RESEARCH

Csaba Singer

Solarturmreceiver für überkritische Dampfprozesse und ihre technische und ökonomische Bewertung

Springer Vieweg

Solarturmreceiver für überkritische Dampfprozesse und ihre technische und ökonomische Bewertung

Csaba Singer

Solarturmreceiver für überkritische Dampfprozesse und ihre technische und ökonomische Bewertung

Springer Vieweg

Csaba Singer
Stuttgart, Deutschland

D 93

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart

ISBN 978-3-658-02210-5 ISBN 978-3-658-02211-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-02211-2

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

Springer Vieweg
© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Das vorliegende Werk entstand in den Jahren 2007 bis 2012 am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart bei der Abteilung Solarforschung des Instituts für Technische Thermodynamik. Diese Abteilung erhielt im Jahr 2011 ihr eigenes Institut, in welchem verstärkt die schnelle Entwicklung von solarthermischen Innovationen bis zur Marktreife stattfinden soll. Diese Aussichten sowie das Bedürfnis, meine Energie und Kreativität für eine nachhaltige Zukunft einzusetzen, beflügelten und motivierten mich bis zur Fertigstellung.

Außerordentlich dankbar bin ich Herrn Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. Hans Müller-Steinhagen für die Übernahme des Hauptberichts. Stets offen für neue Ideen und mit fachlichem Weitblick für den Weg zur Verwirklichung dieser Ideen, ebnete er diesen Weg wirkungsvoll mit motivierenden, unterstützenden und konstruktiven Worten. Gleichzeitig gilt mein ganz besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Jens von Wolfersdorf für die Übernahme des Mitberichts, aber auch für seine wohlwollende und wertvolle Unterstützung, seitdem ich ihn kenne. Weiterhin sei Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß als Vorsitzendem des Prüfungsausschusses für die durch ihn mitbewirkte angenehme Prüfungsatmosphäre gedankt.

Herrn Dr.-Ing. Reiner Buck, der über die Jahre hinweg die Entstehung dieser Forschungsarbeit betreute und dessen Tür jederzeit für jegliche Belange offen stand, danke ich aufrichtig von ganzem Herzen. An dieser Stelle möchte ich es nicht versäumen, meinen treuen Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Pitz-Paal für seine wertvollen fachlichen Ratschläge kundzutun.

Für ihre vielfältigen Beiträge möchte ich insbesondere den Herren Dipl.-Ing. (FH) Ralf Uhlig, Dipl.-Ing. Juan Felipe Vasquez Arango, Dipl.-Ing. Fabian Feldhoff und Dr.-Ing. Edgar Teufel danken. Des Weiteren danke ich Herrn Markus Schilder und Herrn Dipl.-Ing. Lars Amsbeck für die Behebung diverser IT-Probleme, Herrn Dr.-Ing. Thomas Bauer für die „lange Leine“ im Salzlabor sowie Frau Gabriele Taube und Herrn Andreas Krause für den technischen Support bei der spektroskopischen Vermessung von den bis zu 800°C heißen Salzschmelzen.

Mit Worten unbeschreiblich ist meine Dankbarkeit gegenüber meinem Vater.

Baden-Baden Csaba Singer

Für meinen Sohn Felix

„Man kann nicht in die Zukunft schauen,
aber man kann den Grund für etwas Zukünftiges legen
- denn Zukunft kann man bauen“

Antoine de Saint-Exupéry

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG - 1 -

2 STAND DES WISSENS - 5 -

2.1 Konzepte zur solarthermischen Stromerzeugung - 5 -
2.1.1 Linienfokusierende Systeme - 6 -
2.1.2 Punktfokusierende Systeme - 6 -
2.1.3 Vorangegangene Potenzialbewertungen - 8 -

2.2 Komponenten von Solarturmkraftwerken - 9 -
2.2.1 Heliostatenfeld, Turmreflektor und CPC - 10 -
2.2.2 Turm - 11 -
2.2.3 Receiver - 12 -
2.2.4 Thermischer Speicher und Wärmetransportsystem - 13 -
2.2.5 Dampfprozesse - 13 -

2.3 Receiverkonzepte für Solarturmsysteme - 15 -
2.3.1 Rohrreceiver - 15 -
2.3.2 Volumetrische Receiver - 16 -
2.3.3 Direkt absorbierende Receiver - 17 -
2.3.4 Receiver für Turmreflektorsysteme - 19 -

2.4 Stand der Umsetzung von Solartürmen mit Salzschmelzen - 20 -
2.4.1 Solar-Two - 21 -
2.4.2 Gemasolar - 22 -

3 KONZEPTBEWERTUNG - 23 -

3.1 Übergeordnete Annahmen - 24 -
3.1.1 Basis- bzw. Referenzkonzept und Leistungsklasse - 24 -
3.1.2 Standort und Auslegungszeitpunkt - 24 -
3.1.3 Heliostatenfeld - 24 -
3.1.4 Receiver - 25 -
3.1.5 Wärmeträgermedium - 25 -
3.1.6 Wärmetransportsystem und thermischer Speicher - 25 -
3.1.7 Kosten - 26 -

3.2 Werkzeuge - 26 -

3.3 Datenfluss - 27 -

3.4 Receiver für erhöhte Temperaturen - 28 -
3.4.1 Rohrreceiver - 28 -
3.4.2 Direktabsorption mit Flüssigfilmkühlung - 33 -
3.4.3 Tankreceiver mit poröser Absorberstruktur - 35 -

3.5 Dampfprozesse der Konzeptbewertung - 37 -

3.6 Kostenmodelle - 37 -

3.7 Jahresrechnung - 39 -

3.8 Ergebnisse der Konzeptbewertung und Konzeptauswahl - 42 -
3.8.1 Gegenüberstellung der Konzentratorsysteme - 42 -
3.8.2 Gegenüberstellung der Receiverkonzepte - 44 -
3.8.3 Gegenüberstellung der Potenziale zur Kostenreduktion - 48 -

4 INNEN LIEGENDE DIREKTABSORPTION MIT FLÜSSIGFILMKÜHLUNG - 53 -

4.1 Modellbildung - 53 -
4.1.1 Receivergeometrie und Funktionsweise - 53 -
4.1.2 Strömung des Flüssigfilms - 55 -
4.1.3 Dicke des Flüssigfilms - 57 -
4.1.4 Strahlungsmodelle - 58 -
4.1.5 Freie Konvektion - 63 -
4.1.6 Erzwungene Konvektion - 64 -
4.1.7 Stoffübergang - 65 -
4.1.8 Stabilitätskriterien des Flüssigfilms - 66 -
4.1.9 Tropfenaustrag - 69 -

4.2 Betriebsstrategien - 70 -
4.2.1 Massenstromregelung - 70 -
4.2.2 Receiverrotation - 72 -

4.3 CFD-Implementierung - 75 -
4.3.1 Entkoppeltes CFD-Modell - 75 -
4.3.2 Randbedingungen - 77 -
4.3.3 Diskretisierung und Netzstudie - 78 -
4.3.4 Plausibilitätsprüfung - 79 -

5 AUSLEGUNG UND ANALYSE DES IDAR-LEITKONZEPTS - 81 -

5.1 Randbedingungen der Auslegung - 81 -

5.2 IDAR-Leitkonzept - 82 -
5.2.1 Heliostatenfeld und Turm - 82 -
5.2.2 Receiver - 85 -
5.2.3 Speicher - 94 -
5.2.4 Dampfprozess - 94 -
5.2.5 Ansätze zur Betriebsführung - 94 -

5.3 Betriebskriterien des IDARs - 98 -
5.3.1 Analyse der Temperaturfelder - 98 -
5.3.2 Analyse der Filmstabilität - 103 -
5.3.3 Austrag des Wärmeträgermediums durch Tropfen - 106 -

5.3.4 Austrag durch Diffusion - 108 -

5.4 Analyse des Betriebsverhaltens - 109 -
5.4.1 Auslegungs-Zeitpunkt - 109 -
5.4.2 Teillastverhalten - 115 -
5.4.3 Jahres-Ergebnisse - 119 -

5.5 Kostenrechnung - 121 -

6 AUSBLICK - 127 -

7 ZUSAMMENFASSUNG - 129 -

8 ANHANG - 135 -

8.1 Modellannahmen - 135 -

8.2 Kostenannahmen - 141 -

8.3 Wärmestrahlung des gekühlten porösen Absorbers - 142 -

8.4 Passive Massenstromregelung in porösen Absorbern - 148 -

8.5 Messung der optischen Eigenschaften von HT-Salzschmelzen - 150 -

8.6 Turmhöhe, Windeinflüsse und freie Konvektion - 155 -

8.7 Lagerung des Receivers und Filmführung - 156 -

8.8 Verschmutzung des Wärmeträgermediums - 157 -

8.9 Korrosion bzw. Materialpaarung - 158 -

8.10 Wärmeübertrager - 158 -

8.11 Thermische Speichertechnologie - 159 -

8.12 Leistungsklasse überkritischer Dampfprozesse - 160 -

8.13 Verwendete Dampfprozesse - 161 -

8.14 Basislegende Demonstrations- und Testanlagen - 167 -
8.14.1 Themis - 167 -
8.14.2 SSPS - 167 -
8.14.3 MSEE - 168 -

8.15 Jahreserträge der Konzeptbewertung - 169 -

8.16 Sensitivitätsanalysen der Konzeptbewertung - 169 -

9 LITERATURVERZEICHNIS - 173 -

Nomenklatur

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m^2
A_V	spezifische Oberfläche	m^2/m^3
C_{Annu}	Annuitätenfaktor	–
D	Durchmesser	m
$D_{1,2}$	Diffusionskoeffizient	m^2/s
$E,\ E_{Netto}$	Energie, in das Stromnetz eingespeiste elektrische Nettoenergie	$J,\ kWh$
$\dot{E}$	Energiefluss	W
F	Kraft	N
G_λ	spektrale Bestrahlungsstärke	W/m^2
H	Höhe	m
I_λ	spektrale Strahlungsflussdichte	W/m^2
J	Trägheitsmoment	$kg\,m^2$
$K_{Inv},\ K_{B\&W}$	Investitionskosten, Betriebs- und Wartungskosten	€
L	charakteristische Länge	m
L_1, L_2, L_3	Cavity Durchmesser, Cavity Tiefe/Länge, Apertur Durchmesser	m
$LCOE$	Stromgestehungskosten	$€/kWh$
M	molare Masse	kg/mol
$M_{\lambda,S}(\lambda,T)$	spektrale spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers	$W/(m^2 \cdot m)$
P	Leistung	W
$Q,\ \dot{Q}$	Wärme, Wärmestrom	$J,\ W$
R_{HF}	Feldauslastung	–
RG	Referenzgrößen bei der Kostendegression	–
RV	Rotationsverhältnis zur kritischen Winkelgeschwindigkeit	–
SF	Skalierfaktor für die Kostendegression	–
SKK	spezifischen Komponentenkosten	–
T, T^*	Temperatur, reduzierte Temperatur	K, –
TDR	Massenstromverhältnis bezogen auf den Auslegungszeitpunkt	–
TLF_{PB}	Teillastfaktor des Kraftwerksblocks	–
V	Volumen	m^3
W	Flüssigfilmbreite bzw. benetzter Umfang	m
X	Beladung	–
X_U	Umfangsposition des Modulrandes	m

Kleine lateinische Symbole:

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a	Viskositätskoeffizient	m^{-2}
a_z	Zentrifugalbeschleunigung	m/s^2
az	Azimutwinkel der Sonne	°
b	Inertialkoeffizient	m^{-1}
c_p	spezifische Wärmekapazität	$J/(kg\ K)$
c_w	Luftwiderstandsbeiwert	–
d	Rohrdurchmesser	m
f	normierte Einstrahlung, $\dot{Q}_{sol}/\dot{Q}_{sol,\,DP}$	–
h	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2K)$
hw	Höhenwinkel der Sonne	°
i_V	jährliche Versicherungsrate	–
i_Z	Zinssatz	–
k_a	Wärmedurchlasskoeffizient	$W/(m^2K)$
k_r	Rauheit	m
$\dot{m}$, $\dot{m}_A$	Massenstrom, Massenstromdichte	kg/s, $kg/(s\,m^2)$
$\dot{m}_D$	Diffusionsmassenstrom	kg/s
n	Betriebsdauer	$Jahre$
n_P	Rohranzahl eines Rohrreceivermoduls	–
n_1	Brechungsindex auf der Seite des einfallenden Strahls	°
n_2	Brechungsindex auf der Seite des ausfallenden Strahls	°
p, p_D	Druck, Dampfdruck	Pa
$par_{T\&P}$	flächenspezifische elektrische Verluste des Heliostatenfeldes	W/m^2
par_{PB}	parasitärer Anteil der erzeugten Elektrizität	–
Δp	Druckverlust	Pa
$\dot{q}$	flächenspezifischer Wärmestrom	W/m^2
$\dot{q}'''$	volumenspezifischer Wärmestrom	W/m^3
r	Radius des zylindrischen Koordinatensystems	m
t	Zeit	s
x_U , Δx_U	Umfangskoordinate des Receivers, Umfangslänge des Moduls	m
u	Geschwindigkeit	m/s
z	z-Koordinate des zylindrischen Koordinatensystems	m

Griechische Symbole:

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Neigungswinkel der oberen Absorberwand zur Horizontalen	°
α	Absorptivität	–
α_λ	spektrales Absorptionsmaß des Wärmeträgermediums	m^{-1}
α_{por}	Absorptionsmaß der porösen Absorberstruktur	m^{-1}
β	Neigungswinkel der seitlichen Absorberwand zur Vertikalen	°
β_D	Stoffübergangskoeffizient	m/s
δ_F	Filmdicke	m
ε	Emissionsgrad	–
ϕ_1, ϕ_2	Einfallswinkel und Brechungswinkel gemessen zum Lot	°
Φ	Neigung der Aperturebene zur Vertikalen	°
φ	Winkelkoordinate des zylindrischen Koordinatensystems	°
η	dynamische Viskosität	$kg/(m\ s)$
η	Wirkungsgrad	–
λ	Wellenlänge	m
λ_c	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m\ K)$
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
θ	Neigungswinkel zur Horizontalen	°
θ_O	Kontaktwinkel	°
ρ	Dichte	kg/m^3
ρ	Reflexionsgrad	–
$\sigma_{1,2}$	Lennard-Jones-Stoßdurchmesser	m
σ_o	Oberflächenspannung	N/m
$\tau_{i,j}$	Spannungstensor	–
ω	Winkelgeschwindigkeit	$°/s$
ζ	Widerstandsbeiwert	–
Ψ_V	volumenbezogene Porosität	–
$\Omega_{1,2}^*$	reduziertes Stoßintegral	–
ξ_1	Konstante für das Polynom der Einstrahlung	W/m^6
ξ_2	Konstante für das Polynom der Einstrahlung	W/m^5
ξ_3	Konstante für das Polynom der Einstrahlung	W/m^4
ξ_4	Konstante für das Polynom der Einstrahlung	W/m^3

Indizes:

Symbol	Bezeichnung
ab	Abgeführt
abs	Absorbiert
abw	Abwärts
A	Basisgröße der Skalierung
Ap	Apertur
at	Verlustmechanismus durch atmosphärische Auslöschung
aufw	Aufwärts
Aus	am Auslass des Receivers
AW, AWO, AWS	Absorberwand, obere Absorberwand, seitliche Absorberwand
bl	Verlustmechanismus durch blockierter Strahlen
B	Zielgröße der Skalierung
cl	Verlustmechanismus durch die Verschmutzung der Spiegel
cos	Verlustmechanismus durch die Flächenprojektion (Kosinusverluste)
diff	Diffus
DNI	solarer Direktstrahlungsanteil
DP	zum Auslegungszeitpunkt
DR	Austrag durch Tropfen
eff	Effektivwert
Ein	am Einlass des Receivers
ek	erzwungene Konvektion
el	Elektrisch
em	Emittiert
F	Flüssigfilm
fk	freie Konvektion
HF	Heliostatenfeld
HT	Wärmetransport
i	Innenseite
ic	Verlustmechanismus durch den Receiver verfehlende Strahlen
in	in das System hinein
ist	Ist-Zustand
j	Laufindex der Modulnummerierung
k	Laufindex der Iterationsschritte
K	Konzentration
kin	Kinetisch
krit	kritischer Wert
l	Flüssigkeit
L	Luft

Weitere Indizes:

Symbol	Bezeichnung
lam	Laminar
loss	zum Verlust beitragend
m, max, min	Mittelwert, Maximalwert, Minimalwert
nutz	Nutzbar
o	Außenseite
out	aus dem System heraus
P	Rohrreceivermodul (engl. Panel)
PB	Power Block
par	Verlustmechanismus durch parasitären Energieaufwand
por	poröses Medium
PU	Pumpe
pyr	Pyromark-Beschichtung
R	Receiver
rad	thermische Strahlung
refl	reflektierte Strahlung
RW	Rohrwand
s	Feststoff
sh	Verlustmechanismus durch Abschattung der Spiegelfläche
sol	Solar
soll	Soll-Zustand
sp	Verlustmechanismus durch Oberflächenfehler der Spiegel
ST	thermisches Speichersystem
th	Thermisch
TK	Thermokapillareffekt
total	Gesamt
tr	Transmittiert
turb	Turbulent
W	Luftwiderstand
WTM	Wärmeträgermedium
zu	Zugeführt
∞	Umgebung

Hochgestellte Zeichen:

Symbol	Bezeichnung
^{P}	Planck'sches Strahlungsgesetz
^{W}	Wien'sche Näherung
$\overline{}$	Gemittelt

Naturkonstanten:

Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit
c	Lichtgeschwindigkeit	$2.9979 \cdot 10^{8}$	m/s
g	Erdbeschleunigung	9.8067	m/s^2
h	Planck'sches Wirkungsquantum	$6.6261 \cdot 10^{-34}$	$J\,s$
k	Boltzmann-Konstante	$1.3807 \cdot 10^{-23}$	J/K
N_A	Avogadro'sche Zahl	$6.022 \cdot 10^{23}$	mol^{-1}
$\Re$	ideale Gaskonstante	8.31451	$J/(mol\ K)$
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5.67 \cdot 10^{-8}$	$W/(m^2 K^4)$

Dimensionslose Kennzahlen:

Bezeichnung	Zusammenhang
Froude-Zahl	$Fr = \dfrac{u}{\sqrt{g \cdot L}}$
Grashof-Zahl	$Gr_L = \dfrac{\lvert T_\infty - T \rvert}{T_\infty} \cdot \dfrac{g \cdot L^3}{\nu^2}$ für ideale Gase
Kapitsa-Zahl	$Ka = \dfrac{\sigma_o^{\ 3}}{g \cdot \rho^3 \cdot \nu^4}$
Lewis-Zahl	$Le = \dfrac{Sc}{Pr}$
Nusselt-Zahl	$Nu_L = \dfrac{h \cdot L}{\lambda_c}$
Prandtl-Zahl	$Pr = \dfrac{\eta \cdot c_p}{\lambda_c}$
Rayleigh-Zahl	$Ra_L = Gr_L \cdot Pr$
Reynolds-Zahl	$Re_L = \dfrac{u \cdot L}{\nu}$
Film-Reynolds-Zahl	$Re_N = \dfrac{u \cdot \delta_F}{\nu} = \dfrac{\dot{m}}{W \cdot \eta}$ nach Nusselt, alternativ $Re_F = 4 \cdot Re_N$
Schmidt-Zahl	$Sc = \dfrac{\nu}{D_{1,2}}$
Sherwood-Zahl	$Sh_L = \dfrac{\beta_D \cdot L}{D_{1,2}}$
Weber-Zahl	$We = \dfrac{\rho_L \cdot (u_L - u_{WTM})^2 \cdot \delta_F}{\sigma_o}$

Abkürzungen:

Symbol	Bezeichnung
AV	**A**dditional **V**ariable (Benutzerdefinierte Variable in CFX)
BDS	**B**eam **D**own **S**ystem (Turmreflektorsystem)
B & S	**B**locking and **S**hading (blockierte Strahlen und Schattenwurf)
B & W	**B**etrieb und **W**artung
CEL	**C**FX **E**xpression **L**anguage (Benutzerdefinierte Programmiersprache in CFX)
CL	**C**oefficient-**L**oop (CFX-Systemiteration**)**
CPC	**C**ompound **P**arabolic **C**oncentrator (Sekundärkonzentrator)
CSP	**C**oncentrating **S**olar **P**ower (konzentrierende Solarthermie)
DAR	**D**irect **A**bsorption **R**eceiver (direkt absorbierender Receiver)
DLR	**D**eutsches Zentrum für **L**uft- und **R**aumfahrt e.V.
DP	**D**esign **P**oint (Auslegungszeitpunkt)
DNI	**D**irect **N**ormal **I**rradiation (solarer Direktstrahlungsanteil)
DTM	**D**iskrete **T**ransfer **M**ethode
ECOSTAR	**E**uropean **Co**ncentrated **S**olar **T**herm**a**l **R**oadmap
HT	**H**och**t**emperatur
IDAR	**I**nternal **D**irect **A**bsorption **R**eceiver (innen liegende Direktabsorption)
LCOE	**L**evelised **C**osts **o**f **E**lectricity (Stromgestehungskosten)
LIT	**L**iquid **I**n **T**ube (Rohrreceiver mit Flüssigmedium)
MC	**M**onte-**C**arlo Methode
SC	**S**uper **C**ritical (überkritischer Dampfprozess)
SIT	**S**alt **I**n **T**ube (Rohrreceiver mit Salzschmelze)
SKK	**S**pezifische **K**omponenten**k**osten
SUB	**Sub**critical (subkritischer Dampfprozess)
SV	**S**olar**v**ielfaches
TDR	**T**urn **D**own **R**atio (Massenstromverhältnis)
USC	**U**ltra **S**uper **C**ritical (überkritischer Dampfprozess - 700°C)
WTM	**W**ärme**t**räger**m**edium

Kurzfassung

In der kommerziellen Kraftwerkstechnik befinden sich überkritische Dampfprozesse aufgrund ihrer Potenziale die Stromgestehungskosten und den spezifischen Brennstoffbedarf gegenüber herkömmlichen Dampfprozessen zu reduzieren in der Phase der Markteinführung und Weiterentwicklung. In dieser Arbeit werden die Potenziale bei der Interaktion mit solarthermischen Turmkraftwerken untersucht. Das Ziel ist die Steigerung des Receiverwirkungsgrades und das Aufzeigen und Bewerten kritischer Aspekte von innovativen Receivertechnologien. Zunächst erfolgt eine Konzeptstudie, die dazu dient, den Stand der Technik der Solarturmkraftwerke mit ausgewählten Receiveroptionen für die Erhöhung der Dampfprozesstemperaturen zu vergleichen. Die Konzeptstudie zeigt, dass die Direktabsorption auf der inneren Mantelfläche des Receivers mit nach unten geöffneter Apertur und Flüssigfilmkühlung die höchsten Potenziale zwischen den verglichenen Optionen aufweist. Daraufhin erfolgt die detaillierte strömungsmechanische und thermodynamische Modellbildung dieses Receiverkonzepts im Maßstab 1:1, mit welcher die offenen Receiverparameter hinsichtlich der Machbarkeit und der Funktionalität analysiert werden. Es werden verschiedene Betriebsführungsstrategien beleuchtet und bewertet, die am Ende dieser Arbeit zum Vorschlag eines kostenoptimierten Leitkonzeptes führen. Dieses weist ein rotierendes Receiversystem mit geneigten Absorberflächen auf. Es wird gezeigt, dass durch die räumliche Anordnung der Absorberwände die thermischen Verluste des Receivers minimiert, während durch die auf den Flüssigfilm wirkenden Fliehkräfte die Einhaltung der gestellten Betriebsanforderungen bei reduziertem Kostenaufwand erreicht werden. Die Modellergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit Vergleichsmodellen und experimentellen Daten aus der Literatur. Die getroffenen Kostenannahmen sind bezüglich der ermittelten Senkung der Stromgestehungskosten mit Sensitivitätsanalysen relativiert.

Stichworte:

Solarturm-Kraftwerke, überkritische Dampfprozesse, Hochtemperatur, Receiver, Direktabsorption, Wärmeträgermedium, Flüssigfilmkühlung, CFD, Jahresanalyse, Kostenreduktion

Abstract

In the conventional power plant technology, supercritical steam power plants are in the phase of market introduction and further development, due to their potential to reduce the levelised cost of electricity at reduced specific fuel demand. In the present thesis, the potential combination of supercritical steam power plants with solar towers is analysed, to reduce the consumption of fossil fuels. The immediate objective is to enhance the receiver efficiency and to identify and assess critical aspects of novel receiver technologies. At first a concept study is carried out, which compares the ability of selected receiver options to increase the steam cycle temperature. The concept study shows that the direct absorption receiver with downwards oriented aperture, whose absorber structure at the internal lateral area is cooled by a molten salt film, has the highest potential of the compared options. Subsequently, a detailed fluid mechanic and thermodynamic receiver model of this receiver concept is developed for full-scale receiver geometries. The model is used to analyse the open parameters concerning the feasibility and functionality of the concept. Hence, different system management strategies are examined and assessed, which lead to the proposal of a cost optimized lead-concept at the end of this work. This concept involves a rotating receiver system with inclined absorber walls. The spatial arrangements of the absorber walls minimize thermal losses of the receiver, while the centrifugal forces acting on the liquid salt film are essential to realise the required system criteria at reduced cost. The results of the model developed in this thesis are in good agreement with benchmark models and experimental data reported in the literature. Assumptions for the assessment of potential reductions of levelised electricity cost are quantified with sensitivity analysis.

Key words:

Solar Tower Plant, Supercritical Steam Cycle, High Temperature, Receiver, Direct Absorption, Heat Transfer Medium, Liquid Film Cooling, CFD, Annual Performance, Cost Reduction

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Sowohl aus dem Bestreben eine nachhaltige und umweltschonende Energieversorgung zu erschaffen, als auch aus dem Blickwinkel der Wirtschaftlichkeit, besteht derzeit reges Interesse die primären Güter, wie aufbereitetes Trinkwasser, Strom und speicherbare Wärme bzw. chemische Verbindungen mit hoher Energiedichte mit Hilfe regenerativer Energieträger bereitzustellen. Dies begründet sich zum einen durch den exponentiellen Zuwachs der Weltbevölkerung und den dadurch steigenden Energiebedarf und zum anderen durch die zunehmende Knappheit der fossilen Energiequellen und die daraus resultierenden steigenden Kosten der fossilen Energieträger. Neuesten Prognosen des Weltbevölkerungswachstums zufolge werden im Jahre 2050 zwischen 8 bis 10.5 Milliarden Menschen die Erde bewohnen [1], während bis 2050 die Energienachfrage verglichen zu 2010 bei einem vorhergesagtem jährlichen Anstieg der weltweiten Energienachfrage von 1.4 % [2] um 74 % anwachsen wird. Im Referenzszenario (business-as-usual) bedeutet dies bei einem Anstieg des Ölpreises von etwa 55 US$/Barrel im Jahr 2009 auf 133 US$/Barrel im Jahr 2035, einen jährlichen Anstieg um 3.4 % und somit Ölpreise von 217 US$/Barrel in 2050. Ein Argument um den Prognosen des Referenzszenarios entgegen zu wirken, besteht in der wachsenden gesellschaftlichen Unsicherheit hinsichtlich der kontrovers diskutierten Problematik des Klimawandels durch den übermäßigen CO2-Ausstoß führender Industrienationen. Die gesellschaftliche Unsicherheit gegenüber den Möglichkeiten radioaktive Energieträger ohne verseuchende Rückstände für die kernenergetische Versorgung nutzen zu können, sind noch ausgeprägter. Aufgrund dieser Aspekte ist der Ausbau eines regenerativen Energieparks erstrebenswert, um dem steigenden Energiebedarf nachhaltig umweltschonend, preiswert und rentabel nachkommen zu können. Ein Energiemix aus Geothermie, Gezeitenenergie, Windenergie, Wellenenergie, Meeresströmung, biomechanischer Energie, Laufwasserenergie und solarer Strahlung kann trotz zeitlicher Unregelmäßigkeiten zur flächendeckenden Versorgungssicherheit beitragen.

Die auf der Erde vielfältig nutzbaren regenerativen Energiequellen resultieren aus den primären Energiequellen. Während die geothermische Energie aus dem Isotopenzerfall im Erdinneren, und die Gezeitenenergie aus der Planetenbewegung hervorgehen, gehen alle weiteren nutzbaren Energiequellen aus der Sonnenstrahlung hervor. Deshalb stellt die nutzbare Solarstrahlung den größten Anteil der nutzbaren regenerativen Energiequellen und damit das größte Potenzial zur Umwandlung in andere Energieformen dar [3]. Mit Hilfe der Solarstrahlung ist es möglich alle genannten primären Güter bereitzustellen. So besteht die Möglichkeit zur solaren Meerwasserentsalzung [4], zur Speicherung der Solarstrahlung in Form von umgewandelter Wärme nach der Absorption [5, 6], die Stromerzeugung mittels photovoltaischer Anlagen oder thermodynamischen Kreisprozessen [7] und die Produktion von speicherbaren chemischen Verbindungen mit hohem Energiegehalt [8]. Dabei kann die Solarthermie eine übergeordnete Rolle spielen, welche durch die Konzentration der Solarstrahlung mittels Reflexion an Spiegelsystemen und durch die Absorption an geeigneten Absorberflächen in Wärme umgewandelt werden kann, die in eine Vielzahl von kommerziellen Industrieanlagen einkoppelbar ist. Auf diesem Wege vermag die Solarthermie einen großen Beitrag zum Ziel der Bundesregierung zu leisten, den Beitrag der erneuerbaren Energien an der gesamten Energieversorgung auf rund 50 % zu steigern [9]. Dies spiegelt sich unter anderem in der im Jahr 2009 gegründeten DESERTEC Initiative der europäischen Energieversorgungsindustrie wider [10].

C. Singer, *Solarturmreceiver für überkritische Dampfprozesse und ihre technische und ökonomische Bewertung,* DOI 10.1007/978-3-658-02211-2_1, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

Um die Strahlungsenergie der Sonne in elektrischen Strom umzuwandeln existieren zwei aufstrebende Technologien, die solarthermische Stromerzeugung und die am Markt etablierte photovoltaische Stromerzeugung. Die frühere Markteinführung der Photovoltaik ist nicht durch ein höheres Potenzial zur Reduktion der Stromgestehungskosten gegenüber der Solarthermie gegeben. Die frühere Etablierung ist eher mit der frühen Entdeckung des photoelektrischen Effekts (1839 / A. E. Becquerel) und früheren geschichtlichen Entwicklung der Technologie (1958 / erster Satellit mit Solarzellen), deren dezentralen Funktionsweise und dadurch bedingten verteilten Kostenstruktur, sowie durch politisch bewirkte Einspeisevergütungen, welche die Photovoltaik auch für Kleininvestoren attraktiv macht, zu begründen. Die solarthermische Stromerzeugung unterscheidet sich von der photovoltaischen Stromerzeugung darin, dass unterschiedliche physikalischer Effekte zur Erzeugung eines Spannungsgefälles genutzt werden.

Bei der Photovoltaik geschieht dies auf direktem Wege unter Nutzung des inneren Photoeffekts. Dabei werden die Valenzelektronen eines Halbleiters durch auftreffende Photonen in ihrem Energieniveau angehoben und aus ihrem Valenzband gelöst. Das Prinzip macht sich die Elektronen-Loch-Paare in Halbleitern mit unterschiedlich dotierten, hintereinander liegenden Halbleiterschichten zu Nutze, wodurch ein Spannungsgefälle aufgebaut wird. Der erzeugte elektrische Strom kann in einem Akkumulator zwischengespeichert, oder mit Hilfe eines netzgeführten Wechselrichters in das Stromnetz eingespeist werden. Die Stromerzeugung mit photovoltaischen Anlagen unterscheidet sich daher wesentlich von der herkömmlichen Stromerzeugung mit Wärmekraftmaschinen.

Die solarthermische Stromerzeugung basiert hingegen auf der herkömmlichen Stromerzeugung, die sich den technologischen Fortschritt der heutigen Kraftwerksprozesse zu Nutze machen kann. Der Unterschied zu herkömmlichen Kraftwerken liegt darin, dass die fossil befeuerte Wärmequelle gegen eine Wärmequelle auf der Basis konzentrierter Solarstrahlung ausgetauscht wird. Die Konzentration erfolgt auf optischem Wege, indem die Solarstrahlung an konkav gekrümmten Reflektoren umgelenkt wird. Die konzentrierte Solarstrahlung wird von einem Strahlungsempfänger absorbiert. Durch Absorption der konzentrierten Solarstrahlung in einem Receiver erhöht sich dessen Temperatur. Dabei wird die Wärme an ein geeignetes Wärmeträgermedium übertragen. Das Wärmeträgermedium kann wiederum als Wärmespeicher verwendet werden, oder die Wärme nach dem Transport an ein zusätzliches Wärmespeichermedium abgeben. Die gespeicherte Wärme wird für das Antreiben eines thermodynamischen Kreisprozesses zur Stromerzeugung genutzt. Wesentliche konzeptionelle Unterscheidungen der solarthermischen Kraftwerke liegen in der Art der Konzentration, sowie der Auswahl der Receivertechnologie, des Wärmeträgermediums, der Speichertechnologie, des Speichermediums und des angetriebenen Kreisprozesses.

Bei der Art der Konzentration unterscheidet man zwischen linien- und punktfokusierenden Konzentratorsystemen. Es hat sich in vorangegangenen theoretischen Potenzialbewertungen gezeigt, dass in großtechnischem Maßstab die Solarturmtechnologie sowohl linienfokusierenden Konzepten, als auch Dish-Stirling-Systemen, hinsichtlich ihrer Potenziale zur Kostenreduktion überlegen ist. Dennoch sind die Stromgestehungskosten von Solarturmkraftwerken (15-17 €cent/kWh$_{el}$) im Vergleich zur Stromerzeugung auf fossiler Basis (3-5 €cent/kWh$_{el}$) zu hoch, um mit ihnen ohne politisch unterstützte Subventionen kurzfristig konkurrieren zu können. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, das Potenzial zur Senkung der Stromgestehungskosten von Innovationen im Bereich der Solarturmtechnologie zu bewerten [11-13].