

Dietrich Balzer¹ und Bernd Linke²

Wissensbasierte Steuerung von Horizontalfermentern als Systeme mit verteilten Parametern

1. Lösungsansatz

Für die Vergasung pflanzlicher, halmgutartiger Biomassen basiert ein neuer Lösungsansatz zur wesentlich verbesserten Auslegung und Steuerung eines verfahrenstechnischen Systems darauf, dass zur Vergärung biogener Materialien die Gewinnung von Biogas in kontinuierlich betriebenen Horizontalfermentern erfolgt, die ein neuartiges Steuerungsobjekt mit verteilten Parametern darstellen. Die verfahrens- und anlagentechnische Grundidee der betrachteten Horizontalfermenter wurde bereits patentiert. [1] Die biogene Masse wird als feste Phase schwimmend über die Prozessflüssigkeit geführt, die ihrerseits über Umlaufpumpen auf die biogene Masse gesprüht wird. Der Horizontalfermenter verfügt mindestens für jede Phase des Biogasprozesses (Hydrolyse, Versäuerung, Essigsäurebildung, Methanbildung) über einen solchen getrennten Flüssigkeitskreislauf. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass die Prozess- bzw. Perkolationsflüssigkeit einer Phase bzw. eines Abschnittes nicht nur in die eigene Phase zurückgeführt wird, sondern auch in die anderen Phasen bzw. Abschnitte. Dadurch entstehen weitere Freiheitsgrade bei der Prozessführung, die für eine zusätzliche Optimierung genutzt werden können.

Die automatisierungstechnische Innovation besteht darin, dass wir es im Unterschied zu den bisherigen Steuerungs- und Automatisierungssystemen für Bioreaktoren – die Systeme mit konzentrierten Parametern darstellen – mit einem System mit verteilten Parametern zu tun haben, das durch verteilte Steuerungsfunktionen optimiert, stabilisiert und gesichert werden soll. Die verteilten Steuerungsfunktionen sind einmal die Temperatur und zum anderen die Menge pro Zeiteinheit der durch die Umlaufpumpen transportierten Perkolationsflüssigkeit. Diese Steuerungsfunktionen, die ihrerseits sowohl zeit- als auch ortsabhängig sind, werden durch das Steuerungssystem so ausgewählt, dass sich im Horizontalfermenter ein optimales, ortsabhängiges Temperaturprofil und für jeden Zustandsparameter (Fettsäurekonzentration, Leitfähigkeit, Redox-Potential, pH-Wert, NH_4 -Konzentration) ein optimales ortsabhängiges Werteprofil einstellt. Diese optimalen ortsabhängigen Profile sind das Ergebnis der Lösung einer Optimierungsaufgabe, bei der das Maximum der Biogasausbeute *das Optimierungskriterium*, das mathematische Modell der Statik des Horizontalfermenters mit einer vorgegebenen Eingangszusammensetzung der Biosuspension *die Nebenbedingung* und die ortabhängigen Profile der perkolierten Prozessflüssigkeit *die Steuergrößen* darstellen.

1 Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien e.V. (LIFIS)

2 Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim

Dieses Prinzip der Steuerung von Systemen mit verteilten Parametern wurde zum ersten Mal für die Steuerung von Rohrreaktoren erfolgreich eingesetzt. [2] Für weiterführende Überlegungen zur Steuerung von Systemen mit verteilten Parametern sei auf [3], [4] und [5] verwiesen. Diese optimalen Profile werden als Sollwerte für die verteilten Regler verwendet. Das Steuerungssystem funktioniert als hierarchisch strukturiertes, mehrdimensionales wissensbasiertes System. Dabei werden mathematische Modelle des Steuerungsobjektes verwendet. Berechnungen haben einen um ca. 30 % geringeren Investitionsaufwand und um eine ca. 20 % höhere Biogasausbeute gegenüber vergleichbaren herkömmlichen Anlagen ergeben.

2. Der Horizontalfermenter und seine wissensbasierte Steuerung als Beitrag auf dem Wege zum ‚Solarzeitalter‘

Mit Fug und Recht ist heute zu behaupten, dass sich das ‚Solarzeitalter‘ auf dem Wege zur Realität befindet. Folgende Tatsachen fördern bzw. belegen diese Entwicklung:

- Einfluss der Reaktorhavarie in Fukushima;
- Energiepotentiale aus Biomasse in Deutschland: Stromerzeugung 20 %, Wärmeerzeugung 40 %, Kraftstofferzeugung 25 %;
- Ziele beim Einsatz erneuerbarer Energien bis 2020: 30 % der Stromerzeugung, 25 % der Wärmeerzeugung, 17 % der Biokraftstoffe, Reduzierung der Treibhausgase um 17 %;
- Biokraftwerke als Regelkraftwerke sind Bestandteil von virtuellen Kraftwerken.

Ein Beitrag auf diesem Wege ist die Erzeugung von Biogas aus halmgutartigen Biomassen in Horizontalfermentern mit gesteuerter Perkolation ist. Durch wissensbasierte Steuerung der Horizontalfermentoren können bis zu 50 % der Effektivitätsreserven ausgeschöpft werden. Abbildung 1 stellt einen Horizontalfermenter schematisch dar.

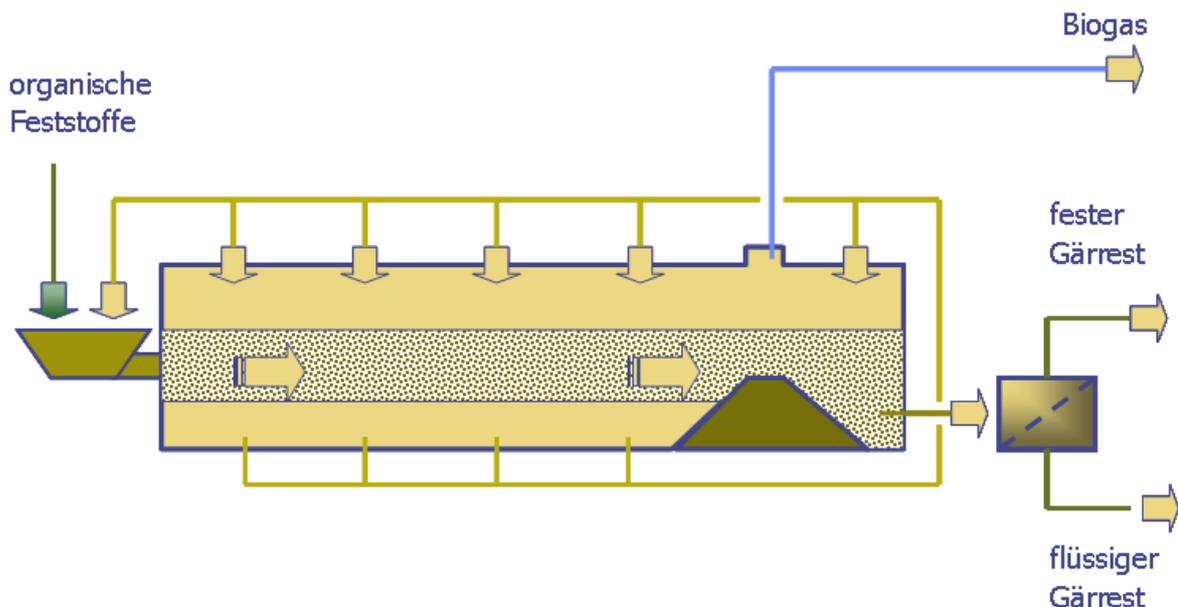


Abb.1: Schematische Darstellung eines Horizontalfermenters (Quelle: Eigendarstellung)

Die Eigenschaften und Vorteile der Horizontalfermentoren sind:

- geregelte Perkolation als System mit verteilten Parametern;
- kontinuierliche Zuführung des Gärsubstrates und kontinuierliche Entnahme des Gärrestes;
- die unterschiedlichen Sektoren erhalten genau die Menge und die Zusammensetzung (gewichtete Zuführung) der Perkolationsflüssigkeit mit der Temperatur, die zur Maximierung der Biogasproduktion führen;
- verbesserte Steuerbarkeit: 20 Steuergrößen bei 4 Sektoren statt 3 Steuergrößen bei klassischen Bioreaktoren (Biosuspensionsmenge, Temperatur, Rührgeschwindigkeit);
- innere Rückführungen möglich (z.B. von „Essigsäurebildung“ zu „Hydrolyse“);
- keine Rührwerke (z.B. Paddelrührwerke);
- keine Konkurrenz zum Food-Bereich.

3. Mathematische Modelle des Steuerungsobjektes

Die mathematischen Modelle werden für eine Vorwärtssteuerung verwendet und basieren auf Material- und Energiebilanzen der festen und der flüssigen Phasen.

3.1 Mathematisches Modell der Feststoffphase

Für die feste Phase wird lediglich eine Materialbilanz aufgestellt, da erstens die biochemischen Reaktionen in der flüssigen Phase anlaufen und da zweitens die spezifische Wärme der festen Phase im Vergleich zur spezifischen Wärme der flüssigen Phase vernachlässigt werden kann. Die feste Phase stellt einen Pfropfenstrom dar und wird deshalb durch ein System partieller Differentialgleichungen beschrieben:

$$\frac{\partial x_1}{\partial t} + w \frac{\partial x_1}{\partial l} = f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, T, a_1, a_2, \dots, a_s) \quad (1)$$

Darin bedeuten:

x_1	Feststoffkonzentration
x_2, x_3, \dots, x_n	Zustandswerte (Fettsäurekonzentration, Leitfähigkeit, Redoxpotential, pH-Wert, NH_4 -Konzentration) in den Abschnitten Hydrolyse, Versäuerung, Essigsäurebildung, Methanbildung
T	Temperatur in den einzelnen Abschnitten
$f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, T, a)$	Abbaugeschwindigkeit der Feststoffe
l	laufende Länge des Horizontalfermenters
t	Zeit

3.2 Mathematisches Modell der Flüssigphase

Bei der mathematischen Beschreibung der Eigenschaften der Flüssigphase gehen wir von folgenden Überlegungen aus:

- Es wird sowohl eine Materialbilanz als auch eine Energiebilanz aufgestellt.
- Es existieren vier in Reihe geschaltete Abschnitte (Hygienisierung, Versäuerung, Essigsäurebildung, Methanbildung) mit idealer Vermischung, die ihrerseits durch ein System mit gewöhnlichen Differentialgleichungen beschrieben werden.

Für die Materialbilanz der Flüssigphase gilt die Gleichung

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{V}{V_0}(x_i - x_{ie}) \quad (2)$$

$i = 2, 3, \dots, n$

Darin bedeuten:

x_{ie}	Zustandwert der zugeführten Perkolationsflüssigkeit
V	Menge der zugeführten Perkolationsflüssigkeit pro Zeiteinheit
V_0	Volumen eines Abschnittes

Es gelten identische Gleichungen für alle x_{ie} in allen Abschnitten. Für die Energiebilanz der Flüssigphase gilt:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{V}{V_0}c(T - T_e) \quad (3)$$

Darin bedeuten:

c	spezifische Wärme der Flüssigkeit im jeweiligen Abschnitt
T_e	Temperatur am Eingang (identische Gleichungen für die Temperaturen in allen Abschnitten)
V	Menge der zugeführten Perkolationsflüssigkeit pro Zeiteinheit
V_0	Volumen eines Abschnittes (auch hier existieren identische Gleichungen für alle x_i in allen Abschnitten)

Durch Mischungsgleichungen zu bestimmende Steuergrößen: x_{ie}, T_e

4. Wissensbasierte Steuerung des Systems mit verteilten Parametern

4.1 Funktionale Struktur des Steuerungssystems

Die Struktur des Steuerungssystems ist in Abbildung 2 dargestellt und zeigt, dass das modellbasierte Prozesssteuerungssystem zwei Ebenen besitzt:

- Ebene 1: Stabilisierung der optimalen Temperatur- und Wertprofile (Minimierung des Regelfehlers)
- Ebene 2: Bestimmung und Nachführung der optimalen Temperatur- und Wertprofile (Optimale Sollwerte)

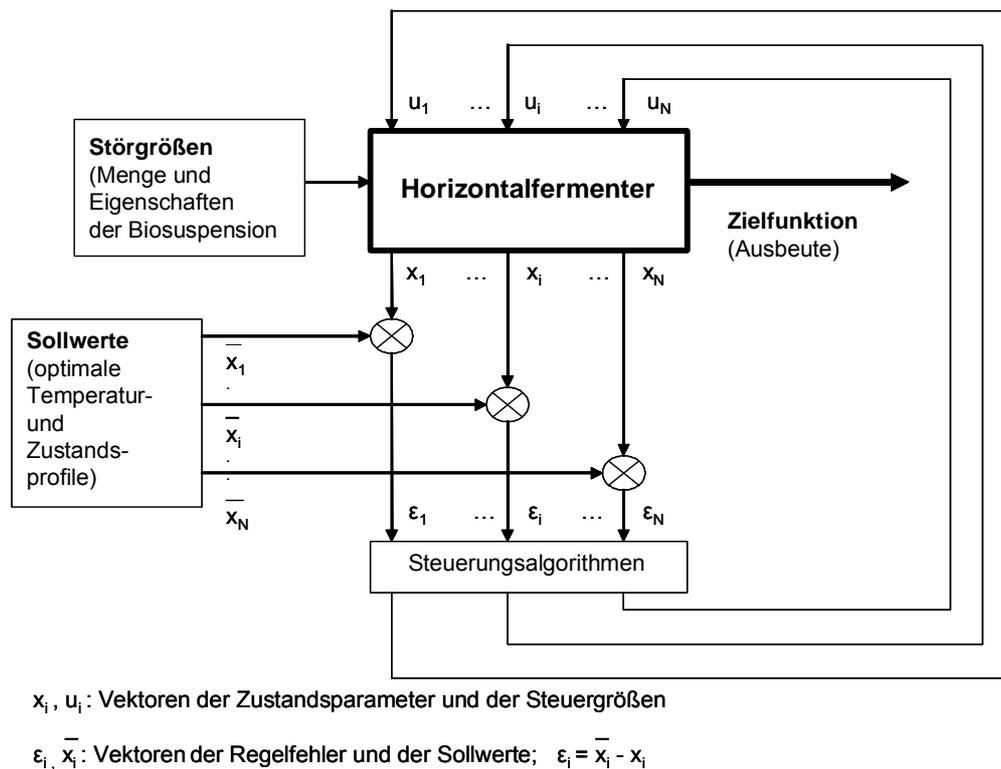


Abb. 2: Struktur des Steuerungssystems (Quelle: Eigene Darstellung)

4.2 Stabilisierung der optimalen Zustandsprofile

Die Stabilisierung der optimalen Zustandsprofile verfolgt das Ziel, die Abweichungen der realen und gemessenen Temperatur- und Werteprofile von den optimalen Zustandprofilen zu minimieren. Diese Aufgabe kann mit zwei Methoden gelöst werden:

- durch ein mehrdimensionales verkoppeltes Regelungssystem mit linearen Reglern bei Kompensation der Wechselwirkungen zwischen den Regelkreisen (dynamisch und statisch entkoppelte Systeme)
oder
- durch eine zeitoptimale Steuerung mit dem Kriterium $t \rightarrow \min$ unter der Nebenbedingung

$$\bar{x}_i(l) = x_i(l, t)$$

als Lösung der Gleichungen (2) und (3).

4.3 Bestimmung und Nachführung der optimalen stationären Zustandsprofile

Die Zustandsprofile sind dann optimal, wenn die Feststoffkonzentration am Ausgang aus dem Horizontalfermenter, d.h. bei $l = L$ (der Länge des Horizontalfermenters), minimal ist. Es ist also eine Minimierung von $x_1(L)$

$$x_1(L) \rightarrow \min$$

durch Auswahl der optimalen Steuergrößen notwendig unter Verwendung des stationären mathe-

matischen Modells des Horizontalfermenters. Das bedeutet, dass die Gleichungen (1), (2) und (3) als Nebenbedingungen bei

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = 0, \quad \frac{dx_i}{dt} = 0, \quad \frac{dT}{dt} = 0$$

eingehalten werden müssen.

Die optimalen stationären Zustandsprofile sind durch die Steuerung realisierbare Profile, da für deren Bestimmung adäquate stationäre mathematische Modelle verwendet werden. Bei Änderung der Fließgeschwindigkeit der Feststoffe sowie bei Änderung der Qualität der Inputstoffe müssen die optimalen stationären Zustandsprofile unter Benutzung des oben beschriebenen Algorithmus nachgeführt werden

Wenn über einen längeren Zeitraum Erfahrungen der Prozessführung einer prototypischen Lösung vorliegen werden die oben beschriebenen Systeme der Prozessstabilisierung und Prozessoptimierung durch regelbasierte Expertensysteme ergänzt. Zu gegebener Zeit wird darüber berichtet werden.

Literatur

- [1] Freudenberg, A.; Freudenberg, P.-W.; Fudel, A.; Linke, B.: Verfahren und Vorrichtung zur Biogaserzeugung, Patentbeschreibung DE 10 2007 049 479 A; 2009.04.23
- [2] Autorenkollektiv: Analyse und Steuerung von Prozessen der Stoffwirtschaft; Akademie-Verlag, Berlin 1971 und Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1971, S. 676
- [3] www.iks.hs-merseburg.de/ – Sokollik
- [4] www.et.tu-dresden.de/rst/index.php?id=62
- [5] www.isys.uni-stuttgart.de

[27.06.11]

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. Dietrich Balzer
Kurfürstenstr. 9
D – 116515 Friedrichsthal
balzer@prosysgmbh.de

Prof. Dr. Bernd Linke
Max-Eyth-Alle 100
D – 14469 Potsdam
blinke@atb-potsdam.de