



Ralf Postler



**Modellbildung und Simulation
instationärer Prozesse
in einer Oxyfuel-Kraftwerksanlage**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



„Modellbildung und Simulation instationärer Prozesse
in einer Oxyfuel-Kraftwerksanlage“





„Modellbildung und Simulation instationärer Prozesse in einer Oxyfuel-Kraftwerksanlage“

Dem Fachbereich Maschinenbau an der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

M.Sc. Dipl.-Ing.(FH) Ralf Postler
aus Hildburghausen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. B. Epple
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. J. Janicka

Tag der Einreichung: 29.05.2012
Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2012

Darmstadt 2012

D 17



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, 2012

Zugl.: (TU) Darmstadt, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-303-3

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-303-3



Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Esslingen, den 20.05.2012

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Technischen Universität Darmstadt am Institut für Energiesysteme und Energietechnik.

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Epple danken für die Gelegenheit, dieses spannende Thema rund um die Dynamik einer Oxyfuel-Kraftwerksanlage bearbeiten zu dürfen. Die vielfältigen Anregungen und wertvollen fachlichen Diskussionen waren bei der Durchführung der Arbeit eine unschätzbare Hilfe.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Janicka für die Mitberichterstattung bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich auf diesem Wege bei unserem akademischen Rat Herrn Dr.-Ing. Ströhle sowie meinen Institutskollegen Herrn Dipl.-Ing. Karner und Herrn Dipl.-Ing. Pfeiffer für den steten fachlichen Austausch bedanken, der ebenfalls zur inhaltlichen Bereicherung dieser Arbeit beigetragen hat. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Servaty und Herrn Binzer für die enge Zusammenarbeit bei allen Fragestellungen zur Informationstechnik.

Ferner darf ich mich an dieser Stelle bei den Mitarbeitern von Alstom Boiler Deutschland GmbH und Alstom Carbon Capture GmbH für die freundliche Unterstützung während der gesamten Bearbeitungsphase bedanken. Namentlich hervorheben möchte ich dabei Herrn Dr.-Ing. Wild aus der Abteilung „Feuerungstechnik“ und Herrn Dr.-Ing. Marquardt aus der Abteilung „Wärmetechnik“ ebenso wie Herrn Dipl.-Ing. Heim und Herrn Dipl.-Ing. Ferrand aus der Abteilung „Prozessdynamik“ und Herrn Dipl.-Ing. Kluger aus der Abteilung „Forschung und Entwicklung“ (alle Alstom Boiler Deutschland GmbH) sowie Herrn Dipl.-Ing. Stallmann aus der Abteilung „CO₂ Capture Systems“ (Alstom Carbon Capture GmbH).

Besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Frau und meinen Kindern bedanken. Ihre Geduld und Rücksicht während der Erstellung der Arbeit sowie ihre moralische Unterstützung waren ein wesentlicher Bestandteil des erfolgreichen Gelingens der Dissertation.

Nicht zuletzt geht ein Dankeschön an meine Eltern, die mir das Studium und damit die eigentliche Voraussetzung für die Promotion erst ermöglichten.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Motivation	7
1.2	Zielsetzung	9
1.3	Gliederung der Arbeit	10
2	Grundlagen und Stand der Technik	13
2.1	Gasseite des luftgefeuerten Prozesses	13
2.1.1	Charakterisierung	13
2.1.2	Gasseitige Betriebsstörungen	14
2.1.3	Berichte über Schäden nach Betriebsstörung	16
2.1.4	Instationäre Simulationsmodelle	17
2.1.5	Zusammenfassung der charakteristischen Einflussgrößen	26
2.2	Gasseite des Oxyfuelprozesses	28
2.2.1	Charakterisierung	28
2.2.2	Instationäre Simulationsmodelle	31
3	Charakterisierung der Anlage	37
3.1	Kreislauf der Wasser-/Dampfseite	37
3.2	Kreislauf der Gasseite	38
3.3	Feuerungssystem	40
4	Modellaufbau	42
4.1	Modellplattform Apros	42
4.2	Modellarchitektur des Oxyfuelmodells	44
4.3	Kreislauf der Wasser-/Dampfseite	46
4.3.1	Modellumfang und -grenzen	46
4.3.2	Diskretisierung der Wärmeübertrager-Einheiten	47
4.3.3	Wärmeübertragermodell	48
4.4	Ventilatoren	52
4.4.1	Modellierung des Kennfeldes	53
4.4.2	Berücksichtigung der Temperaturerhöhung	53
4.4.3	Auslaufverhalten	55
4.5	Regenerativer Gasvorwärmer	58



4.5.1	Ersatzmodell	59
4.5.2	Modellannahmen	60
4.5.3	Äquivalenzgeometrie	60
4.6	REA-Wärmeübertrager	61
4.6.1	Ersatzmodell	62
4.6.2	Modellannahmen	62
4.7	Entstickungsanlage	63
4.7.1	Ersatzmodell	63
4.7.2	Modellannahmen	63
4.7.3	Äquivalenzgeometrie	64
4.8	Elektrostatistischer Partikelfilter	64
4.8.1	Ersatzmodell	65
4.8.2	Modellannahmen	65
4.9	Entschwefelungsanlage	66
4.9.1	Ersatzmodell	66
4.9.2	Modellannahmen	67
4.10	Rauchgaskondensator	67
4.10.1	Ersatzmodell	68
4.10.2	Modellannahmen	68
4.10.3	Äquivalenzgeometrie	68
4.11	Indirektes Feuerungssystem	70
4.11.1	Entwicklung der Übertragungsfunktion	70
4.11.2	Herleitung der Zeitkonstanten	71
5	Instationäre Simulationen	72
5.1	Gasseitige Betriebsstörungen	72
5.1.1	Ausgangsszenario Feuer-Not-Aus	72
5.1.2	Sensitivitätsanalyse	77
5.1.3	Optimiertes Szenario Feuer-Not-Aus	86
5.1.4	Ausfall des Rezirkulationsventilators	88
5.1.5	Ausfall der Transportgaskompressoren	91
5.1.6	Totaler Stromausfall (Schwarzfall)	94
5.1.7	Zusammenfassung der gasseitigen Betriebsstörungen	98
5.2	Umschalten der Betriebsweise	100
5.2.1	GPU-Teilmodell	100
5.2.2	Umschalten von Luft- in Oxyfuelbetrieb	101
5.2.3	Umschalten von Oxyfuel- auf Luftbetrieb	104
5.3	Lastwechselverhalten	107
5.3.1	Laständerung von 85 auf 100 % BMCR	107
5.3.2	Variante 1: Laständerung von 70 auf 100 % BMCR mit gekoppeltem O ₂ -Strom	109
5.3.3	Variante 2: Laständerung von 70 auf 100 % BMCR mit entkoppeltem O ₂ -Strom	111



5.3.4 Zusammenfassung Lastwechselsimulation	114
6 Zusammenfassung	115
7 Ausblick und Folgearbeiten	119
Literaturverzeichnis	121
A Thermodynamische Prozessgrößen	132
B Prozesstechnik	133
B.1 Leittechnische Ausgangsparameter FNA-Szenario	133
B.2 Gestaffelte Brennstoffreduktion	135
B.3 Ersatzkennfeld GPU-Verdichter	135
B.4 Bildungsvorschrift der bezogenen Größen	136

Abbildungsverzeichnis

1.1	Anteile der Primärenergieträger an der deutschen Stromerzeugung 2009 . .	6
1.2	Klassifizierung der CCS-Verfahren	7
2.1	Prozessfließbild einer Rohbraunkohleanlage mit Wärmeverschiebesystem . .	14
2.2	Qualitatives Verhalten der Prozessparameter bei Flammenausfall nach [45], eigene Bearbeitung	16
2.3	Qualitativer Verlauf des Brennkammerdruckes in Abhängigkeit des Verhal- tens von SZV und FLV nach [45], eigene Bearbeitung	16
2.4	Qualitativer Verlauf des Druckprofils bei Über- und Unterdruckfeuerung . .	17
2.5	Einflussfaktoren bei der Entwicklung von gasseitigen Simulationsmodellen .	18
2.6	Erweitertes Regelkonzept für die SZV Schaufelposition nach [45], eigene Be- arbeitung	28
2.7	Prozessfließbild einer Oxyfuelanlage mit TBK-Feuerung nach [78], eigene Bearbeitung	29
2.8	Vereinfachtes Prozessschema des Oxyfuelmodells aus [43]	31
2.9	Anfahrsequenz für Kaltstart mit Oxyfuelmodell aus [43]	32
2.10	Prozessfließbild für das instationäre Oxyfuelmodell aus [86]	34
2.11	Simulierte Transienten im Feuerraum aus [86]	35
2.12	Simulierte Transienten im Gaskanalsystem aus [86]	36
3.1	Anordnung der Wärmeübertragereinheiten im Dampferzeuger aus [103] . .	38
3.2	Prozessfließbild für die Prozessführung der Gasseite aus [103]	39
3.3	Prozessfließbild für das indirekte Feuerungssystem aus [103]	40
4.1	Prinzipielle Modellierung eines Fluidsystems in Apros	42
4.2	Versetzte räumliche Diskretisierung gemäß der „staggered-grid“-Methode aus [108]	44
4.3	Räumliche Diskretisierung einer Wärmeübertragerwand (oben) und dazu korrespondierendes qualitatives Temperaturprofil (unten), nach [109]	45
4.4	Modellarchitektur der modellierten Oxyfuelanlage	46
4.5	Modellumfang Wasser-/Dampfseite basierend auf [103]	47
4.6	Diskretisierung der WÜT-Einheiten des Oxyfuel-Dampferzeugers basierend auf [103]	48



4.7	Diskretisierung der Brennkammer und der dazu korrespondierenden Verdampfersegmente	49
4.8	Gegenüberstellung der WÜT-Geometrie von realer Struktur (links) und Modell (rechts)	50
4.9	Regelstruktur zur Einstellung des stationären Wärmeübergangs	51
4.10	Prozessseitige Anordnung der Ventilatoren aus [103]	52
4.11	Abbildung des Modell-Kennfeldes eines Axialventilators	53
4.12	Analoge Berechnungsstruktur zur In-situ-Berechnung der Temperaturerhöhung im Ventilator	54
4.13	Anteile der Terme für Druck und Wirkungsgrad an der Gesamttemperaturerhöhung	55
4.14	Analoge Berechnungsstruktur zum dynamischen Auslaufverhalten der Ventilatoren	57
4.15	Vergleich der herstellerseitigen Auslaufkurve mit der Auslaufkurve des Auslaufmodells [36]	58
4.16	Massenstromleckagemodell für einen Drehluvo aus [114]	59
4.17	Modellabstraktion eines Drehluvo (links) zu einem Platten-WÜT (rechts) .	59
4.18	Modularer Aufbau der Wärmeübertragungsstruktur für eine einzelne Stützstelle	61
4.19	Gegenüberstellung des realen WVS-Prozesses (links; nach [103] und [116], eigene Bearbeitung) mit dem abgeleiteten Prozessmodell (rechts)	62
4.20	Gegenüberstellung der realen DeNOx-Geometrie (links; nach [103], eigene Bearbeitung) mit dem Ersatzmodell (rechts)	63
4.21	Gegenüberstellung der realen EF-Komponente (links; nach [118], eigene Bearbeitung) mit dem Ersatzmodell (rechts)	65
4.22	Gegenüberstellung der realen REA-Komponente (links; nach [118] und [119], eigene Bearbeitung) mit dem Ersatzmodell (rechts)	66
4.23	Gegenüberstellung des realen RGK-Prozesses (links; nach [118], eigene Bearbeitung) mit dem abgeleiteten Prozessmodell (rechts)	68
4.24	Zuordnung der Geometrieparameter für den Platten-WÜT als Ersatzmodell	69
4.25	Prozessfließbild für das indirekte Feuerungssystem aus [103]	70
4.26	Signalflussbild für das indirekte Feuerungssystem	70
5.1	Leittechnische Maßnahmenkette für das Ausgangsszenario FNA	73
5.2	Wesentliche Prozessparameter im Feuerraum während des Ausgangsszenarios FNA	74
5.3	Wesentliche Prozessparameter entlang des Rezi-Traktes während des Ausgangsszenarios FNA	75
5.4	Wesentliche Prozessparameter entlang des RG-Reinigungstraktes während des Ausgangsszenarios FNA	75
5.5	Gegenüberstellung des stationären und instationären Druckprofils für das Ausgangsszenario FNA	76
5.6	Transienten des BK-Druckes für verschiedene Brennstoffreduktionszeiten .	78



5.7	Transienten des BK-Druckes für verschiedene Konzepte der Oxidantklappenregelung	80
5.8	Transienten des BK-Druckes in Abhängigkeit der Stellzeit der RGK Bypassklappe	81
5.9	Massenstrom durch RGK Bypass bei verschiedenen Klappenstellzeiten . . .	82
5.10	Transienten des BK-Druckes in Abhängigkeit der Stellzeiten für Luft- und Rezi-Klappe	83
5.11	Transienten des BK-Druckes in Abhängigkeit der Reduktionszeit des Sauerstoffstromes	84
5.12	Transienten des BK-Druckes in Abhängigkeit des REV Regelkonzeptes . .	85
5.13	Leittechnische Maßnahmenkette für optimiertes FNA-Szenario	87
5.14	Wesentliche Prozessparameter im Feuerraum während des optimierten FNA-Szenarios	88
5.15	Leittechnische Maßnahmenkette für die Betriebsstörung „Ausfall REV“ . .	89
5.16	Wesentliche Prozessparameter im Feuerraum während der Betriebsstörung „Ausfall REV“	89
5.17	Wesentliche Prozessparameter entlang des Rezi-Traktes während der Betriebsstörung „Ausfall REV“	90
5.18	Wesentliche Prozessparameter entlang des RG-Reinigungstraktes während der Betriebsstörung „Ausfall REV“	91
5.19	Leittechnische Maßnahmenkette für die Betriebsstörung „Ausfall TKG“ . .	92
5.20	Wesentliche Prozessparameter im Feuerraum während der Betriebsstörung „Ausfall TKG“	93
5.21	Wesentliche Prozessparameter entlang des Rezi-Traktes während der Betriebsstörung „Ausfall TKG“	93
5.22	Wesentliche Prozessparameter entlang des RG-Reinigungstraktes während der Betriebsstörung „Ausfall TKG“	94
5.23	Leittechnische Maßnahmenkette während der Betriebsstörung „Totaler Stromausfall“	95
5.24	Wesentliche Prozessparameter im Feuerraum während der Betriebsstörung „Totaler Stromausfall“	96
5.25	Wesentliche Prozessparameter entlang des Rezi-Traktes während der Betriebsstörung „Totaler Stromausfall“	96
5.26	Wesentliche Prozessparameter entlang des RG-Reinigungstraktes während der Betriebsstörung „Totaler Stromausfall“	97
5.27	Signalfluss zur Abbildung des Anfahrens der GPU-Verdichterstation	100
5.28	Modellstruktur des GPU-Verdichtermodells	101
5.29	Saugdruckverhalten beim Anfahren des GPU-Verdichtermodells	101
5.30	Leittechnische Maßnahmenkette bei Übergang vom Luft- in Oxyfuelbetrieb	102
5.31	Gasmassenströme bei Umschalten von Luft- auf Oxyfuelbetrieb	103
5.32	RG-Komponenten am REA-Austritt bei Umschalten von Luft- auf Oxyfuelbetrieb	104
5.33	Leittechnische Maßnahmenkette bei Übergang vom Oxyfuel- in Luftbetrieb	105

VIII



5.34	Gasmassenströme bei Umschalten von Oxyfuel- auf Luftbetrieb	105
5.35	RG-Komponenten am REA-Austritt bei Umschalten von Oxyfuel- auf Luft- betrieb	106
5.36	O ₂ -Sollwert und Brennstoff-Istwert bei Lastwechsel von 85 auf 100 % BMCR	107
5.37	WD-Parameter bei Lastwechsel von 85 auf 100 % BMCR	108
5.38	Gasseitige Parameter bei Lastwechsel von 85 auf 100 % BMCR	109
5.39	O ₂ -Sollwert und Brennstoff-Istwert bei Lastwechsel von 70 auf 100 % BMCR, Var. 1	110
5.40	WD-Parameter bei Lastwechsel von 70 auf 100 % BMCR, Var. 1	110
5.41	Gasseitige Parameter bei Lastwechsel von 70 auf 100 % BMCR, Var. 1	111
5.42	O ₂ -Sollwert und Brennstoff-Istwert bei Lastwechsel von 70 auf 100 % BMCR, Var. 2	112
5.43	WD-Parameter bei Lastwechsel von 70 auf 100 % BMCR, Var. 2	113
5.44	Gasseitige Parameter bei Lastwechsel von 70 auf 100 % BMCR, Var. 2	113
B.1	Gestaffelte Brennstoffreduktion der einzelnen Feuerungsebenen	135
B.2	Synthetisches Ersatzkennfeld für das Teilmodell der GPU-Verdichterstufen	135

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Modellerstellung und die instationäre Simulation einer Oxyfuelanlage im Demonstrationsmaßstab mit 250 MW_{el}. Aufbauend auf den von Alstom bereitgestellten Auslegungsdaten wurde ein Prozessmodell entwickelt, das sowohl den mit Trockenbraunkohle gefeuerten Oxyfuel-Dampferzeuger als auch das transiente Verhalten von Luftzerlegungsanlage und Gas Processing Unit (GPU) umfasst. Gegenstand der dynamischen Simulationsstudien waren gaseitige Betriebsstörungen mit Feuer-Not-Aus als Folge, das Umschalten des Betriebsmodus zwischen Luft- und Oxyfuelbetrieb sowie das Lastwechselverhalten. Im Zuge der Simulation der gaseitigen Betriebsstörungen wurde zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Aufbauend auf deren Resultat wurde anschließend ein ganzheitliches Konzept an praktikablen leittechnischen Maßnahmen dargelegt und mit Hilfe der Simulation bestätigt, um die gaseitigen Druckextrema während der Betriebsstörung aktiv zu reduzieren. Als wesentliche Resultate der Simulation des Umschaltvorganges wurde eine optimale Schaltsequenz für die Hauptklappen des Gaskanalsystems entwickelt sowie ein betriebsgerechter Umstieg von Kamin- auf GPU-Betrieb erarbeitet und getestet. Im Rahmen der Lastwechseluntersuchungen wurde die maximale Lastwechselkapazität des Gesamtsystems aufgezeigt. Die Vorhersagen basieren auf einer O₂-Wechselrate von 5% BMCR/min und einer speziell darauf abgestimmten Brennstoffvorsteuerung.



Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
Lateinische Formelzeichen		
A	Fläche	m^2
a	relative Querteilung des Rohrbündels	—
b	relative Längsteilung des Rohrbündels	—
	Breite	m
c	spezifische Wärmekapazität	kJ/kg K
	Konzentration	Ma. — %, Vol. — %
d	Durchmesser	m
f	Reibungsbeiwert	—
	Korrekturfaktor Nu-Beziehung bei Rohrbündeln	—
G	komplexe Funktion im Laplace-Bereich	—
h	Höhe	m
I	Massenträgheitsmoment	kg m^2
K	Korrekturfaktor zum modellseitigen Wärmeübergang	—
	Verstärkungsfaktor Laplace-Bereich	—
k	Anzahl	—
l	Länge	m
m	Masse	kg
M	Drehmoment	Nm
$\dot{M}$	Massenstrom	kg/s
n	Drehzahl	$1/\text{s}$
	Anzahl der Rohre, Platten	—
Nu	Nusselt-Zahl	—
p	Druck	bar
P	Leistung	W
Pr	Prantl-Zahl	—
Q	Wärmemenge	J
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
R	spezielle Gaskonstante	kJ/kg K
Re	Reynolds-Zahl	—