

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, Prof. Dr.-Ing. Stefan Will

Schriftenreihe Heft 2021-3

MARCO PRENZEL

Scale-up of horizontal packed bed thermal energy storage units: An in-depth experimental and numerical investigation

**Scale-up of horizontal packed bed thermal energy storage units:
An in-depth experimental and numerical investigation**

**Scale-up von horizontalen thermischen Schüttgutspeichern:
Eine experimentelle und numerische Detailuntersuchung**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.
vorgelegt von
Marco Prenzel
aus Fürth

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 11.01.2021

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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Will

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Band 3/2021

Marco Prenzel

**Scale-up of horizontal packed bed thermal energy
storage units: An in-depth experimental and
numerical investigation**

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., 2021

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 978-3-8440-7943-2

ISSN 2365-3957

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

Acknowledgements

I would like to express my deepest gratitude to my supervisor and first examiner Professor Stefan Will, as well as PD Dr. Lars Zigan for their continuous guidance, fruitful discussions and encouragement throughout my time as a doctoral student. My thanks extend to Professor Gerhard Schmitz, who acted as second examiner, the chair of the doctoral examination Professor Michael Wensing and the additional member of the examination committee Professor Martin März.

The dissertation was drafted at Siemens AG Corporate Technology. First and foremost, I thank my mentor Dr. Vladimir Danov for his ongoing support and for helping me to keep a cool head even in stressful times. I further appreciate the helpful feedback of my manager Dr. Jochen Schäfer, who also gave me the valuable opportunity to conduct research in an excellent and ever motivating working group. Special thanks go out to Klaus Dennerlein, Manfred Wohlfart and Roland Reichenbacher, who assisted me with all experimental challenges. I further thank Dr. Sebastian Thiem and my office-mate Oliver Walter for their invaluable contributions. The list of acknowledgements would go on forever, but I was told to keep this manuscript short. Thus, thank you to everyone who contributed to this work. You know who you are.

Further thanks go to Siemens Gamesa Renewable Energy, especially for providing me with valuable experimental data within the framework of the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy funded project Future Energy Solution - FES.

Last but not least, I thank my family for always believing in me and their unending positive attitude. Thanks are owed particularly to my girlfriend Yvonne, who was always by my side along the ups and downs of the past years. To my parents, thank you for your unconditional support and encouragement.

Kurzfassung

Großskalige Energiespeicherung wird als ein essenzieller Baustein für den Übergang zu nachhaltigen und belastbaren Energiesystemen angesehen. Thermische Energiespeicher sind eine zentrale Technologie in thermomechanischen Speichersystemen, welche eine standortunabhängige, umweltfreundliche und kostengünstige Speicherlösung darstellen können. Vorteilhafte thermische Energiespeicher müssen hohe Betriebstemperaturen und thermische Leistungsdichten aufweisen, sowie im industriellen Maßstab und bei niedrigen Kosten zur Verfügung stehen. Neuartige horizontale thermische Schüttgutspeicher, mit Luft als Wärmeträger und Natursteinen als Speichermedium, haben das Potenzial, die genannten Kriterien ganzheitlich zu erfüllen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung und Bewertung horizontaler thermischer Schüttgutspeicher. Zu diesem Zweck wurde ein effizientes thermo- fluiddynamisches Simulationsmodell entwickelt, welches die grundlegenden Masse- und Wärmetransportmechanismen im erforderlichen Detailgrad und bei kurzen Rechenzeiten abbildet. Im Besonderen musste der Einfluss des Auftriebseffektes auf das Strömungsverhalten des Wärmeträgers in das Modell integriert werden. Hierzu wurde zuerst ein hybrides 2D/3D Rechenetz entwickelt, das den Auftriebseffekt grundsätzlich abbilden kann. In einem zweiten Schritt wurde ein recheneffizientes Auftriebsmodell abgeleitet. Der empirische Ansatz basiert auf der Überlagerung von Strömungsprofilen induziert durch erzwungene und freie Konvektion.

Das Modell wurde durch Abgleich mit experimentellen Daten und strömungsmechanischen Simulationen (CFD) validiert. Der untersuchte Leistungsbereich erstreckte sich von $10 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis $200 \text{ MW}_{\text{th}}$. Thermische Wirkungsgrade, Ausnutzungsgrade und Druckverluste einer $10 \text{ kW}_{\text{th}}$ horizontalen Versuchsanlage konnten mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1.7 %, 5.4 % und 10.6 % berechnet werden. Der empirische Auftriebsansatz wurde durch Abgleich mit umfangreichen CFD Simulationen kalibriert. Auftriebsinduzierte vertikale Temperaturdifferenzen dienten hierfür als Referenzwert. Unter Verwendung des neuen Auftriebsmodells konnten vertikale Temperaturgefälle mit nur geringen Abweichungen zu CFD Simulationen berechnet werden. Durch einen Vergleich mit experimentellen Daten aus einem $700 \text{ kW}_{\text{th}}$ Demonstrator wurde die Validierung abgeschlossen. Das neue Modell bildete Temperaturen und Druckverlust mit nur geringfügig größeren Abweichungen als ein CFD-Modell ab, benötigte allerdings nur einen Bruchteil der Rechenzeit.

Anschließend wurde das Modell dazu verwendet, großskalige und kostenoptimierte horizontale thermische Schüttgutspeicher auszulegen. Die Optimierung basierte auf Design Gleichungen, welche die Leistungsparameter, in Abhängigkeit von vier neu eingeführten Speicherkoeffizienten, als analytische Funktionen wiedergeben. Die Speicher wurden anschließend in thermomechanische Speichersysteme integriert und durch eine Energie-System-Design-Simulation mit konkurrierenden Speichertechnologien verglichen. Anwendungsfall war die Stadt Hamburg unter Einhaltung eines CO_2 -Emissionsgrenzwertes. Mit rund $33 \text{ GWh}_{\text{th}}$ waren thermomechanische Energiespeicher integraler Bestandteil des kostenoptimalen Energiesystems.

Abstract

Grid energy storage is viewed as a key element in the transition to sustainable and reliable energy systems. So-called thermomechanical energy storage can be a site-independent, eco-friendly and low-cost large-scale energy storage solution. Thermal energy storage units are a core technology in such systems. Favorable thermal energy storage units display high operational temperatures and thermal power densities, while being available on a large-scale and at low cost. Novel horizontal packed bed thermal energy storage units, with air as heat transfer fluid and natural rocks as storage material, can potentially meet the discussed criteria in a comprehensive manner.

This work aims at investigating and evaluating this novel horizontal packed bed thermal energy storage technology. To this end, an efficient thermo-fluid dynamic simulation model was developed within the scope of this work. The model is capable of depicting all fundamental mass and heat transfer mechanisms at the required level of detail, while maintaining short simulation times. In particular, the influence of the buoyancy effect on the fluid flow distribution had to be incorporated. First, a hybrid 2D/3D control volume grid was implemented, which in principle can depict the buoyancy effect. Secondly, a computationally efficient buoyancy model was devised. The empirical buoyancy approach works on the superposition of forced and free convection induced velocity profiles.

The model was validated with experimental data and computational fluid dynamic (CFD) simulations in a rated thermal power range of 10 kW_{th} to 200 MW_{th}. Thermal efficiencies, capacity ratios and pressure drops of a 10 kW_{th} horizontal energy storage unit were predicted with 1.7 %, 5.4 % and 10.6 % average deviation, respectively. A calibration of the new buoyancy approach was conducted by comparison with comprehensive CFD simulations. Buoyancy induced top-down temperature differences inside the packed bed were applied as reference values for the adaption process. In its final version, the novel model displayed top-down temperature differences with only minor deviations to the CFD simulation results. A final comparison with experimental data from a 700 kW_{th} demonstrator concluded the validation process. The new model predicted temperatures and pressure drops with only marginally less accuracy than a CFD model, yet required only a fraction of the simulation time.

The model was further utilized to design cost-optimized large-scale horizontal packed bed thermal energy storage units. The optimization process was based on design equations that depict the key performance indicators as analytical functions of four newly defined storage coefficients. The cost-optimized horizontal packed bed storage units were first integrated into thermomechanical energy storage systems and then benchmarked against competing storage technologies by an energy system design simulation. The city of Hamburg, with a CO₂ emission threshold, functioned as the use case. Thermomechanical energy storage systems were integral part of the cost-optimized solution. Around 33 GWh_{th} of horizontal packed bed thermal energy storage were installed.

Table of contents

Acknowledgements	V
Kurzfassung	VI
Abstract.....	VII
Table of contents	IX
Nomenclature	XIII
1 Introduction.....	1
2 State of the art and basic theory	7
2.1 Thermal energy storage	7
2.1.1 Overview of sensible thermal energy storage technologies.....	10
2.1.2 Comparison of sensible thermal energy storage technologies	12
2.1.3 Overview of packed bed thermal energy storage test facilities	14
2.1.4 The case for horizontal packed bed thermal energy storage.....	17
2.2 Modeling of packed bed thermal energy storage	18
2.2.1 Modeling approaches	18
2.2.2 Model parameters.....	23
2.2.3 Review of numerical research.....	36
2.3 Objectives and methods of this work	40
3 Experimental setups	43
3.1 Lab-scale horizontal storage unit.....	43
3.1.1 Lab-scale plant description	43
3.1.2 Measuring instruments and measurement uncertainties	46
3.1.3 Overview of experiments and experimental procedure	47
3.1.4 Key performance indicators	49
3.1.5 Selected experimental data	51
3.2 Demo-scale horizontal storage unit	56

3.2.1	Demo-scale plant description.....	56
3.2.2	Experimental procedure of the demo-scale storage unit	56
4	CFD model development and validation	59
4.1	Setup of the CFD model.....	59
4.1.1	Mesh generation and quality.....	59
4.1.2	Numerical setup.....	60
4.2	CFD model validation	61
4.2.1	CFD error analysis.....	61
4.2.2	Comparison of the CFD model with experimental results of the demo-scale storage unit.....	64
4.3	CFD simulations of large-scale horizontal storage units	66
5	Advanced model.....	71
5.1	Setup of the advanced model.....	71
5.1.1	Basic setup and selection of the model parameters	71
5.1.2	Calculation grid.....	73
5.1.3	Discretization and boundary conditions.....	74
5.1.4	General solution algorithm	76
5.1.5	Inclusion of the buoyancy effect into the advanced model	78
5.2	Validation of the advanced model.....	79
5.2.1	Grid and time step independence	79
5.2.2	Comparison of the advanced model with experimental results of the lab-scale horizontal storage unit.....	82
5.2.3	Improvement and validation of the buoyancy approach	93
5.2.4	Validation with the demo-scale storage unit.....	96
6	Design of packed bed thermal energy storage.....	101
6.1	Development of design equations	101
6.1.1	Advanced model setup	102
6.1.2	Definition of storage coefficients	103
6.1.3	Derivation of design equations.....	104
6.1.4	Application of the design equations	110
6.2	Packed bed thermal energy storage design for a specific use case.....	112

6.2.1	Energy system design and use case.....	113
6.2.2	Integration of packed bed thermal energy storage units into thermomechanical energy storage systems	115
6.2.3	Cost of applied technologies.....	119
6.2.4	Energy system design results and discussion.....	123
7	Conclusion and outlook	127
	References	i
	Appendix.....	xix
A	Air physical properties	xix
B	Radial void fraction correlations.....	xxiii
C	Fluid-solid heat transfer coefficient	xxv
D	Fluid-wall heat transfer coefficient	xxx
E	Effective thermal conductivity of packed beds with stagnant fluid	xxxi
F	Physical properties of solid materials.....	xxxvi