

**New Material Findings and Pressure Retention
Concepts for an Efficient and Procedurally Safe Use
of Deep Geothermal Brine**

*Neue Materialerkenntnisse und Druckhaltekonzepte für
eine effiziente und prozesstechnisch sichere Nutzung
tiefen Thermalwassers*

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

zur
Erlangung des Doktorgrades
DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

Peter Iberl
aus Amberg

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

Tag der mündlichen Prüfung: 26.04.2016

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr. Peter Greil

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und
Anlagentechnik

Band 29

Peter Iberl

**New Material Findings and Pressure Retention
Concepts for an Efficient and Procedurally Safe Use
of Deep Geothermal Brine**

Neue Materialerkenntnisse und Druckhaltekonzepte
für eine effiziente und prozesstechnisch sichere Nutzung
tiefen Thermalwassers

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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 978-3-8440-4616-8

ISSN 1614-3906

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

Für meine Eltern und Konni

Preface

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von 2011 bis 2015, im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Viele Personen haben dazu beigetragen, dass ich meine Promotion erfolgreich abschließen konnte. Ihnen möchte ich hiermit meinen herzlichsten Dank aussprechen:

Zuallererst möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker danken, dass er mir die Möglichkeit gab, an seinem Lehrstuhl zu arbeiten und mich an seinem Lehrstuhl aufnahm, obwohl ich nicht den geraden Weg zur Promotion genommen habe. Danke für die Möglichkeit frei und eigenverantwortlich zu arbeiten und gleichzeitig danke für das Einbringen von fruchtbaren, fachlichen Ideen.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens danken und die damit verbundenen fachlichen Diskussionen. Zudem gilt mein Dank dem Vorsitzenden der Prüfungskommission, Prof. Dr.-Ing. Stefan Will, und der Drittprüferin, Prof. Dr. Sannakaisa Virtanen.

Thorsten Weimann und Andreas Rauch von der Firma gec-co möchte ich für die allzeit gute Zusammenarbeit danken.

Meinem Gruppenleiter Dr. Nicolas Alt danke ich für die fachliche Betreuung und die Hilfe bei der Planung meiner Versuchsanlagen.

Allen Mitarbeitern am Lehrstuhl danke ich für die gute Zusammenarbeit, speziell Ines Wischniewski für die vielen kleinen und großen organisatorischen Aufgaben, die sie erledigte und für das Redigieren der Arbeit. Herrn Dr. Depmeier gilt mein Dank, weil er immer wieder eine Geldquelle aufgetan hat, um das Projekt und meine Arbeit zu finanzieren.

Oliver Weisert möchte ich für die schnelle Fertigung von Bauteilen und für die sauren Pommes in der Werkstatt danken und Stefan Grünwald dafür, dass er meine Studentinnen beim Aufbau der Anlagen tatkräftig unterstützte.

Meine Kollegen am Lehrstuhl haben maßgeblich dazu beigetragen, dass ich eine sehr glückliche Zeit im fränkischen Exil hatte. Danke, dass ihr mich zur rechten Zeit

vom Arbeiten abgehalten und mir die Zeit so angenehm gestaltet habt. Besonders möchte ich meinem langjährigen Zimmergenossen Bernhard Herrmann danken, der mir neue Sphären der Internetunterhaltung eröffnet hat.

Meinen Abschlussarbeitern Pavel Krasnikov, Tamara Söhnlein, Maren Volkert, Fabian Kohlberg und Stephan Forman möchte ich für ihre Beiträge danken, die maßgeblich zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich danke meinen lieben Mitbewohnern und Sportsfreunden in der Dreikönigstraße.

Mein Dank gilt außerdem meiner Familie und im Speziellen meinen Eltern, die mich bei meinem beruflichen Werdegang nie einschränkten und mich in allen Lebenslagen unterstützten.

Zuletzt möchte ich meiner Freundin Konstanze Faßbinder danken, dass sie die entbehrungsreichen Jahre der Fernbeziehung auf sich nahm und mich in meiner Entscheidung unterstützte, nach Erlangen zu gehen. Berti rockt!

München, Juni 2016

Peter Iberl

Contents

1	Introduction.....	1
1.1	Sources and geographic distribution of geothermal energy.....	2
1.2	Use of geothermal energy in high enthalpy zones	4
1.3	Use of geothermal energy in Central Europe	5
1.4	Challenges by using geothermal brine	9
1.4.1	Corrosion.....	10
1.4.2	Scaling and degassing.....	10
1.5	Technical approaches against the negative consequences when using geothermal brine	11
1.5.1	Material engineering measures.....	12
1.5.1.1	Metallic materials.....	12
1.5.1.2	Polymer materials	12
1.5.2	Process engineering measures	13
1.5.2.1	Limiting the cooling of the brine.....	13
1.5.2.2	Pressure retention.....	13
1.5.3	Other measures.....	15
2	Literature review of brine composition in Central Europe	17
2.1	North German – Polish Basin	17
2.2	Upper Rhine Graben	21
2.3	Molasse Basin	21
3	Evaluation of corrosion of metallic materials based on a literature review	25
3.1	Properties of metallic materials	25
3.1.1	Carbon steels	25
3.1.2	Stainless steels	26
3.1.2.1	Ferritic stainless steels	27
3.1.2.2	Austenitic stainless steels.....	27
3.1.2.3	Duplex stainless steels.....	28
3.1.3	Nickel-based alloys.....	29
3.1.4	Titanium materials	30
3.2	Corrosion caused by the corrosive ingredients of geothermal brines ...	30
3.2.1	Types of corrosion.....	30
3.2.2	Summary: Water ingredients and their corrosive effects	35
3.2.3	Influence of scaling on corrosion.....	36
3.3	Corrosion influenced by mechanical stress and flow velocity	37

3.3.1	Types of corrosion influenced by mechanical stress	37
3.3.2	Types of corrosion influenced by tribological stress	38
3.3.3	Material resistance against corrosion influenced by tribological stress	39
3.4	Corrosion resistance in the geothermal regions of Central Europe	39
3.4.1	North German – Polish Basin (NGPB)	40
3.4.2	Upper Rhine Graben (URG)	41
3.4.3	Molasse Basin (MB)	42
4	Investigation of the behavior of polymer coatings under geothermal conditions	45
4.1	Deposit formation	46
4.1.1	Process of deposit formation	46
4.1.2	Influencing factors	49
4.1.2.1	Physiochemical parameters	49
4.1.2.2	Surface and material parameters	55
4.2	Material and methods	58
4.2.1	Characterization of materials	58
4.2.1.1	Polytetrafluoroethylene (PTFE)	59
4.2.1.2	Perfluoropropylvinylether (PFA - Perfluoroalkoxy alkane)	60
4.2.1.3	Polyetheretherketone (PEEK)	61
4.2.1.4	Epoxy	62
4.2.2	Measurement methods	62
4.2.2.1	Surface free energy	62
4.2.2.2	Surface roughness	65
4.2.3	Experiment under geothermal conditions	65
4.2.3.1	Experimental setup	66
4.2.3.2	Experiment preparation, procedure and evaluation	69
4.3	Results and Discussion	73
4.3.1	Surface free energy	73
4.3.2	Surface roughness	75
4.3.3	Experiments under geothermal conditions	75
4.3.4	Behavior of the coatings in dependance on their surface properties	83

5	Development of a controllable downhole pressure retention valve for the injection well	87
5.1	Boundary conditions.....	87
5.1.1	Pressure depending precipitation reaction.....	87
5.1.2	Pressure level in the thermal water cycle.....	89
5.2	Valve design.....	96
5.2.1	Analytic design method	99
5.2.1.1	Analytic design method for the valve with helical channel	100
5.2.1.2	Analytic design method for the valve with longitudinal channels....	104
5.2.2	Adjustability and control	107
5.2.2.1	Dimensioning the actuating rod	108
5.2.3	Preventing cavitation and degassing	112
5.2.4	Design and material	113
5.2.5	Installation	114
5.3	Material und methods	116
5.3.1	Experimental analysis.....	116
5.3.1.1	Experimental setup	116
5.3.1.2	Characteristic diagram and tension analysis.....	121
5.3.1.3	Cavitation analysis.....	122
5.3.1.4	Moment analysis	125
5.3.2	CFD analysis	126
5.3.2.1	The basics of turbulence modelling in computational fluid dynamics.....	126
5.3.2.2	Procedure for the CFD simulation of the valves.....	128
5.4	Results.....	133
5.4.1	Verification of pressure drop and flow velocity calculation	133
5.4.1.1	Valve with helical channel – Laboratory scale	133
5.4.1.2	Valve with helical channel – Plant scale.....	138
5.4.1.3	Valve with longitudinal channels – Laboratory scale	140
5.4.1.4	Valve with longitudinal channels – Plant scale	143
5.4.2	Acting forces and moments.....	146
5.4.2.1	Drag force	146
5.4.2.2	Moment	148
5.4.3	Cavitation and degassing behavior	151
5.4.3.1	Valve with helical channel	151

5.4.3.2	Valve with longitudinal channels	154
5.5	Conclusion	157
6	First glimpse on turbine designs concerning their suitability as pressure retention system	159
6.1	Basics of water turbines.....	159
6.1.1	Axial impulse turbine.....	159
6.1.2	Turbine with helical channels (THC)	164
6.2	Material and methods	166
6.2.1	Turbine designs	167
6.2.1.1	Turbine with helical circumferential channels	167
6.2.1.2	Axial impulse turbine.....	168
6.2.2	CFD-Simulation settings	169
6.3	Results.....	170
6.3.1	Comparison of operating behavior	170
6.3.2	Considerations to the pressure retention potential of the turbines	173
6.4	Conclusion	173
7	Economic and energetic effectiveness.....	175
8	Discussion and Conclusion	179
8.1	Future tasks	182
9	Index of symbols and abbreviations.....	185
9.1	Index of symbols.....	185
9.2	Index of abbreviations	189
10	Index of references	193
11	Appendix	205
11.1	Evaluation of corrosion resistance	205
11.2	Numerical examination of the contact angles.....	212
11.3	Numerical examination of the surface free energy	212
11.4	Meshing settings for the CFD simulation of the valves.....	213
11.5	Model settings for the CFD simulations of the valves	215
11.6	Meshing settings for the CFD simulation of the turbine.....	217
11.7	Model settings for the CFD simulations of the turbine.....	218