Markus Junk

Technical and economical assessment of various carbonate looping process configurations

Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Technical and economical assessment of various carbonate looping process configurations

Technical and economical assessment of various carbonate looping process configurations

Zur Erlangung des Grades eines Doktor der Ingenieurwissenschaft (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Markus Junk
Oktober 2016, Darmstadt
Darmstadt D-17
1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Bernd Epple
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Fachbereich Maschinenbau
Institut für Energiesysteme
und Energietechnik

Genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Markus Junk aus Gladbeck

Hauptberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Epple

Nebenberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl

Darmstadt D- 17

Technische Universität Darmstadt – Fachbereich Maschinenbau

Tag der Einreichung: 19.10.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 21.12.2016

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.
1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016
Zugl.: (TU) Darmstadt, Univ., Diss., 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

1. Auflage, 2016
Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9448-5
eISBN 978-3-7369-8448-6

Preface

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiesysteme und Energietechnik an der Technischen Universität Darmstadt. Ganz herzlich möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-lng. Bernd Epple, dem Leiter des Instituts und Betreuer meiner Doktorarbeit, bedanken. Er hat mir die Möglichkeit gegeben, mich mit vielfaltigen interessanten Aufgaben zu beschäftigen. Seiner Unterstützung, Beratung und Förderung konnte ich mir stets gewiss sein.

Ferner gilt mein besonderer Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Karl, der sich dazu bereiterklärt hat, die Mitberichterstattung für diese Arbeit zu übernehmen. Ihm und seinem Mitarbeiter Daniel Höftberger möchte ich vor allem für die besondere Unterstützung und Kooperation während des CARINA Projektes danken. Ohne den großen Einsatz bei dem Bau der Heatpipes wäre das Projekt nicht so erfolgreich abgelaufen.

Bedanken möchte ich mich auch ganz herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Jochen Ströhle, dem Akademischen Rat am Institut für Energiesysteme und Energietechnik. Seine Unterstützung, seine Anregungen und Hinweise haben einen wertvollen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet. "Danke" sagen möchte ich meinen Kollegen und Freunden, insbesondere Johannes Kremer, Ralf Starkloff, Peter Ohlemüller, Lorenz Frigge, Karl Karner, Josef Langen, Jan-Peter Busch, Matthias Orth, Vitali Kez, Martin Haaf, Alexander Daikeler, Jochen Hilz, Stefan Pfeiffer, Jörg Belz, Qu Zhichao, Ingo Zorbach, Ralf Postler, Falah Alobaid, Philipp Herdel, Martin Helbig, David Krause, Alexander Atroh und Alexander Galloy. Besonderer Dank geht auch an meinen Kollegen Michael Reitz und unsere Werkstatt, ohne die der Aufbau der Pilotanlage so nicht möglich gewesen wäre.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei unserer langjährigen Sekretärin Susanne Tropp, die mich immer bei allen Anliegen unterstützt hat. Allen anderen Kollegen des Instituts sowie allen Studenten, die bei mir ihre Studien-, Bachelor-, Diplom- oder Masterarbeiten geschrieben haben, gilt ebenfalls mein Dank. Besonders hervorheben möchte ich hier Katrin Armbrust, Tobias Wedemeier, Jan May und Jens Heußer, die einen wichtigen Beitrag für diese Arbeit geleistet haben. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Ulrich Priesmeier von der Steinmüller Babcock Environment GmbH für die freundliche Unterstützung im Rahmen des Projektes CARINA bedanken. Herrn Dr. Ing. Reinhold Elsen von der RWE AG danke ich für die langjährige Zusammenarbeit und die guten Gespräche im Rahmen der Vorlesung „Planung, Bau, Inbetriebnahmen und Betrieb von Großkraftwerken“.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Freundin Kristina Albert, meinem Bruder Andreas Junk und meinen Eltern Monika und Volker Junk aufs Herzlichste dafür bedanken, dass sie mich immer grenzenlos unterstützt und mir jederzeit den Rücken freigehalten haben. Auf Ihre Unterstützung während meines Studiums und der anschließenden Promotion konnte ich immer zählen.

Table of Contents

Nomenclature

Latin symbols

a	Decay constant of the solid fraction in the lean phase	1/m
A	Carbonator cross section	m²
AD	Annual depreciation	€/a
AEP	Annual electricity production	MWh
AEP_n	Electricity production in the year n	MWh
AH	Annual hours of operation	h
b	Decay constant of the contact efficiency in the lean phase	1/m
c	Concentration	-
CC	Capital costs	€
CC_n	Capital costs in year n	€
c_{CO2}	Average CO_2 concentration in the carbonator	mol/m³
c_{CO2}*	Equivalent CO_2 concentration in the carbonator	mol/m³
D	Carbonator diameter	m
d_p	Particle diameter	m
DP	Depreciation period	a
d_p*	Dimensionless particle diameter (K-L Model)	-
E	CO_2 capture efficiency	-
E_a	Activation energy	J/mol
e_{max}	Average carbonate layer thickness on the calcium oxide	m
F_0	Molar make-up-flow ($CaCO_3$)	mol/s
f_a	Fraction of active CaO in the carbonator	-
F_{Ash}	Molar ash flow introduced into the CL process	mol/s
FC	Fuel costs	€
f_{Calc}	Average calcination efficiency	-
f_{Carb}	Average carbonation in the carbonator	-
FC_n	Fuel costs in the year n	€
F_{CO2}	Molar CO_2 flow to the carbonator	mol/s
f_m, f_w	Limestone specific parameter	-
FOC	Fixed operating costs	€

FOC_n	Fixed operating costs in the year n	€
FP	Fuel price	€/t
F_R	Molar CaO flow in the solid loop	mol/s
$F_{R,Ash}$	Molar ash flow in the solid loop	mol/s
$F_{R,S}$	Molar calcium sulfate flow in the solid loop	mol/s
F_{Rt}	Molar solid circulation flow between reactors	mol/s
F_S	Molar calcium sulfate flow introduced into the CL process	mol/s
g	Gravity	m/s^2
G_s	Specific mass flow at the carbonator exit	kg/m^2*s
h	Specific enthalpy	J/kg
H	Enthalpy	J/mol
H_d	Height of the dense phase	m
H_l	Height of the lean phase	m
HP	Heating price	$€/MWh_{th}$
HP_n	Heating price in the year n	$€/MWh_{th}$
H_t	Total height of the carbonator	m
i	Full cylces without make-up introduction	-
IC_{Total}	Total investment costs	€
IDC	Interest during construction	€
I_n	Interest payment in the year n	€
k	Deactivation constant of the sorbent	-
K	Equilibrium constant	-
k'''	Reaction rate constant of a first order reaction (K-L model)	-
$k‘$	Reaction rate constant	-
k_0	Reaction constant of the Arrhenius equation	-
K_{cw}	Exchange coefficient (core-wall)	1/s
k_r	First order reaction rate constant of the carbonation reaction	$m^3/mol*s$
k_{ri}	Average reaction velocity of the carbonation reaction of the active sorbent particel	1/s
k_s	Intrinsic reaction rate constant of the carbonation reaction	$m^4/mol*s$
LAR	Levelized asset retirement costs	€/MWh
LC	Levelized costs of the respective cost component	€/MWh

LCC	Levelized capital costs	€/MWh
$LCOE$	Levelized costs of electricity	€/MWh
$LCOE_{PP}$	LCOE of reference plant without IHCL process	€/MWh
$LCOE_{PP+IHCL}$	LCOE of reference plant with IHCL process	€/MWh
LFC	Levelized fuel costs	€/MWh
$LFOC$	Levelized costs of electricity	€/MWh
LHV	Lower Heating Value	MJ/kg
$LVOC$	Levelized variable operating costs	€/MWh
$\Delta LCOE$	Difference of the LCOE (reference plant with and without IHCL)	€/MWh
m	Mass	kg
$\dot{m}$	Mass flow	kg/s
M	Molar mass	g/mol
n	Mole	mol
N	Number of cycles	-
N_{age}	Number of full carbonation/calcination	-
NPV	Added net present values of the respective cost component	€/MWh
OC	Owner costs	€
p	Pressure	Pa
P	Electrical power	W
p_{CO2}	Price of CO_2 certificate	€/t CO_2
$P_{el,gr}$	Electrical Gross Power	MW_{el}
PR	Performance ratio	-
$\dot{Q}$	Heat flow	W
R	Universal gas constant	J/kmol*K
$r_{Fo,}$	Age structure at the last make-up introduction	-
r_N	Fraction of the particles in cycle N	-
r_{Nage}	Fraction of particles with N_{age} full carbonation/calcination cycles	-
S	Active reaction surface	
S_0	Initial active reaction surface	m^2/m^3
S_N	Specific active reaction surface of one particle in cycle N	m^2/m^3
$sp.AR$	Specific costs for asset retirement	€/$MW_{el,gr}$

$sp.FOC_n$	Specific fixed operating costs in the year n	€/$MWh_{el,gr}$
$sp.TC_n$	Specific total costs in the year n	€/ $MWh_{el,gr}$
$sp.VOC_n$	Specific variable operating costs in the year n	€/$MWh_{el,gr}$
T	Temperature	° C
t	Time	s
TC_n	Total costs in the year n	€
t_{lim}	Time that is necessary to reach full conversion	s
TPC	Total Plant Costs	€
u	Gas velocity	m/s
u_0	Superficial gas velocity	m/s
u_t	Terminal velocity	m/s
u_t^*	Dimensionless terminal velocity	-
V	Volume	m^3
$\dot{V}$	Volume flow	m^3/s i.Br.
v/r	Reaction rate	1/s
V_M	Molar volume	m^3/mol
VOC	Variable operating costs	€
VOC_n	Variable operating costs per year	€
w	Velocity	m/s
W_s	Solid inventory carbonator	kg
X	Particle conversion	-
X_{ave}	Average sorbent conversion	-
x_i	Mole fraction	-
$X_{max,ave}$	Average maximum sorbent conversion	-
X_N	Maximum conversion at the end of the fast reaction phase	-
X_r	Particle end conversion after a high number of cycles	-
y	Volume fraction	-
z	Height	m

Greek symbols

δ	Core volume fraction of the dense phase	-
Δx_{CaSO4}	Average sulfated sorbent fraction per cycle	-
ε^*	Asymptotic solid volume fraction	-
ε_0	Particle porosity	-
ε	Solid volume fraction or auxiliary electrical power	-
η	Efficiency	-
μ	Viscosity	kg/m*s
ξ	Volume ratio of Ca particles to all particles in the system	-
ρ	Density	kg/m³
τ	Average residence time (space time)	s
τ_a	Active space time	s
Ψ	Pore structure parameter	-

Indices

0	Make Up
a	Potential active fraction
ave	Average
Calc	Calciner
cap	Captured
Carb	Carbonator
CL	Carbonate Looping
cond	Condenser
d	Dense phase
diss	Dissipated
el	Electric
eq	Chemical equilibrium
evap	Evaporator
F	Fuel
g	Gas phase
in	Input parameters

l	Lean phase
LS	Loopseal
max	Maximum
mf	Minimal Fluidization
NB	New Built
out	Outlet flow
PHR	Preheated Retrofit
R	Retrofit
s	Solid phase
th	Thermal
tot	Total
w	Wall region of the fluidized bed

Most used chemical symbols

C	Carbon
C_3H_8	Propane
$Ca(OH)_2$	Calcium hydroxide
$CaCO_3$	Calcium carbonate (limestone)
CaO	Calcium oxide (burnt lime)
CH_4	Methane
CO	Carbon monoxide
CO_2	Carbon dioxide
H_2	Hydrogen
H_2O	Water
N_2	Nitrogen
N_2O	Nitrous oxide
NO_x	Nitrous oxide
O_2	Oxygen
SO_2	Sulfur dioxide

Abbreviations

AG	Aktiengesellschaft (Stock company)
BFB	Bubbling Fluidized Bed
Cal	Calciner
Car	Carbonator
CCS/U	Carbon Capture and Storage/Utilization
CFB	Circulating Fluidized Bed
CFD	Computational Fluid Dynamics
CL	Carbonate Looping
CLC	Chemical Looping Combustion
COORETEC	CO_2-Reduktions-Technologien (Initiative of BMWi)
DEA	Diethanol-Amine
DEM	Discrete Element Method
EB	Entrained Bed
EPC	Engineering, Procurement and Construction
EPRI	Electric Power Research Institute
Eqs	Equation
EST	Institute for Energy Systems and Technology (TU Darmstadt)
EU	European Union
FAU	Friedrich-Alexander Universität Nürnberg
FGD	Flue Gas Desulfurization Unit
Fig	Figure
GKM	Grosskraftwerk Mannheim
GPU	Gas Processing Unit
Gt	Gigatonne
GW	Gigawatt
HE	Heat Exchanger
I/O	Input/output
IEA	International Energy Agency
IEAGHG	IEA Greenhouse Gas R&D Programme
IFK	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (Stuttgart)

IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IHCL	Indirectly Heated Carbonate Looping Process
$IHCL_{NP}$	Indirectly Heated Carbonate Looping Process (New Build Plant)
$IHCL_{PHR}$	Indirectly Heated Carbonate Looping Process (Preheated Retrofit)
$IHCL_{R}$	Indirectly Heated Carbonate Looping Process (Retrofit)
INCAR-CSIS	Instituto Nacional del Carbón - CSIC
INDC	Intended Nationally Determined Contributions
IR	Imputed interest rate
IR_{AR}	Imputed interest rate for asset retirement
ITRI	Industrial Technology Research Institute (Taiwan)
K-L	Kunii-Levenspiel
kW_{th}	Kilowatt (thermal)
LP	Low Pressure
LT	Lifetime
M&E	Mass and Energy Balance
MEA	Monoethanol-Amine
MP	Medium Pressure
MW	Megawatt
n	Operating year
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
Ppm	Parts Per Million
PSD	Particle Size Distribution
RFCR	Research Fund For Coal and Steel
RK	Rotary Kiln
SCL_{R}	Standard Carbonate Looping (Retrofit)
SCR	Selective Catalytic Reduction ($DeNO_x$)
TGA	Thermogravimetric analysis
TUD	Technische Universität Darmstadt
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

List of Figures