

Chemical Quenching: Eine Option für zukünftige kohlebefeuerte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke mit integrierter Kohlevergasung

J. Starflinger, IKET

Einleitung

Im Rahmen des THERMIE-Projektes der Europäischen Union wurde in Puertollano, Spanien, ein IGCC-Kraftwerk (Integrated Gasification Combined Cycle) mit einer Nettoleistung von 317,7 MW_{el} und einem Wirkungsgrad von 47,1% (bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffs) gebaut [1]. Eine Hauptkomponente dieses Kraftwerks ist der PRENFLO-Vergaser (PREssure ENtrained FLOW), der aus dem asche- und schwefelreichen Brennstoff ein Synthesegas mit einem unteren Heizwert von etwa 22,5 MJ/kg erzeugt [2].

Ein ähnlicher Vergaser mit dem Namen CARBO-V (CARBON-Ver-gasung) wurde bei der Firma UET [3], Freiberg, entwickelt. Er unterscheidet sich vom PRENFLO-Vergaser in der Methode, wie das in der Brennkammer erzeugte

Gas abgekühlt wird. Diese zu PRENFLO verschiedene Verfahrensführung wird „Chemical Quenching mit Kohlenstoffpartikeln“ genannt und hat einen erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung des erzeugten Kohlegases und die thermische Nutzung seiner fühlbaren Wärme.

Das Ziel der nachfolgenden Untersuchung bestand darin, die Vergaser mit CHEMCAD zu modellieren und dann mittels eines Vergleichs unter denselben Randbedingungen herauszufinden, welches Potential das „Chemical Quenching“ beim Einsatz in einem IGCC-Kraftwerk aufweist.

Vergasertypen

PRENFLO

PRENFLO (siehe Abb. 1) ist ein zwei-stufiger Flugstromvergaser von der Firma Krupp Koppers,

Dortmund [2]. Am unteren Ende des Vergasers liegt die Brennkammer, in welcher Kohlestaub und zurückgeführte Flugasche mit Wasserdampf und technischem Sauerstoff unterstöchiometrisch, d.h. unter Sauerstoffmangel, bei ca. 1500°C verbrannt wird. Das Kohlegas verlässt die Brennkammer am oberen Ende, wo es mit kaltem gereinigtem Kohlegas (Quench-Gas in Abb. 1) vermischt wird. Dadurch sinkt seine Temperatur auf ca. 900°C ab. Über zwei Strahlungswärmetauscher wird es weiter abgekühlt und anschließend zur Gasreinigung geleitet [4].

CARBO-V

CARBO-V ist ebenfalls ein zwei-stufiger Flugstromvergaser, entwickelt von der Firma UET in Freiberg [3]. Am Kopf des Vergasers (siehe Abb. 2) werden Kohlestaub, zurückgeführter Koks, zu-

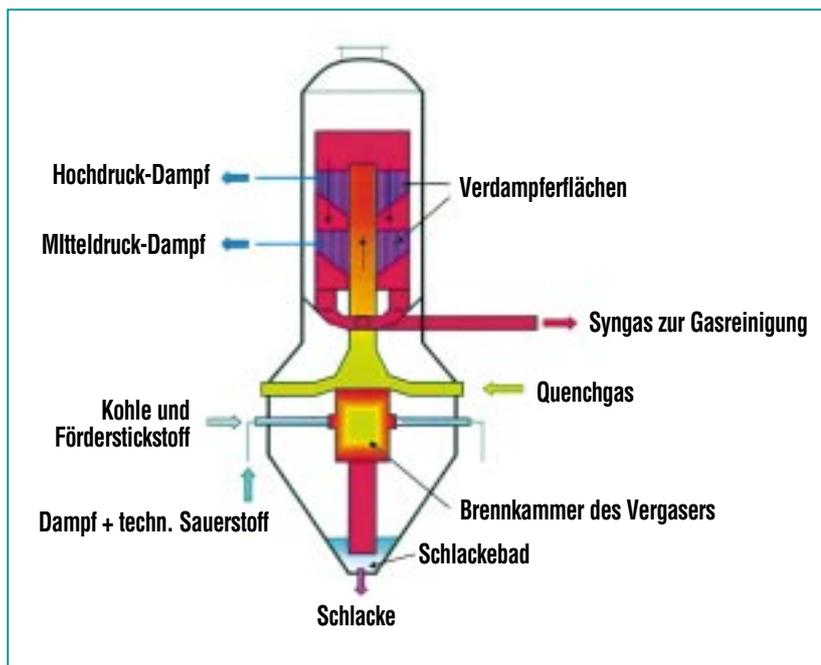


Abb. 1: Skizze des PRENFLO-Vergasers [2].

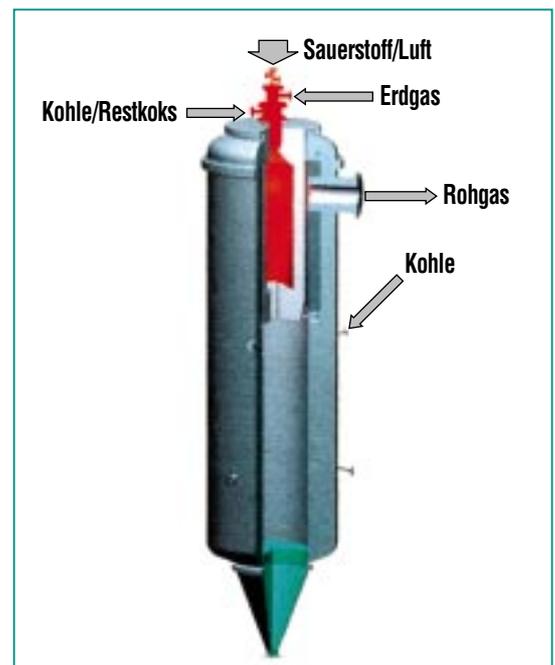


Abb. 2: Skizze des CARBO-V-Vergasers [3].

sätzlich Erdgas zum Anfahren des Vergasers, Dampf und technischer Sauerstoff der Brennkammer zugeführt, in der ebenfalls eine unterstöchiometrische Verbrennung bei ca. 1500°C stattfindet.

Durch eine Öffnung im Boden der Brennkammer (1. Stufe) treten die flüssige Schlacke und das erzeugte Gas im Gleichstrom in die 2. Stufe ein und werden dort mit eingeblasenem Kohlestaub ver-

mischt. In dieser 2. Stufe findet eine endotherme Reaktion des Kohlenstoffs mit Kohlendioxid und Wasserdampf aus der 1. Stufe statt [5], wodurch die Temperatur auf ca. 900°C absinkt. Dieser Vorgang wird „Chemical Quenching mit Kohlenstoffpartikeln“ genannt. Das entstandene Kohlegas wird nach Verlassen des Vergasers vorgereinigt und zu den Strahlungswärmetauschern geleitet.

Modellierung

Vereinfachende Annahmen und Randbedingungen

Bei der Simulation der beiden Vergasertypen, die mit dem Programm CHEMCAD [6] durchgeführt wird, sind folgende vereinfachende Annahmen getroffen worden:

- Die Kohle (Pittsburgh Nr. 8) wird durch ein Gemisch aus Einzelkomponenten und chemischen Verbindungen zusammengestellt, die in Summe die reale atomare Speziesverteilung gemäß den Analysen des Argonne National Laboratory [8] wiedergibt. Der Heizwert des Gemisches (31,44 MJ/kg) wird im Programm manuell eingestellt.
- Die Brennkammer (1. Stufe) beider Vergaser wird im Programm als sog. „Gibbs Reaktor“ modelliert, in dem thermisches und chemisches Gleichgewicht aller Komponenten herrscht.
- Die 2. Stufe des CARBO-Vergasers wird vereinfachend auch als „Gibbs Reaktor“ abgebildet. Die eingeblasenen Kohlepartikel kommen mit dem 1500°C heißen Gas aus der 1. Stufe in Kontakt, und zusätzlich sind die Verweilzeiten der Partikel in der 2. Stufe recht hoch. In erster Näherung wird auch hier ein thermisches und chemisches Gleichgewicht angenommen. Die Verwendung eines „Gibbs Reaktors“ stellt somit eine obere Schranke hinsichtlich der Gasausbeute dar.

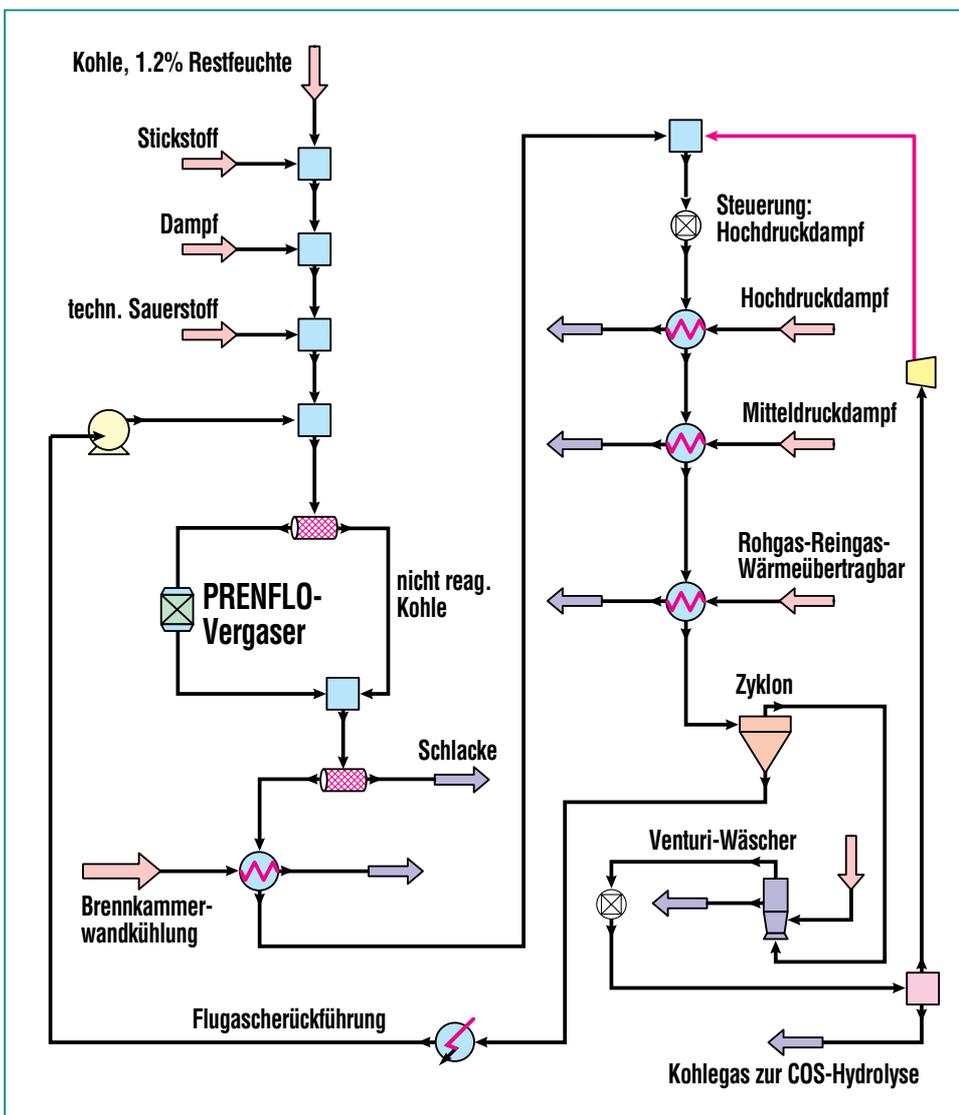


Abb. 3: Strömungsführung des PRENFLO-Vergasers.

PRENFLO

Die Abb. 3 zeigt das CHEMCAD-Fließschema des PRENFLO-Vergasers, in den 24,39 kg/s Kohlestaub mit einem Wassergehalt von 1,2 gew.-% zusammen mit einem Förderstrom von 1,4 kg/s Stickstoff eingebracht werden. Weiterhin werden 2,3 kg/s Satteldampf bei 35 bar, 21,55 kg/s technischer Sauerstoff bei 200°C und 33,2 bar, sowie 0,29 kg/s Flugasche und Kohlestaub bei 100°C und 29 bar in die Brennkammer eingeleitet. Bei der Simulation wird ein 99%-iger Umsatz der Kohle angenommen. In der Brennkammer herrscht eine Temperatur von 1500°C.

Der PRENFLO-Ver gaser ist mit einer aktiven Brennkammerwandkühlung ausgestattet, in der 2,3 kg/s Wasser bei 40 bar verdampft wird. Dieser Satteldampf wird direkt zur Vergasung der Kohle verwendet. Hinter dem Austritt der Brennkammer wird kaltes Gas zugemischt, um das Kohlegas auf 900°C abzukühlen. Anschließend wird das Gas über Wärmetauscher weiter abgekühlt. Mit etwa 200°C bei einem Druck von etwa 27,6 bar verlässt das Kohlegas, das immer noch mit etwa 0,3 kg/s Kohlestaub beladen ist, den PRENFLO-Ver gaser und wird einer ersten Reinigungsstufe zugeführt. Etwa 0,29 kg/s Kohlestaub und Flugasche werden im nachfolgenden Zyklon abgeschieden und der Brennkammer mit einer Temperatur von etwa 100°C wieder zugeführt: Eine Feinreinigung erfolgt im Venturi-Wäscher.

Hinter dem Wäscher hat das Gas eine Temperatur von 140°C bei

einem Druck von 27,47 bar. Von diesem Strom werden 41,5 kg/s abgeteilt, auf 30 bar rückverdichtet und zum Vergaser geleitet. Die übrigen 52,8 kg/s des Kohlegases gehen zur COS-Hydrolyse. An dieser Stelle kann ein verfahrenstechnischer Vergleich der Vergaser durchgeführt werden.

CARBO-V

Der 1. Stufe von CARBO-V (CHEMCAD-Fließschema in Abb.

4) werden 12,2 kg/s Kohlestaub (50% des gesamten Kohleeinsatzes), 15,9 kg/s technischer Sauerstoff, 19,2 kg/s Satteldampf bei 35 bar, 0,7 kg/s Förderstickstoff und 2,84 kg/s nicht-reagierter Kohlenstoff und Flugasche zugeführt. In der Brennkammer herrscht eine Temperatur von 1500°C.

Der Rest des Kohlestaubs (12,2 kg/s) wird zusammen mit dem Förderstickstoff (0,71 kg/s) in die

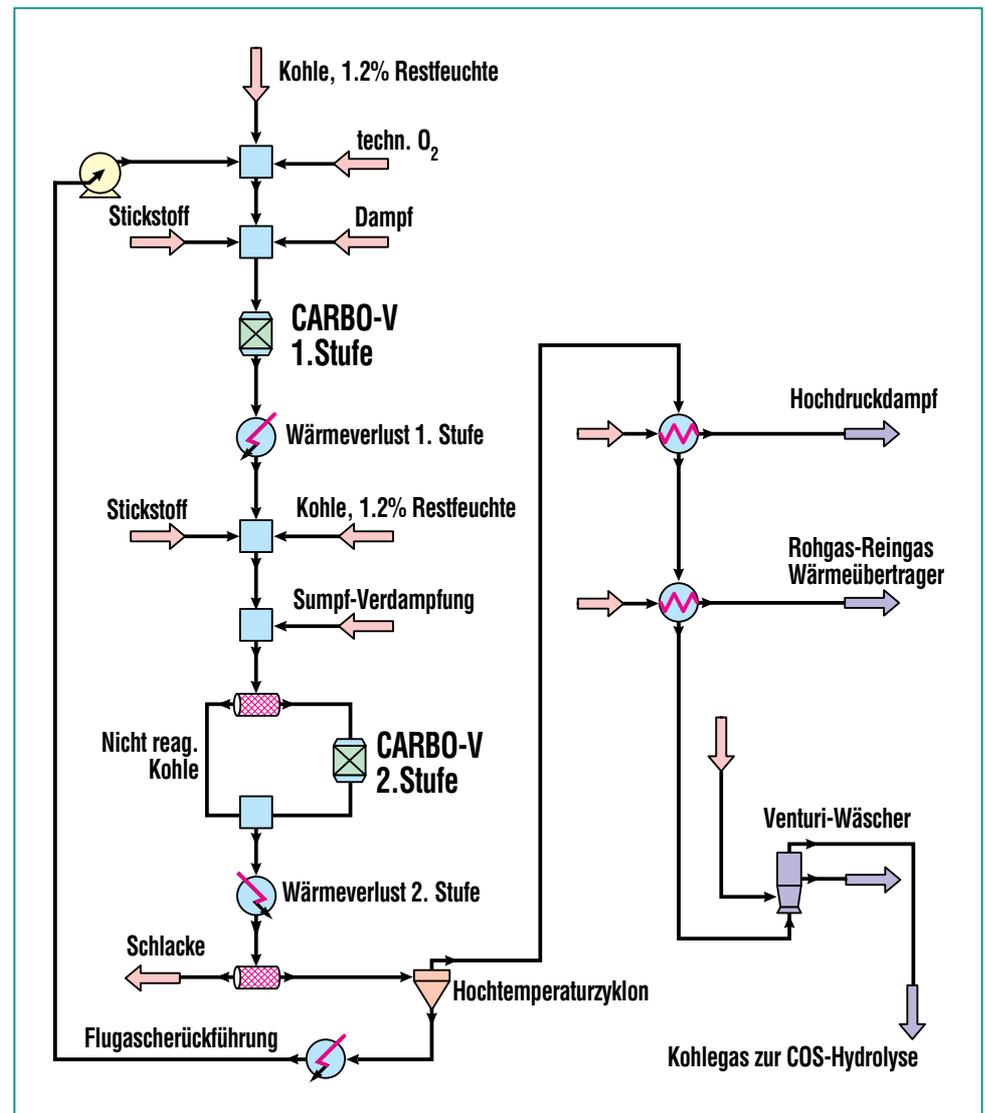


Abb. 4: Strömungsführung des CARBO-V-Ver gasers.

2. Stufe eingblasen und mit dem heißen Gasstrom vermischt. Zusätzlich wird etwas Wasserdampf zugeführt, der die Sumpfvverdampfung berücksichtigt. Da die Kohle und der Förderstickstoff kalt eingeblasen werden, wird das Gas allein durch die Mischung mit den kalten Einsatzstoffen um ca. 280°C abgekühlt.

Endotherme chemische Reaktionen sorgen dann in der 2. Stufe für eine Verringerung der Temperatur um ca. 300°C auf 915°C. Der Kohlenstoffumsatz in der 2. Stufe des Reaktors ist dabei jedoch nicht vollständig. Unter Berücksichtigung der Wärmeverluste ergibt sich eine Kohlegas-temperatur von 903°C. Hinter dem Gibbs-Reaktor wird die Schlacke aus dem System entfernt.

Dem Vergaser ist ein Hochtemperaturzyklon nachgeschaltet, in dem 99% der 900°C-heißen Kohle- und Flugaschepartikel (2,84 kg/s) abgeschieden werden. Diese werden, wie bei PRENFLO, zu-

sammen mit der Flugasche auf 100°C abgekühlt und zur 1. Stufe zurückgefördert.

Ein Kohlegasmassenstrom von 59,49 kg/s wird zu den Wärmetauschern geleitet. Ein Venturi-Wäscher entfernt anschließend den restlichen Feinstaub. Das Kohlegas wird mit einer Temperatur von 140°C bei einem Druck von 27,48 bar zur COS-Hydrolyse geleitet.

Analyse

Kohlegaszusammensetzung

Die Tab. 1 zeigt die Ergebnisse der CHEMCAD-Simulation für das Kohlegas der beiden Vergaser: Mit etwa 59,5 kg/s generiert CARBO-V etwa 15% mehr Gas als PRENFLO. Im Gegensatz dazu ist der untere Heizwert des PRENFLO-Kohlegases um etwa 9% höher als beim CARBO-V-Gas.

Das PRENFLO-Gas ist nahezu CO₂-frei, während das CARBO-

V-Gas etwa 10 vol% CO₂ enthält. Der Anteil an CO ist bei PRENFLO deutlich höher; das CARBO-V beinhaltet signifikant mehr H₂ und H₂O. Diese Unterschiede können direkt auf das „Chemical Quenching“ zurückgeführt werden.

Kaltgaswirkungsgrad

Die unterschiedlichen Gaszusammensetzungen und Massenströme wirken sich auf den sog. Kaltgaswirkungsgrad η_{KG} (Maß für den Energieinhalt des aus der Kohle entstehenden Gases) aus:

$$\eta_{KG} = \frac{\dot{m}_{KoG} \cdot H_{u, KoG}}{\dot{m}_{Kohle} \cdot H_{u, Kohle}}$$

mit dem Massenstrom \dot{m} und dem unteren Heizwert H_u des Kohlegases und der Kohle (Index: KoG und Kohle). Mit den Werten aus Tab. 1 und den Kohledaten [8] liegt der Kaltgaswirkungsgrad η_{KG} beim PRENFLO-Vergaser bei 81,32% und bei CARBO-V bei 85,58%. Die Differenz $\Delta\eta_{KG}$ beträgt 4,25%, die relative Änderung $\phi\eta_{KG}$ bezogen auf die PRENFLO-Werte erreicht 5,23%.

In Tab. 2 sind die den Vergasern zugeführten Massenströme von technischem Sauerstoff und Satttdampf aufgeführt.

Der Vergleich zeigt, dass beim CARBO-V-Vergaser 26% des technischen Sauerstoffs eingespart werden können. Dies ist dadurch zu erklären, dass in der Brennkammer nur 61,6% des eingesetzten Kohlemassenstroms (50% des Kohlemassenstroms und 11,6% vom Heißgaszyklon rückgeführter Koks) mit

Kohlegas		PRENFLO	CARBO-V
Massenstrom	[kg/s]	52,80	59,49
Temperatur	[°C]	140,10	139,80
Druck	[bar]	27,47	27,48
Unterer Heizwert (15,5°C)	[MJ/kg]	11,81	11,03
Molanteile wichtiger Kohlegaskomponenten			
Wasserstoff	H ₂	0,2946	0,3296
Wasser	H ₂ O	0,0894	0,1364
Kohlenmonoxid	CO	0,5670	0,3508
Kohlendioxid	CO ₂	0,0042	0,1019
Methan	CH ₄	0,0003	0,0450

Tab. 1: Vergleich der Kohlegas-Zusammensetzung.

technischem Sauerstoff verbrannt werden.

Andererseits benötigt CARBO-V die 457%-ige Dampfmenge im Vergleich zu PRENFLO. Dieser Dampf muss entweder im Vergaser erzeugt oder aus dem Dampfkraftwerk entnommen werden.

Thermische Analyse

Die unterschiedlichen Quench-Varianten der beiden Vergaser führen zu erheblichen Auswirkungen auf die Wärmenutzung des Kohlegases. Im PRENFLO-Vergaser wird das heiße Kohlegas durch Zumischung von kaltem Kohlegas auf 900°C abgekühlt. Der Massenstrom erhöht sich dadurch von 48,44 kg/s auf 89,94 kg/s. Im Hochdruckwärmetauscher (175 bar) werden knapp 75 MW_{th} an den Dampfkreislauf des IGCC-Kraftwerks abgegeben, im Mitteldruckwärmetauscher (40 bar) etwa 6 MW_{th}. An das gereinigte Gas, welches zur Turbine geleitet wird, werden etwa 20,4 MW_{th} übertragen. Insgesamt können etwa 101 MW_{th} im PRENFLO-Vergaser genutzt werden.

Wie Tab. 3 zeigt, werden beim PRENFLO-Vergaser etwa 6 MW_{th} Mitteldruckdampf für die Vergasungsreaktion entnommen. CARBO-V benötigt hingegen etwa 27,7 MW_{th} (4,57-fache Menge, Tab. 2). Wegen des hohen Exergieverlustes wird bei CARBO-V kein Mitteldruckdampf erzeugt, sondern der 900°C heiße Kohlegasstrom ausschließlich zur Produktion von Hochdruckdampf verwendet. Der zur Vergasungs-

	PRENFLO	CARBO-V	Δ [kg/s]	φ [-]
Massenströme [kg/s]				
Technischer Sauerstoff	21,55	15,90	-5,65	-0,26
Wasserdampf	3,45	19,20	15,75	+4,57

Tab. 2: Bedarf an technischem Sauerstoff und Sattdampf für die Vergasungsreaktionen.

		PRENFLO	CARBO-V
Energieinhalt der Kohle	[MW _{th}]	766,77	766,77
Wärmenutzung (Dampf)			
Hochdruck (175 bar)	[MW _{th}]	74,91	57,39
Mitteldruck (40 bar)	[MW _{th}]	6,06	0,00
	[MW _{th}]	80,97	57,39
Anteil am Energieinhalt der Kohle		10,56%	7,48%
Wärmenutzung (Gasvorwärmer)			
	[MW _{th}]	20,43	22,31
Anteil am Energieinhalt der Kohle		2,66%	2,91%
Wärmenutzung (gesamt)			
	[MW _{th}]	101,40	79,70
Anteil am Energieinhalt der Kohle		13,22%	10,39%
Differenz zu PRENFLO	[MW _{th}]		-21,70

Tab. 3: Wärmenutzung des Kohlegases.

reaktion benötigte Mitteldruckdampf (40bar) muss daher aus dem Dampfkraftwerk abgezweigt werden. Dies ist die einzige Verfahrensänderung gegenüber dem IGCC-Kraftwerk mit PRENFLO-Vergaser.

Bei CARBO-V wird deutlich weniger fühlbare Wärme genutzt, da weniger Kohlegas (59,5 kg/s) zu den Wärmetauschern geleitet wird.

Daher wird im Hochdruckwärmetauscher nur 57,4 MW_{th} Satt-dampf bei 175 bar erzeugt. An das gereinigte Gas, welches zur Turbine geleitet wird, werden etwa 22,3 MW_{th} übertragen. Der Vergleich zeigt einen Vorteil von 21,7 MW_{th} (knapp 3% des Energieinhalts der Kohle), fast ausschließlich in Form von Hochdruckdampf (175 bar), zugunsten des PRENFLO-Verfahrens.

Ausgehend von den Kraftwerksanalysen in [4] ist für beide Vergaser ein Eingabedatensatz für das Kraftwerkssimulationsprogramm IPSE Pro [8] erstellt worden. Unter gleichen Randbedingungen kann so der Einfluss der unterschiedlichen Vergasungsmethoden auf die Netto-Leistung eines IGCC-Kraftwerks untersucht werden.

Die Analyse ergab, dass sich die elektrische Netto-Leistung des Kraftwerks mit CARBO-V-Vergaser bei gleichem Kohleeinsatz um 14,84 MW_{el} erhöht. Das bedeutet eine Steigerung des Nettowirkungsgrades um 1,94%-Punkte.

Zusammenfassung

Auf Grund der höheren Gasausbeute und eines besseren Kaltgaswirkungsgrads stellt „Chemical

Quenching mit Kohlenstoffpartikeln“ eine sinnvolle Option für zukünftige IGCC-Kraftwerke dar. Die optimale technische Ausführung bedarf allerdings weiterer Untersuchungen (optimale Gaszusammensetzung der 1. Stufe, Hochtemperatur-Zyklon, Entwicklung einer Hochtemperatur-Gasreinigung, etc.). Mit CHEMCAD steht dazu ein leistungsfähiges Werkzeug zur numerischen Simulation der Vorgänge beim „Chemical Quenching“ zur Verfügung.

Künftige Untersuchungsschwerpunkte liegen bei Parameterstudien zur Bestimmung der optimalen Betriebsweise eines solchen Vergasers und Variationsuntersuchungen der Implementierung dieses Vergasers in ein IGCC-Kraftwerk. Außerdem wird die Vergasung von Slurrys theoretisch untersucht.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei Herrn Dipl.-Ing. D. Rüger, UET, Freiberg, für die fruchtbaren Diskussionen zum CARBO-V und bei Dr. E. Henrich und Prof. Dr. Ederer, ITC, für die wertvollen Hinweise bei der Modellierung der chemischen Prozessketten.

Literatur

- [1] CARNOT Online. Case Study: Conversion of Solid Fuels. Puertollano IGCC Power Plant, http://enpov.aeat.com/carnot/case_studies/pdf/Puertollano.pdf
- [2] Department of Trade and Energy: "Gasification of Solid and Liquid Fuels for Power Generation" Technology Status Report 008, UK, Dec. 1998, <http://www.dti.gov.uk/cct/pub/tsr008.pdf>
- [3] UET Freiberg, <http://www.fee-ev.de/uet/>
- [4] R. Kloster, *Thermodynamische Analyse und Optimierung von Gas-/Dampfturbinen Kombikraftwerken mit integrierter Kohlevergasung*, Fortschrittsbericht Nr. 409, VDI, Reihe 6, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [5] H. Jüntgen, K. H. van Heek, *Kohlevergasung – Grundlagen und technische Anwendungen*, Thiemig-Taschenbücher, Band 94, Verlag Karl Thiemig, München, 1981
- [6] Chemstations: User Manual CHEMCAD 5.2, 2001, <http://www.chemstations.de/>
- [7] Argonne Premium Coal Samples, Argonne, 16.3.2003. <http://www.anl.gov/PCS/report/part2.html>
- [8] SimTech: IPSE Pro User Documentation, Graz, 1999. <http://www.simtechnology.com/english/ie/index.htm>