Wochen an. Es bleibt allerdings unklar, welche Rahmenbedingungen dieser Angabe zugrunde liegen. Die Hersteller dimensionieren je nach Substrat mit den in Tabelle 3-3 aufgeführten HRT. Es ist auffällig, dass diese relativ gering ausfallen. Zurückführen lässt sich dies entweder auf die Nutzung als Impfmaterial im Folgedurchlauf oder auf nachgeschaltete Prozesse, z.B. Kompostierung, welche die restliche Organik abbauen.

Tab. 3-3: Aufenthaltszeiten der unterschiedlichen Verfahren (Herstellerangaben, Befragung)

Verfahren (diskontinuierlich)	HRT	Verfahren (kontinuierlich)	HRT
Bekon	24 - 28	Eisenmann	(3) - 30
Eggersmann Kompoferm	21	Dranco	20 - 30
GICON	16 - 26	Hitachi Zosen Inova Kompogas	15 - 21
Helector Herhof (Loock) TNS	20 - 21	Strabag Linde-KCA	(16) 18 - 25
Viessmann Bioferm	28	Valorga	14 - 28

Für die eigenen Versuche ableitend, sind - begründet in dem einmaligen Durchlauf - längere Verweilzeiten zu wählen, so dass substratunabhängig hohe Abbauraten zu verzeichnen sind und der Gärrest ein geringes Restgaspotential aufweist. Dies geschieht auch vor dem Hintergrund, bei ungehemmten Verläufen die

Ertragspotentiale erfassen zu können. In Anbetracht der zu untersuchenden Substrate, z.B. Grasschnitt (siehe dazu Kapitel 5.1), sowie den maximal genannten acht Wochen, bietet sich eine über den gesamten Zeitraum gleichbleibende Versuchsdauer von mindestens 60 Tagen an.

3.2.2 Mischungsverhältnisse

Die Ausführungen zur Raumbelastung aufgreifend, bieten erhöhte Mengen an Impfmaterial die Möglichkeit, den Prozess zu stabilisieren und die Abbaurate positiv zu beeinflussen. Gleichzeitig wird jedoch die Auslastung der Anlage reduziert [132]. Dieser Zusammenhang spielt insbesondere in der Anfahrphase eine tragende Rolle, da in dieser Zeit Erfahrungen bezüglich der Leistungsfähigkeit des Impfmaterials fehlen.

Ein Optimum ist erreicht, wenn die zugegebene Menge an Impfmaterial minimiert wird, ohne dabei Stabilität und Abbaugeschwindigkeit zu beeinträchtigen. Stabilisierend kann hier die Perkolation wirken, indem sie in der versäuernden Anfangsphase die überschüssigen Säuren abführt und somit eine Reduktion der zur Stabilisierung notwendigen Impfmaterialmenge ermöglicht. Der Zusammenhang wird vereinfacht in Abbildung 3-4 dargestellt, wobei von einem asymmetrischen und substratspezifischen Verlauf der Perkolation auszugehen ist.

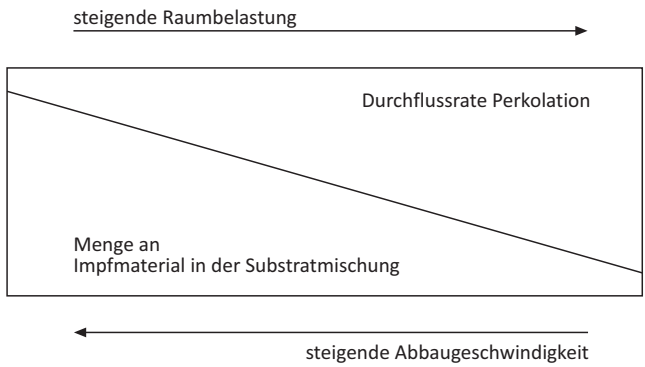

Abb. 3-4: Schematischer Zusammenhang von Impfmaterial und Perkolation, nach [101]

Nach Vavilin et al. [241] sollte die Perkolationsrate zu Beginn gering gehalten werden, da eine hohe Rate zur erhöhten Auswaschung der löslichen Bestandteile und der organischen Säuren führt. Letzteres ist im Prinzip positiv zu werten, da sich ein stabiles Milieu einstellt. Werden die Methanbildner ebenfalls ausgespült, lässt sich dieser Umstand allerdings nicht nutzen. Durch Turbulenz und permanente Beaufschlagung mit organischen Säuren ist zudem die Hemmung der methanogenen Archaeen vorstellbar. Bei Versuchen mit Eigenperkolation führte die kontinuierliche Berieselung von Maissilage zu einer längeren Lag-Phase [132]. Das Mischungsverhältnis muss in Abhängigkeit von Substrat, den Eigenschaften des Impfmaterials und des Verfahrens individuell angepasst werden. In der Literatur findet sich demzufolge ein breites Spektrum.

Bezogen auf die feuchte Masse werden 0 - 80 % an einzubringendem Masseanteil Altmaterial genannt. Eine Auswahl enthält Tabelle 3-4. Rosenwinkel et al. [196] nennen ebenfalls eine Rückführungsrate von bis zu 80 % des ausgefaulten Materials, wobei sie für Garagenfermenter auf 40 % - 60 % reduzieren. Hinsichtlich der Haufwerksverfahren werden 50 % genannt. Dem stimmen Liesch und Müller [153] nach Auswertung der Literatur zu und nennen verallgemeinert einen Anteil > 50 %. Verfahrensanbieter empfehlen auf der Basis von Erfahrungswerten eine ähnliche Größenordnung. So gibt bspw. BEKON für Bioabfall ein Mischungsverhältnis von 60 % Frischsubstrat zu 40 % Gärrest an [147].

Tab. 3-4: Auswahl an Mischungsverhältnissen auf Basis der Feuchtmassen (FM)

Quelle	Jahr	Massenanteil Impfmaterial [%]	Substrat	Impfmaterial	Verfahren
Hall et al. [98]	1985	0	Rinderfestmist, Stroh	-	Festbett, Perkolation
Baserga [11]	1998	10	Extensosgrassilage	Rindergülle	Pfropfenstrom, (ANACOM)
Mohee und Ramjeawon [175]	2003	10	Biologische Fraktion Restabfall	Flüssiger Gärrest	Kreuzlaufführung (SEBAC)
Linke [154]	2004	≈ 50	Grünschnitt, Futtermittel, Maissilage, Gras, Kartoffelreste	Rottemist	Folienschlauch
Weiland [249]	2004	> 50 - 75	Substrat allgemein, Geflügelmist	Impfsubstanz, Rinderfestmist alt	Haufwerk
Jäkel et al. [109]	2005	50 - 80	Rindermist frisch, Futterreste, Maissilage	Rinderfestmist alt	Folienschlauch
Adhikari et al. [3]	2006	10	Biologische Fraktion Restabfall	Rindergülle, Gärrest	Kreuzlaufführung (SEBAC)
Gronauer und Aschmann [94]	2006	30 - 70	Rindermist, Silagen, Hühnermist	Gärrest	Garage, Perkolation
Linke et al. [156]	2006	27	Maissilage, Putenmist	Gärrest	Garage, Perkolation (Kreuzlaufführung)

Resümierend lässt sich feststellen, dass ein Impfmaterialanteil von 75 % für nahezu alle Substrate einen sicheren Betrieb bewerkstelligen kann, obschon hier verschiedene Gesichtspunkte zu beachten sind, wie z.B. Ausfaulgrad oder Anreicherungen von Hemm- oder nicht abbaubaren Stoffen wie Lignin. Noch gut gärfähiges Altmaterial kann bei leicht abbaubaren Substanzen ebenfalls zur Hemmung beitragen. Zur Inbetriebnahme wird gelagerter Rindermist (Rottemist) empfohlen, da schon eine aktive methanogene Mischpopulation enthalten ist. Bei Verwendung von vier Wochen altem Mist kann auf Impfmaterial verzichtet werden. Nach dem Einfahrbetrieb wird auf entstehende Gärreste verwiesen [95, 132, 154, 168].

Da die Bestimmung des Verhältnisses auf Feuchtbasis Schwankungen im TS-Gehalt und damit der Raumbelastung unzureichend beachtet, sind bei Verwendung neuer Substrate Abschätzungen nur mit Vorbehalt möglich. Linke [154] hat demzufolge für unterschiedliche pflanzliche Biomassen und organische Reststoffe Mischungsansätze unter mesophilen Bedingungen untersucht und empfiehlt die Einführung eines Impfmaterialverhältnisses p_i auf Basis der Masse der organischen Trockensubstanz (oTM):

$$p_i = \frac{m_i \cdot c_i}{m_s \cdot c_s}$$ *Gleichung 3-1:*

mit:

p_i Impfmaterialverhältnis auf oTS-Basis [-]

$m_{i,s}$ Masse Impfmaterial und Substrat (kg)

$c_{i,s}$ oTS-Konzentrationen (g/kg)

Substrate wie Maissilage oder Apfeltrester benötigen demgemäß einen hohen Zusatz an Impfmaterial, deren p_i zwischen 2,5 und 4,5 angegeben wird, d.h. es wird bis zum 4,5fachen Masseanteil Impfmaterial benötigt (≈ 80 % FM). Gleichzeitig fällt der Impfanspruch von Exkrementen auf Strohbasis erwartungsgemäß geringer aus und liegt i.d.R. unter eins. Lediglich Geflügelmist benötigt eine mit NawaRo vergleichbare, höhere Altmaterialzugabe. Dies deckt sich mit den Aussagen von Gronauer und Aschmann [95], die den gesteigerten Bedarf auf die hohen Ammoniumgehalte zurückführen.

Kusch et al. [135] erachten demgegenüber den Bezug auf die Trockensubstanz (TS) als ausreichend. Der Einfluss unterschiedlicher NawaRo hinsichtlich des erforderlichen Mindestanteils an festem Impfmaterial ergab einen Bereich von 0 Gew.-% TS für Rinderfestmist, über 30 % für Grünschnitt und bis zu 70 % bei Gras- und Maissilage [132]. Dies steht im Einklang mit der von Weitze [252] zusammengetragenen Spanne von 20 - 80 %, wobei sich erstere auf thermisch vorbehandelte Abfälle und letztere auf genannten Apfeltrester beziehen.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass der Bezug auf TS respektive oTS aussagekräftigere Abschätzungen erlaubt und sich bezüglich Prozessstabilität ein Richtwert von 50 - 70 % TS an notwendiger Impfmaterialzugabe abzeichnet.

3.3 Einflussfaktoren auf den anaeroben Abbau

Im Gegensatz zu frei suspendierenden Organismen, an denen im Normalfall Eigenschaften untersucht werden, weisen sie im immobilisierten Zustand erhebliche Unterschiede auf. Im Festbettreaktor ist der größte Teil der mikrobiellen Biomasse in sessiler Form aktiv. An den Oberflächen entstehen Mikrokonsortien in Form eines Biofilms, der zu langen Verweilzeiten der Zellen am Substrat führt und die Interaktion mit anderen oberflächengebunden Zellen ermöglicht. Die Wechselwirkung zeichnet u.a. auch für das Wachstum von Spezialisten verantwortlich, welche befähigt sind, persistente Verbindungen abzubauen. Die Interaktion von Adsorption und Abbau hat wesentliche Bedeutung für die Prozessstabilität [115, 163, 186].

Die Erhöhung der Biomassedichte geht mit folgenden Vorteilen einher [186]:

- bessere Zurückhaltung im Reaktor,
- größere Volumenströme bei geringerer Aufenthaltszeit,
- syntrophe Assoziationen mit vielfältigen Stoffwechseleigenschaften.

3.3.1 Milieubedingungen

Nach Braun [27] werden beteiligte Mikroorganismen durch Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Nährstoffversorgung mit Makro- und Mikronährstoffen sowie Hemmstoffe beeinflusst, wobei im Rahmen dieses Kapitels lediglich auf die für diese Arbeit relevanten Parameter eingegangen werden soll.

Da, wie bereits erwähnt, mesophile Anlagen in der Praxis überwiegen, fanden zur Auswahl des Temperaturbereiches keine Überlegungen statt. Die Einflüsse, die sich sowohl kinetisch als auch physikalisch-chemisch ergeben, lassen sich übersichtlich in Gerardi [90] respektive Meyer [171] nachvollziehen.

Definiert als negativ dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenaktivität beeinflusst der pH-Wert die Enzymaktivität sowie die Dissoziation von Stoffwechselprodukten und ist daher für alle mikrobiellen Stoffwechselprozesse essentiell. An der anaeroben Umsetzung beteiligte Organismengruppen weisen dabei für die maximale Wachstumsgeschwindigkeit unterschiedliche Optima und Toleranzbereiche auf. Während säurebildende Bakterien in einem größeren pH-Bereich aktiv sein können, wird für Acetogene und Methanogene ein Optimum im neutralen Bereich genannt. Eine Hemmung methanogener Mikroorganismen ist ab einem pH-Wert von 6,6 (6,5 - 6,8) zu beobachten, wobei der pH-Wert selbst weniger hemmend wirkt, sondern vielmehr der Einfluss undissoziierter Fettsäuren [4, 148, 179, 248]. Da der Batchprozess während der Initialphase durch eine Absenkung des pH-Wertes gekennzeichnet ist, muss eine ausreichend große Pufferkapazität im Ausgangsmaterial vorliegen. Das diesbezüglich wichtigste System ist der Kohlendioxid / Hydrogencarbonat-Puffer [263]. In Bezug auf einstufige Vergärungsanlagen sollte demnach ein pH-Wert > 6,8 vorhanden sein, der sich im Fall geringer belasteter Reaktoren von selbst einstellt [196].

Hinsichtlich der Hemmstoffe ist zu unterscheiden, ob sie von außen in den Fermenter eingetragen oder während des Gärprozesses gebildet werden. Der am häufigsten auftretende Fall ist die Aufkonzentrierung gebildeter Zwischenprodukte, die bei hohen Konzentrationen hemmend wirken. Das Spektrum reicht von reversibler Hemmung bis zur vollständigen Abtötung. Die Stärke der Auswirkung hängt dabei u.a. auch von der Aggregationsform der aktiven Biomasse ab. Biofilme erweisen sich hier als deutlich unempfindlicher [148, 179].

Tabelle 3-5 fasst die wichtigsten Stoffe zusammen. Die diesbezüglich in der Fachliteratur zu findenden Ausführungen, z.B. in [83, 162, 171, 179, 199, 248], lassen sich im Wesentlichen auf Kroiss [124] zurückführen, weshalb zur Beschreibung der Zusammenhänge auf diese Quelle verwiesen wird, obschon deren Grundlage die anaerobe Abwasserreinigung darstellt.

Tab. 3-5: Hemmstoffe anaerober Gärprozesse [179]

Hemmstoff	Hemmkonzentration [mg/l]	Anmerkung zur Hemmwirkung
Schwefelwasserstoff (H_2S)	> 50	steigt mit sinkendem pH-Wert
Ammomiumstickstoff (NH_4-N)	> 3500 (bei pH = 7,0)	steigt mit höherem pH-Wert, hohe Adaptationsfähigkeit der Organismen
organische Säuren (flüchtige Fettsäuren)	> 2000 * (bei pH = 7,0)	steigt mit sinkendem pH-Wert
Desinfektionsmittel, Antibiotika	stoffspezifisch	wirkstoffabhängig
* ... als Essigsäureäquivalent		

Da sich die Batchprozesse der Feststoffvergärung mehrheitlich messtechnischen Möglichkeiten zur Erfassung der Störgrößen bzw. der Einflussnahme entziehen, wurde die Prozessflüssigkeit (Press- oder Sickerwasser, Perkolat) zur Prozessbeurteilung herangezogen. Als relevante Größen im Rahmen dieser Arbeit wurde auf organische Säuren (Essigsäureäquivalent) und i.T. der Kjeldahl-Stickstoff (organischer Stickstoff, NH_4) eingegrenzt.

Der Gehalt an organischen Säuren - auch als flüchtige Fettsäuren bezeichnet - ist als Maß der Anreicherung von Zwischenprodukten des anaeroben Abbaus zu verstehen. Niedrige Werte weisen hier auf eine stabile Abbauleistung und weitestgehend vollständige Umsetzung hin. Im Gegensatz dazu bedeuten hohe Konzentrationen nicht zwangsläufig auch Instabilität. Diese tritt erst auf, wenn ein gestörtes Gleichgewicht zwischen Produktion und Abbau vorliegt, so dass sich Säuren im System akkumulieren. Neben der hemmenden Wirkung des undissoziierten Anteils auf essigsäureverwertende und methanbildende Mikroorganismen, kommt es durch Änderung der thermodynamischen Verhältnisse vermehrt zur Bildung langkettiger Fettsäuren, deren Abbau durch die Hemmung blockiert

ist. Dieses Zusammenspiel kann in Abhängigkeit von der Pufferkapazität entscheidend den pH-Wert beeinflussen. Tritt ein Absinken auf, wird die Hemmwirkung durch den Anteil undissoziierter Säuren verstärkt (siehe Abbildung 3-5). Eine kurzzeitige Überschreitung der Grenzwerte kann ggf. ohne Zusammenbruch des Prozesses durch eine Steigerung der Stoffwechselaktivität abgefangen werden. Absolute Grenzwerte sind also mit Vorbehalt zu betrachten und, so dies möglich ist, eher ein zeitlicher Verlauf der Säurekonzentration heranzuziehen [4, 27, 67, 148, 248].

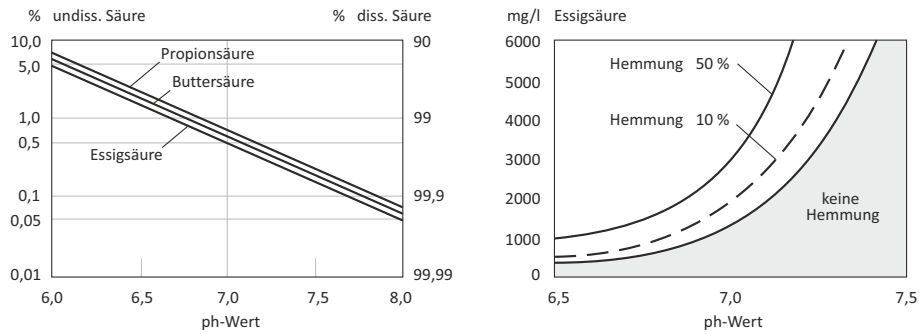

Abb. 3-5: Dissoziationsgrad von Säuren und Hemmung der Methanbildung durch Essigsäure in Abhängigkeit vom pH-Wert, nach [124]

Stickstoff, als essentieller Nährstoff der beteiligten Organismen, wird vorranging in Form von Ammonium erschlossen. Organisch gebunden, wird Stickstoff zunächst als Ammoniak freigesetzt und dann in Wasser gelöst (NH_4^+). Abhängig vom pH-Wert sowie der Höhe der Temperatur stellt sich ein Gleichgewicht ein, dessen Lage entscheidend ist, da nicht Ammonium sondern Ammoniak die hemmende Wirkung zugesprochen wird. Bei konstant gehaltener Temperatur hängt die Hemmwirkung demnach vom pH-Wert ab und nimmt mit dessen Anstieg zu. Oft reichen hier geringe Schwankungen. In erster Linie werden dann acetogene Methanbildner gehemmt. Hinsichtlich der Adaptationsfähigkeit, gelten die Aussagen zu den organischen Säuren, da z.T. auch Konzentrationen oberhalb der Grenzkonzentration toleriert werden [27, 61, 148, 179, 248].

3.3.2 Anaerobe Verfügbarkeit der Substrate

In Vergärungsanlagen ist die Geschwindigkeit der unterschiedlichen Abbauphasen von essentieller Bedeutung für die Stabilität des Gesamtprozesses. Bei flüssigen oder gelösten Substraten stellt üblicherweise die Acetogenese den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt dar, da deren Bakterien ihre Körpermasse erst in mehreren Tagen verdoppeln, wohingegen hydrolytisch wirkende Bakterien maximal wenige Stunden benötigen [162].

Einen Vergleich der Generationszeiten beteiligter Organismen ermöglicht Tabelle 3-6. In der Praxis sind die Verweilzeiten so zu wählen, dass die Populationsdichte der am langsamsten wachsenden Gruppe nicht abnimmt. Da der großtechnische Maßstab häufig keine optimalen Bedingungen aufweist, liegen sie in der Regel noch über den Zellverdopplungszeiten [23].

Tab. 3-6: Generationszeiten verschiedener Mikroorganismen

Mikroorganismen	Substrat	Generations-zeiten [h]	Quelle / Bemerkung
Hydrolysierende	Kohlenhydrate	5	[173]
	Proteine	17	
	Fette	72	
Acidogene	Monomere	1 - 96; < 48; < 24	[91]; [196]; [248]
Acetogene	Fettsäuren (kurzkettig)	60 - 120; 72 - 84; 36 - 96; 60 - 240	[91]; [173] / Propion- und Buttersäure; [176]; [67, 196]
Methanogene	Essigsäure	24	[165] / abhängig vom Wasserstoffpartialdruck;
		48 - 92; 71 - 85; < 48	[91]; [173]; [196]
	Wasserstoff	6 - 20; 4 - 6; 15 - 28	[91]; [176]; [173, 196]

Bei festen Substraten wirkt häufig die Hydrolyserate unlöslicher Polymere geschwindigkeitslimitierend, sie korrespondiert dann mit der Verlängerung der Verdopplungsrate der Säurebildner [196, 248]. Als Maß für die Umsetzung der Polymere in Monomere ist die Hydrolysekonstante zu sehen - je höher die Konstante desto schneller die Verfügbarkeit. Entscheidend ist die biochemische Zusammensetzung des Substrates, die auf einem Mix an strukturschwachen und strukturreichen Stoffgruppen beruht. Deren differente Abbaubarkeit wird in Abbildung 3-6 schematisch darstellt [159, 148].

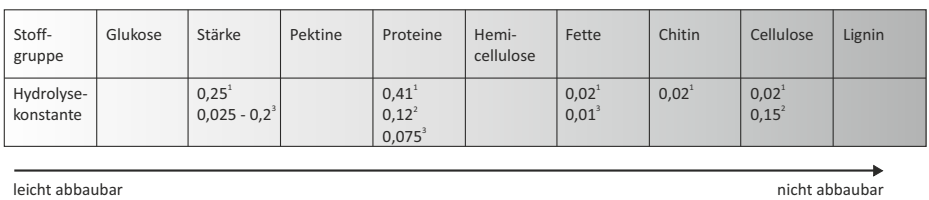

Abb. 3-6: Abbaubarkeit verschiedener organischer Komponenten, nach [186, 246] mit Zuordnung der Hydrolysekonstanten ([1] [151], [2] [108], [3] [36])

Wie aus Abbildung 3-6 ersichtlich wird, schwanken die Angaben zur Hydrolysekonstanten bereits innerhalb reiner Stoffgruppen beträchtlich. Sanders [198] stellt daher die Anwendung literaturbasierter Werte in Frage. In ihren Untersuchungen zeigte sich, dass die Konstante nicht nur substrat- sondern gleichzeitig auch systemspezifisch ist. So üben Änderungen von Temperatur, Partikelgröße und pH-Wert Einflüsse aus, die korrigiert werden müssen. Eine grobe Einordnung nach prinzipieller Verfügbarkeit ist dennoch möglich, da die Parameter weitgehend substratunabhängig wirken. So erhöht sich bspw. die Hydrolysierbarkeit mit dem Anstieg der Temperatur, unabhängig ob Proteine, Cellulose oder Fette betrachtet werden, wohingegen die Zunahme der Partikelgröße eine Verringerung nach sich zieht. Lediglich beim pH-Wert war kein eindeutiger Zusammenhang festzustellen [188, 198].

Um eine überschlägige Aussage hinsichtlich der generellen Hydrolysierbarkeit eines Substrates treffen zu können, bietet es sich an, die Komponenten zu betrachten, aus denen sich das Substrat zusammensetzt. Exemplarisch werden entsprechende Anhaltswerte für ausgewählte NawaRo in Tabelle 3-7 vorgestellt. Damit wird deutlich, dass auf Grund des hohen Zuckergehaltes, Rüben zu schnell hydrolysierbaren Substraten zu zählen sind. Auch Grasschnitt kann i.T. als solches eingeordnet werden. Maissilage tendiert zu einer mittleren Verfügbarkeit, während hohe Anteile an schwer zugänglichen Stoffgruppen bei Stroh eine niedrige Hydrolyserate annehmen lassen und es damit nur langsam abgebaut werden kann.

Tab. 3-7: Zusammensetzung ausgewählter NawaRo

Substrat	Zucker [% TS]	Stärke [% TS]	Prot. [% TS]	Hemi-cell. [% TS]	Fette [% TS]	ADF [% TS] * Cell.	Lignin
Apfeltrester [41, 239]	23	0	5 - 6	7	2 - 4	30	
Grasschnitt [17, 107, 185]	8 - 13		7 - 17	27	2	35 - 38	
Maissilage [86, 107, 125, 209, 239]		28 - 35	7 - 9	7 - 17	1 - 3	11 - 26	
Rüben [17, 107, 239]	54		7 - 17	4	0 - 5	6 - 7	
Stroh [17, 107, 235, 239, 246]	1	1	3 - 8	21 - 50	1 - 3	30 - 46	13 - 17
* ... ADF = Acid Detergent Fibre (suare Detergensfaser)							

In Batchversuchen ist das Verhalten an der Entwicklung der Gasbildungskurve zu erkennen. Während leicht verfügbare Stoffe im ungestörten Prozess eine normale Biogasproduktion gemäß Abbildung 3-7 zeigen, stellt sich bei schwer zugänglichen ein verzögerter Abbau ein.

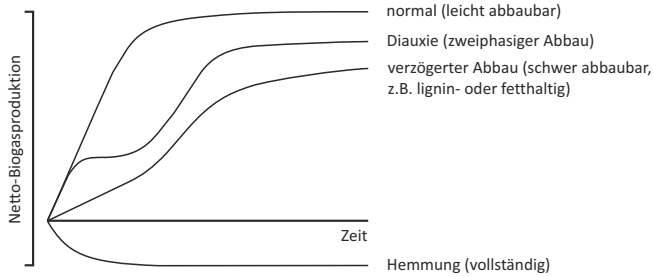

Abb. 3-7: Typische Verläufe von Gasbildungskurven, nach [243]

Ungestört verläuft die Methangärung nur, wenn die komplexe Mischflora unter den gegebenen Bedingungen in Summe ausreichend wachsen kann. Den Idealfall stellt also ein Fließgleichgewicht der Stoffkonzentrationen dar. Verhältnisse können durch das Heranziehen von typischen Netto-Kurvenverläufen (substratspezifische Erträge) interpretiert werden, auch wenn in Teilen Störungen von anderen Eigenschaften nicht zu unterscheiden sind und eine Vielzahl von Mischformen auftritt [67, 196, 243].

4 Physikalische Grundlagen zu Festbetten

Wird als Systemgrenze entsprechend Kapitel 3.1 die bauliche Umgrenzung eines Fermenters festgelegt, der einen Raum konstanter Größe darstellt, kann unter Zuhilfenahme der Thermodynamik systembezogen nach folgenden Gesichtspunkten klassifiziert werden [74]:

a) Wechselbeziehung mit der Umwelt sowie

b) Eigenschaften der innerhalb befindlichen Stoffe.

Für Ersteres maßgebend sind die Möglichkeiten des Stoff- und Energietransportes über die Systemgrenze. Durch den Ein- und Austritt von Perkolat sowie das Abführen des Biogases und damit einem Austausch von Masse und Energie, handelt es sich um ein stoffdurchlässiges oder offenes System. Bezüglich der Eigenschaften kann von chemischer Seite von einem Mehrstoffsystem ausgegangen werden, in dem gleichzeitig unterschiedliche physikalische Aggregatzustände vorliegen (Mehrphasensystem).

Da die Interaktion mit der Umgebung für die vorliegenden Betrachtungen von nachrangigem Interesse ist bzw. als konstant angenommen wird, z.B. die Aufrechterhaltung der für den biologischen Abbau notwendigen Temperatur, liegt der Fokus auf den inneren Zustandsgrößen, die die Eigenschaften des Systems bzw. das Systemverhalten vor dem Hintergrund eines ungestörten, stabilen Anaerobprozesses beschreiben. Dieser setzt voraus, dass die beteiligte Mischpopulation immobilisierter, aber auch suspendierter Mikroorganismen durch eine optimale Substratkonzentration maximale Wachstumsgeschwindigkeiten aufweist, idealerweise gleich an jedwedem Punkt der Haufwerkspackung (siehe auch Kapitel 3). Dementsprechend widmen sich folgende Abschnitte den physikalischen Größen von Festbetten, die im Zusammenhang mit der Durchströmung und damit Bereitstellung bzw. Verteilung der notwendigen Flüssigphase stehen.

4.1 Systembeschreibung

Das dreiphasige und damit heterogene Stoffsystem, bestehend aus Feststoff, Flüssigkeit und Gas, welches Festbetten der batchbetriebenen Feststoffvergärung darstellen, kann im Allgemeinen als disperses System betrachtet werden, in dem Partikelkollektive der dispersen Phase als poröse Matrix vorliegen und von mindestens einem Medium, der kontinuierlichen Phase, umgeben sind [183, 231]. Es liegt also eine persistente (räumlich fixierte) Festphase vor, die durchgängig ist (kohärent-dispers), sowie verbleibende Zwischen- bzw. Porenräume, die durch eine oder mehrere Fluidphasen gefüllt sind. Als Phase wird dabei ein chemisch homogener Teilbereich angesehen, getrennt durch eine deutliche, physikalische Grenze mit Diskontinuitäten in den Fluideigenschaften. Es kann jeweils nur eine Gasphase geben, weil Gase in Gänze mischbar sind, jedoch mehrere flüssige Phasen, die dann nebeneinander existieren. Für die Betrachtungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit stehen zwei nicht mischbare Fluide im Mittelpunkt, namentlich Perkolat als Flüssigphase und Biogas als Gasphase. Die Struktur des porösen Mediums ermöglicht mittels diffuser oder advektiver

Mechanismen den internen Transport einer extensiven Größe einer Phase (z.B. Masse oder Energie), entweder innerhalb der Phase oder über Phasengrenzen hinweg. Eine Beschreibung dieser auf mikroskopischer Ebene stattfindenden Vorgänge ist faktisch allerdings unmöglich [117].

Zur ganzheitlichen Betrachtung der gekoppelten Festkörper-Fluid-Aggregate bietet sich eine konzeptionelle Durchschnittsbildung an, die von einem statistisch gemittelten Mehrphasenkontinuum ausgeht. Mit dem Kontinuum-Ansatz lassen sich die einzelnen Phasen durch Variablen ausdrücken, so dass das poröse Medium hypothetisch beschrieben werden kann. In diesem Ersatzmodell, festzulegen als repräsentatives Elementarvolumen (REV), koexistieren die Kontinua "ineinander", d.h. im Zustand idealer Unordnung statistisch über den Kontrollraum verteilt (siehe Abbildung 4-1). Damit sind geometrische und physikalische Eigenschaften in jedem Raumpunkt definiert und es wird die Notwendigkeit umgangen, Gegebenheiten auf der Mikroskala abbilden zu müssen. Zustands- und Prozessgrößen werden so makroskopisch messbar gemacht [73, 117].

Die Feststoffmatrix wird also als fiktives Kontinuum angesehen, die nur noch durch Bruttogrößen wie Durchlässigkeit, Porosität und Speichervermögen gekennzeichnet ist. Die Porosität gibt dabei das Verhältnis des Hohlraum- oder Porenvolumens V_p zum Gesamtvolumen (V_p + Feststoffvolumen V_k) an. Im diesem Zusammenhang wird auch vom Porenanteil n gesprochen, entscheidend beeinflusst durch Lagerungsdichte und Korngrößenverteilung. Es wird in wassergefüllte Poren n_w sowie gas- oder luftgefüllte Poren n_a unterschieden. Steht die Volumenänderung des Gesamtsystems im Vordergrund, bspw. durch Konsolidierung, wird als Bezugshorizont die Porenzahl e eingeführt, die auf das Feststoffvolumen V_k abstellt, welches nicht veränderbar ist. Beide Größen können über die Dichte einer Probe bestimmt werden. Der gesamte Sachverhalt lässt sich an einer Raumeinheit veranschaulichen, wenn darin die Festmasse zusammengefasst wird (Abbildung 4-1). Der Umfang des Hohlraumgehaltes ist als Maß für die speicherbare Fluidmenge anzusehen, während Größe, Gestalt und Konnektivität der Hohlräume über die Durchlässigkeit entscheiden [203, 31, 128, 255].

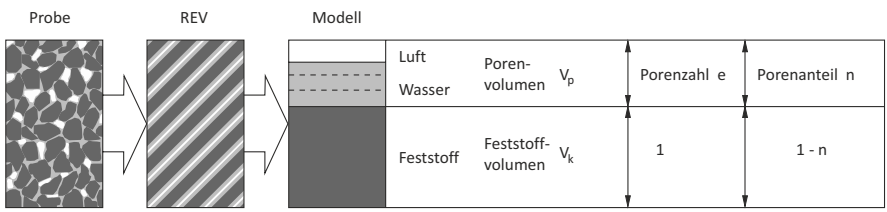

Abb. 4-1: Boden Dreiphasenstoff, modifiziert nach [127]

Der Grundfall der Mehrphasenhydraulik, als deren Prototyp gasförmige Luft und flüssiges Wasser gesehen werden kann, ist die vollständige Sättigung der Hohlräume mit den Fluiden als mobile Teilsysteme [117, 166].

Von Interesse sind im vorliegenden Fall konvektiver Transport und Speicherung. Diffusionsbedingte sowie phaseninterne Umwandlungsprozesse sind nicht Gegenstand der Betrachtung. Somit stehen mechanische - genauer hydraulische Eigenschaften - und nicht stoffliche Aspekte im Vordergrund. Hinsichtlich der Hydraulik sind nach Busch et al. [31] drei Eigenschaften maßgebend oder zentral bedeutend:

1. Hohlraumgehalt als Ausdruck des Speichervermögens,
2. Durchlässigkeit beruhend auf der Durchgängigkeit (Konnektivität) sowie
3. Verformbarkeit auf der Basis der Elastizität des Gefüges.

Punkt drei ist in erster Linie vor dem Hintergrund der resultierenden Änderung von Speichervermögen und Durchlässigkeit zu sehen. Der kleinstmögliche Porenanteil tritt diesbezüglich bei Übereinstimmung mit der Fuller-Kurve auf. Allerdings sind in Böden die Werte für Porenraum und Durchlässigkeit weitestgehend unabhängig voneinander, weshalb eine Klassifikation der Poren als zweckmäßig angesehen wird [31, 203]:

- Primärporen: körnungsbedingte Poren zwischen den Einzelkörnern sowie
- Sekundärporen: gefügebeeinflussende Grobporen durch mechanische Vorgänge, bspw. Quellung und Schrumpfung, oder biologische; sie zeichnen sich durch stark ausgeprägte Kohärenz aus.

Die durchströmbare Porosität ist dabei stets kleiner als die Gesamtporosität und abhängig vom Verbindungsgrad der Poren untereinander. In Einzelkorngefügen nichtbindiger Erdstoffe (Kiese, Sande), die als Vergleich zu den losen Haufwerken der nachwachsenden Rohstoffe (NawaRo) herangezogen werden, ergibt sich durch die unterschiedliche Größe, Form und Lagerung der Körner eine hohe Variationsbreite der Korn- und Struktureigenschaften mit einer Vielzahl an möglichen Porenkanalgeometrien. Eine exakte bzw. praktisch nutzbare Beschreibung des Haufwerksaufbaus wird daher verhindert. Zur Abstraktion der Sachverhalte werden i.d.R. Kugelmodellkonzepte herangezogen und Erkenntnisse experimentell bestätigt. Bei heterodispersen Zufallsschüttungen gelingt die Modellbetrachtung nur unvollständig, weshalb sich die Charakterisierung auf Äquivalenzgrößen beschränkt - z.B. den hydraulisch wirksamen Porenkanaldurchmesser oder die spezifische Oberfläche, unter Vernachlässigung lokal variierender Packungsstrukturen - und statistische sowie wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen zu Hilfe genommen werden [31, 169, 183, 226].

Hinsichtlich der durchströmenden Fluide wird unter Bezugnahme auf die Grenzflächenspannung in benetzende und nichtbenetzende Phase unterschieden. Fluide, deren Moleküle und Atome bevorzugt auf der Feststoffoberfläche adsorbiert werden, gelten hierbei als benetzende Phase, die verdrängte als nichtbenetzende Phase. Verfahrenstechnisch zielt die perkolierte, batchbetriebene Feststoffvergärung auf die Überströmung von Packungselementen durch eine Flüssigphase in Form eines Films ab, während sich die Gasphase in freibleibenden Räumen im Gegenstrom bewegt. Somit bildet sich zunächst eine flüssige Benetzungsfront, gefolgt von einer Transportzone, in der Flüssigkeit transportiert

wird, wobei eine Sättigung des Porengefüges vorliegen kann, aber nicht muss. Voraussetzung für das Strömen ist Kohärenz, bewirkt durch den hydraulischen Gradienten des zusammenhängenden Fluids. Inkohärente oder residual verteilte Anteile sind hydraulisch immobil, die nur durch Übergang in eine andere Phase und anschließendem Transport mit oder in ihr verändert werden können. Dies ist vorliegend vor allem für die Gasphase bei gleichzeitiger Flüssigkeitssättigung von Belang, da sie als nichtbenetzende Phase definitionsgemäß keine Grenzfläche zur Feststoffmatrix aufweist und somit dann als insular verteilter Stoff vorliegt. Nimmt der Anteil der benetzenden Phase ab, werden immer die kleineren Porenräume okkupiert, wobei die Tortuosität steigt und der Verkopplungsgrad der Poren fällt. Größere Porenräume werden dann zunehmend von der nichtbenetzenden Phase gefüllt [31, 118, 169].

Vertiefende Kenntnisse zu Wechselwirkungen zwischen fester und flüssiger Phase in Böden können über Blume et al. [203] erworben werden. Zusammenhänge bei Fragestellungen geohydraulischer Natur lassen sich umfänglich Busch et al. [31] oder Kolditz et al. [117] entnehmen. Grundlagen zur Haufwerksströmung vor dem Hintergrund der verfahrenstechnischen Anwendung finden sich u.a. in Kraft [118] und Mersmann et al. [169].

Nichtbindige Böden (Sande, Kiese, Steine) unterscheiden sich von bindigen dadurch, dass zwischen ihren Einzelteilen keine gegenseitigen Anziehungskräfte herrschen. Unbelastet und trocken liegen sie lose aneinander und bilden ein Haufwerk mit verhältnismäßig groben Korndurchmessern. In den Berührungsflächen wirken lediglich Reibungskräfte. Bindige Böden, gekennzeichnet durch hohe Anteile an Ton und Schluff, bilden zusammenhängende formbare Massen mit wesentlich kleineren Einzelteilchen. Es wirken zusätzlich Kohasionskräfte, beruhend auf den Anziehungskräften der die Körner umgebenden hygroskopischen Wasserhüllen [200, 226]. Neben den mineralischen Böden existieren organische Böden (Humus, Torf und Faulschlamm), denen die zu untersuchenden Materialien am nächsten kommen. Sie stellen allerdings keinen tragfähigen Baugrund dar, weshalb die Beschreibung geotechnischer bzw. bodenmechanischer Untersuchungen, die im Normalfall bautechnische Zwecke verfolgen, literaturseitig unterrepräsentiert ist. So lassen sich bei Blume et al. [203] oder Kuntze et al. [128] zwar grundsätzliche Aussagen zu organischen Bestandteilen und deren Beurteilung bzw. Einfluss finden, angepasste oder gesonderte Methoden zur Bestimmung physikalischer Eigenschaften jedoch nicht. Aus diesem Grund wird die Verfahrensweise bei mineralischen Böden als maßgebend erachtet und stellt somit die Basis dar.

NawaRo, welche wie natürliche Böden als inhomogen einzustufen sind, werden bezogen auf die Eigenschaften in der Schnittmenge bindiger und nichtbindiger Bodenarten vermutet, da einerseits Kornstrukturen mit bloßem Auge wahrnehmbar sind, andererseits das Vorhandensein von Wasser Einfluss ausübt und in Teilen offensichtlich Aggregate vorliegen, z.B. bei Rinderfestmist. Adäquat zu Böden setzen sie sich aus fester Masse und Hohlräumen (Poren) zusammen.

Feste Masse sind in diesem Fall die Partikel, die in Abhängigkeit von Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit eine Struktur bilden [226].

Im Unterschied zu mineralischen Böden, die ein stabiles poröses System mit nahezu konstantem Substanzvolumen darstellen, besitzen organische Böden - ebenso wie Haufwerke aus organischem Material - geringere Gefügestabilität und hohe Elastizität. Neben dem primären Einzelkorngefüge neigen sie durch chemische und biologische Wechselwirkungen zu sekundärem Aufbau- oder Ballungsgefüge, das durch relativ locker verknüpfte Aggregate gekennzeichnet ist und auch als Krümelgefüge bezeichnet wird. Gleichzusetzen mit der Verminderung der inneren Oberflächen werden kleinste Teilchen zu größeren Elementen zusammengefasst. Darüber hinaus kommt über die Zeit, begründet im mikrobiellen Stoffabbau (Zersetzung), eine Veränderung der Haufwerksstruktur und damit der physikalischen Eigenschaften zum Tragen. Hier sind insbesondere die Auswirkungen auf Lagerungsdichte sowie Porenraumgliederung zu nennen. So nimmt in Moorböden das gesamte Porenvolumen mit steigendem Zersetzungsgrad - als Ausdruck des Gleichgewichts von Mineralisierung und Humifizierung - ab. Der Porenraum erfährt eine komplette Neugliederung zugunsten von Mittel- und Feinporen und zu ungunsten der für die Flüssigkeitsbewegung maßgebenden Grobporen. Begründet ist dies in der Intensität der Wasserbindung, welche insbesondere eine Funktion der Porengröße ist. Adhäsionskräfte übertreffen dann Kohäsionskräfte.

Je höher der Anteil feiner Bestandteile desto stärker ist zudem die Benetzung. Stark zersetzte Torfe bspw. besitzen aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche und der guten Sorptionseigenschaften schlechte Wasserleitfähigkeiten und zunehmend feste Wasserbindung. Sie können je nach Zersetzungsgrad und Lagerungsdichte bis zum Zwanzigfachen ihres eigenen Gewichts an Wasser binden. "Das Porenvolumen reicht daher nicht aus, bodenphysikalische Eigenschaften hinreichend zu deuten" [9, 128].

Die Wasserbindung kann zudem von Quellung, also einer Volumenvergrößerung vornehmlich in horizontaler Richtung, begleitet sein. Dabei findet zunächst eine Umorientierung der Teilchen statt. Werden kettenförmige Polymere mit einem Lösungsmittel, in diesem Fall Wasser, in Verbindung gebracht und können sich uneingeschränkt voneinander entfernen, bilden sie mit diesem eine homogene Lösung. Bei Material mit den Eigenschaften eines viskoelastischen Körpers wird das Lösemittel zunächst unter Volumenzunahme aufgenommen. Allerdings unterliegen die Polymerketten aufgrund ihrer Verknüpfung im dreidimensionalen Netzwerk einer Entfernungsbeschränkung. Bei weiterer Zugabe von Quellmittel über diesen Punkt hinaus geht es dann in eine zweite Phase über und kann am Fließvorgang teilnehmen. Dieser Unterschied wird in Abbildung 4-2 veranschaulicht [113].

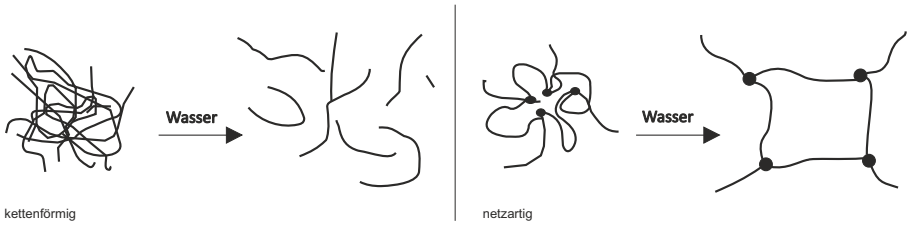

Abb. 4-2: Lösemittelaufnahme (Wasser) kettenförmiger Polymere und Netzwerke, nach [113]

Mit zunehmender Quellung im Boden sinkt dessen Durchlässigkeit. Quellungshindernisse stellen stabilisierende Eisenoxidkrusten oder -hüllen, grobe Bodenteilchen, die eine Verschiebung durch Reibung verhindern, sowie eine verminderte Wasseradsorption dar [128].

4.2 Charakterisierung disperser Systeme

In Abhängigkeit von der Korngröße, d.h. dem Durchmesser eines Teilchens, können disperse Systeme in grob ($d > 1\ \mu m$) bzw. kolloid ($1\ nm < d < 1\ \mu m$) und molekular ($d < 1\ nm$) unterteilt werden, wobei im Zusammenhang mit den zu untersuchenden Substraten lediglich grobdispers von Relevanz ist. Der disperse Feststoff wird dann als Haufwerk oder Schüttgut bezeichnet, welches polydispers über große Korngrößenbereiche verfügt. Monodispersität, in der alle Teilchen gleich groß und/oder gleich beschaffen sind, kommt in der Praxis nicht vor. Und selbst die Betrachtung der Idealvorstellung, bestehend aus einer kugelförmigen Mehrkornschüttung, also Haufwerke mit mehreren verschiedenen Partikeldurchmessern, stellt eine komplizierte Aufgabe dar, weshalb zur Beschreibung ihrer geometrischen Eigenschaften, wie erwähnt, auf statistische Methoden zurückgegriffen wird [160, 183, 217].

Physikalische Eigenschaften von Haufwerken werden dahingegen mehrheitlich durch den Dispersitätszustand, d.h. den Aufteilungs- oder Mischungszustand, ihrer Partikel geprägt. "Im Kollektiv äußert sich der disperse Zustand in der Schüttgutdichte, im Fließverhalten oder in der Durchströmbarkeit" [216].

Wenn die chemischen Eigenschaftsparameter als konstant angenommen werden, heißt Charakterisierung in diesem Zusammenhang, physikalische Eigenschaften, wie Größe, Form oder Porosität, zu beschreiben [216]. In Bezugnahme auf das Durchflussverhalten kann zudem in Eigenschaften, welche die Lagerung bestimmen, aber auch in solche die aus der Lagerung resultieren unterschieden werden.

Kraft [118] hat diesbezüglich für Bioabfälle und deren biologischen Abbau folgende Parameter als maßgebend benannt:

- räumliche und zeitliche Verteilung der Fluide,
- effektiver, am Fluidaustausch beteiligter Porenraum,
- benetzte Oberfläche und
- Verweilzeitverhalten.

Das Verhalten von Schüttgütern lässt sich somit nicht allein durch die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung beschreiben. Im vollständig fluidisierten Zustand verhält sich die Materialpackung wie eine Flüssigkeit, im kompaktierten Zustand wie ein Festkörper [216]. Im Bereich der Vergärung (also Bewegung und Lagerung der Schüttgüter) liegen in der Regel Zustände dazwischen vor: lose bis leicht verdichtet. Sowohl dieser Zustand als auch die Verteilung von Partikeln, Phasen und Poren ändern sich über die Verweilzeit im Fermenter, insbesondere durch die Beaufschlagung von Perkolat. Diese Änderung hängt u.a. von folgenden Faktoren ab:

- Mischungsverhältnisse von Frischsubstrat zu Impfmaterial,
- Wassergehalt,
- Hydrolysierbarkeit der Mischsubstrate,
- Qualität der Biozönose oder
- Hemmungserscheinungen.

Die Ergebnisse fallen für jeden Anaerobprozess individuell aus. Ist die initiale Phase überwunden und ein stabil verlaufender Abbau zu verzeichnen, ist dessen Vollständigkeit jedoch mehrheitlich eine Frage der Zeit. Als kritischer Moment wird demnach der Beginn, d.h. nach Einbau der Substrate, angesehen. Hier ist eine gute Durchströmbarkeit durch das Perkolat als essentiell zu betrachten, um die notwendige Flüssigphase bereitzustellen, intermediäre Produkte - die in höheren Konzentrationen hemmend wirken - abzutransportieren sowie Nährstoffe und Mikroorganismen zu verteilen. Aus diesem Grund findet im Rahmen dieser Arbeit bezüglich der Charakterisierung eine Fokussierung auf die Ausgangssubstrate statt. Liegen hier bereits Suboptima vor, ist nicht zu erwarten, dass sich das im Prozessverlauf ändert. Sind Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Durchströmung ableitbar, müssen diese perspektivisch über weitere Versuche um das Verweilzeitverhalten ergänzt werden.

Die Elemente einer Packung können durch verschiedene Merkmale charakterisiert werden, z.B. Größe, Form, Festigkeit, Struktur, Farbe, Porosität, Homogenität, wobei sie immer verteilt vorliegen. Die Anordnung dieser Elemente kann verschieden sein: als Primärpartikeln, Agglomerate, unregelmäßige Flockungsstrukturen oder geordnete Strukturen. Stehen Aussagen zum Durchflussverhalten im Vordergrund, müssen jeweils Material, Packung und Durchlässigkeit berücksichtigt werden, wobei sich die Eigenschaften der Komponenten verzahnen und in Korrespondenz zum Fluid stehen. Zentrale Größe ist das Volumen des Porenraums, der maßgeblich abhängig von den Eigenschaften der Materialien ist [118, 121, 216].

Hartge und Horn [99] formulieren dahingehend folgende Grundsätze:

- Form: Hohlräume nehmen mit Unregelmäßigkeit der Einzelkörner zu, begründet in den geringeren Abstützungsmöglichkeiten,
- Sortierung: Porenvolumina verkleinern sich bei gleicher Form mit zunehmender Variabilität der Teilchengröße,
- Teilchengröße: Porenvolumina steigen mit kleiner werdender Korngröße.

Allerdings lassen sich Stoffe mit abnehmender Partikelgröße auch besser agglomerieren. Bei der Ermittlung der dispersen Eigenschaften der Ausgangsprodukte, finden also insbesondere Größen- und Formverteilungen Berücksichtigung. Gemeinsam mit den erfassten Anteilen im Dreiphasensystem werden sie gemäß einer Eigenschaftsfunktion in Relation zu den Produkteigenschaften gesetzt. Vorliegend liegt der Blick auf der Durchströmbarkeit, hauptsächlich für die flüssige Phase. Deren Bestimmung erfolgt auf empirischer Basis [216]. Das Ergebnis bei Verwendung von Wasser ist der Durchlässigkeitsbeiwert k, welcher auch unter Wasserleitfähigkeit, hydraulische Leitfähigkeit oder Wasserdurchlässigkeit firmiert. Mit einem Wert stets kleiner eins erfasst er alle Einflüsse, die das Material auf die Bewegung des Wassers ausübt. Als Eigenschaft der Packung kann jedoch nicht von gleichmäßiger Verteilung ausgegangen werden, da veränderbare Strukturen vorliegen, bspw. durch den Strömungsdruck infolge Druckgefälle oder durch den Quellungszustand. Bei ausgeprägtem Sekundärporensystem ist zudem eine stärkere Variation als bei vorherrschenden Primärporen zu verzeichnen. In Summe bleibt festzuhalten, dass Wasserleitfähigkeiten nur unter Schwierigkeiten störungsfrei zu messen sind, weshalb zur Vorhersage verschiedene Ansätze erarbeitet wurden, die unabhängig von Fließvorgängen sind [31, 99].

Das wohl bekannteste Konzept wurde 1927 von Kozeny vorgestellt, welches Carman später modifizierte (1937 bzw. 1956). Die sogenannte Kozeny-Carman-Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit, Porenvolumen und Oberfläche der festen Bestandteile, die mit dem Fließmedium in Kontakt treten [99]. Auf Basis des Gesetzes von Hagen-Poiseuille entwickelt und mit der Annahme einer laminaren stationären Strömung eines homogenen Newton'schen Fluids durch Kapillarröhren, zeigt sie deutlich den Einfluss der Charakteristika sowohl des Fluids als auch der Feststoffmatrix. Durch Taylor [234] wurde eine Vereinfachung der Beziehung vorgenommen, die sich wie folgt darstellt:

$$k = D_s^{\,2} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \cdot C \qquad \textit{Gleichung 4-1}$$

darin sind:

k	Durchlässigkeitskoeffizient nach Darcy in [m/s], siehe Kapitel 4.3
D_s	wirksamer Korndurchmesser, auch d_w
γ	spezifisches Gewicht oder Wichte des Fluids
μ	dynamische Viskosität des Fluids, auch η
e	Porenzahl
C	Formfaktor

Eine kurze und prägnante Entstehungsgeschichte, inklusive der Unwägbarkeiten bei der Anwendung, lässt sich bei Chapuis und Aubertin [34] nachlesen.

Bereits bei Böden umstritten ist der Faktor C, der Anteile an Rauhigkeiten, Kornform bzw. Porenkanal und Tortuosität enthält. Er wird von Carman mit 1/5 angegeben und von Taylor nicht hinterfragt. Bereits Lambe und Whitmann [136] haben diesen Wert bei einem Vergleich von Sanden und Ton angezweifelt und den zusätzlichen Einfluss von Mikro- und Makrostrukturen demonstriert. Es kann davon ausgegangen werden, dass für NawaRo eigene Faktoren zu bestimmen sind [34, 204].

Eine weitere Herausforderung stellt die Ermittlung des wirksamen oder charakteristischen Korndurchmessers dar, da die Körner meist unregelmäßig geformt sind und von der Kugelform abweichen. Ein Durchmesserwert ist im Mittel zu berechnen, wenn drei senkrecht zueinander stehende Ebenen gemessen werden können. Meist wird jedoch eine andere Größe herangezogen, wie Volumen, Masse oder Oberfläche und dann ein Äquivalentdurchmesser bestimmt. Ziel ist es, das Haufwerk analytisch durch eines gleich großer Kugeln zu ersetzen. Praktische Bedeutung haben die folgenden Durchmesser erlangt [140, 160]:

- volumengleich, d_v: das Volumen eines Teilchens bildet eine Kugel und deren Durchmesser wird berechnet,
- oberflächengleich, d_o: die Oberfläche eines Teilchens bildet eine Kugel,
- projektionsflächengleich, d_p: die Projektionsfläche wird als Kreis angenommen,
- sedimentationsgeschwindigkeitsgleich, d_{St}: durch Messung der stationären Sinkgeschwindigkeit im laminaren Strömungsbereich und Umstellung der Stokesschen Geschwindigkeitsgleichung.

Die Umrechnung ineinander erfolgt z.B. durch den Kornformfaktor Sphärizität Ψ, die sich aus dem Quotienten der Oberfläche volumengleicher Kugeln und tatsächlicher Oberfläche ergibt. Für die Kugel ergibt sich der Wert eins, für abweichende Kornformen ist $\Psi < 1$. Ferner existiert noch der Heywoodfakor f, der sich aus der gemessenen spezifischen Oberfläche des Teilchens und der spezifischen Oberfläche einer Kugel mit Durchmesser d ergibt. Die Bestimmung von Kornformfaktoren wird grundsätzlich als problematisch eingestuft, weshalb ihre Berücksichtigung als unbefriedigend einzustufen ist. Teilweise wird diesbezüglich vorgeschlagen, sie mittelbar aus Durchströmungsversuchen abzuleiten [160]. Dessen ungeachtet hat sich zur Beschreibung der wirksamen Korngröße d_w das Verfahren nach Kozeny und Köhler bewährt, basierend auf Kornverteilungskurven bzw. Sieblinien [140]:

$$\frac{1}{d_w} = \frac{\sum \frac{1}{d_i} \cdot \Delta G_i}{\sum \Delta G_i} \qquad \textit{Gleichung 4-2}$$

mit:

i Index der Kornklasse in den frei wählbaren Grenzen d_o und d_u

ΔG_i Gewichtsanteil der jeweiligen Kornklasse i (in Gewichtsprozenten oder als Dezimalbruch)

$1/d_i$ harmonisches Mittel nach Köhler aus der oberen und unteren Grenze der jeweiligen Kornklasse i

Es wird also die gesamte Körnungslinie abgeschritten und der ermittelte d_w als repräsentativ für das betrachtete Material angesehen. Grundvoraussetzung sind Kornfraktionen gleicher Korn- oder Feststoffdichte [118].

Vertiefende Ausführungen zur Thematik sowie zu unterschiedlichen Ansätzen zur Ermittlung des wirksamen Korndurchmessers lassen sich bei Langguth finden [140]. Hartge und Horn [99] stellen generell fest, dass sich gute Vorhersagen der Wasserleitfähigkeit bisher nur erzielen ließen, wenn die Substrate in Einzelkornstrukturen vorlagen und nur wenig von der Kugelform abwichen. Dies deckt sich mit den Aussagen von Chapuis und Aubertin [34], die deshalb die spezifische Oberfläche vorziehen, obschon sie verhältnismäßig schwer zu messen bzw. abzuschätzen ist.

Die Betrachtung dieser spezifischen Oberfläche, wie sie bei Kozeny-Carman vorgesehen ist, wird nicht ins Auge gefasst. Kraft [118] hat diesbezüglich Überlegungen zu biologischen Abfallstoffen angestellt und kommt zu dem Schluß, dass die vorhandenen Methoden oder deren Adaption ungeeignet bzw. nicht zielführend sind. Er schlägt stattdessen eine adaptierte Zufallsmethode nach Chalkley et al. [32] vor, deren Funktionalität an Hand von heterogenen Kugelpackungen getestet wurde und an Kompostchargen einer Plausibilitätsprüfung unterlag. Da eine Validierung über Großzahlversuche an unterschiedlichen Materialpackungen noch aussteht, wurde jedoch von einer Anwendung Abstand genommen.

Aus den bisherigen Ausführungen lassen sich für die vorliegende Arbeit zunächst folgende Zielparameter hinsichtlich der Substratcharakterisierung ableiten:

- Korngrößenverteilung zur Bestimmung der Partikelgrößen sowie
- Korndichte zur Ableitung des Porenvolumens bzw. der Porenzahl

Lambe und Whitman [136] geben hinsichtlich des Einflusses auf die Permeabilität K [m²], die im Gegenzug zu k einen Flächenbezug aufweist, noch drei weitere entscheidende Merkmale der Feststoffe an - in ihrem Fall Boden:

- Zusammensetzung,
- Gefüge / Struktur und
- Sättigungsgrad.

Neben der Andeutung, dass ein linearer Zusammenhang von k gegen $e^3/(1 + e)$ besteht, stellen sie fest, dass Gleichung 4-1 lediglich die Partikelgröße und die Porenzahl berücksichtigt, während die genannten Faktoren indirekt behandelt oder ignoriert werden. Der Zusammensetzung wird mit Ausnahme organischer Beimengungen geringe Bedeutung beigemessen, begründet in der Ionenaus-

tauschkapazität (Quellung). Der Struktur hingegen, wird großer Einfluss zugesprochen, da Bodenproben, die flokkuliert vorliegen, höhere Durchlässigkeiten besitzen als jene, die maximal dispers verteilt sind (bei gleicher Porenzahl). Die Ursache ist für letztere in der höheren Tortuosität zu finden und der geringeren Anzahl größerer Flußbahnen. So weicht bspw. mit zunehmender Verdichtung auch die Partikelform immer weiter von der Kugelgestalt ab, wodurch Querschnitte unsteter werden und der Formwiderstand zunimmt, vergleichbar mit den Effekten der Partikelrauhigkeit. Letztlich lässt sich mit steigendem Sättigungsgrad eine höhere Durchströmbarkeit feststellen. Dabei überwiegt der Effekt denjenigen der Reduzierung der für den Fluß zur Verfügung stehenden Porenkanäle. Obschon sich dies grafisch darstellen lässt, gelingt es nicht, eine unmittelbare Beziehung zwischen Sättigungsgrad und Durchlässigkeit zu formulieren. Zur Begründung werden das hystere Verhalten der Entwässerung bzw. das zeitlich differierende durchflusswirksame Hohlraumvolumen sowie die überlappenden und stark prägenden Einflüsse der Struktur angeführt, die einer genauen Berechnung des Haftwasseranteils entgegen stehen [136, 183].

Um diesen Wechselwirkungen Rechnung zu Tragen werden die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit um folgende Parameter erweitert:

- Wassergehalt (auch als Bezugsgröße für den biologischen Abbau),
- Wasserkapazität, zunächst vor dem Hintergrund des Sättigungsgrades, aber auch zur Abschätzung der im Material gehaltenen Flüssigkeit und damit Austrag bei Ausbau,
- Schüttdichte und Verdichtungsverhalten.

Es gilt in erster Linie die grundsätzliche Verwendung anerkannter Methoden einzuordnen und die gewonnenen Ergebnisse zu bewerten. Ziel ist die Darstellung geeigneter Herangehensweisen im Umgang mit verschiedenen Eingangssubstraten auf der Basis nachwachsender Rohstoffe, das Aufzeigen von Möglichkeiten der Charakterisierung sowie die Ableitung sinnvoller Randbedingungen für Feststoffvergärungsprozesse. Im Mittelpunkt steht dabei eine stabile Prozessführung. Eine spätere Übertragung der Erkenntnisse auf den Bereich der Bioabfallvergärung wird nicht ausgeschlossen.

4.3 Mehrphasige Durchströmung poröser Medien

Wie bereits das Kapitel einführend festgehalten, sind unter Mehrphasigkeit im vorliegenden Kontext zwei fließende Phasen zu verstehen:

1. Flüssigkeit (benetzend): experimentell Wasser, praktisch Perkolat und
2. Gas (nichtbenetzend): experimentell Luft, praktisch Biogas.

Die Hohlräume der Haufwerksmatrix sind mit den jeweilig nicht mischbaren Fluiden belegt. Das zur Verfügung stehende Porenvolumen wird aufgeteilt, wodurch eine gegenseitige Beeinflussung auftritt. Durchströmung kommt nur bei durchlässigem Matrixmaterial und einem vorhandenen Druckgradienten zustande, d.h. die Poren müssen über eine gewisse Konnektivität verfügen. Im Gegensatz zu Kolonnen können in porösen Medien gegenläufige Strömungsrichtungen mit

stationärem Fluß nicht realisiert werden. Entweder findet der Fluß in die gleiche Richtung statt oder eines der Fluide verharrt immobil. Eine Begründung dieses Unterschieds liefert die Größe der Poren, welche in typischen Kolonnen meist um ein Vielfaches größer sind. Damit spielen Einflüsse aus der Kapillarität keine große Rolle. Sie sind also irrelevant. Weiterhin kann dem Durchfluss turbulentes Verhalten unterstellt werden, wohingegen in porösen Medien viskose Strömungsbilder dominieren [63, 118].

Unter Beachtung der Phasenverteilung ergeben sich mehrere Möglichkeiten der Haufwerksdurchdringung, die in Abbildung 4-3 grafisch dargestellt sind. So kann jedes Fluid eigene Porenkanäle nutzen, wodurch sich zwei differente kontinuierliche Teilsysteme ausbilden. Auch die gemeinsame Nutzung des gleichen Porenraums ist möglich, wobei entweder beide Fluide kontinuierlich oder eines kontinuierlich und das andere diskontinuierlich bzw. dispers vorliegen. Gegenläufigkeiten sind nur über Verdrängung realisierbar [63].

Dies impliziert, dass zur genaueren Beurteilung des Impulstransports (Viskosität) die Phasenverteilung zu charakterisieren ist. Dies geschieht unter Zuhilfenahme der Sättigung der jeweiligen Phase. Abbildung 4-4 zeigt diesbezüglich eine schematische Darstellung zur Verteilung eines Zweiphasensystems in einem Haufwerk, bestehend aus Wasser als benetzende und Luft als nichtbenetzende Phase [183].

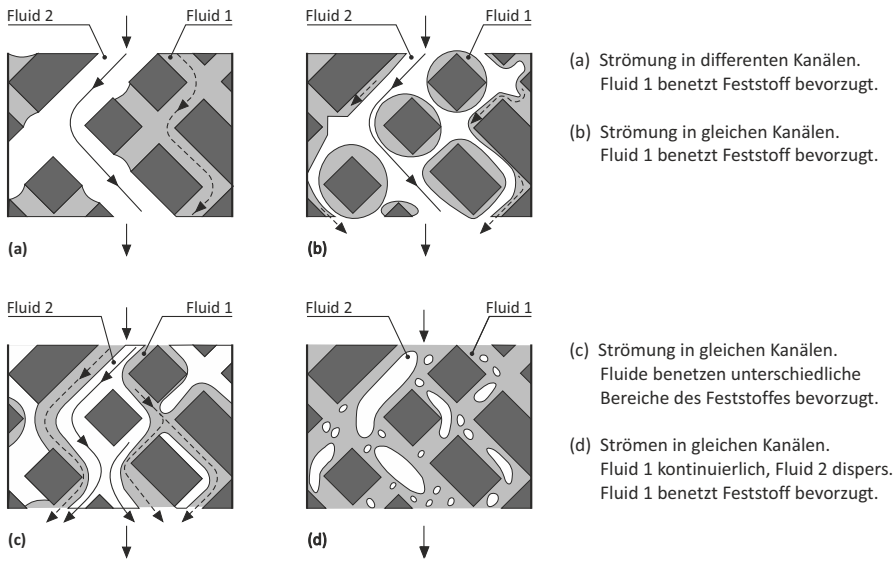

Abb. 4-3: Zweidimensionale Darstellung eines dreidimensionalen Zweiphasenflusses im porösen Medium, nach [63]

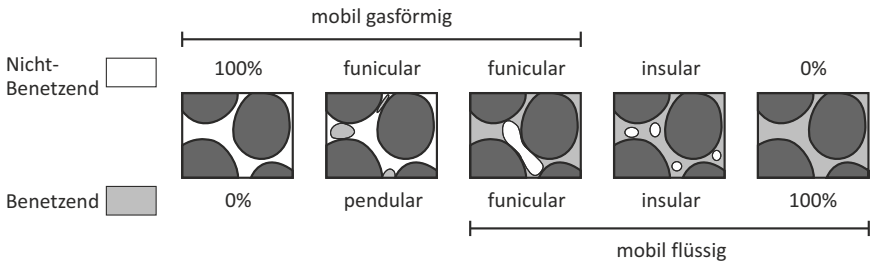

Abb. 4-4: Möglichkeiten der Phasenverteilung im Haufwerk, nach [183]

Effektive Durchstömungswiderstände jeder Phase i ergeben sich dann aus der intrinsischen oder spezifischen Permeabilität K der einphasig durchströmten Feststoffmatrix sowie der relativen Permeabilität $K_{rel,i}$, welche für gas- und flüssigkeitsgefüllte Porenanteile unterschiedlich sind und im Wesentlichen von der örtlichen Sättigung abhängen. Bei dieser ist zusätzlich noch von Belang, ob es sich um einen Be- oder Entfeuchtungsvorgang handelt. Ferner bestehen Beziehungen zu den kapillaren Eigenschaften des Materials, dem Verhältnis der Volumenströme sowie den Benetzungseigenschaften, also Oberflächenspannung und Randwinkel zwischen Matrix und Fluid. Abbildung 4-5 gibt dazu exemplarisch den Verlauf der relativen Permeabilitäten einer Luft-Wasser-Strömung in Abhängigkeit der Phasenverteilung wieder [1, 103, 160, 183, 215, 260].

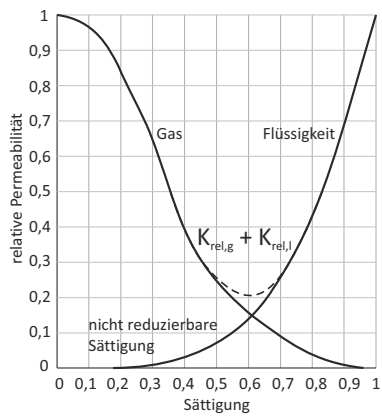

Abb. 4-5: Relative Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Sättigung, nach [160, 261]

Bei niedrigem Volumenanteil des Wassers steigt $K_{rel,l}$ nur langsam an. Im Gegensatz dazu, ist eine starke Zunahme bei fast vollständiger Sättigung zu verzeichnen. Zur Begründung werden die kapillaren Eigenschaften herangezogen, da sich das Wasser bevorzugt in kleinen Poren ohne Strömung festsetzt. Die Wahrscheinlichkeit zusammenhängender Flüssigkeitsbrücken ist gering, wodurch der hydraulische Kontakt verloren geht. Erst bei höheren Sättigungen treten die konkurrierenden Wechselwirkungen in größeren Poren auf. Nach Überschreiten der

immobilen Sättigung findet eine signifikante Einflussnahme statt. Das Verhalten der nichtbenetzenden Phase ist entsprechend. Allerdings prägt bereits ein geringer Gasvolumenanteil das Durchströmungsverhalten der Flüssigphase stark. Summarisch liegen die Permeabilitäten stets unterhalb der Durchlässigkeit einphasiger Strömungen [160, 183]. Bezüglich vertiefender Ausführungen zum Thema wird auf Neumann [183] und besonders auf Wyckoff und Botset [260] verwiesen, welche die Grundlagen erarbeitet haben.

Auf der vorgestellten Basis ist es möglich, ein System gekoppelter Differentialgleichungen aufzustellen und über numerische Näherungslösungen zu Ergebnissen zu kommen. Für praktische Auslegungen sind diese Rechnungen jedoch zu kompliziert und die Allgemeingültigkeit bisher noch nicht nachgewiesen [160, 215]. Darin begründet wird für die Betrachtungen zum Durchfluss auf die Ansätze der einphasigen Strömung zurückgegriffen, wohlwissend dass in der Praxis nicht nur durch die Phasenwechselwirkungen sondern auch durch höhere Viskositäten, Suffosion und Gegenläufigkeiten geringere Durchlässigkeiten vorliegen. Hinsichtlich der Materialcharakterisierung bzw. des Durchströmungsverhaltens birgt dies den Vorteil, etablierte empirische Methoden der k-Wert-Bestimmung nutzen zu können.

Im Falle der einphasigen Durchströmung einer Schüttung durch eine Flüssigkeit, gilt unter bestimmten Voraussetzungen die Darcy-Gleichung, gleichermaßen für gesättigte und ungesättigte Verhältnisse. Auf Basis experimenteller Untersuchungen beobachtete Darcy bei der Durchströmung vertikaler homogener Sandschüttungen einen linearen Zusammenhang von Druckgradient und querschnittsbezogener Anströmgeschwindigkeit. In dieser speziellen Lösung der Navier-Stokes-Gleichung (Impulserhaltungssatz) lässt sich unter der Berücksichtigung der dynamischen Viskosität die Permeabilität K als Proportionalitätsfaktor definieren, die einen vom durchströmenden Medium unabhängigen Kennwert darstellt [183]. Dadurch kann die Beziehung auch wie folgt ausgedrückt werden [1, 31, 99, 118, 140, 183]:

$$v = \frac{Q}{A} = k \cdot i = K \cdot \frac{\gamma}{\eta} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} = K \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} \qquad \text{Gleichung 4-3}$$

hierin bedeuten:

v	Filtergeschwindigkeit bzw. spezifischer Durchfluss [m/s]
Q	Volumenstrom bzw. Durchflussrate [m^3/s]
A	durchströmte Fläche [m^2]
k	Durchlässigkeitskoeffizient [m/s]
i	hydraulischer Gradient, Quotient $\Delta h/\Delta l$ mit Δh als Druckgefälle von Ein- und Austrittsstelle sowie Δl als durchströmte Wegstrecke [-]
K	spezifische Permeabilität [m^2], $K = k \cdot \eta/\gamma = k \cdot \eta/(\rho \cdot g)$
γ	spezifisches Gewicht oder Wichte [$kg/m^2 \cdot s^2$], $\gamma = \rho \cdot g$
η	dynamische Viskosität der Flüssigkeit [$kg/m \cdot s$]
Δp	Druckdifferenz zwischen An- und Abströmseite [$kg/m \cdot s^2$]

Mit dem Ansatz

$$K = C \cdot d_w^{\,2} \qquad \textit{Gleichung 4-4}$$

in dem C eine dimensionslose Materialkonstante verkörpert, lässt sich Gleichung 4-4 in den bereits aufgeführten Ansatz nach Kozeny-Carman bzw. Taylor überführen (Gleichung 4-1). Eine mathematisch exakte Ableitung des Gesetzes von Darcy findet sich in Busch et al. [31].

Der Gültigkeitsbereich ist auf wirbelfreie oder laminare Strömung begrenzt. Es kann unterstellt werden, dass sich das Einzelteilchen auf tortuosen Bahnen zwischen den Partikeln bewegt und durch die Änderung der Durchflussquerschnitte Verwirbelungen unterliegt. Im Mittel gleichen sich diese turbulenten Einzelbewegungen bei entsprechend großer Volumeneinheit (REV) aus, so dass das praktische Fließen in zahllosen Porenkanälen laminar ist. Das Gesetz beschreibt ergo den Fließzustand im makroskopischen Bereich, wobei der Parameter k bzw. K den statistischen Mittelwert der Durchlässigkeit im REV kennzeichnet [31, 140].

Vor dem Hintergrund des Flüssigkeitstransports, der im Haufwerksfermenter die Aufgabe von Versorgung und -verteilung übernimmt, sollte für den optimalen Zustand eine doppelt funiculare Verteilung angestrebt werden, da beide Phasen mobil sein müssen. Solange mikrobieller Stoffumsatz vorliegt, der eng an die Flüssigphase gekoppelt ist, kann Gasproduktion und damit eine permanent nachgelieferte Gasphase unterstellt werden. Entstehendes Biogas wird dann gegenläufig durch Verdrängung abtransportiert. Während der Perkolation liegt entsprechend Abbildung 4-3 Variante d) vor. Im Falle der Entwässerung wechselt das System dann ggf. unter Umkehrung der Strömungsrichtung zu Variante b). Wasser wird dabei im Porenraum durch Kapillar-, Adsorptions-, Schwer-, Van der Waals- sowie Coulomb'sche Kräfte gehalten. Dieser nichtreduzierbare Anteil an Wasser wird auch Feldkapazität genannt, aus der die Residualsättigung hervorgeht [203].

Hinsichtlich des gelösten Stofftransports im porösen Medium sind zwei Hauptmechanismen von Belang [18, 103, 117, 254]:

1. Advektion oder auch Konvektion als passiver Transport des gelösten Stoffes mit der transportierenden Flüssigkeit sowie
2. Hydrodynamische Dispersion als Transporteffekt innerhalb der Poren durch korngerüstbedingte Geschwindigkeitsvariationen.

Die Größe des advektiven Flusses kann über die Betrachtung der Filtergeschwindigkeit und der Konzentration bestimmt werden. Die hydrodynamische Dispersion, als Zusammenfassung der nicht trennbaren dispertiven und diffusiven Stoffflüsse, zeichnet für die räumliche Verteilung der gelösten Stoffe verantwortlich. Sie lässt sich nach Scheidegger [204] über das erste Ficksche Gesetz unter Einführung des Diffusions- bzw. Dispersionskoeffizienten beschreiben. Da letzterer um Größenordnungen größer ist, kann bei Abstandsgeschwindigkeiten $v_a > 0{,}1$ m/d, die sich als Quotient der Filtergeschwindigkeit und des durchfluss-

wirksamen Porenraumanteils darstellt, die molekulare Diffusion vernachlässigt werden. Dieser Konzentrationsgradientenausgleich, verursacht durch brownsche Bewegungen mit oder ohne Fließen, spielt somit nur bei nicht perkolierten Anaerobverfahren eine tragende Rolle. Das Hauptaugenmerk im vorliegenden Kontext liegt allerdings auf der Advektion, die konzentrationsabhängig mit dem Durchlässigkeitsbeiwert korrespondiert [38, 169, 225].

Neben den Untersuchungen zur k-Wert-Bestimmung im Rahmen der physikalischen Charakterisierung lassen sich auf Basis der Ausführungen auch für die Vergärungsversuche zwei unterschiedliche Herangehensweisen ableiten. Zum einen interessiert das nicht perkolierte Haufwerk, bei dem der komplette Porenraum mit Ausnahme des Haftwassers zur Ausgasung bereitsteht. Zum anderen ist vor praktischem Hintergrund der perkolierte Prozess hinsichtlich der Biogasentwicklung zu untersuchen.

5 Material und Methoden

Die experimentelle Versuchspalette teilt sich zur Beantwortung der Fragen wie folgt auf:

- Physikalische Charakterisierung mit Hilfe von bodenphysikalischen Kenngrößen sowie
- Untersuchungen zur dichteabhängigen Biogasentwicklung im Festbett.

Grundlage der Datengenerierung bilden die durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) geförderten Projekte "Einfluss physikalischer Feststoffparameter auf die Trockenvergärung von nachwachsenden Rohstoffen" [120] sowie "Strategien zur optimalen Einfahrphase batchbetriebener Feststoffvergärungsprozesse" [122]. Zudem wird auf die Versuchsergebnisse der Diplomarbeiten von Bothe [24], Rocktäschel [195], Vedder [244] und Viehmann [246] zurückgegriffen.

5.1 Substrate

Da die Untersuchungen zu einer Zeit stattfanden, indem NawaRo Forschungsgegenstand waren, lag hier auch der Fokus der Substratauswahl. Neben den im anaeroben Bereich klassisch vertretenen Silagen wurde das Spektrum um eine alternative Auswahl erweitert. Im Vordergrund standen dabei die generelle Verfügbarkeit, z.B. Abprodukte von Herstellungsprozessen, die Möglichkeit zur Betriebssicherung durch Ausgleich bei Substratmangel sowie geringere Marktpreisschwankungen. Einen Überblick, in welchen Versuchsreihen welche Substrate zur Anwendung kamen, gibt Tabelle 5-1, die z.T. auch folgend erläutert werden.

Apfeltrester fallen als Rückstand aus dem Entsaftungsprozess an. Ein Teil kommt derzeit als Viehfutter, zur Pektinherstellung sowie als Grundstoff der Alkoholproduktion zum Einsatz. Eine genaue Angabe zur nutzbaren Menge in Biogasanlagen lässt sich nicht ableiten. Die in der Literatur zu findenden knapp 350.000 t jährlich beruhen auf der Annahme einer maximal 50 %igen Verfügbarkeit aller Obsttrester [238]. Trester besitzen in frischer Form nur eine begrenzte Haltbarkeit und werden deshalb in der Regel siliert. Dies ist durch einfaches Einstampfen sowie luftdichtes Abschließen ohne Siliermittel möglich [184]. Im vorliegenden Fall wurde das Material von einem privaten Obsthof bezogen und in frisch eingesetzt.

Rübenschnitzel sind im Normalfall Nebenerzeugnisse der Kristallzuckererzeugung, die mit Melasse nach der Trennung des gelösten Zuckers von den übrigen Pflanzenbestandteilen verbleiben und als Futtermittel Verwendung finden. Es wird angenommen, dass lediglich ein Prozent (16.700 t) für die Feststoffvergärung Berücksichtigung finden können. Neben den geringen Mengen, ist zudem der saisonale Anfall (September - Dezember) zu beachten [238]. Demgegenüber hat in den letzten Jahren der Direkteinsatz der Zuckerrübe als Biogassubstrat an Bedeutung gewonnen. Grund ist die stoffliche Zusammensetzung, die einen

schnellen anaeroben Umsatz begünstigt, sowie der hohe Trockenmasseertrag. Die Rüben können ab Anfang September kontinuierlich geerntet und zugefüttert werden. Eine Lagerung ist erst mit abnehmenden Temperaturen sinnvoll (Ende Oktober), wobei Lagerungsverluste individuell gegen Silierverluste abzuwägen sind. Die Zwischenlagerung zerkleinerter Rüben ist aufgrund der biologischen Aktivität nicht möglich. Bei Verwendung ganzer Rüben muss demnach direkt vor dem Einbringen aufbereitet werden, z.B. über Rübenschnitzler in der Radladerschaufel oder Gehölzschredder. Hinsichtlich des Vergärungsprozesses selbst hat die Größe der Rübenteile keine ausschlaggebende Bedeutung [40].

Tab. 5-1: Substratüberblick

Substrat	Bezug	Untersuchung	
		P	D
Apfeltrester	Mosterei Obsthof Schönemeyer, Eschenhörn	x	x
Anwelk-/Grassilage	Thüringer Lehr-, Prüf- und Versuchsgut GmbH, Buttelstedt	x	
Grasschnitt	Milchviehanlage Schildt GbR, Groß Nieköhr	x	x
Maissilage	Milchviehanlage Schildt GbR, Groß Nieköhr Agra-Milch e.G., Frohndorf Thüringer Lehr-, Prüf- und Versuchsgut GmbH, Buttelstedt	x x x	x x
Rinderfestmist	Milchviehanlage Schildt GbR, Groß Nieköhr Thüringer Lehr-, Prüf- und Versuchsgut GmbH, Buttelstedt	x x	x x
Rübenschnitzel	Kleinbauer (privat), Süßenborn	x	x
Stroh	Milchviehanlage Schildt GbR, Groß Nieköhr Thüringer Lehr-, Prüf- und Versuchsgut GmbH, Buttelstedt Agrargenossenschaft Bucha eG	x x x	x
Topinambur	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Dornburg	x	x
Triticale	Einzelbauer (Landwirt), Kritzkow Thüringer Landeswirtschaftsamt Hildburghausen, Versuchstation	x	x x

P ... Physikalische Charakterisierung

D ... Dichteuntersuchungen, Einfluss Einbaudichte auf die Gasentwicklung

Rinderfestmist (RFM) wird in der Literatur, z.B. in [12, 132, 227], häufig als Grundsubstrat der landwirtschaftlichen Feststoffvergärung, zumindest aber als stabilisierendes Kosubstrat mit beachtlichem Puffervermögen angegeben. Zugleich wird Rindermist als funktionierendes, "reproduzierbares" Impfmaterial gehandelt, welches durchaus in der Anfahrphase einer Biogasanlage zweckdienlich ist. Als Festmiste sind gemäß Definition stapelfähige Gemenge aus tierischen Exkrementen, Einstreu und Futterresten zu bezeichnen. Im Regelfall werden sie auf einer befestigten Dungplatte in Stallungsnähe gelagert. Entsprechend des Verhältnisses zwischen Einstreu und Exkrement (Kot, Harn) geht ein gewisser Anteil der Flüssigphase (Harn, Trink- und Reinigungswasser, Niederschlagswasser) in Jauche über. Die Zusammensetzung unterliegt hohen Schwankungsbreiten und ist von Haltungssystem, Art und Menge der Einstreuungen sowie Lagerungsbedingungen abhängig. Charakteristisch sind ein geringer Stärkegehalt, da leicht Verdauliches bereits im Rinderpansen umgesetzt wurde. In Deutschland werden ca. 25 % der Rinder in eingestreuten Stallsystemen gehalten [95, 218].

Stroh als anfallender Rückstand von Körner liefernden Kulturen wird gegenwärtig nur zu einem geringem Umfang energetisch genutzt, zum Einen in Strohkesseln und zum Anderen in Heiz- und Kraftwerken. Den größten Strohanteil liefern Getreide, Ölsaaten, Leguminosen und Mais. In der betrieblichen Praxis verbleibt ein Großteil zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit auf dem Feld. Zusätzlich wird ein Teil in der Tierproduktion als Einstreu und/oder Futter benötigt, gelangt allerdings anschließend in Form von Festmist oder Gärrest wieder auf die Anbaufläche (s.o.). In beiden Fällen werden Nährkreisläufe geschlossen, der Humusgehalt verbessert und der Strukturarmut des Bodens entgegen gewirkt. Regionalspezifisch werden so bereits potentiell verfügbare Strohmengen vollständig genutzt. Die Betrachtung von Weizenstroh zielt ergo nicht darauf ab, eine konkurrierende Nutzungsschiene aufzubauen, sondern inwiefern sich energetisch nutzbare Mengen als gut lagerfähiges Material für Vergärungsprozesse erschließen lassen. Hierfür werden jährlich ein bis drei Millionen Tonnen angegeben, die in den letzten Jahren kaum Schwankungen unterlagen [238, 110, 246].

Auf Anraten der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) wurde Topinambur, ein Korbblütengewächs, als geeignete Energiepflanze in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, da er fruchtfolgetechnisch eine Alternative zu Mais und Getreide darstellt. Durch vorrangig hohen Biomasseertrag mit hohem Rohfett- und Rohprotein- bzw. geringem Rohfaseranteil eignen sich bei dieser Pflanzenart sowohl Knolle als auch Kraut zur Fermentation. Die Knolle kann allerdings ebenso als Nahrungsmittel sowie als Einsatzstoff bei der Destillatproduktion fungieren. Darüber hinaus ergeben sich durch geringe TS-Gehalte sowie Schmutzanhaftungen Schwierigkeiten bei der Silierung und der Biogasherstellung, weshalb lediglich das Kraut beerntet und mit einem Maishäcksler zerkleinert wurde [82, 245].

Triticale, ein Hybrid aus weiblichem Weizen und männlichem Roggen, vereint hohe Erträge und Kornqualität mit Anspruchslosigkeit und Robustheit. Er wird vorwiegend als Futtergetreide genutzt. Vorliegend vertritt Triticale Ganzpflanzengetreide (Ernte zwischen Beginn der Kornfüllung und Teigreife). Die Substratbereitstellungskosten sind vergleichsweise gering und liegen unwesentlich über denen von Silomais, allerdings bei geringerer Flächenproduktivität. Triticale wird in Thüringen großes Entwicklungspotential zugesprochen [62, 82]. Eingeholt wurde das Wintergetreide mit einem Futterernter und unterlag anschließend einer Aufbereitung mit praxisüblichem Gerät (Feldhäcksler mit einer Schnittlänge von 30 mm).

5.2 Charakterisierung

Die Materialcharakterisierung basiert auf unterschiedlichen, zumeist genormten Methoden, entlehnt den standardisierten bodenmechanischen Versuchen zur Klassifizierung und zur Bestimmung der Zustandsform sowie von Durchlässigkeit und Wasseraufnahme. Es werden im Sinne einer Ansprache physikalische Kennwerte erhoben, die im Hinblick auf das Durchströmungsverhalten Materialeigenschaften und deren Verzahnung in der Haufwerkspackung beschreiben. Tabelle 5-2 gibt dazu einen Überblick der zugrunde gelegten Standards, auf die im Nachhinein näher eingegangen wird, insbesondere wenn Adaptionen stattfanden.

Tab. 5-2: Übersicht der zugrundeliegenden bodenphysikalischen Standards

Parameter	Norm	Bemerkung
Wassergehalt	DIN 18121-1 *	zwei Temperaturniveaus
organische Trockensubstanz	DIN 18128	-
Schüttdichte	BGK Methodenbuch	-
Verdichtungsfähigkeit	DIN EN 13286-2, DIN 18127	teilweise adaptiert
Wasserkapazität	Methode Kraft / Schittkowski [118]	nicht genormt, adaptiert
Korndichte	DIN 18124	ergänzt
Korngrößenverteilung	DIN 18123, DIN 66165-1	Trockensiebung, Nasssiebung
Durchlässigkeitsbeiwert	DIN 18130-1	
* ... im März 2015 durch DIN EN ISO 17892-1 ersetzt		

5.2.1 Wassergehalt und Trockensubstanz

Die Bestimmung des Wassergehaltes vollzog sich nach den Vorgaben der DIN 18121-1 [47]. Gemäß Anmerkung 1 tritt "bei Bodenproben, die organische Bestandteile enthalten, bei 105 °C durch Oxidation und andere chemische Reaktionen eine geringfügige Verfälschung des Wassergehaltes auf." Übertragen auf die untersuchten Substanzen, die fast ausschließlich aus organischem Material bestehen, bedurfte es der Abschätzung der Fehlergröße, weshalb es zur Unterscheidung zweier Temperaturniveaus kam, genauer 55 °C und 105 °C. Das Trocknen bei 105 °C im Trockenschrank steht im Einklang mit der Bestimmung des Trockenrückstandes von Schlämmen nach DIN 38414-2 respektive DIN EN 12880 [49]. Die Proben wurden bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und der Wassergehalt über den Gewichtsverlust bestimmt. Dieser Prozess nahm großteils eine Dauer von 48 h in Anspruch.

Die organische Trockensubstanz wurde gemäß DIN 18128 [50] als Glühverlust bei 550 °C bis zur Massekonstanz (> 2 h) ermittelt und als Massenanteil in % der Trockenmasse bzw. Trockensubstanz angegeben. Die vorangegangene Zerkleinerung der getrockneten Substrate erfolgte je nach Struktur durch eine Kugelmühle oder mittels Mörsermühle bzw. Mörser. Die Messgenauigkeit betrug 1 mg, die Abkühlung des Glührückstandes erfolgte im Exsikkator.

5.2.2 Schüttdichte und Verdichtungsfähigkeit

Die Schüttdichte (bulk density) ρ_b entspricht dem Quotienten der unverdichteten Masse m eines Gemenges pro definiertem Volumen V. Das dabei vom Schüttgut eingenommene Volumen schließt Zwischenräume, Hohlräume und Haufwerksporen ein. Da sich die entsprechenden Normen DIN EN 1097-3 [46] auf Gesteinskörnungen bzw. DIN EN 13041 [58] auf Kultursubstrat im trockenen Zustand beziehen, musste das Verfahren gemäß Methodenbuch der BGK [28] adaptiert werden.

Das Mindestvolumen des Messgefäßes beträgt 10 l bei einer oberen Korngröße von 31,5 mm. Zunächst wurde das Messgefäß eingewogen. Anschließend erfolgt ein viermaliges Aufstoßen zum Lösen der Biomasse an den Wandungen sowie zur Vergleichmäßigung. Es fand eine Oberflächenbegradigung ohne Druckbeanspruchung zum definierten Ablesen der Höhe statt. Nach Rückwaage des Gesamtaufbaus ist die Schüttdichte ermittelbar. Die Messung wurde viermalig wiederholt. Darüber hinaus erfolgten überprüfende Messungen mittels Proctortopf (d_1 = 150 mm) mit Aufsatzring. Dieser wurde zur Vergleichmäßigung der Probe mit einem Abstreichlineal abgenommen. Der Proctortopf nebst Material wurde anschließend zur Bestimmung des k_f-Wertes genutzt.

Eine Verdichtung wird bodenphysikalisch durch die bleibende Verminderung des Porenanteils bzw. die bleibende Erhöhung der Trockendichte beschrieben, wobei die volle Sättigung kaum erreicht wird und die Trockendichte unterhalb der Sättigungslinie liegt. Sie hängt vom Wassergehalt sowie von der Verdichtungsarbeit und der Verdichtungsart ab [197].

Die Betrachtungen zur Verdichtungsfähigkeit fanden zweiteilig statt und orientieren sich im vorliegenden Fall an DIN EN 13286-2 [51] sowie DIN 18127 [45], den Proctorversuchen. Während erstere auf einen Anhaltswert zwischen gegebenem Wassergehalt und erreichbarer Trockendichte abstellt, zielt der Proctorversuch nach DIN 18127 auf die Ermittlung der maximalen Trockendichte als Funktion des Wassergehaltes w ab. Über die vorgegebene Verdichtungsenergie W wird eine Verringerung des Porenraums hervorgerufen, wodurch Abschätzungen zu in der Praxis erreichbaren Dichten möglich sind. Im Ergebnis liegen eine höhere Lagerungsdichte und eine verminderte Wasserdurchlässigkeit vor. Bindige, wassergesättigte Böden sind ebenso wie ausgetrocknete Materialien schwer verdichtbar. Entsprechend den Anforderungen wurde ein Proctortopf mit Innendurchmesser d_1 von 150 mm sowie ein Fallgewicht der Form B gewählt.

Im ersten Teil wurde in einer Schicht eingebaut und verdichtet (W differiert):

$$W = \frac{G \cdot h \cdot n \cdot g}{V_{Pr}} \qquad \textit{Gleichung 5-1}$$

mit:

G	Fallgewicht [kg] (4,5 kg für Fallgewicht Form B)
h	Fallhöhe [m] (0,45 m)
n	Anzahl der Schläge über alle Schichten
g	Erdbeschleunigung [m/s²] (9,81 m/s²)
V_{Pr}	Volumen des Proctortopfes [m³] (0,00221 m³ für den gewählten Proctortopf)

Auf die geforderte Anzahl von mindestens 46 Schlägen wurde verzichtet, da sich abzeichnete, dass sich die Maximalverdichtungen bereits bei weitaus weniger einstellen. Kriterium war die Konstanz der Dichte über fünf Schläge. Im zweiten Teil erfolgte ein dreischichtiger Einbau, jeweils gleichmäßig mit 22 Schlägen verdichtet (W = 0,6 Nm/m³).

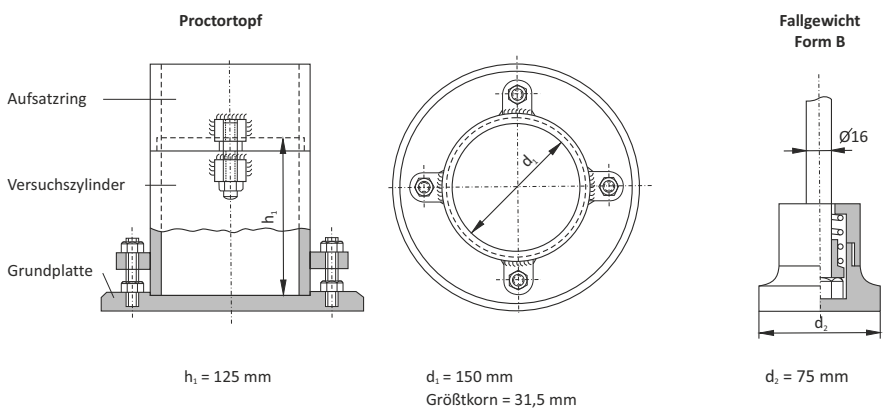

Abb. 5-1: Versuchszylinder und Fallgewicht [45]

Die ermittelten Proctordichten nach DIN 18127 [45] werden in Abhängigkeit von w grafisch dargestellt, beispielhaft in Abbildung 5-2 gezeigt. Nach allgemeinen Erfahrungsgrundsätzen ergeben sich bei bindigen Böden deutlich gewölbte Proctorkurven, wohingegen nichtbindige und insbesondere gleichkörnige Böden flache Kurven liefern, da der Wassergehalt einen geringeren Einfluss hat. Die ebenfalls dargestellte Sättigungskurve veranschaulicht ein vollständig wassergefülltes Porenvolumen, welches keine Luft mehr enthält. Da dies bei Böden durch Verdichtung kaum zu erreichen ist, bleibt die Trockendichte meist darunter [221].

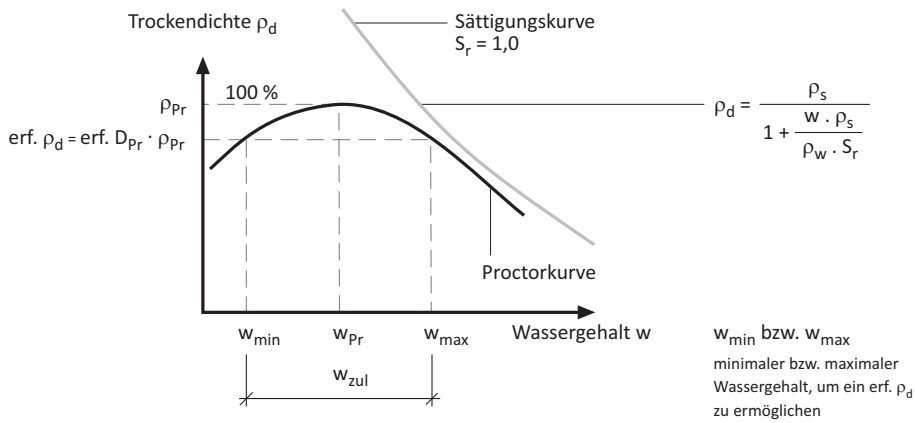

Abb. 5-2: Typische Proctorkurve eines Bodens, nach [197]

Der Vergleichbarkeit halber und auch in der Tatsache begründet, dass literaturseitig keine Anhaltswerte zum optimalen Wassergehalt w_{Pr} von organischem Material existieren, kamen die Substrate zunächst im Originalzustand zum Einsatz. Darüber hinaus wurde bei 105 °C vorgetrocknetes Material beprobt, um den Vorgaben der DIN gerecht zu werden. Es wurde anschließend ein Anfangswassergehalt eingestellt und über sukzessive Wasserzugabe, die substratspezifisch variierend von 2 bis 15 % ausfiel, eine Proctorkurve entwickelt. Basierend auf den Beobachtungen der Wassergehaltsbestimmung, die über differente Werte der beiden Temperaturniveaus strukturelle Änderungen suggeriert, wurde vermutet und auch bestätigt, dass die Ursprungswassergehalte nicht wieder herzustellen sind.

5.2.3 Wasserkapazität

Etablierte Bestimmungsmethoden der Bodenmechanik sind nach Kraft [118] als unzureichend anzusehen, begründet entweder durch den Geltungsbereich für lose, körnige Schüttungen geringer Korngrößen oder durch Verwendung kleiner Untersuchungsbehältnisse.

Die alternativ entwickelte und getestete Methode folgt nachstehender Durchführung [206]:

- Material bei 105 °C trocknen, anschließend gewünschten Wassergehalt einstellen,
- Material in drei Lagen von 100 mm Mächtigkeit in 2 PVC-Zylinder DN 200, unten mit Vlies und Lochplatte abschließend, einbauen, ggf. verdichtet,
- Gesamtaufbau auf ± 1 g einwiegen,
- Gesamtaufbau über 24 h in Wasserbehälter stellen und mit Verdunstungsschutz versehen, hydraulisches Gefälle 15 mm,
- Gesamtaufbau über 24 h abtropfen lassen und erneut einwiegen,
- Differenz gibt die zusätzlich aufgenommene Menge an Wasser an, neuer Wassergehalt entspricht der Wasserkapazität in Gew.-% FS.

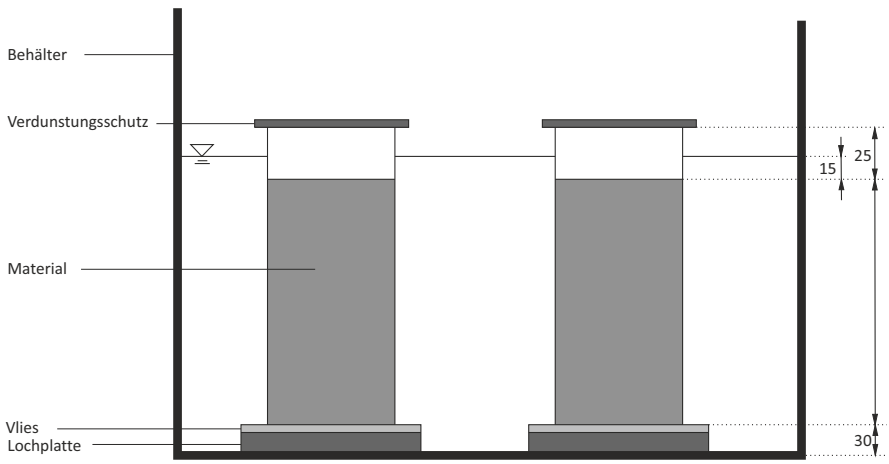

Abb. 5-3: Versuchsaufbau Wasserkapazität, nach [118]

Abweichend von den Vorgaben wurde - auf den Erkenntnissen beim Einstellen des Wassergehaltes der Trockendichtebestimmung beruhend - auf eine Vortrocknung verzichtet und das Material ausschließlich unverändert eingebracht. Der Ausgangswassergehalt wurde separat bestimmt. Rocktäschel [195] hat zudem zwei Methoden vergleichend untersucht. Während Methode A dem genannten Ablauf folgt und die aufgenommene Wassermenge über den Massenvergleich des Gesamtaufbaus (PVC-Zylinder, Vlies, Lochplatte) ermittelt, findet bei Methode B ein reiner Materialmengenvergleich statt. Da sich nach ersterer Methode z.T. Kapazitäten über 100 % ergaben, die durch den prozentualen Bezug auf die Feuchtmasse nicht vorkommen können, wurde die Größenordnung der über die Apparatur aufgenommenen Wassermenge betrachtet. Es zeigte sich, dass insbesondere über das Vlies ein nicht zu vernachlässigender Anteil Wasser einbezogen wird, der zu überhöhten Wasserkapazitäten führt.

Dementsprechend wurde Methode A verworfen und Methode B der Vorzug gegeben.

5.2.4 Korndichte

Zur Bestimmung der Korndichte stehen in der Bodenmechanik und dem Straßenbau differente Methoden zur Verfügung. In Feldversuchen hat sich das Luftpyknometer als überschlägiges Schnellverfahren bewährt [224], indem bei bekanntem Wassergehalt nach der Vorgehensweise DIN 18121-2 [56] der Rückschluss auf die Korndichte gezogen werden kann. Nach DIN 18124 [44] eignen sich Kapillarpyknometer (Glasgefäß mit eingeschliffenem Kapillarstopfen) bzw. Weithalspyknometer. Die Entlüftung vollzieht sich über Kochen im Wasser- oder Sandbad bzw. durch das Anlegen eines Unterdrucks.

Nach Kraft [118] liefert das Erhitzen im Sandbad für gleiche Materialien größere Werte, zurückzuführen auf die maximal erreichbaren Temperaturen und damit schnellere Wärmeübertragung. Die Entlüftungsdauer wird mit einer Spanne von 25 Minuten bis zu einem Tag angegeben. In Kombination mit den Erkenntnissen von Schwind [222] für Bioabfall, die u.a. die Nichteignung kleiner Untersuchungsgefäße sowie die Problematik des Aufschäumens in der Variante Kapillarpyknometer und Unterdruck hervorbrachten, wurden zwei unterschiedliche Kombinationen gewählt:

1. Weithalspyknometer (2000 ml), Entlüftung durch Kochen im Sandbad sowie
2. Luftpyknometer.

Das Luftpyknometer besteht aus zwei Kammern. Die untere wird mit der Probe befüllt und anschließend luftdicht mit der oberen verschraubt. Mittels Pumpe lässt sich ein Luftdruck von 2,3 bar einstellen. Über den Druckausgleich zwischen den Kammern und unter Zuhilfenahme einer Kalibrierkurve kann nach dreimaliger Wiederholung und Mittelwertbildung das Probenvolumen V_m aus Wasser und Feststoff korreliert werden [127, 224].

Während im Luftpyknometer die Substrate im Originalzustand in viermaliger Wiederholung untersucht wurden, fand für das Weithalspyknometer die Unterscheidung in getrocknete und unveränderte Substrate statt (3-facher Ansatz). Auftretenden Gefäßspannungen, die zur Zerstörung des Glasgefäßes führen (Absprengen des Bodens), wurde durch Wärmeableitung insbesondere in der Abkühlphase mittels eingebrachter Glasstäbe entgegengewirkt. Das Kochen der Proben vollzog sich solange, bis kein weiterer Luftaustritt zu beobachten war. Der Vergleichbarkeit halber betrug die Versuchsdauer maximal acht Stunden (ein Arbeitstag). Bei den getrockneten Materialien wurde die Oberflächenspannung wie bereits bei den Proctorversuchen durch den Zusatz von Tensiden herabgesetzt (Benetzbarkeit) [195].

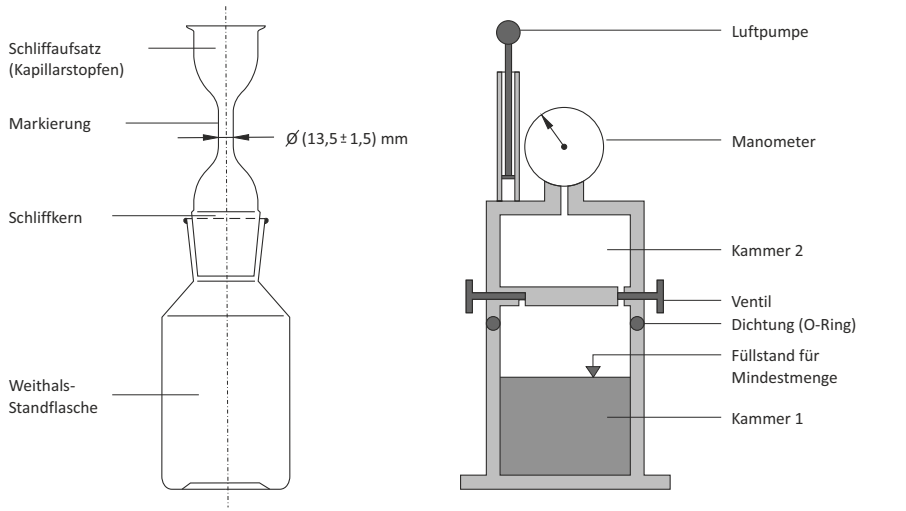

Abb. 5-4: Links: Weithalspyknometer [60], Rechts: Luftpyknometer [127]

Abweichend der DIN-Vorgaben von d = 5 mm für die maximale Korngröße sowie $m_d \approx 20$ g für die Trockenmasse der Probe fand keine Zerkleinerung statt, da das Zertrümmern von Einzelkörnern unzulässig ist; zudem kamen größere Probenmengen zum Einsatz.

5.2.5 Korngrößenverteilung

Die Siebanalyse, also die Trennung eines Bodens in Körnungsgruppen mit Hilfe von Prüfsieben, wird gemäß DIN 18123 [54] für Korngrößen > 0,063 mm als Trockensiebung durchgeführt. Im Ergebnis liegt die prozentuale Verteilung der Korngrößen vor, dargestellt in einer Körnungslinie. Ist ein Korngrößenanteil < 0,063 mm vorhanden, muss ein nasses Abtrennen der Feinteile durchgeführt werden, indem die trockene Probe nach dem Wiegen aufgeschlämmt und vom Grobkorn getrennt wird. Für diese Kornanteile unter 0,125 mm kann die Verteilung über Sedimentation und bspw. dem Aräometerverfahren (Dichtebestimmung der Suspension) nach Boyoucos-Casagrande ermittelt werden [226]. Aufgrund der Beschaffenheit der Substrate und der zu erwartenden Korngrößen, spielen die feinen Bestandteile eine untergeordnete Rolle, so dass nur gesiebt wurde.

Durch die Bestimmung der Wassergehalte ist bekannt, dass das Material nach dem Trocknungsprozess z.T. stark verbackt, so dass dann eine Auftrennung der Kornfraktionen nicht zweifelsfrei möglich ist. Der händische Aufschluss dieser Konglomerate würde nicht den Zustand einer ungestörten Probe widerspiegeln. Darin begründet wurden die Substrate im natürlichen Zustand analysiert. Im Vordergrund stand dabei die sogenannte Nasssiebung, die mittels Wasserbeaufschlagung den Siebvorgang unterstützt (Spülung). Die Vorgehensweise ist in DIN 66165-2 [42] zur Partikelgrößenanalyse genormt. Bei Substraten, bei denen eine

Trockensiebung im Ausgangszustand möglich war, wurde diese entweder vorgezogen oder vergleichend durchgeführt. Da für extreme Formen, z.B. nadelförmige Partikel (Halmgut), die Bestimmung der Größenverteilung durch Siebanalyse nicht empfohlen wird, wurde für entsprechende Substrate auf eine Handsortierung zurückgegriffen.

Somit ergaben sich folgende Versuchsreihen:

- Nasssiebung: Apfeltrester, Anwelk-/Grassilage, Maissilage, Rübenschnitzel, Stroh und Rinderfestmist,
- Trockensiebung: Maissilage und Topinambur,
- Handsortierung: Grasschnitt, Stroh und Triticale.

Im Falle der Nasssiebung wird der Siebsatz im Vorfeld der jeweiligen Anwendung wasserbenetzt und im abgetropften aber nicht trockenen Zustand gewogen. Nach der Siebung erfolgt die Ermittlung der Massenrückstände durch Rückwaage der einzelnen abgetropften Siebe. Der Siebsatz bestand aus:

- Sieben mit Prüfsiebgewebe der Maschenweiten: 0,25 - 0,5 - 1 - 2 mm sowie
- Sieben mit Quadratlochplatten der Lochweiten: 4 - 8 - 10 - 16 - 32 mm.

Durch das Aufbringen von Wasser kommt es durch Wasseraufnahme zu Veränderungen gegenüber dem ursprünglichen Wassergehalt. Es ist zudem davon auszugehen, dass dieser zwischen den Kornfraktionen variiert. Weil die Körnungslinie durch Aufsummieren der prozentualen Trockenrückstände generiert wird, sind die Wassergehalte bzw. Trockenmassen jeder einzelnen Fraktion zu bestimmen [195].

5.2.6 Durchlässigkeitsbeiwerte

Gemäß DIN 18130-1 [48] stehen verschiedene Möglichkeiten der Versuchsanordnungen zur Verfügung, deren Auswahl sich am Nachweis der vollen Wassersättigung sowie stationärer Strömung ausrichtet. Zunächst lässt sich die Aufnahme des Probekörpers prinzipiell untergliedern in:

- Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit statischer Belastung,
- Triaxialzelle sowie
- Versuchszylinder.

Darüber hinaus ist in veränderliche und konstante Druckhöhe zu unterscheiden, wobei ersterer bei bindigen und letzterer bei nichtbindigen Böden der Vorzug zu geben ist [221]. Der Versuch mit Kompressions-Durchlässigkeitsgerät eignet sich nur für feinkörnige Böden und wurde deshalb außer Acht gelassen.

Die Triaxialzelle kann für alle Bodenarten mit $k < 10^{-5}$ m/s Anwendung finden. Dazu muss ein Seitendruck aufgebracht werden, welcher höher liegt als der Einströmdruck und verhindert, dass die Probe umströmt wird. Vedder [244] konnte zeigen, dass das Material dabei aufgrund seiner Konsistenz zusammengedrückt und das Porenwasser verdrängt wird. In der Folge lag eine sehr schwach durch-

lässige Probe vor. Ähnliche Erfahrungen machten auch LeLievre und Jofriet [144] mit Mais, indem sich die Membran durch den Zellwasserdruck in den freien Porenraum drückte und damit Volumenänderungen hervorrief. Der Versuch, den resultierenden Fehler hinsichtlich einer Korrekturberechnung zu messen, scheiterte an einer geeigneten Methodik. Der Versuchsstand an der BUW wurde schlussfolgernd mit einem einaxialen Zylinder (Festwandzelle) ausgestattet. Filtersteine zur Vergleichmäßigung der Wasserbeaufschlagung, so sie eingesetzt werden, müssen ausreichend durchlässig sein, "d.h. ihr Durchlässigkeitsbeiwert muss mindestens eine Zehnerpotenz über desjenigen des Probekörpers liegen" [48]. Da keine k-Werte für NawaRo bekannt sind, wurde lediglich ein Filtervlies gewählt, um Ausschwemmeffekte zu verhindern. Die Probe wurde weiterhin von unten nach oben durchströmt und mit einem Eingangsdruck von 0,36 bar bzw. 360 cm Wassersäule beaufschlagt. Die Probenhöhe und damit die durchflossene Strecke betrug 12 cm, der Querschnitt A = 72,4 cm². Das hydraulische Gefälle ergibt sich entsprechend zu i = 30. Es wurden neben Schüttdichten unterschiedliche Einbaudichten bis hin zur maximalen Feuchtdichte realisiert.

Der Versuchszylinder eignet sich für sämtliche Bodenklassen. Den Ausstechzylinder ersetzt im vorliegenden Fall der Proctortopf, in dem der Einbau im Fermenter mit Schüttdichte simuliert wird (siehe Kapitel 5.2.2). Abgedeckt mit Kopf- und Bodenplatte, in die jeweils Lochplatten integriert sind, wird die Probe unter gleichbleibendem Druck, der über freie Wasserspiegel von Überlaufbehältern reguliert wird (Δh = 81 cm, i = 6,75), durchströmt. Die Menge wird zeitlich im Abstand von ca. 10 min erfasst aufgefangen. Sobald zu- und abfließende Wasservolumen pro Zeiteinheit gleich sind, wird der Durchlässigkeitsbeiwert k bestimmt und über den Korrekturbeiwert α auf T = 10 °C bezogen in m/s angegeben. Wie geschehen, ist bei größeren durchströmenden Wassermengen und konstantem hydraulischem Gefälle die Erfassung des unterwasserseitig überlaufenden Wassers ausreichend. Der verwendete Proctorzylinder entsprach dem der Verdichtungsversuche mit d = 150 mm. Die Lochplatten wiesen einen Durchmesser von 4 mm auf. Filter wurden nicht eingesetzt.

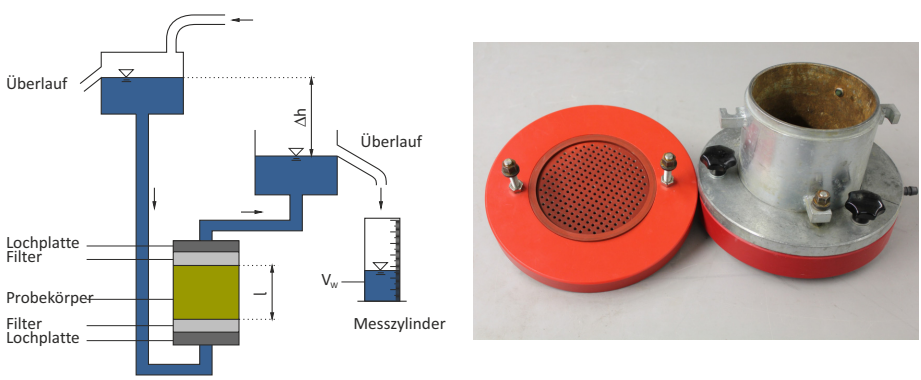

Abb. 5-5: Versuchszylinder mit konstantem hydraulischen Gefälle (Versuch ZY-MS-MZ) [226], Proctortopf

5.3 Halbtechnische Untersuchungen zur Feststoffvergärung

Die anaeroben Untersuchungen zur Abhängigkeit der Gasentwicklung von der Einbaudichte liefen in zwei parallelen, abgestimmten Versuchsschienen ab. Während die erste die Einflüsse eines dynamischen Elementes ausschließt und damit auf große Mengen Impfmaterial angewiesen ist, nutzt die zweite Monosubstrate, unterstützt durch Perkolation. Entsprechend Kapitel 3.1 liegt der Fokus vorliegender Arbeit auf Feststofffermentern mit Impfmaterial, weshalb die zugehörige Versuchsreihe in den Mittelpunkt rückt. Die perkolierten Versuche werden zu Vergleichszwecken mit orientierendem Charakter herangezogen.

5.3.1 Versuche mit Impfmaterial ohne Perkolation

Die Versuche wurden im halbtechnischen Maßstab durchgeführt. Dafür wurde eine Anlage mit in Summe acht Fermentern realisiert, die in Abbildung 5-6 schematisch dargestellt ist. Wie der Volumenangabe der Reaktionsbehältnisse zu entnehmen ist, kamen in einem Versuchszeitraum von 24 Monaten drei unterschiedliche Größen zum Einsatz:

- Substrate: 6 Stück mit ca. 160 l aus PE-HD (Höhe 95 cm, Innendurchmesser 46 cm) bzw. 6 Stück mit 18 l aus Edelstahl (Höhe 51 cm, Innendurchmesser 21,5 cm) sowie
- Impfmaterial: 2 Stück mit 36 l aus Edelstahl als Kombination zweier 18-l-Reaktoren für die Referenzansätze.

Eingebrachte Edelstahl-Lochböden verhinderten den Einstau des Materials durch anfallende Prozesswässer. Das Nutzvolumen reduziert sich damit um 16,5 l bzw. 1,8 l (≈ 10 %). Zur Temperierung standen zwei Klimakammern zur Verfügung, die über Rippenrohrheizöfen konstant mesophile Bedingungen sicherstellten. Die Messtechnik fand außerhalb des klimatisierten Raumes Aufstellung, um temperaturbedingten Materialschäden bei Schwankungen im Grenzbereich vorzubeugen. Der Anschluss der Gaserfassung wurde mittels gasdichter Steckverbindungen realisiert. Der PA-Schlauch mit einem Innendurchmesser von 8 mm leitet das Gas über eine Kondensatfalle zur Volumen- oder Mengenerfassung - je nach Reaktorgröße ein Trommelgaszähler TG 05 (max. Q = 60 l/h) oder ein MilliGascounter MGC (max. Q = 1,2 l/h) der Firma Dr.-Ing. Ritter Apparatebau GmbH. Anschließend erfolgte die Zwischenspeicherung in einem Gasspeicherbeutel mit einem maximalen Fassungsvermögen von fünf Litern (Calibrated Instruments, Material CaliBond). Wahlweise fand eine über ein Drei-Wege-Magnetventil gesteuerte Umschaltung in die Abluft statt. Die Speicherung erfolgte vor dem Hintergrund, dass das Analysegerät (Awite) zur Messung der Gaszusammensetzung ein Volumen von mindestens 2,5 Litern benötigt, um die Parameter CH_4, CO_2 (0 - 100 Vol.-%) sowie H_2 und H_2S (0 - 2000 ppm) zu bestimmen. Die Messungen wurden manuell, also nicht automatisiert, ausgelöst.