

Reihe 6

Energietechnik

Nr. 616

Dipl.-Ing. Tobias Vogel, Mülheim a. d. Ruhr

## Thermische Kraftwerkskonzepte zur kombinierten Nutzung von Erdgas und Solarwärme



# **Thermische Kraftwerkskonzepte zur kombinierten Nutzung von Erdgas und Solarwärme**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Tobias Vogel  
aus  
Mülheim a. d. Ruhr

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner

Tag der mündlichen Prüfung: 02.05.2016



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 6

Energietechnik

Dipl.-Ing. Tobias Vogel,  
Mülheim a. d. Ruhr

Nr. 616

Thermische  
Kraftwerkskonzepte  
zur kombinierten  
Nutzung von Erdgas  
und Solarwärme

VDI verlag

Vogel, Tobias

## **Thermische Kraftwerkskonzepte zur kombinierten Nutzung von Erdgas und Solarwärme**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 6 Nr. 616. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

276 Seiten, 147 Bilder, 82 Tabellen.

ISBN 978-3-18-361606-0, ISSN 0178-9414

€ 95,00/VDI-Mitgliederpreis € 85,50.

**Für die Dokumentation:** Concentrated Solar Power (CSP) – Solarthermisches Kraftwerk – Parabolrinnen-Kollektor – Dampfturbine – Solarwärme-Erdgas-Hybrid-Kraftwerk – Einbindung von Industrie-Gasturbinen – Betriebsverhalten – Kraftwerksberechnung – Quasi-stationäre Jahresertragssimulation – Thermodynamische Gesamtsystemanalyse

Bei der Transformation der weltweiten Stromerzeugungsstruktur hin zu einem weitestgehend auf erneuerbare Energien gestützten System, bilden Hybrid-Kraftwerke, kombinierend erneuerbare und fossile Energien, einen wichtigen Zwischenschritt. Für Regionen mit ausreichender Verfügbarkeit von Solarwärme und Erdgas sind thermische Solarwärme-Erdgas-Hybrid-Kraftwerke eine interessante Option.

Vor diesem Hintergrund behandelt die vorliegende Arbeit zwei wesentliche Forschungsaspekte für derartige Hybrid-Kraftwerke. Zum einen wird detailliert das Betriebsverhalten von Solarwärme-Erdgas-Hybrid-Kraftwerken im Jahresverlauf in stündlicher Auflösung anhand von quasi-stationären Simulationen unter Berücksichtigung wesentlicher technischer Randbedingungen analysiert. Zum anderen werden verschiedene Konzepte zur Integration von Industrie-Gasturbinen in Solarwärme-Erdgas-Hybrid-Kraftwerke entwickelt, untersucht und techno-ökonomisch bewertet.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,  
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Universität Duisburg-Essen  
genehmigte Dissertation  
Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner  
Datum der mündlichen Prüfung: 02.05.2016

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9414

ISBN 978-3-18-361606-0

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT) der Universität Duisburg-Essen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner, der mir die Forschung im Themenbereich der solarthermischen Stromerzeugung ermöglichte. Das stets entgegengebrachte Vertrauen sowie die wissenschaftliche Betreuung habe ich sehr geschätzt. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner danke ich für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit. Darüber hinaus danke ich Frau Prof. Dr. Tina Kasper und Frau Prof. Dr. rer. nat. Angelika Heinzel für ihr Mitwirken in der Prüfungskommission.

Meine Dissertation konnte ich in dem freundschaftlich, kollegialen Arbeitsumfeld am LUAT anfertigen. Deswegen möchte ich an dieser Stelle allen derzeitigen und ehemaligen Arbeitskollegen sowie Studenten am LUAT danken. Einen ganz besonderen Dank spreche ich Herrn Dr.-Ing. Gerd Oeljeklaus aus. Die vielen fachlichen Diskussionen haben mich weitergebracht und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Auch meinen ehemaligen Diplom-, Bachelor- und Masteranden gilt ein spezieller Dank für die begleitenden Forschungstätigkeiten.

Ferner möchte ich den in meinen Forschungsprojekten beteiligten Partnern für die Gespräche und gegebenen Hinweise einen Dank aussprechen, wobei ich namentlich Ph.D. E. Burin (USFC), Dr.-Ing. J. Dersch (DLR), Dr.-Ing. T. Polklas, Dr.-Ing. K. Saidi, Dr.-Ing. C. Tümmers, F. Kores, C. Frekers (alle MAN Diesel & Turbo SE, kurz: MAN) nennen möchte. Ergänzend danke ich Herrn F. Runkel (SHAMS Power Company) für die Interviewmöglichkeit. Ebenso gilt ein expliziter Dank den Firmen MAN und Siemens AG für die zur Verfügung gestellten Gasturbinen Performance Data-Sets.

Die Stipendienggeber Greif-Stiftung, Studienstiftung des deutschen Volkes und Dr. Jürgen Ulderup Stiftung ermöglichten es mir, meinen Bewusstseinsbereich durch internationale Aufenthalte in Studium und Promotion zu erweitern, wofür ich sehr dankbar bin.

Insbesondere möchte ich noch meinen Eltern, Dorothea und Werner Vogel, ausdrücklich für die kontinuierliche Unterstützung in meiner gesamten schulischen und akademischen Ausbildung danken.

Der abschließende, größte Dank gebührt meiner Freundin, Janna Cornelißen. Aus unserer Partnerschaft konnte ich stets die notwendige Kraft gewinnen, mich gestärkt meiner Promotion zu widmen.

Essen, Juni 2016

*Tobias Vogel*





# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
Lateinische Buchstaben .....	VII
Griechische Buchstaben .....	VIII
Indizes .....	IX
Abkürzungen .....	XI
<b>Hinweise .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>XV</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung und Motivation .....	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit .....	8
<b>2 Bewertungsgrößen .....</b>	<b>10</b>
2.1 Thermodynamische Bewertungskriterien .....	10
2.1.1 Energetische Kennzahlen .....	11
2.1.2 Exergetische Kennzahlen .....	20
2.2 Wirtschaftliche Bewertungskriterien .....	22
2.2.1 Stromgestehungskosten .....	22
2.2.2 Grenzkosten .....	27
2.2.3 CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten .....	27
2.3 Randbedingungen .....	28
2.3.1 Thermodynamische Annahmen .....	28
2.3.2 Wirtschaftliche Annahmen .....	30
<b>3 Berechnungsgrundlagen .....</b>	<b>34</b>
3.1 Basiskraftwerk - Parabolrinnenkraftwerk SHAMS ONE .....	34
3.1.1 Standort .....	35
3.1.2 Aufbau des Basiskraftwerks .....	41
3.1.3 Stationäres Prozessverhalten .....	53
3.2 Modellerweiterung zur Abbildung des transienten Verhaltens des Wärmeträgerfluids .....	78
3.2.1 Thermodynamischer Zusammenhang .....	79
3.2.2 Stationäre Prozessergebnisse .....	82
3.3 Einbindung von Gasturbinen in den Kraftwerksprozess .....	86
3.3.1 Konzeptdarstellung .....	89
3.3.2 Auswahl der Gasturbine .....	92
3.3.3 Grundlagen zur Modellierung von Gasturbinen .....	94
3.3.4 Modellierung der GTa (THM 1304-14, Fa. MAN) .....	95
3.3.5 Stationäres Prozessverhalten der Konfigurationen zum BKWGT- Konzept .....	105
3.4 Entwicklung der Betriebslogik .....	115
3.4.1 Einteilung der Kraftwerks-Betriebszustände .....	116
3.4.2 Tag-Betrieb .....	117

3.4.3	Heater-Betrieb .....	123
3.4.4	Unterhalb-Mindestlast-Betrieb .....	126
3.4.5	Nacht-Betrieb .....	126
<b>4</b>	<b>Gesamtsystemanalyse .....</b>	<b>127</b>
4.1	Basiskraftwerk .....	128
4.1.1	Identifikation der Grundeinstellungen der Betriebslogik zur Steuerung des BKW-Betriebs .....	128
4.1.2	Gesamtverhalten des BKWs .....	143
4.1.3	Thermodynamische Bewertung .....	151
4.1.4	Wirtschaftliche Bewertung .....	152
4.2	Basiskraftwerk mit erweiterter Anlagenbetrachtung .....	157
4.2.1	Angepasste LuKo-Auslegung .....	157
4.2.2	Transientes Verhalten des WTFs .....	168
4.3	Basiskraftwerk mit Gasturbine .....	179
4.3.1	Gasturbinen-Jahresbetriebsverhalten .....	180
4.3.2	Einfluss der Restwärmeintegration in die HD-VW-Strecke .....	182
4.3.3	Jahres-Betriebsverhalten der Konfiguration BKWGTa1 .....	184
4.3.4	Jahres-Betriebsverhalten der Konfiguration BKWGTa2 .....	189
4.3.5	Jahres-Betriebsverhalten der Konfiguration BKWGTa3 .....	193
4.3.6	Quervergleich der drei Integrationsoptionen am BKWGTa-Modell .....	196
4.3.7	Quervergleich aller Konfigurationen zum BKWGT-Konzept .....	203
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>211</b>
<b>6</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>218</b>
6.1	Berechnung der standortabhängigen Solarstrahlung .....	218
6.2	Parabolrinnen-Kollektor und Solarfeld-Anordnung .....	220
6.2.1	Parabolrinnen-Kollektor .....	220
6.2.2	Solarfeld-Anordnung .....	222
6.3	Berechnungsgleichungen der Nutzungsgrade .....	224
6.4	Auswertung der Wetterdaten .....	225
6.5	Verluste im Solarfeld .....	225
6.5.1	Druckverlustberechnung .....	225
6.5.2	Wärmeverlustberechnung .....	227
6.6	Solar-Only-Referenzanlage .....	229
6.7	Integration von Gasturbinen in das BKW .....	233
6.7.1	Erarbeitete Optionen für das BKWGT-Konzept .....	233
6.7.2	Modellierung der GTb (SGT400, Fa. Siemens) .....	234
6.7.3	Modellierung der GTc (THM 1304-12N, Fa. MAN) .....	236
6.7.4	Energetische Bewertung der Konfigurationen .....	237
6.7.5	Einfluss der LuKo-Dimensionierung .....	239
6.7.6	Variation der Gasturbinen-Anzahl .....	243
6.8	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	248
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>251</b>

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Buchstaben

A	(Apertur-)Fläche
d	Durchmesser
e	spezifische Exergie
E	Exergie
$\dot{E}$	Exergiestrom
$\dot{E}_0$	extraterrestrische Solarstrahlungsleistung
$\dot{G}$	Strahlung
h	spezifische Enthalpie
$H_u$	Heizwert
i	Kostensatz; Anteil
$i_E$	realer jährlicher Eskalationssatz
$i_Z$	kalkulatorischer Zinssatz
J	Tageswinkel
k	Koeffizient Newtonsches Abkühlungsgesetz; Wärmedurchgangskoeffizient
K	Kosten
$K_1, K_2, \dots$	Koeffizienten
$K_{EW}$	Einfallswinkelkorrekturfaktor
l	Länge
L	relative Last
m	Masse
$\dot{m}$	Massenstrom
M	Systemgewichtungsfaktor
n	Anzahl; Häufigkeit
p	Druck; spezifische Kosten
P	elektrische Leistung
q	spezifische Wärme
Q	Wärmeenergie
$\dot{Q}$	Wärmeleistung
r	Radius
R	Abstand

$s$	spezifische Entropie
$t$	Zeit
$T$	Temperatur
$T_m$	thermodynamische Mitteltemperatur
$\bar{T}$	mittlere Temperatur
$\tilde{T}$	mittlere, leistungsgewichtete Temperatur
$\Delta T_m$	mittlere logarithmische Temperaturdifferenz
$v$	Geschwindigkeit
$\dot{V}$	Volumenstrom
$W$	elektrische Energie
$x$	Dampfgehalt
$\bar{x}$	mittlerer Dampfgehalt
$y$	Anteil; Dampfmasse
$\bar{y}$	mittlere Dampfmasse

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Azimut-Winkel; Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_{BF}$	Baumannfaktor
$\alpha_{BF}^*$	abgewandelter Baumannfaktor
$\beta$	Kollektorneigung
$\gamma$	Höhen-Winkel
$\delta$	Sonnendeklination
$\Delta$	Differenz
$\epsilon_{CO_2}$	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor
$\zeta$	exergetischer Wirkungsgrad (ZR: Nutzungsgrad); Widerstandsbeiwert
$\zeta_F$	Feuchtigkeitsverlust
$\eta$	Wirkungsgrad (ZR: Nutzungsgrad); dynamische Vis- kosität
$\eta_C$	Exergieanteil (bzw. Carnot-Wirkungsgrad)
$\eta_{opt,0}$	optischer Spitzenwirkungsgrad
$\theta$	Einfallswinkel
$\vartheta$	Fluidtemperatur
$\lambda$	geographische Länge; Wärmeleitfähigkeit
$\pi$	Kreiszahl (Pi)
$\rho$	Dichte

$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\tau$	Temperaturtransient ( $dT/dt$ )
$\varphi$	geographische Breite; Luftfeuchte
$\omega$	Stundenwinkel

## Indizes

a	außen	
abw	Abweichung	
aus	Austritt	
axial	axial	
AbwNutz	Abwärmenutzung	
AM	Arbeitsmaschine	
AP	Anlagenpreis	
AR	Abschreibungszeitraum	
AT	Alternativ-Technologie	
brutto	Bruttowert	
B	Bezugszeitpunkt	
BK	Brennkammer	
Br	Brennstoff	
DP	Design-Punkt	
DT	Dampfturbine	(ebenso Abkürzung)
eigen	Eigenbedarf	
ein	Eintritt	
el	elektrisch	
E	Erde	
End	Endverlust	
EZ	Emissionszertifikat	
feucht	feucht	
fossil	fossile Energie	
FD	Frischdampf	(ebenso Abkürzung)
Fokus	Fokussierung	
ges	gesamt	
gr	groß	
gas	gasseitig	
G	Generator	
GT	Gasturbine	(ebenso Abkürzung)

hybrid	Hybrid	
i	innen; jeweilige Komponente	
is	isentrop	
ISO-TET	ISO-Turbineneintrittstemperatur (ebenso Abkürzung)	
kl	klein	
KW	Kraftwerk	(ebenso Abkürzung)
L	Luft	
LuKo	luftgekühlter Kondensator	(ebenso Abkürzung)
max	Maximalwert	
mech	mechanisch	
min	Minimalwert	
M	Material	
Mo	Motor	
nenn	Nennlast	
netto	Nettowert	
nom	Nominalwert	
nutz	Nutzwert	
opt	optischer	
PB	Preisbasis	
PE	Projektentwicklung	
Per	Personal	
PK	Parabolrinnen-Kollektor	
rb	real bereitgestellt	
Ref	Referenz	
RL	Rohrleitung	
RT	Referenz-Technologie	
satt	Sattdampfzustand	
solar	solare Energie	
soll	Sollwert	
S	Sonne	
SF	Solarfeld	
SpR	Spiegelreinigung	
SSG	Solar Steam Generator	(ebenso Abkürzung)
SW	Speisewasser	(ebenso Abkürzung)
tb	theoretisch bereitstellbar	
teil	Teillast	

th	thermisch
trocken	trocken
U	Umgebung
V	Verlust; Versicherung; verdichtet
Vsa	Verlust aus Reihenabschattung
Vsm	Verlust aus Verschmutzung
VW	Vorwärmer (ebenso Abkürzung)
W	Wasser
WKM	Wärmekraftmaschine
WTF	Wärmeträgerfluid (ebenso Abkürzung)
WÜ	Wärmeübertrager (ebenso Abkürzung); Wärmeübertragung
zu	zugeführt
ZP	Zeitpunkt
ZR	Zeitraum (ebenso Abkürzung)
0	Basiszeitpunkt
1, 2, ...	Laufindizes

## Abkürzungen

ADE	Abhitzedampferzeuger
ADFEC	Abu Dhabi Future Energy Company
ADWEA	Abu Dhabi Water & Electricity Authority
ADWEC	Abu Dhabi Water & Electricity Company
AMPC	Al Mirfa Power Company
ASTRO	Abengoa Solar Trough
BK	Brennstoffkosten
BKW	Basiskraftwerk
BKWGT	Basiskraftwerk mit Vorschaltgasturbine
BOP	Balance of Plant
BWK	Betriebs- und Wartungskosten
CAPEX	Investitionskosten (capital expenditure)
CAS	Chemical Abstracts Service
CE	spezifische CO <sub>2</sub> -Emission
CEPCI	Chemical Engineering Plant Cost Index
CK	CO <sub>2</sub> -Kosten
CoCSPGT	Co-located CSP / Gas Turbine

CSP	concentrated solar power
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DNI	Direct Normal Irradiance
EC	Economiser
ELEP	Expansion Line End Point
ET	Euro Trough
EXW	Ex Works (deutsch: ab Werk)
Fa.	Firma
GK	Grenzkosten
GI	Gleichung
GSL	genutzte Solarleistung (ZR: Solarwärme)
GT	Gasturbine
GuD	kombiniertes Gas- und Dampfkraftwerk
GUI	graphical user interface (deutsch: graphische Benutzeroberfläche)
HAR	high ambient rating
HD	Hochdruck
HT	Helio Trough
IAM	Incidence Angle Modifier
IATA	International Air Transportation Association-Code
IS	Investition
ISCC	Integrated Solar Combined Cycle
ISO	International Organization for Standardization
ITD	interne Temperatur Differenz
kH	kalte Headerleitung
KG	Größe der Komponente
KK	Komponentenkosten
Kp	spezifischer Preis der Komponente
LCOE	Levelized Cost of Electricity Generation
LF	Load-Faktor
LUAT	Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagen- technik
LuKo	luftgekühlter Kondensator
LZ	lokale Zeit
MAN	MAN Diesel & Turbo SE
MD	Mitteldruck



MENA	Middle East & North Africa
MOZ	mittlere Ortszeit
ND	Niederdruck
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PV	Photovoltaik
Ra	hydraulische Rohrrauigkeit
Re	Reynoldszahl
SA	Solaranteil
SF	Solarfeld
SHCC	Solar-Hybrid-Combined-Cycle
SK	Stilllegungskosten
S-O-RA	Solar-Only-Referenzanlage
SPGT	Solar Preheat to Gas Turbine
SSTIG	Solar Steam Injected Gas Turbine
SV	Solarvielfaches
SWB	Speisewasserbehälter
T	Tank
TRANSCO	Abu Dhabi Transmission & Despatch Company
UEEP	Used Energy End Point
ÜH	Überhitzer
USFC	Universidade Federal de Santa Catarina
UT	Ultimate Trough
VAE	Vereinigte Arabische Emirate
VD	Verdampfer
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VF	Volumenstromfaktor
VK	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten
wH	warmer Headerleitung
WMO	World Meteorological Organization
WOZ	wahre Ortszeit
WTF	Wärmeträgerfluid
Zgl(J)	Zeitgleichung
ZÜ	Zwischenüberhitzung

## Hinweise

In der vorliegenden Dissertation werden Quellen mit numerischen Verweisen angegeben. Hierbei wird folgende Struktur angewandt:

- Erfolgt die Quellenangabe vor dem Satzzeichen, so bezieht sich die genannte Quelle auf den Satz.
- Erfolgt die Quellenangabe nach dem Satzzeichen, so bezieht sich die genannte Quelle auf den gesamten davorliegenden Teil des Absatzes.

Eine Abkürzung die ebenso als Index verwendet wird, ist im Symbolverzeichnis ausschließlich im Abschnitt Indizes aufgeführt. Zur Kennzeichnung ist der jeweils betreffende Index mit dem Hinweis „(ebenso Abkürzung)“ versehen.

## Kurzfassung

Hybrid-Kraftwerke stellen einen wichtigen Zwischenschritt auf dem Weg zu einer weitgehend auf erneuerbare Energien gestützten Energieversorgung dar. Für die Hybridisierung von solarthermischen Kraftwerken ist aus der Gruppe der fossilen Brennstoffe - Erdgas -, aufgrund seiner niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen und der technischen Vorteile bei der Integration in den Kraftwerksprozess, zu bevorzugen. Das Ziel der Arbeit ist es, eine derartige Hybridisierung bei Parabolrinnenkraftwerken zu modellieren und zu bewerten, wobei der Fokus der Betrachtung auf dem Betriebsverhalten des Kraftwerks sowie der Einbindung von Industrie-Gasturbinen liegt. Als exemplarischer Untersuchungsgegenstand dient das Kraftwerk SHAMS ONE. Basierend auf einer Literaturrecherche und Firmenangaben wurde für dieses Basiskraftwerk ein thermodynamisches Gesamtsystemmodell in der Entwicklungsumgebung des Kraftwerksberechnungsprogramms EBSILON®Professional erstellt. Aufgrund der am Standort stets veränderlichen Umgebungsbedingungen, erfolgt die Bewertung solcher Kraftwerke auf Basis von Jahresertragssimulationen.

Mit dem Ziel, hierbei wesentliche technische Randbedingungen zu berücksichtigen, wurde eine Kraftwerks-Betriebslogik entwickelt. Deren Funktionsfähigkeit und die damit verbundene Einhaltung der technischen Randbedingungen zeigt die Jahresertragssimulation des Basiskraftwerks auf. Dabei erwies sich der Kondensatordruck vor allem in den Sommermonaten als auffällig. Aus diesem Grund wurde als mögliche Prozessverbesserungsmaßnahme ergänzend eine größere Dimensionierung des LuKos betrachtet. Die Maßnahme ermöglicht, dass ein größerer Anteil der zur Verfügung stehenden Solarwärme im Kraftwerksprozess verstromt werden kann. Zur Berücksichtigung von Wärmeverlusten im Solar-Wärmeträgerfluid-Kreislauf, insbesondere bei Kraftwerksstillstand, wurde ein Verfahren entwickelt, welches das transiente Wärmeträgerfluid-Verhalten quasi-stationär abbildet.

Das entwickelte Konzept zur Integration von Industrie-Gasturbinen in der Leistungsklasse 10-20 MW<sub>el</sub> ermöglicht Peaker-Gasturbinen kostengünstig eine nachgeschaltete Verstromung ihrer Abwärme, bei gleichzeitig erhöhter Effizienz des Gesamtsystems. Dieses Konzept repräsentiert auch eine Alternative gegenüber dem weitverbreiteten Konzept der kombinierten Gas- und Dampfkraftwerke mit Solarwärme-Integration.

Es wurden drei Gasturbinen betrachtet, wobei das Betriebs- und Teillastverhalten über eigene thermodynamische Modelle bzw. Hersteller-Kennlinien abgebildet wurde. Die Integration der im Gasturbinenabgas enthaltenen Abwärme in den Kraftwerkskreislauf erfolgte über drei unterschiedliche Optionen. Anhand der durchgeführten Jahresertragssimulationen konnte dargelegt werden, dass der Brennstoff-Verstromungsgrad bei allen betrachteten Konfigurationen mit Gasturbinen-Integration gegenüber dem Basiskraftwerk ansteigt und dennoch vergleichsweise hohe Solaranteile ermöglicht. Je nach gewählter Option der Abwärmeintegration, tritt eine erhöhte Lastbeanspruchung der Dampfturbine auf, die im Umsetzungsfall hinsichtlich ihrer Zulässigkeit zu prüfen ist.

## Abstract

Hybrid power plants represent an important intermediate step on the way to an energy supply structure based substantially on renewable energies. Natural gas is the preferred fossil fuel for hybridization of solar thermal power plants, due to its low specific CO<sub>2</sub>-emission and technical advantages by means of integration into the power plant process. The purpose of this work is to model and evaluate such a hybridization of a parabolic trough power plant, whereby the focus is on the power plant operational behavior and the integration of industrial gas turbines. The power plant SHAMS ONE serves as an exemplary object of this study. Based on literature review and company statements, a thermodynamic simulation model of this base case power plant has been created within the power plant calculation program EBSILON®Professional. The evaluation of such a power plant is expediently done on basis of annual yield simulations, because of the inconstant ambient conditions.

With the objective to take the main technical constraints into account, a special power plant operational logic has been developed. Its functionality, with the associated consequent observance of the main technical constraints, demonstrates the annual yield simulation of the base case power plant. Thereby it turned out that especially in the summer month the condenser pressure is conspicuous. Therefore, an alternative dimensioning of the air cooled condenser has been studied as measure for process improvement. By doing this, a higher amount of solar heat conversion into electricity can be achieved. Furthermore a method has been developed, which depicts the transient heat transfer fluid behavior within a quasi-steady simulation series. Thereby heat losses in the solar heat transfer fluid circuit can be considered in particular at idle state of the power block.

In order to facilitate peaker gas turbines in an economical way, industrial gas turbines of the 10-20 MW<sub>el</sub> class have been integrated into the base case power plant. The concept has been set up, to make use of the gas turbine waste heat for power generation and increasing the overall power plant efficiency of the hybrid power plant at the same time. This concept also represents an alternative to the widely used concept of combined cycle power plants with solar heat integration.

Three different gas turbines have been studied, whereas their operating and partial load behavior were reproduced with thermodynamic models as well as with characteristic curves, latter delivered by the gas turbine manufacturers. The integration of the heat, contained in the gas turbines exhaust gas, into the water steam cycle was done with three different options. Based on the conducted annual yield simulations it could be demonstrated that the fuel to electricity conversion utilization ratio is increasing compared to the base case power plant, while ensuring yet comparatively high solar shares. Depending on the integration option temporarily steam turbine overload can occur, whose permissibility must be examined in case of implementation.