

MICHAEL SCHÖN

**NUMERICAL MODELLING OF ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES  
IN AGRICULTURAL BIOGAS PLANTS**

DISSERTATION

**Zusammenfassung**

Anaerobe Prozesse wurden von Ingenieuren aus den Fachbereichen der Siedlungswasserwirtschaft bzw. Umwelttechnik seit langem für die Klärschlammfäulung angewendet. Dabei stand vor allem die Schlammstabilisierung im Vordergrund und erst in zweiter Linie war der Energiegewinn aus dem produzierten Biogas von Interesse. In den letzten Jahren stieg das Interesse an der Gewinnung von Biogas aus organischen Substraten massiv an und insbesondere Ökostromgesetze ermöglichen in Europa eine wirtschaftliche Erschließung dieser erneuerbaren Energiequelle im landwirtschaftlichen Bereich. Die anaerobe Umwandlung von organischen Substraten über verschiedene Zwischenprodukte bis hin zum energiereichen Biogas ist eine komplex vernetzte Prozess- bzw. Reaktionsabfolge die von verschiedenen Konsortien von Mikroorganismen katalysiert wird.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit dem Ziel betrieben, den „Black-Box-Charakter“ einer Biogasanlage durch eine mechanistische biokinetische Beschreibung transparenter zu erfassen. Thema der vorliegenden Arbeit war es, ein anerkanntes mathematisches Simulationsmodell (ADM1-Anaerobic Digestion Model No.1 der International Water Association IWA) auf die Mono- und Co-Fermentation von landwirtschaftlichen Nebenprodukten - insbesondere Gülle - anzuwenden und Einsicht in die auftretenden Wirkmechanismen zu erreichen. Im Rahmen der Forschungsinitiative BioTreaT (Forschungszentrum Seibersdorf mit den Instituten Mikrobiologie und Umwelttechnik der Universität Innsbruck) war es möglich, die Entwicklung und Errichtung eines Prototypen einer landwirtschaftlichen Kleinbiogasanlage im Zuge der vorliegenden Doktorarbeit zu begleiten. Durch das enge Zusammenspiel von großtechnischen Versuchen und numerischer Simulation konnte die Modelltheorie anaerober Prozesse der Ingenieurspraxis ein Stück näher gebracht werden.

Die Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in 3 strukturell getrennte Teile, und zwar in

- einen eigenständigen Textteil über die Hinführung zum Thema, eine Literaturrecherche, eine Methodikbeschreibung und schließlich die Schlussfolgerungen
- 5 veröffentlichte bzw. eingereichte wissenschaftliche Beiträge, die als einzelne Kapitel der Dissertation verschiedene Aspekte der Arbeit zusammenfassen
- einen Anhang mit ausgelagerten Detailinformationen A-E, die den jeweiligen Artikeln zugeordnet sind.

In Kapitel 1 wird ein kurzer geschichtlicher Rückblick auf die Entwicklung der Biogastechnologie geboten und die Zielsetzung der Arbeit aufgezeigt. In der anschließenden Literaturrecherche (Kapitel 2) wird der Stand der Technik anhand der bislang angewendeten verfahrenstechnischen Möglichkeiten dargestellt. Dann werden die einzelnen biologischen Abbauschritte beschrieben und die einzelnen Einflussfaktoren auf den Ablauf anaerober Prozesse besprochen. Das Verständnis der Wirkungen der chemisch-physikalischen Randbedingungen wie pH-Wert, Temperatur, usw. bzw. die Kenntnis von relevanten Nährstofflimitierungen und Inhibitionen sind die Voraussetzung für die nachfolgende Vorstellung des Anaerobic Digestion Model No.1. Das Modell besteht im Wesentlichen aus Wachstumsfunktionen von funktionalen Gruppen von Mikroorganismen, deren Stoffumwandlungen exakten Massenbilanzen entsprechen.

Im Methodik-Abschnitt über die durchgeführten Laborversuche (Kapitel 3) werden die verwendete Labor-Versuchsanlage und wesentliche Messeinrichtungen beschrieben. Praxisrelevanz erhält die Arbeit durch den unmittelbaren Bezug zur Errichtung und -inbetriebnahme der o.g. großtechnischen Biogasanlage, deren Konzeption und Ausführung erläutert werden. Des Weiteren werden in diesem Abschnitt die bei den Simulationen verwendeten Kalibrierungsroutinen dargestellt. Es wird erklärt, wie anhand einzeln gemessener Summenparameter und Elementarbilanzen auf die Verteilung der teilweise nicht direkt messbaren Stoffgruppen im Zulauf rückgerechnet wird. Es wurde großer Wert auf die Allgemeingültigkeit der gewonnenen Aussagen gelegt, d.h. die erzielten Erkenntnisse können mittels der Modellbeschreibungen von den betrachteten Fällen auch auf andere Anwendungsbeispiele übertragen werden.

Die Kapitel 4 bis 8 bestehen aus Veröffentlichungen, die einen internationalen Review-Prozess durchlaufen haben und auf Konferenzen der IWA (International Water Association) und der IWWG (International Waste Working Group) präsentiert bzw. beim renommierten Fach-Journal „Bioresource Technology“ eingereicht wurden.

Kapitel 4 der Arbeit setzt sich grundsätzlich mit dem Einsatz von so genannten erneuerbaren Energien in den Alpen auseinander. Es werden dabei die Potenziale von Wasserkraft, Biogasproduktion, Geothermie, Windkraft und Sonnenenergie verglichen.

Im Kapitel 5 wird das Modell ADM1 für die Simulation der Biogasproduktion aus Schweinegülle und Bioabfall eingesetzt. Die Vergärung von Gülle ist seit langem ein standardisiertes Verfahren mit hoher Prozessstabilität, aber geringen Biogasausbeuten. Die Zufuhr von weiterem organischem Substrat kann hier eine erhebliche Steigerung der Biogasausbeute bringen. Mit Hilfe der Simulation wird aufgezeigt, wie die Prozessführung optimiert werden kann: durch Rezirkulation innerhalb des verwendeten 4-Kammersystems der Biogasanlage kann die Biogasproduktion deutlich erhöht werden.

Die dem Kapitel 6 der Promotion zugrunde liegende Publikation widmet sich noch einmal der Behandlung von Gülle und Bioabfall. Die Problematik der Versäuerung des Reaktors durch eine zu hohe organische Fracht (Bioabfall) wird durch die Simulation herausgearbeitet.

Im Kapitel 7 wird die Anfahrphase eines anaeroben Prozesses behandelt. Es stellt sich grundsätzlich die Frage, ob es sinnvoll ist, zur Inangabe Impfmateriale (Inokulum) aus einer stabil arbeitenden Anlage zu verwenden oder ob die Anlage auch mit frischer Gülle angefahren werden kann. Interessanterweise wird beim Anfahren mit einem Inokulum aus einem anderen Anaerobreaktor trotz absichtlich herbeigeführtem steilen Anstieg der Substratbelastung kein Einbruch der Vergärung festgestellt. Die zweite Variante (frische Gülle) mit einem Temperaturgradienten stellt sich ebenfalls bei der Erhöhung der organischen Belastung als stabil heraus. Mit den für diese Prozessführung durchgeführten Simulationen wird herausgearbeitet, dass kinetische Parameter des ADM 1 angepasst werden müssen.

Im Kapitel 8 der Arbeit geht es um die für die anaerobe Behandlung extrem wichtige Populationsdynamik. In zwei Fallstudien wird das ADM1 verwendet, um das Verhalten im Hinblick auf die Biogasproduktion bzw. Reaktorstabilität zu erklären. Es wird gezeigt, dass mit Hilfe von zwei Verhältniszahlen (org. Substrat/Biomasse und Konzentration org. Säuren/Alkalinität), das Versagen einer Anlage zur Klärschlammbehandlung besser vorhergesagt werden kann als dies anhand der org. Fracht möglich ist. Die zweite Fallstudie, die dem Kapitel 7 entnommen ist, zeigt, dass eine permanente Zufuhr von geringen Mengen aktiver Biomasse zu einer erheblichen Prozessstabilität beiträgt, die sonst nicht gewährleistet werden könnte.

Im Schlusskapitel wird einerseits die Bedeutung der Modellierung für die Biogas-Branche herausgestrichen und andererseits auf einige Einschränkungen in der Handhabung des Modells ADM1 und damit auf den Entwicklungsbedarf hingewiesen.