





**Hydraulische Einbindung von Wärmespeichern  
bei der solarthermischen Prozesswärmebereitstellung  
am Beispiel der Galvanikindustrie**

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von  
Sebastian Schramm, M.Sc.Eng.  
geboren am 07.06.1979 in Aachen

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Krumm  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

Tag der mündlichen Prüfung: 17.05.2016



Berichte aus der Energietechnik

**Sebastian Schramm**

**Hydraulische Einbindung von Wärmespeichern  
bei der solarthermischen Prozesswärmebereitstellung  
am Beispiel der Galvanikindustrie**

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4780-6

ISSN 0945-0726

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Zentrum für Innovative Energiesysteme der Hochschule Düsseldorf. Für die abwechslungs- und lehrreiche Zeit am ZIES danke ich ganz besonders Prof. Mario Adam. Durch seine fachliche und persönliche Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen hat Mario mein Dissertationsvorhaben erst ermöglicht. Ich beende meine Zeit am ZIES mit einem lachenden und einem weinenden Auge.

Bei Prof. Wolfgang Krumm bedanke ich mich sehr herzlich für die Betreuung der Arbeit und die Anfertigung des Erstgutachtens. Prof. Robert Brandt und Prof. Thomas Seeger danke ich für die Übernahme ihrer Ämter im Prüfungsausschuss.

Großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am ZIES. Sie schafften die angenehme Atmosphäre während der Arbeit und anderer, weniger wissenschaftlicher Aktionen außerhalb des Hochschulbetriebs. Klaus, Jonas und Fabian haben u.a. dazu beigetragen, dass ich immer gerne in unser Büro gekommen bin.

Prof. Matthias Neef danke ich für meine Berücksichtigung bei unterschiedlichsten Tätigkeiten zur Unterstützung der Studierenden im Rahmen der Fachstudienberatung.

Dem Präsidium der Hochschule Düsseldorf gilt mein Dank für die finanzielle Unterstützung meines Promotionsvorhabens.

Hr. Brix, Hr. Stienemeier und Hr. Wolfgarten danke ich für die reibungslose Kooperation im Rahmen meiner Feldmessungen und die konstruktive Unterstützung beim Umbau der Solaranlage.

Meinem guten Freund Marcel gilt mein großer Dank, nicht nur für das Redigieren meiner Arbeit, sondern vielmehr für unsere regelmäßigen Treffen und den Gesprächen während unserer Spaziergänge.

Daniel danke ich dafür, dass er mit mir den Segelschein gemacht hat.

Christiane, Josef, Jan & Julia haben mich im Laufe meines Lebens mit ihrem jeweils eigenen Naturell sehr unterstützt und damit dazu beigetragen, dass ich heute diese Zeilen schreiben kann.

Dir, geliebte Marie, gilt mein unermesslicher Dank für deine Geduld und die Akzeptanz, dass meine Aufmerksamkeit während der letzten, für uns so wichtigen und intensiven Zeit oft bei meiner Diss anstatt bei unserem Alltag lag. Für deine Unterstützung. Für deine Spontanität. Für die Geburt unserer Tochter und genau die Art und Weise, wie Du unser großes Familienglück prägst und gestaltetest.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Zielsetzung und Methodik.....	5
<b>2 Thema der Arbeit im Kontext der Technologieentwicklung .....</b>	<b>6</b>
2.1 Bedeutung solarthermischer Wärmeerzeugung .....	6
2.1.1 Historische Entwicklungen.....	6
2.1.2 Heutige Marktsituation solarer Prozesswärme.....	9
2.2 Entwicklungen im Bereich der solaren Prozesswärme.....	11
2.2.1 Branchenstudien.....	13
2.2.2 Ausgewählte Pilotanlagen.....	14
2.2.3 Allgemeine Integrationskonzepte.....	16
2.3 Etablierte Integrationskonzepte im Gebäudesektor.....	20
2.3.1 Solaranlagen zur reinen Trinkwassererwärmung .....	21
2.3.2 Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung.....	22
2.3.3 Solare Nahwärmeanlagen .....	24
<b>3 Besonderheiten der Galvanikindustrie .....</b>	<b>27</b>
3.1 Überblick über die Galvano- und Oberflächentechnik.....	27
3.2 Analyse exemplarischer Galvanikunternehmen.....	30
3.2.1 Charakteristische Phasen einer Produktionswoche .....	32
3.2.2 Abstrahiertes Wärmelastprofil .....	35
3.2.3 Randbedingungen in der Galvanikindustrie für die solare Wärmebereitstellung.....	39
<b>4 Anlagenkonzepte für die Bereitstellung von solarer Prozesswärme ....</b>	<b>41</b>
4.1 Merkmale einer solaren Prozesswärmeanlage .....	41

4.1.1	Integrationsstelle im konventionellen Wärmeversorgungssystem .....	41
4.1.2	Hydraulische Einbindung von Speichern.....	48
4.2	Spezifisches Anlagenkonzept für die Galvanikindustrie .....	53
4.2.1	Wahl der Integrationsstelle .....	53
4.2.2	Speichereinbindung mit dynamischem Beladebereich .....	56
<b>5</b>	<b>Speicherkonzepte im Feldtest .....</b>	<b>59</b>
5.1	Vorstellung der Feldtestanlage.....	59
5.1.1	Verbrauchsstruktur der Wärmeabnehmer .....	60
5.1.2	Dimensionierung des Solarsystems .....	62
5.2	Betriebserfahrungen mit verschiedenen Speicherkonzepten.....	64
5.2.1	Speichereinbindung mit dynamischem Beladebereich im Vergleich zur herkömmlichen Speicherhydraulik.....	65
5.2.2	Speichereinbindung mit Speicherumgehung .....	78
5.3	Erkenntnisse aus dem Feldtest.....	81
5.3.1	Vergleich der Speicherhydraulik.....	81
5.3.2	Temperaturabsenkung im Grundlastmodus .....	83
<b>6</b>	<b>Simulation verschiedener Anlagentypen.....</b>	<b>84</b>
6.1	Analysierte Prozesswärmeanlagen.....	84
6.1.1	Hydraulik der vier Anlagenkonzepte.....	85
6.1.2	Wärmelastprofile und Dimensionierung des Kollektorfeldes .....	88
6.1.3	Verwendeter Wetterdatensatz.....	90
6.2	Variationsgrenzen wichtiger Systemparameter .....	91
6.2.1	Temperaturniveau der Prozesswärmeversorgung.....	91
6.2.2	Verlustkoeffizient der Speicherwärmedämmung.....	91
6.2.3	Spezifisches Speichervolumen .....	93
6.3	Vorstellung der Simulationstechnik.....	93
6.3.1	Simulationsumgebung.....	93
6.3.2	Mathematisches Modell .....	94
6.3.3	Temperaturverläufe .....	97
6.3.4	Fazit zur Modellierung .....	100
6.3.5	Parametervariation nach DoE-Methodik .....	101
6.4	Solarerträge bei reiner Prozesswärmebereitstellung.....	105
6.4.1	Ertragsprognosen in den Variationsgrenzen.....	106
6.4.2	Einfluss der Strahlungsintensität.....	111

6.5	Solarerträge bei Prozess- und Raumwärmebereitstellung.....	113
6.5.1	Ertragsprognosen in den Variationsgrenzen.....	114
6.5.2	Einfluss der Strahlungsintensität und bediente Wärmeverbraucher.....	118
6.6	Wirtschaftlichkeit eines Speicher .....	121
6.7	Weitere Anwendungsfälle.....	126
6.8	Erkenntnisse aus den Simulationsergebnissen.....	128
<b>7</b>	<b>Diskussion und Ausblick.....</b>	<b>131</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>134</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>150</b>