Membrane Distillation - a Thermodynamic, Technological and Economic Analysis

Dissertation

submitted to the

Department of Mechanical and Process Engineering

of the

University of Kaiserslautern, Germany

for the attainment of the academic degree of

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

by

Dipl.-Ing. Daniel Winter

born in Filderstadt, Germany

2014

Research performed at the

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems

Freiburg im Breisgau, Germany

Dissertation for the attainment of the academic degree of Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.), approved by the Department of Mechanical and Process Engineering of the University of Kaiserslautern, Germany.

Date of examination:	April 24th, 2015
Dean:	Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler Department of Mechanical and Process Engineering University of Kaiserslautern, Germany
First supervisor:	Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger Institute for Mechanical Process Engineering University of Kaiserslautern, Germany
Second supervisor:	Prof. Dr. rer. nat. Volker Wittwer University of Freiburg, Germany Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Daniel Winter

Membrane Distillation

A Thermodynamic, Technological and Economic Analysis

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015
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 978-3-8440-3706-7
ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Global desalination capacity has increased during the past decades to alleviate water scarcity in regions with a mismatch between water availability and demand. The recent desalination market relies almost exclusively on non-sustainable, industrial-scale processes which do not provide a solution to prevent water scarcity in rural areas. The development of small-scale, self-sufficient and environmentally friendly desalination systems is considered to be one of the key challenges to sustainably overcome water scarcity.
Thermally driven Membrane Distillation (MD) has been identified as a promising approach for decentralised desalination. However, MD has not yet reached successful commercialisation, as it still requires scientific research in the fields of material, module and system development. High potential for improvement is associated with adapted membrane module design meeting custom project requirements. Comprehensive MD design methods, tools and universal design suggestions are not yet available.

This thesis presents comprehensive methods for MD process and module evaluation which may also be applied for techno-economic module and system optimisation based on arbitrary optimisation criteria. The methods refer to the context of desalination, but their general validity also allows application to related MD separation problems.
The derivation of the presented method is based on extensive experimental and numerical analysis of the fundamental MD phenomenology in coupled heat and mass transfer. The approach includes a comparative discussion on different MD process configurations, known as Direct Contact Membrane Distillation (DCMD), Permeate Gap Membrane Distillation (PGMD) and Air Gap Membrane Distillation (AGMD). The experimental equipment involves a lab test cell with a membrane surface of $150 \times 250\,\mathrm{mm}^2$. The role of the key material properties for channel spacers, membranes, backing structures and gap spacers is quantified and discussed. Furthermore, the process sensitivity to operational parameters such as temperature, flow rate, salinity and state of deaeration is analysed.
The results are then transferred from the level of fundamental process phenomenology to the scale of application, considering full-scale module flow channels. The performance of the MD modules is characterised and discussed on the basis of key performance parameters such as output capacity, flux, thermal efficiency and thermal as well as electrical energy consumption. In order to validate the numerical models, different DCMD, PGMD and AGMD module prototypes with membrane surface areas of 5 to $15\,\mathrm{m}^2$ were fabricated and characterised. Theoretical and experimental studies specifically address the strongly interlinked process sensitivities to MD concept, channel design and operational conditions. Purely theoretical studies provide suggestions on membrane selection and the role of potential material improvements. Wide-range parametric field studies demonstrate the fundamental thermodynamic limitations imposed for the different MD processes.
The technological discussion of MD modules is followed by an economic evaluation of the different MD concepts in the context of small-scale desalination applications. A comprehensive cost model

is suggested for the estimation of water unit costs, to be used as an integral quantitative measure for module and system comparison and as an optimisation criterion. The implementation of a generic parameter optimisation program allows the derivation of adapted module design specifications by performing automated iterative techno-economic optimisation, performed for selected scenarios as examples. A comparative presentation of the results indicates the suitability of the different module concepts, the expected key cost positions and economic feasibility.

Kurzfassung

Die weltweit installierte Entsalzungskapazität wurde in den letzten Jahrzehnten massiv ausgebaut, um Wassermangel in betroffenen Regionen zu begegnen. Derzeit werden fast ausschließlich Entsalzungsanlagen im industriellen Maßstab eingesetzt, welche jedoch kein Lösungsansatz für den ländlichen Raum darstellen. Daher wird die Entwicklung von kleinen, dezentralen Entsalzungssystemen als besonders wichtige Herausforderung auf dem Weg zu einer flächendeckenden Trinkwasserversorgung angesehen.
Der thermisch betriebene Membrandestillationsprozess (MD) gilt hierfür als aussichtsreicher Technologieansatz. Dennoch konnte sich die MD bis heute nicht kommerziell durchsetzen und weiterhin ist Entwicklungsarbeit in den Bereichen Materialien, Module und System zu leisten. Ein besonders hohes Verbesserungspotential wird der anwendungsorientierten Entwicklung von Membranmodulen zugeschrieben. Umfassende Gestaltungsmethoden, -werkzeuge und -richtlinien sind hierfür bisher nicht verfügbar.

In dieser Arbeit werden Methoden zur MD Prozess- und Modulbewertung erarbeitet, welche schließlich zur techno-ökonomischen Modul- und Systemoptimierung auf Basis verschiedener Optimierungskriterien angewendet werden können. Zwar werden die Methoden hier im Kontext der Entsalzung dargestellt, doch erlaubt deren Allgemeingültigkeit grundsätzlich auch Anwendung bei verwandten MD Separationsproblemen.
Die dargestellten Methoden beruhen auf umfangreichen experimentellen und theoretischen Untersuchungen zum gekoppelten Wärme- und Stofftransport in der MD. Eine zentrales Element der Arbeit stellt die vergleichende Betrachtung von Direkt Kontakt MD (DCMD), Permeat Spalt MD (PGMD) und Luft Spalt MD (AGMD) dar. Die Experimente werden mit einer Testzelle durchgeführt, welche eine Membranfläche von $15 \times 25\,\mathrm{cm}^2$ bereitstellt. Die Einflüsse der wichtigsten Materialparameter zu Kanal-Stützgeweben, Membranen, Trägerstrukturen und Spaltgrößen werden quantifiziert und diskutiert. Zudem wird eine vergleichende Sensitivitätsanalyse zum Einfluss von Betriebsbedingungen wie Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Salzgehalt und Entgasungszustand durchgeführt.
Die Ergebnisse werden weiterführend auf Strömungskanäle im Anwendungsmaßstab überführt. Die Leistungsfähigkeit der MD-Module wird anhand von allgemeingültigen Bewertungsgrößen evaluiert, welche Produktdurchsatz, Flux, thermische Effizienz und sowohl thermischen als auch elektrischen Energiebedarf beschreiben. Zur Modellvalidierung werden unterschiedliche DCMD,

PGMD und AGMD Module mit Membranflächen von 5 bis 15 m^2 hergestellt und charakterisiert. Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen adressieren insbesondere die gekoppelten Sensitivitäten bezüglich MD Konzept, Kanalgestaltung und Betriebsbedingungen. Mittels Modellrechnungen werden Empfehlungen für eine angepasste Materialauswahl ausgearbeitet und das Potential möglicher Materialverbesserungen ermittelt. Die thermodynamischen Grenzen der verschiedenen MD Konfigurationen werden durch Ergebnisse umfangreicher Parameterfeldstudien deutlich.

Der technologische Teil der Arbeit wird ergänzt durch eine wirtschaftliche Bewertung der MD Verfahren am Beispiel kleiner Entsalzungsanlagen. Ein Kostenmodell zur Abschätzung der Wassergestehungskosten wird vorgestellt, welche dann als Vergleichsgröße zur Modul- und Systembewertung sowie auch als Optimierungskriterium dienen. Die Implementierung eines Parameteroptimierers erlaubt eine automatisierte, iterative techno-ökonomische Optimierung von Modulgestaltungsgrößen, welche exemplarisch für ausgewählte Szenarien durchgeführt wird. Die entsprechenden Ergebnisse geben Hinweise auf die Eignung der verschiedenen MD Verfahrensvarianten, die Verteilung der Kosten sowie die Wirtschaftlichkeit.

Table of Contents

1 Introduction **1**

1.1 Motivation . . . 1

1.2 Outline of Thesis . . . 3

1.2.1 Challenges and Objectives . . . 3

1.2.2 Structure and Scientific Approach . . . 5

2 Membrane Distillation **7**

2.1 Basic Concept . . . 7

2.2 Process Configurations . . . 9

2.2.1 Direct Contact Membrane Distillation . . . 10

2.2.2 Permeate Gap Membrane Distillation . . . 11

2.2.3 Air Gap Membrane Distillation . . . 12

2.2.4 Sweeping Gas Membrane Distillation . . . 14

2.2.5 Vacuum Membrane Distillation . . . 14

2.2.6 Osmotic Membrane Distillation . . . 16

2.3 Heat Recovery Strategies . . . 17

2.3.1 Sensible Heat Recovery . . . 18

2.3.2 Latent Heat Recovery . . . 18

2.4 Membranes . . . 19

2.5 Membrane Modules . . . 24

2.5.1 Module Design Concepts . . . 25

2.5.2 Performance Parameters for Membrane Distillation Modules . . . 29

2.5.3 Commercial Membrane Distillation Module Developments . . . 29

2.6 Advances in Membrane Distillation . . . 32

2.7 Potential Fields of Application . . . 33

3 Process Analysis **37**

3.1 Fundamentals and Model Development . . . 37

3.1.1 Transmembrane Mass Transfer . . . 38

3.1.2 Transmembrane Heat Transfer . . . 46

3.1.3 Heat Transfer in the Hydraulic Boundary Layers . . . 49

3.1.4 Mass Transfer in the Hydraulic Boundary Layers . . . 53

3.1.5 Integrated Modelling of Membranes on Backing Structures . . . 55

3.2 Node Models for Theoretical Process Evaluation . . . 61

3.2.1 Direct Contact Channel Configuration 62
3.2.2 Permeate Gap Channel Configuration 63
3.2.3 Air Gap Channel Configuration 66
3.3 Experimental Approach 68
3.3.1 Laboratory Cell Design and Test Rig 68
3.3.2 Testing Conditions and Evaluation of Performance Parameters 70
3.3.3 Uncertainty of Measurement and Error Propagation 71
3.3.4 Materials for Experimental Evaluation 74
3.4 Results and Model Validation 76
3.4.1 Spacers - Enhanced Heat Transfer in the Flow Channels 77
3.4.2 Membranes - An Analysis Based on Different Membrane Structures 81
3.4.3 Laminates - Membranes on Backing Structures 96
3.4.4 Extended Channel Configurations - The Gap Variants 104
3.4.5 A Comparative Evaluation of Different Process Configurations 116

4 Module Analysis 129
4.1 Multi-Node Models for Theoretical Module Evaluation 129
4.1.1 Direct Contact Module Configuration 131
4.1.2 Permeate Gap Module Configuration 135
4.1.3 Air Gap Module Configuration 138
4.1.4 Evaluation of the Module Performance Parameters 139
4.1.5 Simulation Settings 144
4.2 Experimental Approach 146
4.2.1 Test Rig for Module Characterisation 146
4.2.2 Testing Conditions and Evaluation of Performance Parameters 148
4.2.3 Uncertainty of Measurement and Error Propagation 150
4.2.4 Full-Scale Module Prototypes for Experimental Evaluation 153
4.3 Results and Model Validation 156
4.3.1 General Aspects of Membrane Distillation Module Operation 156
4.3.2 Specific Aspects of Direct Contact Module Operation 178
4.3.3 Specific Aspects of Permeate Gap Module Operation 183
4.3.4 Specific Aspects of Air Gap Module Operation 187
4.3.5 A Comparative Evaluation of Different Module Configurations 196
4.3.6 Selection of an Optimal Membrane 204
4.3.7 Performance Potential using Advanced Materials 211
4.3.8 Parametric Field Studies 219

5 Economic Evaluation 229
5.1 Cost Model Development 229
5.1.1 Investment Costs 230
5.1.2 Operational Costs 237
5.2 Results and Discussion 243

5.2.1 An Analysis of the Investment Costs 243
5.2.2 A Sensitivity Analysis on the Unit Costs of Water 244
5.2.3 Design of Waste-Heat Driven Plants 249
5.2.4 Techno-Economic Module Optimisation 250

6 Conclusion **265**
6.1 Summary 265
6.2 Recommendations for Further Research 275

Appendix **277**
A Commercial Desalination Technologies 277
B Physical Properties of Salt Water 284
C Ionic Composition of Salt Water 287
D Spacers - Enhanced Heat Transfer in the Flow Channels 288
E Laminates - Membranes on Backing Structures 289
F Uncertainty of Measurement and Error Propagation 290
G General Aspects of Membrane Distillation Module Operation 292
H Specific Aspects of Air Gap Module Operation 293
I Selection of an Optimal Membrane 294
J Parametric Field Studies 296

Nomenclature **298**

Literature **305**
Publications 305
Bibliography 307

Curriculum Vitae **323**

Acknowledgements **325**