

Reihe 6

Energietechnik

Nr. 622

Jan Claas Scheffler M. Sc.  
Hamburg

## Physikalische Modellierung einer Kohlemühle im Kontext der Regel- leistungsbereitstellung



# Physikalische Modellierung einer Kohlemühle im Kontext der Regelleistungsbereitstellung

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Jan Claas Scheffler

aus

Lübeck

2020

1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Alfons Kather
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Henning Zindler
Vorsitzender des Prüfungsausschusses:	Prof. Dr.-Ing. Christian Becker
Tag der mündlichen Prüfung:	16. Januar 2020

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 6

Energietechnik

Jan Claas Scheffler M.Sc.  
Hamburg

Nr. 622

Physikalische Modellierung  
einer Kohlemühle im  
Kontext der Regel-  
leistungsbereitstellung

VDI verlag

Scheffler, Jan Claas

## **Physikalische Modellierung einer Kohlemühle im Kontext der Regelleistungsbereitstellung**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 6 Nr. 622. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

134 Seiten, 56 Bilder, 17 Tabellen.

ISBN 978-3-18-362206-1, ISSN 0178-9414

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

**Für die Dokumentation:** Systemsimulation – physikalische Modellierung – Dynamik – Kohlemühle – Steinkohle – Dampfkraftprozess – Sekundärregelleistung – Doppelhöcker – Modelica – Flexibilisierung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss der Kohlemühle auf das Lastwechselverhalten des steinkohlebefeuerten Dampfkraftprozesses untersucht. Dazu wird ein physikalisches Modell einer Steinkohlemühle entwickelt, verifiziert und mit Betriebsmessdaten validiert. Das validierte Mühlenmodell wird mit einem umfassenden Modell eines Steinkohlekraftwerks gekoppelt. Anschließend werden die Mühlensteuergrößen Primärluftmassenstrom, Sichterzahl und Mahlwalzendruck in verschiedenen Szenarien geregelt und übersteuert. Als Grundlage aller Szenarien dient stets das Präqualifikationsverfahren zur Bereitstellung von Sekundärregelleistung, der sogenannte Doppelhöckertest. Die Bewertung der verschiedenen Regelungskonzepte erfolgt anhand der bereitgestellten elektrischen Nettoleistung des Gesamtprozesses.

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

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.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 [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

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 978-3-18-362206-1

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik an der Technischen Universität Hamburg.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfons Kather für die Möglichkeit zur Promotion, seine Art den Dingen ihren Lauf zu lassen und zum richtigen Zeitpunkt mit wertvollen Ratschlägen zu unterstützen. Auch danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Zindler für seine Diskussionsbereitschaft, seine wertvollen Hinweise und für die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Becker danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen für die gemeinsame Zeit am Institut bedanken. Ich werde gerne an die Kickerspiele, gemeinsame Kurzurlaube und besuchte Karnevalsfeiern zurückdenken. Besonders danke ich Herrn Rafailidis, der mir mit der Übernahme jeglicher organisatorischer Aufgaben stets den Rücken freihielt. Mein persönlicher Dank gilt Herrn Jan Braune für seine stets ungetrübt gute Laune im Büroalltag und seine Unterstützung bei der Arbeit mit Modelica® und bei allen weiteren Herausforderungen.

Bei Herrn Theodor Kinn und Herrn Volker Heinz bedanke ich mich für die Bereitstellung der notwendigen Validierungsdaten, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Auch gilt mein Dank Herrn Hartmut Rapp und Herrn Jens-Peter Thiel für ihre Expertise, die sie bereitwillig mit mir teilten.

Meinen Eltern und meiner Familie danke ich von ganzem Herzen für ihre Unterstützung nicht nur während des Studiums und für die gemeinsamen Wochenenden in der Heimat. Ganz besonders und nicht zuletzt danke ich Eva für ihre Unterstützung beim Lektorat dieser Arbeit, die notwendige Ablenkung und die gemeinsame Zeit für die wirklich wichtigen Dinge im Leben.

Hamburg, im Januar 2020

Jan Claas Scheffler





# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Vorgehensweise .....	3
2 Stand der Technik .....	5
2.1 Kohlemühlen .....	5
2.2 Modellierung von Kohlemühlen.....	8
3 Modellbildung .....	11
3.1 Mahlen.....	12
3.2 Transport .....	24
3.3 Sichten .....	28
3.4 Trocknen .....	30
3.5 Modellierung der Gasphase .....	32
4 Bewertung der Modellgüte.....	34
4.1 Verifizierung.....	34
4.2 Validierung.....	38
4.3 Sensitivitätsrechnungen.....	49

5	Einfluss der Mühlendynamik auf den Gesamtprozess .....	53
5.1	Beschreibung des Kraftwerksmodells.....	53
5.2	Bereitstellung von Systemdienstleistungen .....	60
5.3	Das Referenzszenario .....	62
5.4	Variation der Mühlensteuergrößen.....	72
5.5	Potenzial der Kohlemühle .....	86
6	Zusammenfassung .....	103
	Anhang .....	106
	Literatur .....	113

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Wenn nicht zusätzlich gekennzeichnet, sind alle physikalische Größen in SI-Einheiten angegeben.

## Abkürzungen

BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
DeNO <sub>x</sub>	Rauchgasentstickung
DGL	Differenzialgleichung
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
HD	Hochdruck
HGI	Hardgrove-Index
LuVo	Luftvorwärmer
MPS	Mühle, Pendel, Schüssel
MW-Druck	Mahlwalzendruck
ND	Niederdruck
PrimLu	Primärluft
Ref.	Referenz
Rezi	Rezirkulation
STABW	Standardabweichung
SRL	Sekundärregelleistung
VDN	Verband der Netzbetreiber
waf	wasser- und aschefrei

## Lateinische Symbole

A	Fläche
$A_M$	Mantelfläche
$A_R$	Kreisringfläche
$B, \underline{B}$	Bruchfunktion, Bruchmatrix
b	Breite
$c_w$	Widerstandsbeiwert
$c_{hydr}$	hydraulische Federkonstante
d	Durchmesser
$d_{50,3}$	massenbezogener mittlerer Korndurchmesser
F	Kraft
G	Übertragungsfunktion
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
h	spezifische Enthalpie
$\Delta h_v$	spezifische Verdampfungsenthalpie
$K_v$	Volumenanteil Partikel
m	Masse
N	Anzahl
n	Drehzahl
P	Leistung
p	Druck
Q	Energie in Form von Wärme
r	Radius
$S, \underline{S}$	Auswahlfunktion, Auswahlmatrix
$s_0$	Grundwert der Zerkleinerung
T	Temperatur
T	Trennfunktion
t	Zeit
U	innere Energie
u	Absolutgeschwindigkeit der Partikel

### Lateinische Symbole (Fortsetzung)

u	Eingangssignal
V	Volumen
v	Geschwindigkeit des Gases
w	Relativgeschwindigkeit der Partikel
y	Ausgangssignal

### Griechische Symbole

$\alpha_B$	Böschungswinkel
$\beta$	Winkel Archimedische Spirale
$\eta$	Wirkungsgrad
$\xi$	Massenanteil
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Standardabweichung
$\Phi$	Umlaufzahl
$\varphi_i$	innerer Reibungswinkel
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

## Indizes

el	elektrisch
f	fluid
FD	Frischdampf
grenz	Grenzwert
hydr	Hydraulik
K	Korn/Partikel
Kond	Kondensator
krit	kritisch
KS	Kohlenstaub
MWD	Mahlwalzendruck
N	Normzustand
nom	nominal
norm	normiert
PL	Primärluft
r	radial
Reib	Reibung
RK	Rohkohle
s	Sättigung
SG	Schüttgut
SWB	Speisewasserbehälter
t	tangential
th	thermisch
Verl	Verlust
ZT	Zuteiler
zu	zugeführt
ZÜ	Zwischenüberhitzung

## Kurzfassung

Bei der heutigen Erzeuger- und Netzinfrastruktur und dem gegebenen Strommarktdesign dienen konventionelle Kraftwerke der Deckung der Residuallast sowie der Bereitstellung der Systemdienstleistungen. An konventionelle Kraftwerke wird dadurch die Anforderung des Betriebs bei niedrigen Teillasten und mit hohen Laständerungsgeschwindigkeiten gestellt. Die Stromerzeugung in einem konventionellen steinkohlebefeuerten Dampfkraftwerk ist jedoch nicht beliebig schnell anpassbar. Unter anderem übt das Speicher- und Transportverhalten der Kohlemühle erheblichen Einfluss auf die Dynamik des Gesamtprozesses aus.

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Kohlemühle auf das dynamische Verhalten eines steinkohlenbefeuerten Dampfkraftprozesses untersucht. Dazu wird die Kohlemühle auf Basis physikalischer Gleichungen modelliert. Das Kohlemühlenmodell wird verifiziert und mit Betriebsmessdaten in verschiedenen Szenarien validiert. Anschließend wird das validierte Mühlenmodell mit dem Modell eines Referenzkraftwerks gekoppelt. Das gewählte Szenario aller Simulationen ist der sogenannte Doppelhöckertest, welcher die Präqualifikationsbedingungen zur Bereitstellung von Sekundärregelleistung beschreibt. Es werden verschiedene Szenarien definiert, in welchen die Mühlensteuergrößen Primärluftmassenstrom, Mahlwalzendruck und Sichterzahl sowie der Gradient des Leistungssollwerts variiert werden. Die Ergebnisse werden einem Referenzszenario gegenübergestellt. Die Bewertungsgrundlage sind stets die Anforderungen des Doppelhöckertests an die bereitgestellte elektrische Nettoleistung am Generator.

Ohne die Regelung der genannten Mühlensteuergrößen benötigt der Prozess im Referenzszenario  $\Delta t_{100} = [466 \text{ s}, 676 \text{ s}]$  um eine Sekundärregelleistung von 10 % der nominalen Nettoleistung bereitzustellen. Eine kombinierte Regelung aus allen drei Mühlensteuergrößen führt zu einer Reduktion der Anstiegszeit auf  $\Delta t_{100} = [327 \text{ s}, 343 \text{ s}]$ . Die zusätzliche Übersteuerung der Mühlensteuergrößen kann die Anstiegszeiten weiter reduzieren, ist jedoch stets mit Ausgleichseffekten verbunden, welche zum anschließenden Unterschwingen der Sekundärregelleistung führen können. Die Erhöhung des Gradienten des Leistungssollwerts führt zu Anstiegszeiten von  $\Delta t_{100} = [286 \text{ s}, 283 \text{ s}]$ , bewirkt jedoch ebenfalls ein Unterschwingen. Durch die Reduktion der Sekundärregelleistung auf 8 % der nominalen Nettoleistung können die Präqualifikationsbedingungen erfüllt werden.

