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

Dissertation

Martin Thema

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

Prozessoptimierung zur biologischen CO_2-Methanisierung im Rieselbettreaktor für Power-to-Gas-Anwendungen: der ORBIT-Prozess

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Martin Jiří Thema

aus Dachau

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Tag der mündlichen Prüfung: 10.11.2020

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl
(FAU Erlangen-Nürnberg)

Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner
(OTH Regensburg)

Prof. Dr. Kathrin Castiglione
(FAU Erlangen-Nürnberg)

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

Es ist doch eine sehr abendländische Vorstellung, dass der technische Fortschritt eine historische Zwangsläufigkeit ist und universale Geltung besitzt.

Francis Noguère

Originalität – Heute, beklagte sich Herr K., gibt es Unzählige, die sich öffentlich rühmen, ganz allein große Bücher verfassen zu können, und dies wird allgemein gebilligt. Der chinesische Philosoph Schuang Dsi verfasste noch im Mannesalter ein Buch von hunderttausend Wörtern, das zu neun Zehnteln aus Zitaten bestand. Solche Bücher können bei uns nicht mehr geschrieben werden, da der Geist fehlt. Infolgedessen werden Gedanken nur in eigener Werkstatt hergestellt, indem sich der faul vorkommt, der nicht genug davon fertigbringt. Freilich gibt es dann auch keinen Gedanken, der übernommen werden, und auch keine Formulierung eines Gedankens, der zitiert werden könnte. Wie wenig brauchen diese alle zu ihrer Tätigkeit! Ein Federhalter und etwas Papier ist das einzige, was sie vorzeigen können! Und ohne jede Hilfe, nur mit dem kümmerlichen Material, das ein einzelner auf seinen Armen herbeischaffen kann, errichten sie ihre Hütten! Größere Gebäude kennen sie nicht, als solche, die ein einziger zu bauen imstande ist!

Bertolt Brecht, Kalendergeschichten, Geschichten vom Herrn Keuner

Abstract

This thesis identifies Power-to-Gas in general and biological CO_2-methanation in trickle-bed reactors in particular as promising energy storage and sector coupling technology ready for application but with further optimization potential.

It reviews the global status and development of Power-to-Gas technology as to be of exponentially growing importance in energy systems changing towards renewable power supply and analyzes optimization and standardization potential for biological CO_2-methanation in trickle-bed reactors deriving an improved methanation process.

Process development and experiments on hydrodynamical and biological improvement of such a setup were performed, leading to an optimized combination of a packing and microorganisms in pure culture embedded in the new ORBIT-process. First experimental results give evidence of successful application of different optimization approaches implemented in a technical center scale setup.

Die vorliegende Arbeit analysiert Status und Entwicklung der Power-to-Gas-Technologien Wasserelektrolyse und CO_2-Methanisierung hinsichtlich Kosten, technischer Parameter und energiepolitischer Stellung in den wichtigsten Einsatzländern. So konnte ein exponentieller Trend in zugebauter Anlagenleistung sowie deutliche Investitionskostendegressionen für alle untersuchten Technologien abgeleitet werden.

Die Arbeit entwickelt Optimierungs- und Standardisierungsansätze für die biologische CO_2-Methanisierung im Rieselbett-Reaktor, welche als eine der vielversprechenden Power-to-Gas-Anwendungen identifiziert wird. Mit Versuchen zur Verbesserung der hydrodynamischen Bedingungen im Reaktor sowie zu einer optimierten Verbindung aus Packungselementen und Mikroorganismen in Reinkultur wird daraus der neue ORBIT-Prozess abgeleitet. Erste Versuchsergebnisse aus einer realisierten Anlage im Technikumsmaßstab deuten hin auf die erfolgreiche Umsetzung der identifizierten Optimierungsansätze.

Contents

Acknowledgements

Abbreviations, symbols and units

List of figures

List of tables

Preface

Summary I

Zusammenfassung III

Motivation V

Power-to-Gas: context and concept overview XIII

Leading questions XIX

I Power-to-gas - a global review 1

1 Power-to-gas politics status quo 3

2 Results from a review on electrolysis and CO_2-methanation 9

II Methanation of carbon dioxide for Power-to-Gas 13

3 Biological and chemical methanation of carbon dioxide 15
3.1 Thermochemical CO_2-methanation 15
3.2 Biological CO_2-methanation 21
3.2.1 Biological CO_2-methanation in separate reactors 21
3.2.2 Biological underground methanation 24
3.2.3 In-situ methanation 24
3.3 Comparison of biological and chemical CO_2-methanation 25

4 Trickle-bed reactors for biomethanation 29
4.1 Modelling with reactor parameters 29
4.2 Gas solubility and mass transfer on phase interfaces: k_La-value 34

5 Microbiology in a Power-to-Gas context **39**
5.1 Archaea – microbial extremists . . . 39
5.2 Metabolism of hydrogenotrophic methanogenic archaea . . . 41
5.3 Growth of microorganisms . . . 44
5.3.1 Planktonic growth . . . 44
5.3.2 Growth on surfaces: biofilms . . . 45

6 Approach for a standardized nomenclature in biological CO_2-methanation **49**
6.1 System boundaries for biological CO_2-methanation . . . 49
6.2 System parameters and characteristic variables . . . 52
6.3 Performance parameters . . . 54
6.4 Microbiological parameters . . . 58

7 Review on biological CO_2-methanation in trickle-bed reactors **59**
7.1 Projects overview . . . 59
7.2 Evaluation . . . 65
7.3 Engineering optimization potential . . . 71
7.4 Operation optimization potential . . . 75

III Experiments: Packing optimization and organism selection **79**

8 Hydrodynamic studies on different packings **81**
8.1 Material and methods . . . 81
8.1.1 Experimental setup . . . 81
8.1.2 Design of experiments . . . 82
8.1.3 Implementation . . . 87
8.2 Theory and calculation . . . 88
8.3 Results . . . 93
8.3.1 Experimental runs . . . 93
8.3.2 Analysis of variance . . . 99
8.3.3 Main effects and interdependences . . . 100
8.4 Discussion . . . 101

9 Archaeal growth on packing material **107**
9.1 Organism preselection criteria . . . 107
9.2 Material and methods . . . 108
9.2.1 Organism preselection . . . 108
9.2.2 Toxicity and adherence studies . . . 108
9.2.3 Robustness of organisms . . . 109
9.3 Results . . . 110
9.3.1 Toxicity and adherence studies . . . 110
9.3.2 Robustness of organisms . . . 113
9.4 Ranking from a biological perspective . . . 114
9.5 Discussion . . . 115

10 Conclusion: improved organism-packing-combination **117**

IV The ORBIT-Process: an improved reactor and system design 121

11 Implemented optimization approaches 123

12 Process implementation 127
12.1 Functional modules . . . 133
12.1.1 Module 1: Gas supply . . . 133
12.1.2 Module 2: Gas supply receiver tanks . . . 133
12.1.3 Module 3: Receiver tanks and substratum feeding . . . 133
12.1.4 Module 4: Gas distribution reactor . . . 136
12.1.5 Module 5: Medium recirculation, effluent and liquid sampling . . . 136
12.1.6 Module 6: Reactor . . . 136
12.1.7 Module 7: Product gasometry and deflation . . . 140
12.1.8 Module 8: Product distribution and feed-in . . . 140
12.1.9 Module 9: Total/residual/remaining . . . 142
12.2 Process media . . . 143
12.2.1 Feed gases . . . 143
12.2.2 Sodium sulfide as reducing agent and Resazurin . . . 143
12.2.3 Nutrient solution for cell cultivation . . . 143

13 First experiences with the ORBIT-system at test site Regensburg 147
13.1 Initial startup . . . 147
13.2 Plant operation . . . 150

V Conclusion and outlook 159

Literature 164

Appendix 195

A Power-to-Gas: electrolysis and CO_2-methanation status review 195
A.1 Methods . . . 196
A.1.1 Electrolysis and CO_2-methanation cost development – status quo and projection . . . 196
A.1.2 Power-to-Gas project database . . . 196
A.2 Results and discussion . . . 205
A.2.1 Cost development for electrolysis and CO_2-methanation between the years 2000 and 2050 . . . 205
A.2.2 Power-to-Gas projects: development and projection . . . 206

B ORBIT – Risk analysis 213

C ORBIT – Cost evaluation 215