

Analyse und Demonstration des CellFlux-Speichersystems

Von der Fakultät für Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart
genehmigte Abhandlung zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Christian Odenthal

aus Langenfeld (Rhld.)

Hauptberichter:

Prof. Dr. rer. nat. habil. André Dietrich Thess

Mitberichter:

Univ.-Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht

Tag der mündlichen Prüfung:

17. Dezember 2015

Institut für Energiespeicherung (IER)

2015

Berichte aus der Energietechnik

Christian Odenthal

**Analyse und Demonstration
des CellFlux-Speichersystems**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2015

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 978-3-8440-4530-7

ISSN 0945-0726

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung Thermische Prozesstechnik am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. in Stuttgart. Sie wurde im Rahmen des von e.On geförderten Projekts „Development of the CellFlux Storage System for Sensible Heat“ angefertigt.

Zunächst möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Thess für sein großes persönliches Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptberichts bedanken. Herrn Prof. Dr. Scheffknecht danke ich für die Übernahme des Mitberichts und Herrn Prof. Dr. Laurin für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Frau Doerte Laing danke ich für die Ermöglichung meiner Arbeit in der Fachgruppe Thermische Energiespeicher. Herrn Dr. Heidemann vom Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart danke ich für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Beseitigung zahlreicher bürokratischer Hürden. Ein besonderer Dank gilt meinem fachlichen Betreuer Herrn Dr. Steinmann und meinem Fachgruppenleiter Herrn Dr. Markus Eck für die zahlreichen Diskussionen und persönlichen Ratschläge zu meiner Arbeit.

Weiterhin danken möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen am DLR die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Durch die offene und kollegiale Arbeitsatmosphäre habe ich mich immer sehr wohl gefühlt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Julian Barnick, der durch seinen unermüdlichen Einsatz während seiner Masterarbeit und im Anschluss daran einen wesentlichen Teil zum Aufbau meiner Versuchsanlage beigetragen hat. Auch allen weiteren Studenten, die durch ihre Praktikantentätigkeit oder ihre Studien- / bzw. Diplomarbeit wichtige Beiträge geliefert haben, möchte ich danken: Anton Hoffmann, Marcus Rohne, Gerrid Brockmann, Eduard Gebhard, Jens Weller, Sebastian Gamisch, Lukas Friedenstab und Marek Podlecki. Ich danke auch den Herren Manuel Moosmann, Gerrit Lucht, Michael Fiss und Matthias Hempel, die durch die vielen Ratschläge und der Mithilfe beim Aufbau der Versuchsanlage einen wertvollen Beitrag geleistet haben.

Meinem Bürokollegen Harald Pointner danke ich für die gute Arbeitsatmosphäre und seine Unterstützung bei meinen Anliegen. Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie und Freunden, die mich auf meinem Weg begleitet und mir viel Rückhalt gegeben haben. Hierbei möchte ich mich besonders bei Stephanie Mammeas und Jörg Bürkle bedanken, die gerade in schwierigen Phasen stets ein offenes Ohr für meine Anliegen hatten.

Stuttgart, im Dezember 2015

Christian Odenthal

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
INHALTSVERZEICHNIS	V
FORMELZEICHEN	VI
KURZFASSUNG / ABSTRACT	X
1 EINLEITUNG	1
1.1 SPEICHERSYSTEME FÜR DEN MITTLEREN BIS HOHEN TEMPERATURBEREICH	1
1.2 DAS CELLFLUX-KONZEPT	4
1.3 INHALTE UND AUFGABENSTELLUNG	5
2 ABLEITUNG DER RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DAS SPEICHERSYSTEM	9
2.1 BESCHREIBUNG DES KRAFTWERKSPROZESSES	9
2.2 AUSLEGUNGSRANDBEDINGUNGEN FÜR DEN WÄRMEÜBERTRAGER	12
2.3 AUFBAUKONZEPTE FÜR DAS SPEICHERVOLUMEN	14
2.4 ZWISCHENWÄRMETRÄGERMEDIEN	17
3 MODELLBILDUNG UND SIMULATION	21
3.1 GRUNDLAGEN DER MODELLBILDUNG	21
3.2 MODELLIERUNG DES WÄRMEÜBERTRAGERS	23
3.3 MODELLIERUNG DES REGENERATORS	29
3.4 MODELLIERUNG DES KRAFTWERKSBLOCKS	37
4 MODELLVALIDIERUNG UND VERSUCHE	39
4.1 KONZEPTION UND INBETRIEBNAHME DER VERSUCHSANLAGE	39
4.2 EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS	46
4.3 VERSUCHE ZUR MODELLVALIDIERUNG	51
4.4 VERGLEICH DER DRUCKVERLÜSTE MIT TESTSTANDSERGEBNISSEN	60
5 CHARAKTERISIERUNG UND AUSLEGUNG DER SYSTEMKOMPONENTEN	63
5.1 ÜBERSICHT ÜBER DIE METHODIK	63
5.2 AUSLEGUNG DES WÄRMEÜBERTRAGERS	65
5.3 KENNZAHLE ZUR CHARAKTERISIERUNG DER DYNAMIK VON REGENERATORSPEICHERN	74
5.4 DATENBASIS ZUR CHARAKTERISIERUNG DES REGENERATORSPEICHERS	85
6 DYNAMIK DES GESAMTSYSTEMS	93
6.1 EINLEITUNG UND VORGEHEN	93
6.2 EXERGETISCHE BEWERTUNG MIT ABGELEITETEN RANDBEDINGUNGEN	97
6.3 TRANSIENTE RANDBEDINGUNGEN MIT KRAFTWERKSBLOCK	109
6.4 VERGLEICH DER BEWERTUNGSERGEBNISSE	117
6.5 NACHRECHNUNG IM REALEN MAßSTAB	118
7 ZUSAMMENFASSUNG	131
ANHANG	135
A VERWENDETE DRUCKVERLUSTKORRELATIONEN UND WÄRMEÜBERGANGSBEZIEHUNGEN	135
B VERIFIZIERUNG DER MODELLE	142
C ERGEBNISSE DER AUSLEGUNG DES WÄRMEÜBERTRAGERS	149
D VORUNTERSUCHUNGEN	154
E FEHLERBETRACHTUNG DER VERSUCHSANLAGE	161
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	173
TABELLENVERZEICHNIS	177
LITERATURVERZEICHNIS	179

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
a_v	Fläche pro Volumenelement	m^2/m^3
A	Fläche	m^2
A_0	freie Querschnittsfläche	m^2
b_p	Plattenbreite	m
c, c_p	Spezifische Wärmekapazität	J/kgK
C	Konstante	-
d, D	Durchmesser	m
dt	Zeitliches Differential	s
E	Exergie	J
E_{el}	Elektrische Energie	J
f	Funktion von	-
h	Spezifische Enthalpie	J/kg
h_{Ri}	Rippenhöhe	m
\dot{H}	Enthalpiestrom	W
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
L, l	Länge	m
\hat{L}, \hat{l}	effektive Länge	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
n	Anzahl	-
Nu	Nusselt-Zahl	-
n_{rpr}	Anzahl Rohre pro Reihe	-
n_r	Anzahl Rohrreihen	-
n_t	Gesamtanzahl Rohre	-
P	Leistung	W
P_g, P_f	Gas- / fluidseitiger Wirkungsgrad des Wärmeübertragers	-
p	Druck	Pa
Pr	Prandtl-Zahl	-
p_{Ri}	Rippenteilung	m
\dot{q}''	Wärmestromdichte	W/m^2
\dot{Q}	Wärmestrom	W
r	Radius	m
R	Wärmekapazitätsstromverhältnis	-
R_M	Spezifische Gaskonstante	J/kgK
Re	Reynolds-Zahl	-
s	Spezifische Entropie	J/kgK
s_{Ri}	Rippendicke	m
s_x	Steigung des räumlichen Temperaturverlaufs	K/m
s_t	Steigung des zeitlichen Temperaturverlaufs	K/s
S	Entropie	J/K
\dot{S}	Entropiestrom	W/K
SSF	Storage Steadiness Factor	-
T	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$

\check{T}	Temperatur in Kelvin	K
t	Zeit	s
t_l, t_t	Longitudinaler / transversaler Rippenspitzenabstand	m
u	Spezifische innere Energie	J/kg
U	Innere Energie	J
v	Geschwindigkeit	m/s
w	Breite der Temperaturfront	m
x, y, z	Kartesische Koordinaten	m
X_t, X_l	Transversaler / Longitudinaler Rohrabstand	m

Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
ζ	Druckverlustbeiwert	-
∂	Partielles Differential	-
Δ	Differenzwert	-
ε	Porosität des Besatzmaterials	%
ϵ	relative Abweichung	%
γ	Bewertungskoeffizient	-
Γ	Koeffizient zur Anpassung des Koordinatensystems	-
η_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad	-
$\eta_{Ri}, \eta_{o.g}$	Rippenwirkungsgrad, Oberflächenwirkungsgrad	-
η_{Sp}	Ausnutzungsgrad des Speichers	%
η	Dimensionslose Länge (z-Richtung)	-
ξ	Dimensionslose Länge (x-Richtung), Reibungsbeiwert	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
Λ	Dimensionslose Regeneratorlänge	-
∇	Nabla-Operator	-
Π	Dimensionslose Periode	-
Ψ	Energierückgewinnungsgrad	%
ρ	Dichte	kg/m ³
Ξ	Exergierückgewinnungsgrad	%
θ_a, θ_e	Anfangs- / Endtemperatur der Periode	-
σ	Standardabweichung	(-)
τ	Dimensionslose Zeit	-
$\Delta\tau_L, \Delta\tau_K$	Dimensionslose Zeit linearen / konst. Temperaturverlaufs	-

Superskripte

Symbol	Bedeutung
\wedge	effektiver Wert
$-$	mittlerer Wert
'	Beladepiode
"	Entladepiode
B	Bilanz

Indizes

Symbol	Bedeutung
0	Anfangswert, Sollwert
a	außen, Anfang
aus	austretender Stoffstrom
Allg	Allgemein
BM	Bereichsmittel
Brut	Brutto
e	Ende
ein	eintretender Stoffstrom
el	elektrisch
f	fluid
FS	Formsteine
g	gasförmig
h, H	heiß
hyd	hydraulisch
i, j, k	Index
i, in	innen
irr	irreversibel
k, K	kalt
Konv	Konvektion
KW	Kraftwerksblock
log	logarithmisch
L	Luft
Leit	Leitung
max, min	maximal, minimal
Mod	Module
Net	Netto
Paras	parasitär
Part	Partikel
ppr	Durchgänge pro Reihe (<i>passes per row</i>)
P	Platten
PB	Packed Bed
r	Rohr
ref	Referenz
Reg	Regenerator
Ri	Rippe
Ripm	Rippen pro Meter
s	Solid (Feststoff)
SF	Solarfeld
Sp	Speicher
th	thermisch
u	Umgebung
U	Umfang
V	Verlust
v	Volumenspezifisch
WÜ	Wärmeübertrager
zu	Zugeführter Wärmestrom

Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
ANDASOL	Parabolrinnenkraftwerk in Almeria, Spanien
CSP	Concentrated Solar Power
DAE	Differential Algebraic Equation
DFVLR	Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt
DGL	Differentialgleichung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DSC	Differenzkalorimetrie
E	Erhalten
EBSILON	Simulationssoftware für Kraftwerksprozesse
FC	Finite Conductivity
FS	Formsteine
G-Fin	Formschlüssiges Verbindungsverfahren für Rohrippen
H	Heizen
HD	Hochdruck
Hitec HTS	Wärmeträgermedium aus Flüssigsalz
HTF	Heat Transfer Fluid
I	Inaktiv
ISO	Isolation
K	Kühlen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LAPACK	Linear Algebra Package, Softwareroutine
MATLAB	Matrix Laboratory, Programmierumgebung
ND	Niederdruck
NIST	National Institute of Standards and Technology, nist.gov
NTU	Number of Transfer Units
OCA	One Capacity Approach
OSF	Offset-Strip-Fin
P	Platten aus Beton
PB	Schüttung aus Basalt (von engl. Packed bed)
PEC	Performance Evaluation Criteria
PHOEBUS	Forschungsprojekt für solarthermische Kraftwerke
SIMULINK	Signalbasierte Simulationsumgebung, basierend auf MATLAB
SSF	Storage Steadiness Factor
SM	Simplified Model
SWS	Strom-Wärme-Strom
TCA	Two Capacity Approach
TCT	Heißdrahtmethode
TMPHS	Eigene Vektornotation für signalbasierte Stoffströme in SIMULINK
U	Umschaltphase
VP1	Synthetisches Wärmeträgeröl, Fa. Dow
ZCA	Zero Capacity Approach
ZWT	Zwischenwärmepuffermedium

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Analyse eines neuartigen Speicherkonzeptes für sensible Wärme – des CellFlux-Speicherkonzeptes – durchgeführt. Diese Analyse umfasst die Identifikation geeigneter Komponenten zur Umsetzung sowie die Abbildung des dynamischen Verhaltens des Gesamtsystems in einem Simulationsprogramm. Im Vordergrund steht ein Einsatz des Speichersystems in Kombination mit Kraftwerksprozessen. Die Funktionsfähigkeit des Konzeptes wird im Pilotmaßstab nachgewiesen. Auf Basis der erarbeiteten Entwurfsgrundlagen wird eine beispielhafte Anwendung des Speicherkonzeptes untersucht.

Gegenüber dem aktuellen Stand der Speichertechnik soll das CellFlux-Speicherkonzept eine Kostensenkung ermöglichen und gleichzeitig eine höhere Anwendungsflexibilität aufweisen. Hierzu werden kostengünstige Feststoffe als Speichermedien eingesetzt während Luft unter Umgebungsdruck zur Übertragung der thermischen Energie dient. Um das Konzept auch bei Anwendungsfällen einsetzen zu können, die flüssige Wärmeträgermedien oder druckbeaufschlagte Gase nutzen, wird das Speichersystem mit einem Wärmeübertrager kombiniert. Hier erfolgt die Wärmeübertragung zwischen dem Luftstrom und dem eigentlichen Arbeitsmedium. Wesentlich für eine erfolgreiche Umsetzung des CellFlux-Konzeptes ist die Abstimmung von Speichervolumen, Wärmeübertrager und Luftkreislauf.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst innovative Ansätze zur Gestaltung des Speichersystems diskutiert und entscheidende Einflussgrößen herausgearbeitet. Auf dieser Grundlage erfolgt eine Charakterisierung des Wärmeübertragers und des Speichervolumens. Hierzu werden in der Programmierumgebung MATLAB eigene Auslegungsmodelle implementiert. Mit Hilfe der Programme erfolgt eine umfassende Analyse des Speichervolumens unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Betriebsweise und geometrischer Einflussgrößen. Dabei wird deutlich, wie die zulässige Änderung der Austrittstemperatur ΔT_e das Betriebsverhalten und damit auch die Größe des Speichervolumens beeinflusst.

Da noch keine belastbaren Kostendaten verfügbar sind, sollen die Ergebnisse so vorbereitet werden, dass spätere ökonomische Untersuchungen stattfinden können. Um die transienten Temperaturverläufe aus dem Speichervolumen charakterisieren zu können, wird eine neue Kenngröße, der Storage Steadiness Factor (SSF) vorgestellt, mit der sich diese anhand einer analytischen Gleichung rekonstruieren lassen. Am Beispiel solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke werden zwei Bewertungsansätze entworfen und angewendet. Der erste dieser Ansätze vereinfacht die Problemstellung durch Ableitung von Randbedingungen, wie es gewöhnlich in der Literatur angewandt wird. Dadurch können die zuvor berechneten Ergebnisse genutzt werden, was den Rechenaufwand signifikant verringert. Die Bewertung erfolgt anhand eines exergetischen Wirkungsgrads. Für den neuartigen zweiten Ansatz wird das Speichersystem mit dem Kraftwerksblock gekoppelt. Die Bewertung erfolgt anhand der mit dem Speicher produzierbaren Strommenge. Beide Ansätze verwenden das gleiche Energieangebot als gemeinsame Vergleichsgrundlage. Um zugleich die vorgegebenen Auslegungsparameter einzuhalten, wird ein Minimierungsalgorithmus eingesetzt. In Verbindung mit den Auslegungsergebnissen der Wärmeübertrager ergeben sich so für beide Ansätze pareto-optimale Speicherkonfigurationen, die sich in kompakten Kennfeldern darstellen lassen. Mit dem neuen Ansatz können dabei genauere Auslegungsrechnungen durchgeführt werden. Es werden weitere Verbesserungsmöglichkeiten des Speichersystems, wie eine asymmetrische Betriebsweise und die Modularisierung des Speichervolumens, identifiziert.

Zum experimentellen Funktionsnachweis wird eine Großanlage mit 100 kW thermischer Leistung bei 10 m Bettlänge und einem Speichervolumen von 30 m³ aufgebaut und in Betrieb genommen. Dabei wird erstmals ein horizontal durchströmtes Speichervolumen realisiert. Neben umfangreichen Inbetriebnahmeversuchen zur Sicherstellung konsistenter Ergebnisse, wird auch die Gleichverteilung der Strömung untersucht. Letztere führte in bisherigen Veröffentlichungen zu signifikanten Unsicherheiten. Die entwickelten Simulationsprogramme werden anhand verschiedener Versuchsergebnisse validiert. Anhand weiterer Versuche wird eine neue Nusselt-Korrelation für den inneren Wärmeübergang hergeleitet und es wird gezeigt, dass kürzere Stillstandszeiten des Regenerators von einigen Stunden nahezu keinen Einfluss auf das innere Temperaturprofil haben. Für Formsteine wird eine neue Druckverlustkorrelation hergeleitet. Dabei zeigt sich, dass der Druckverlustbeiwert in der Pilotanlage, aufgrund der ungenaueren Ausrichtung des Besatzmaterials, etwa 50 % höher als in zuvor ermittelten Teststandsversuchen ausfällt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können die Modelle für die Simulation größerer Speicherkonfigurationen verbessert werden.

Zum Nachrechnen einiger Konfigurationen wird in SIMULINK ein weiteres Simulationsprogramm entwickelt, in dem sich Systemkomponenten beliebig verschalten lassen. Mit den realistischen Temperatur- und Massenstromverläufen eines Solarfelds wird abschließend das dynamische Verhalten einiger Konfigurationen untersucht. Dabei zeigt sich, dass für Konfigurationen mit geringer zulässiger Änderung der Austrittstemperatur eine zusätzliche Regelung des Ölmassenstroms notwendig ist, um die Auslegungserträge zu erreichen. Bei weiteren Simulationen mit halbiertem Strahlungsangebot zeigt sich, dass bei Speicherkonfigurationen mit möglichst hoher zulässiger Änderung der Austrittstemperatur der Stromertrag mit 40 % am wenigsten sinkt.

Abstract

In this thesis, a new concept for sensible thermal energy storage, the CellFlux-concept, is analyzed. This analysis encompasses the identification of suitable components for a successful implementation as well as dynamic modeling of the full system within a simulation environment. Focus lies on utilization with solar thermal power plants. The concept is proven by a pilot scale test facility. Based on the sizing concepts, an example configuration is derived and thoroughly investigated.

The CellFlux-concept aims for significant cost reductions and higher application flexibility when compared to the current state-of-the-art for thermal energy storage. Cost effective solids are used as storage materials, while air at ambient pressure transfers heat to or from the storage material. To allow for pressurized or liquid working fluids as well, a heat exchanger is utilized to transfer heat between the working fluid and the air. Crucial for the success of the CellFlux-concept is the adjustment of storage volume, heat exchanger and air cycle.

As a first step, innovative designs of the storage system are discussed and major influencing variables are identified. On this basis, heat exchanger and storage volume are characterized. This is achieved by the development and implementation of sizing routines in the MATLAB programming environment. Supported by these tools, a comprehensive analysis of the storage volume under simultaneous consideration of both geometric and systemic influences is performed. It is shown that the permitted change in exit temperature ΔT_e influences the operational behavior and eventually the size of the storage volume.

Since no reliable costs for such systems are available, the results must be conditioned in a way that allows subsequent economic studies. To characterize the transient progression of the exit temperatures of the storage volume, a newly developed characteristic number, the storage steadiness factor (SSF), is introduced. The transient progression of the exit temperature can be reconstructed from the SSF by an analytical function afterwards. Based on two example solar thermal parabolic trough power plants, two possible assessment approaches are developed and applied. The first one simplifies the complexity of the problem by deriving constant boundary conditions, as commonly applied in the literature. Through this derivation, previously calculated solutions are applied, thereby significantly reducing the necessary computational effort. As a final step in this assessment an exergetic rating is used. For the second approach, the storage system is coupled with a model of a solar thermal power plant. The final step in this assessment culminates in the electricity produced from the thermal energy. Both approaches use the same amount of initially available thermal energy as a common basis for the comparison. A minimization routine is used to satisfy given boundary conditions. In conjunction with the sizing results of the heat exchanger, pareto-optimal storage system configurations are identified, which are visualized in compact characteristic maps. With the second approach, the precision of the sizing calculations is significantly increased. Furthermore, it is shown that the storage system can be improved by an asymmetric operation strategy or the modularization of multiple storage volumes.

For the experimental proof-of-concept, a large scale plant with 100 kW thermal power, a bed length of 10 m and 30 m³ in volume is built and commissioned. For the first time, the storage volume is arranged in a horizontal flow direction. In addition to comprehensive commissioning experiments to guarantee consistent results, the flow stratification is investigated. The latter has led to significant uncertainties in prior studies. The developed computer models of the storage system are validated by various experiments. A new Nusselt-

correlation for the inner heat transfer is deduced from experiments and it is shown that stand-by periods shorter than a few hours have virtually no impact on the inner temperature profile of the storage volume. For regularly shaped bricks with inner flow channels a new pressure loss correlation is derived. Results show that deviations in the alignment of the bricks can increase the predicted pressure drop by 50 % when compared to preliminary test rig results. The new insights allow an improvement of further simulations of large scale systems.

For a detailed final investigation, another simulation tool is developed in SIMULINK which allows for an arbitrary interconnection of the system components. Alongside with realistic exit temperatures and mass flow rates from a solar field as input data, several storage system configurations are investigated. It is shown that for those configurations with only a small allowable change in exit temperature, additional control of the mass flow rates is necessary, if the predicted electricity yield is to be achieved. Further simulations with halved thermal energy supply show that storage configurations with a large permitted change in exit temperature are favorable, since they have the comparatively lowest decrease in electricity yield of only 40 %.