

Olaf Höhne

**Grundlagenuntersuchungen zum
Einfluss des Systemdrucks
auf die Trocknung von Braunkohle
in Wasserdampf**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss des Systemdrucks auf die Trocknung von Braunkohle in Wasserdampf





Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss des Systemdrucks auf die Trocknung von Braunkohle in Wasserdampf

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und
Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen
Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Olaf Höhne

geboren am 13. Oktober 1975 in Cottbus

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. pol. F. Müsgens

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H. J. Krautz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H. P. Berg

Tag der mündlichen Prüfung:

16. Dezember 2011



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) Cottbus, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-076-6

© 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

978-3-95404-076-6



Vorwort

Wesentliche Grundlagen der vorliegenden Arbeit entstanden in der Zeit von Ende 2003 bis Anfang 2009 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus und am Centrum für Energietechnologie e.V.. Die Weiterführung und Fertigstellung der Arbeit erfolgte parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit als Mitarbeiter der Vattenfall Europe Generation AG.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. J. Krautz, der auch nach meinem Tätigkeitswechsel die Arbeit wissenschaftlich betreute und durch seine wertvollen Anregungen stets förderte. Für die Übernahme des Koreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H. P. Berg. Herrn Prof. Dr. rer. pol. F. Müsgens danke ich für Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Für die kritischen und kreativen Diskussionen insbesondere bei der Interpretation der Versuchsergebnisse gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. M. Klatt, der mich auch durch sein hohes Interesse an einzelnen Themen der Arbeit sehr unterstützt hat.

Zum Gelingen der Arbeit haben durch die stets positive Zusammenarbeit viele Kollegen und Mitarbeiter des Lehrstuhls Kraftwerkstechnik und des CEBra e.V. beigetragen. Besonders möchte ich mich bei den Laborantinnen Frau M. Grütza und Frau D. Seifert bedanken, die begleitende Untersuchungen und Analysen sorgfältig und gewissenhaft durchführten.

Meiner Familie danke ich ganz herzlich für die vielen Entbehrungen und geduldige Wegbegleitung der letzten Jahre, denn die Arbeit parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit zu vollenden war mit vielen Belastungen und Herausforderungen verbunden.

Cottbus, März 2012

Olaf Höhne





Kurzfassung

Die Braunkohle ist ein weltweit wichtiger Primärenergieträger der in Deutschland hauptsächlich zur Strom- und Fernwärmeerzeugung genutzt und in Kohleveredlungsbetrieben zu Festbrennstoffen weiterverarbeitet wird. Voraussetzung für die energetische und stoffliche Nutzung der Braunkohle ist ein effizientes und wirtschaftliches Trocknungsverfahren. Hierfür ist die Wirbelschichttrocknung in einer überhitzten Wasserdampfatmosphäre besonders geeignet. Mit der Integration des Verfahrens in ein braunkohlebefeuetes Kraftwerk kann der Wirkungsgrad signifikant gesteigert und gleichzeitig dessen Emissionen gesenkt werden. Weiterhin ist es als Basis für alle modernen Kraftwerksprozesse zur Stromerzeugung und zur Umwandlung der Braunkohle zu flüssigen, gasförmigen oder festen Produkten einsetzbar.

Optimierungspotentiale des Verfahrens können erschlossen werden, wenn es mit geringer Partikelgröße und unter erhöhtem, moderatem Systemdruck durchgeführt wird. Der Einfluss des Drucks auf die Trocknung von Braunkohle, insbesondere auf die Bindungswärme, ist theoretisch und experimentell betrachtet worden. Weiterhin wurden der kapillare Energie- und Stofftransport modelliert. Die experimentellen Untersuchungen sind an einer feuchten, aschereichen Lausitzer Braunkohle mit einem gravimetrischen Messsystem in einer Wasserdampfatmosphäre bei Drücken zwischen 1,0 und 6,0 bar und Temperaturen bis 200 °C durchgeführt worden. Es wurden der Druckeinfluss auf das Desorptionsgleichgewicht, die Brühdichte und die Änderung des Gleichgewichtswassergehalts durch Druckentspannung messtechnisch erfasst. Die gewonnenen Daten bildeten die Grundlage zur Ermittlung des Trocknungsverlaufs, des kapillaren Energie- und Stofftransports, der Bindungswärme und des gesamten thermischen Trocknungsenergieaufwands. Dabei wurde die Bindungswärme analytisch direkt ermittelt.

Die durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen erweitern die Grundlagen, um Verfahren zur Trocknung von Braunkohle unter erhöhtem Druck in einer Wasserdampfatmosphäre technisch und wirtschaftlich optimiert auslegen zu können.





Abstract

Lignite is globally an important primary source of energy which is used in Germany mainly to generate electricity and district heat as well as to process solid fuels in refinement plants. Prerequisite for an energetic and material use of lignite is an efficient and economic drying process. The fluidised bed drying in a superheated steam atmosphere is particularly suitable for this. By integrating this process in a lignite fired power plant, the efficiency can be increased significantly and emissions can be reduced at the same time. Furthermore the drying process can be also used as a base for all modern power plant processes to generate electricity and for conversion of lignite to upgraded liquid, gaseous or solid products.

The process can be optimised if it is carried out with small particle size and under increased, moderate system pressure. The influence of pressure on the drying of lignite, in particular on the heat of binding, has been considered theoretically and experimentally. Furthermore the capillary energy and material transport was modelled. The experimental investigations were performed with a moist, ash-rich Lusatian lignite by using a gravimetric measurement system in a steam atmosphere at pressures from 1.0 to 6.0 bar and temperatures up to 200 °C. The effect of pressure on the desorption equilibrium, on the exhaust vapour density and on the change of equilibrium water content by depressurising was measured. The gained data formed the basis to determine the characteristics of the drying process, the capillary energy and material transport, the heat of binding and the total thermal drying energy expenditure. Thereby the heat of binding was calculated directly in an analytical way.

The performed scientific studies contribute the fundamental understanding to optimise the design of drying processes for lignite under increased pressure in a steam atmosphere with regard to technical and economical aspects.





Inhalt

Nomenklatur	XII
1 Einleitung und Motivation der Arbeit	1
1.1 Bedeutung der Braunkohletrocknung für eine effiziente und emissionsarme Energieversorgung	1
1.2 Kenntnisstand der Trocknung unter erhöhtem Druck	5
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung	8
2 Entwicklungsstand der Verfahren zur Entfernung des Wassers aus der Braunkohle	11
2.1 Verfahrensprinzipien	11
2.2 Entwässerungsverfahren	13
2.3 Trocknungsverfahren	18
2.3.1 Konvektionstrockner	18
2.3.1.1 Mahltrocknung	19
2.3.1.2 Flugstromtrocknung	20
2.3.1.3 Wirbelschichtkonvektionstrocknung	22
2.3.2 Kontaktstrockner	25
2.3.2.1 Röhrentrocknung	25
2.3.2.2 Wirbelschichtkontaktstrocknung	27
3 Grundlagen der Trocknung von Braunkohle in Wasserdampf	35
3.1 Charakterisierung der Braunkohle	35
3.2 Das Wasser der Braunkohle	36
3.3 Sorptionsgleichgewicht	38
3.4 Trocknungsverlauf	44



4	Modellierung des kapillaren Energie- und Stofftransports bei der Trocknung in Wasserdampf	47
4.1	Energie- und Stofftransportvorgänge in der Kapillare	47
4.2	Teilschritte der Desorption	48
4.3	Isosterische Sorptionswärme	50
4.4	Kapillarmodell	55
4.5	Dampftransport in der Kapillare	61
5	Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Desorptionsisobaren in Wasserdampf	64
5.1	Methoden der Sorptionsmessung in Wasserdampf unter erhöhtem Druck	64
5.1.1	Allgemeine Anforderungen	64
5.1.2	Volumetrische / manometrische Methoden	65
5.1.3	Gravimetrische Methoden	67
5.1.4	Oszillometrische Methoden	70
5.1.5	Impedanzspektroskopische Methoden	72
5.1.6	Kalorimetrische Methoden	74
5.2	Auswahl und Aufbau der Versuchsanlage	75
5.3	Charakterisierung der Versuchskohle	78
5.4	Durchführung der Versuche	82
5.5	Auswertung der Versuche	85
5.6	Diskussion der Versuchsergebnisse	89
5.6.1	Brühdendichte	89
5.6.2	Trocknungsverlauf	91
5.6.3	Desorptionsisobare	93
5.6.4	Nachverdampfung	94
6	Interpretation der Versuchsergebnisse	97
6.1	Systemdruckeinfluss	97
6.1.1	Einfluss des Systemdrucks auf die Brühdendichte	97



6.1.2	Einfluss des Systemdrucks auf den kapillaren Energie- und Stofftransport	98
6.1.3	Einfluss des Systemdrucks auf die Desorptionsisobare	99
6.1.4	Einfluss des Systemdrucks auf die Bindungswärme	101
6.1.5	Einfluss des Systemdrucks auf die Nachverdampfung	107
6.1.6	Einfluss des Systemdrucks auf den Trocknungsenergieaufwand	110
6.2	Kohletypenfluss	114
6.2.1	Einfluss des Kohletyps auf die Desorptionsisobare	114
6.2.2	Einfluss des Kohletyps auf die Bindungswärme	115
7	Zusammenfassung und Ausblick	117
8	Literatur	121
	Anhang	135



Nomenklatur

Formelzeichen

Symbol	Maßeinheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche
a	mol/m ²	Oberflächenkonzentration
c	J/(kg·K), m/s	spezifische Wärmekapazität, Geschwindigkeit
F	N	Kraft
f	-	Funktion
G	J	Gibbs-Energie
g	m/s ²	Erdschwerebeschleunigung
H	J	Enthalpie
h	J/mol, J/kg	molare, spezifische Enthalpie
I	N·s	Impuls
K	-	Konstante
M	kg/mol	molare Masse
m	kg	Masse
N	-	Anzahl
n	1/mol	molare Anzahl
p	bar, Pa	Druck
Q	J, W	Wärme
q	J/kg	spezifische Wärme
R	J/(kg·K)	Gaskonstante
r	m	Radius
S	J/K	Entropie
s	J/(K·mol)	molare Entropie
T	°C, K	Temperatur, absolute Temperatur
t	s	Zeit
U	J	innere Energie
u	J/kg	spezifische innere Energie
V	m ³	Volumen
v	m ³ /mol	molares Volumen



w	Ma.-%, -	Wassergehalt
x	Ma.-%, -	Feuchtegehalt
Z	-	Koeffizient, Zahl
z	m	Ortskoordinate

Griechische Buchstaben

Symbol	Maßeinheit	Bedeutung
α	°	Winkel
Δ	-	Delta, Differenz
η	Pa·s	dynamische Viskosität
λ	m	mittlere freie Weglänge
μ	J/mol	chemisches Potential
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	J/m ²	Oberflächenspannung
Φ	J/m ²	flächenbezogene Spannung
φ	-	relative Gasfeuchte, Wasserdampfspannung

Indizes

Symbol	Bedeutung
.	zeitbezogen
0, 1, 2...	Laufindex
A	Asche
Auf	Auftrieb
Aus	Austritt
Avo	Avogadro
B	Brüden
Bi	Bindung
D	Dampf
Ein	Eintritt
f	frei
Gas	gasförmiger Aggregatzustand



Nomenklatur

Gew	Gewicht
GG	Gleichgewicht
K	Kohle
Kn	Knudsen
Ko	Kondensat
m, n	Exponent
Mono	monomolekular
NVD	Nachverdampfung
p	Druck
PB	Probebehälter
R	Reibung
RBK	Rohbraunkohle
res	resultierend
S	Sättigungszustand
Sorp	Sorption
T	Trocknung, Temperatur
Te	Teer
TBK	Trockenbraunkohle
Tra	Transport
Ü	Überhitzung
uni	universell
V	Verdampfung
v	volumenbezogen
W	Wasser
Zyl	Zylinder

Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
Ma.-%	Masseprozent