Process optimization for microbial biosynthesis of methane in a trickle-bed reactor for Power-to-Gas applications: the ORBIT-process

Dissertation

Martin Thema

Berichte aus der Biotechnologie

Martin Thema

Process optimization for microbial biosynthesis of methane in a trickle-bed reactor for Power-to-Gas applications: the ORBIT-process

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7656-1
ISSN 1434-4556

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Summary

Recently, Power-to-Gas as a storage and sector coupling instrument gained importance in energy transition, decarbonization and climate protection discussions.

The results of a review on Power-to-Gas projects presented in Part I (pp. 3) give a global overview on Power-to-Gas projects producing hydrogen or renewable substitute natural gas focusing projects in central Europe. It deepens and completes the content of previous reviews by including hitherto unreviewed projects and by combining project names with details such as plant location. It is based on data from 153 completed, recent and planned projects since 1988 which were evaluated with regards to plant location, installed power development, plant size, shares and amounts of hydrogen or substitute natural gas producing examinations and product utilization phases. Cost development for electrolysis and carbon dioxide methanation was analyzed and a projection until 2030 is given with an outlook to 2050. The results show substantial cost reductions for electrolysis as well as for CO_2-methanation during the recent years. A further price decline to less than 500 €/kW electric power input for both technologies, electrolysis and methanation, is estimated until 2050 if cost projection follows the current trend. Following an exponential global trend to increased installed power worldwide, today's Power-to-Gas applications are operated in total at about 39 MW_{el}. Hydrogen and substitute natural gas are investigated on equal terms concerning the number of projects but with rising plant capacity, CO_2-methanation gains importance. Methanation enables sector coupling and large-scale energy storage, transmission and trade through the use of existing infrastructure.

For this reason, Part II (pp. 15) compares and evaluates the two basic CO_2-methanation technologies' technical and economical assets and drawbacks taking into account different process and reactor concepts. Then, trickle-bed reactors as being part of the conceptual formulation of this thesis, are introduced and discussion of its technical specifications follows before a subsequent description of microbiological basics relevant in the context of Power-to-Gas: Archaea, which catalyse the methanation reaction, are introduced by means of history and characteristics such as taxonomy, growth, biotopes and metabolism. Biofilm formation, as it is of importance for trickle-bed bioreactor applications is discussed. Since literature on biological CO_2-methanation in trickle-bed systems (and other reactor concepts as well) lacks uniform terminology and methods of calculation, an approach for standardized nomenclature in trickle-bed systems was developed. With it, research status from 22 publications on trickle-bed biomethanation of carbon dioxide is evaluated. From this, the thesis derives optimization potentials for bioengineering and process operation.

Based on the preceding chapters, Part III (pp. 81) describes two experimental optimization approaches pursued in this thesis: Hydrodynamic tests were executed to identify a best-fitting packing material which maximizes liquid hold-up and with it mass transfer at low gas velocities as they occur in trickle-bed biomethanation to improve process performance. Second, systematic microbiological tests with 12 different archaeal strains were executed in coordination with the tests on packing material to identify the influences of the packing material on microbial behaviour as methane formation and cell growth. For this, 14 different packing material types were pre-

selected and hydrodynamically and microbiologically tested in parallel. As a result, best-fitting packing-organism combinations were identified for further experiments with Archaea in pure culture.

Considering the findings of the previous studies, Part IV (pp. 123) presents an improved reactor and system design for biological CO_2-methanation: the ORBIT-process. This includes the technical description and the identification process that led to the final optimization approaches implemented. In the appendix, a risk analysis of the process reveals critical points for operation. With a cost evaluation first approaches for future optimization of the process are introduced.

The thesis concludes with the description of first experiences made with the practical implementation of the ORBIT-process and a discussion on which optimization approaches proved to be successful. The performance of the system is discussed in comparison to results from literature Part II identifies.

To sum up, this thesis aims to contribute to the implementation of biological methanation of carbon dioxide as an energy storage and sector coupling technology by reviewing its status quo, identification of optimization potential, process and system development as well as standardization in nomenclature. First experimental results of a process implementation in technical center scale give evidence of successful application of different optimization approaches identified in this thesis.

Zusammenfassung

Im Lauf der vergangenen Jahre gewann Power-to-Gas als Sektorkopplungs- und Energiespeicherkonzept in der energiepolitischen Diskussion um die Energiewende und deren technologischen Lösungen zunehmend an Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund beginnt diese Arbeit in Teil I (Seite 3 ff.) mit einer Analyse weltweit installierter Power-to-Gas-Anlagen. Die dafür relevanten Elektrolyse- und Methanisierungsprojekte wurden ausgewertet und bereits existierende Übersichten wurden vertieft indem neue und bislang undokumentierte Anlagen ergänzt und Informationen wie Anlagennamen, Leistung oder Standort verknüpft wurden. Die Übersicht umfasst über 153 abgeschlossene, derzeit laufende sowie geplante Projekte beginnend im Jahr 1988. Diese wurden anhand von Anlagenstandort, Entwicklung installierter elektrischer Leistung, Anlagengröße, Anteil von Wasserstoff oder Methan als Produktgas sowie anhand von Produktnutzungspfaden analysiert. Mittels Literatur- und Herstellerangaben sowie einer Expertenumfrage wurde die Kostenentwicklung für drei Elektrolyse- sowie zwei Methanisierungstechnologien dokumentiert und ein Ausblick bis ins Jahr 2050 gegeben. Die Ergebnisse zeigen deutliche Lernkurven mit prognostizierten Kostendegressionen bis auf etwa 500 €/kW elektrischer Leistung für alle untersuchten Power-to-Gas Technologien bis zum Jahr 2050. Die meisten der untersuchten Projekte befinden sich derzeit noch in Mitteleuropa mit Deutschland, Dänemark und der Schweiz als wichtigste Ursprungsländer. In Kanada und den USA gewinnt die Technologie zunehmend an Bedeutung. Derzeit sind weltweit Power-to-Gas-Anlagen mit einer elektrischen Gesamtleisung von etwa 39 MW am Netz. Jeweils etwa die Hälfte der Projekte gewinnt Wasserstoff als Produkt, die anderen verfolgen die Erzeugung von Methan. Die Methanisierung gewinnt demzufolge mit zunehmender Anlagenleistung an Bedeutung. Sie ermöglicht Sektorkopplung und Langzeitenergiespeicherung unter Ausnutzung vorhandener Infrastruktur, Übertragungskapazitäten und Import-/Exportmöglichkeiten.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die techno-ökonomischen Möglichkeiten zur CO_2-Methanisierung (Teil II, Seite 15 ff.) auf biologischem oder chemisch-katalytischem Weg analysiert. Dabei wird auf unterschiedliche Prozess- und Reaktorkonzepte eingegangen.

Es folgt eine detailliertere Beschreibung der biotechnologischen Vorgänge bei der biologischen Methanisierung im Rieselbett-Reaktor. Nach Auslegungsgrundlagen werden taxonomische, wachstums-, lebensraum- und stoffwechselspezifische Eigenschaften der beteiligten Mikroorganismen, der Archaeen, vorgestellt.

Da besonders für die hier bearbeitete Anwendung im Rieselbettreaktor von Belang, wird weiterhin auf die Bildung von Biofilmen durch Archaeen in solchen Systemen eingegangen. In der Fachliteratur bestand keine einheitliche Terminologie und Berechnungsmethodik für Prozessparameter zur biologischen Methanisierung. Deshalb wird ein Ansatz zur Vereinheitlichung vorgestellt, welcher auch als Entwurf für die neue Richtlinie VDI4635 genutzt wurde. Nach diesem Ansatz zur Vereinheitlichung werden im Anschluss 22 Publikationen zur Methanisierung im Rieselbettreaktor ausgewertet und verglichen. Hieraus werden dann Verbesserungsansätze für Konstruktion und Prozessentwicklung wie auch für die Prozessführung abgeleitet.

Teil III (Seite 81 ff.) beschreibt zwei Versuchsreihen zur Prozessoptimierung: erstens hydrodynamische Versuche zur Auswahl einer optimal geeigneten Packung. Ziel war es, den Flüssigphasenanteil in der Packung bei niedrigen Gasgeschwindigkeiten wie sie bei der biologischen Methanisierung zunächst auftreten und damit den Stofftransport zu maximieren.

Zweitens werden systematische mikrobiologische Versuche beschrieben, die eine Vorauswahl 14 unterschiedlicher Packungsmaterialien und 12 verschiedener Archaeenstämme auf Einflüsse hinsichtlich Methanbildungsraten, Toxizität und Aufwuchsverhalten untersuchten. Die Materialvorauswahl wurde in enger Abstimmung zwischen hydrodynamischen und biologischen Experimenten vorgenommen. Aus den kombinierten Ergebnissen beider Versuchsreihen konnten hinsichtlich Methanbildung und Aufwuchsverhalten vielversprechende Material-Mikroorganismen-Kombinationen mit Archaeen in Reinkultur für weitere Versuche abgeleitet werden.

Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Versuche und Erkenntnisse wird in Teil IV (Seite 123 ff.) ein verbessertes Prozess- und Reaktordesign mit angepasster Mikrobiologie in Reinkultur zur CO_2-Methanisierung vorgestellt: der ORBIT-Prozess. Es folgt die Darlegung der technischen Details des Prozesses. Gründe für die Wahl der Optimierungsmaßnahmen und ihrer Umsetzung werden beschrieben. In einer Risiko- und Kostenanalyse wird im Anhang die Praxistauglichkeit des Prozesses erörtert und weitere Verbesserungsmöglichkeiten werden dargelegt.

Die Arbeit schließt ab mit der Beschreibung erster Erfahrungen aus dem Betrieb an einer realisierten ORBIT-Anlage im Technikumsmaßstab und dem Vergleich ihrer Performance im Verhältnis zu bekannten Werten aus der Literatur.