

FORSCHUNGSBERICHTE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

Nr. 1807

Herausgegeben

im Auftrage des Ministerpräsidenten Heinz Kühn

von Staatssekretär Professor Dr. h. c. Dr. E. h. Leo Brandt

Dr. rer. nat. Kurt-Günter Beck

Dr.-Ing. Wilhelm Weskamp

Ing. Erich Schierholz

Steinkohlenbergbauverein, Essen

Beheizung von Horizontalkammeröfen
bei der Steinkohlenverkokung mit Austauschgasen



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

ISBN 978-3-663-06193-9 ISBN 978-3-663-07106-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-07106-8

Verlags-Nr. 011807

© 1967 by Springer Fachmedien Wiesbaden

Ursprünglich erschienen bei Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1967

Inhalt

I. Einleitung	7
II. Die Versuchsreihen und ihre Ergebnisse	10
a) Beheizung mit Hochofengas	10
b) Beheizung mit Generatorgas	17
c) Beheizung mit Grubenmethan	24
d) Beheizung mit Syntheserestgas	29
III. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsreihen a bis d	35
IV. Ersatz von Koksofengas durch Flüssiggas	39
a) Einleitung und Versuchsvorbereitung	39
b) Versuchsergebnisse	41
c) Zusammenfassung	60
V. Beheizung von Koksöfen mit benzolhaltigem Rohgas	61
Literaturverzeichnis	65

I. Einleitung

Im Jahre 1912 wurden auf Anregung von A. WIRTZ von der Firma H. Koppers in Essen auf der Kokerei der Friedrich-Wilhelm-Hütte in Mülheim erstmalig in der Geschichte der Kokereiindustrie Koksöfen für eine Beheizung mit Hochofengas ausgestattet. Damit wurde einmal die Verwendung des überschüssigen Hochofengases zur Beheizung der Koksöfen möglich und andererseits stellte die Kokerei der Hütte große Mengen Koksofengas für metallurgische Zwecke zur Verfügung. Mit dieser Entwicklung zum neuzeitlichen Koksöfen, der, mit Einzel- und Querregeneratoren ausgestattet, wahlweise mit Koksofengas und mit einem heizwertärmeren Austauschgas betrieben werden kann, wurde der energetische Verbund zwischen Kokerei und Hüttenwerk geschaffen.

Durch die Ende der 20er Jahre beginnende Ferngasversorgung wurde es auch für die Zechenkokereien wirtschaftlich bedeutungsvoll, nicht nur durch Senkung des Wärmeverbrauches bei der Beheizung der Koksöfen mit dem eigenen Produktionsgas einen möglichst hohen Anteil des erzeugten Koksofengases der Ferngaswirtschaft zur Verfügung zu stellen (Abb. 1), sondern diesen Anteil noch durch Einsatz von Austauschgasen für die Unterfeuerung der Koksöfen zu erhöhen. Hierzu bot sich für die Zechenkokereien in erster Linie Generatorgas an, das bevorzugt aus schwer absetzbaren kleinstückigen Koksarten hergestellt und wie Hochofengas als Austauschgas verwendet werden kann. Das Generatorgas ist damit zum klassischen Mittel für die Spitzengasdeckung während der Wintermonate geworden.

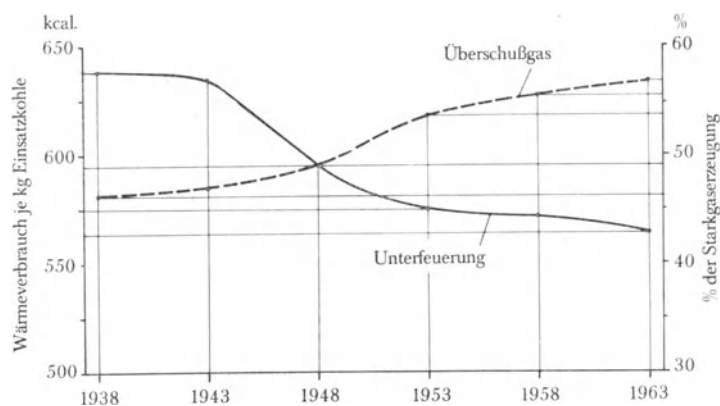


Abb. 1 Unterfeuerungsverbrauch und Überschußgas der Kokereien des Ruhrgebietes

An die Seite des Generatorgases trat im vergangenen Vierteljahrhundert Grubenmethan, das mit der zunehmenden Absaugung der Schlagwetter führenden Abbaustrecken in entsprechend steigenden Mengen zur Verfügung steht und zunächst vor allem wegen des stark schwankenden Methangehaltes zur Dampferzeugung im Kesselhaus verwendet wurde. Nach ausreichender Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Verbrennungseigenschaften erwies sich die Verwendung des Grubenmethans zur Unterfeuerung von Koksöfen als wirtschaftlich optimale Lösung, zumal mit der Entwicklung von Heizwertregelanlagen der Einsatz von Grubenmethan als Unterfeuerungsgas wesentlich erleichtert wurde und heute ohne Schwierigkeiten durchführbar ist.

Gleichzeitig mit der Entwicklung der Ferngaswirtschaft auf der Grundlage des von den Kokereien zur Verfügung gestellten Koksofengases entstanden im Ruhrgebiet mehrere chemische Werke, die den zu etwa 50 Volumen % im Koksofengas enthaltenen Wasserstoff für die Ammoniaksynthese nutzen. Hierbei war die wirtschaftliche Verwertung des bei der Koksofengaserlegung verbleibenden sogenannten Syntheserestgases von großer Bedeutung, das als Austauschgas zur Beheizung von Koksöfen in ähnlicher Weise einen energetischen Verbund zwischen Kokerei und Synthesewerk ermöglichte, wie das Hochofengas zwischen Kokerei und Hüttenwerk. Durch die vom Koksofengas stark abweichende Zusammensetzung und dem damit verbundenen hohen Heizwert des Restgases ergaben sich auf den Kokereien allerdings häufig betriebliche Schwierigkeiten, für deren Überwindung, wie beim Grubenmethan, eine Heizwertregelung von großer Bedeutung ist.

Zu den bereits erwähnten Austauschgasen sind in neuerer Zeit Flüssiggasluftgemische hinzugekommen, durch die auf verschiedenen Kokereien zur Spitzengasdeckung ein Anteil bis zu 50% des zur Unterfeuerung benötigten Koksofengases freigemacht werden kann.

Über den Wärmeverbrauch bei der Beheizung von Koksöfen mit den genannten Austauschgasen liegen zwar auf zahlreichen Kokereien umfangreiche betriebliche Erfahrungen vor, doch sind diese überwiegend an die örtlichen Betriebsbedingungen gebunden, so daß eine umfassende, vergleichende Beurteilung bislang nicht möglich war. Lediglich für Hochofengas wurde vor nahezu 20 Jahren im sogenannten »Krueger-Gutachten« durch Auswertung verschiedener Betriebsunterlagen eine Grundlage für dessen Bewertung bei der Unterfeuerung geschaffen. Die Entwicklung der Hochofentechnik, die in den letzten Jahren zu einem unerwartet starken Rückgang des spezifischen Koksverbrauchs im Hochofen geführt hat, ist allerdings nicht ohne Auswirkung auf die Qualität des Hochofengases geblieben, so daß diese Frage erneut ein aktuelles Interesse erhalten hat. Nachdem 1959 durch die erste Versuchsreihe [1] auf der Versuchskokerei des Steinkohlenbergbauvereins der Einfluß einer unterschiedlichen Heizzugtemperatur auf den Wärmeverbrauch bei Einsatz von Koksofengas in der Unterfeuerung der Koksöfen ermittelt worden war (Abb. 2), regte daher der Deutsche Kokereiausschuß entsprechende Untersuchungen über den Wärmeverbrauch bei der Beheizung von Koksöfen mit Austauschgasen an, über deren Ergebnisse nachfolgend berichtet wird.

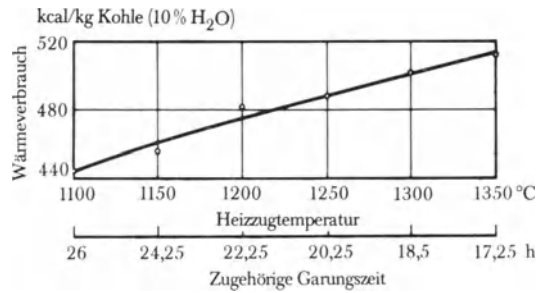


Abb. 2 Wärmeverbrauch in Abhängigkeit von der Heizzugtemperatur

Zielsetzung dieser Untersuchungen war die Feststellung der verbrennungstechnischen Eigenschaften der verschiedenen Austauschgase und deren Auswirkungen auf den Wärmeverbrauch im Vergleich zur Unterfeuerung von Koksöfen mit Koksofengas. Bei den Versuchen mit Flüssiggasluftgemisch sollte darüber hinausgehend geprüft werden, bis zu welchem Ausmaß dieses Austauschgas an der Unterfeuerung beteiligt werden kann, ohne daß es zu technischen Schwierigkeiten bei den vorhandenen Beheizungseinrichtungen kommt.

II. Die Versuchsreihen und ihre Ergebnisse

a) Beheizung mit Hochofengas

Die Versuche mit Hochofengas wurden an einer Ofengruppe von 20 Zwillingszug-Unterbrenner-Verbundöfen durchgeführt. Die wichtigsten Ofenabmessungen sind folgende:

Kammerlänge zwischen den Türstopfen	12 830 mm
Kammerhöhe bis Scheitel	4 500 mm
mittlere Kammerbreite	450 mm
Läufersteinstärke	110 mm

Die Ofengruppe befand sich bei Beginn der Versuche etwa fünf Jahre in Betrieb. Insgesamt wurden zwei Versuche mit Hochofengas bei Heizzugtemperaturen von 1200 und 1300°C durchgeführt*. Die Vergleichsversuche mit Koksofengasbeheizung fanden bei den gleichen Heizzugtemperaturen statt.

Nach Einstellen der Heizzugtemperatur und der zugehörigen Garungszeit wurden bis zum Beginn des Hauptversuches mindestens sieben Tage zur Erreichung des Beharrungszustandes benötigt. Anschließend erfolgte der eigentliche Hauptversuch über einen Zeitraum von fünf Tagen.

Das zur Unterfeuerung gelangende Hochofengas hatte während der Versuchszeit folgende mittlere Zusammensetzung:

CO ₂	12,0%
CO	29,5%
H ₂	2,0%
N ₂	56,5%
	<hr/>
	100,0%

Der mittlere Heizwert des Gases betrug:

$$H_o = 952 \text{ kcal/Nm}^3$$
$$H_u = 942 \text{ kcal/Nm}^3$$

Aus der Tab. 1 sind einige wichtige Kennzahlen der bei den vier Versuchen eingesetzten Kokskohle zu entnehmen. Mit Ausnahme des Versuches Koksofengasbeheizung bei 1200°C zeigen alle Kohlen in ihrem Gehalt an Flüchtigen Bestandteilen, im Aschegehalt und im Körnungsaufbau eine gute Übereinstim-

* Alle meßtechnischen Untersuchungen wurden entsprechend den »Richtlinien für den Bau und die Abnahme von Koksofen-Anlagen« – Verlag Glückauf GmbH, Essen 1956 – vorgenommen.

Tab. 1 Kennzahlen der Kokskohlen

Beheizungsart		Hoch- ofengas	Koks- ofengas	Hoch- ofengas	Koks- ofengas
Heizzugtemperatur °C		1200	1200	1300	1300
Wasser	%	8,9	9,8	9,6	9,4
Asche (wf)	%	7,2	6,6	7,8	7,5
Flüchtige Bestandteile					
(waf)	%	25,9	23,6	25,6	25,6
Siebanteil < 2,0 mm	%	64,5	64,5	64,8	66,0
Siebanteil < 0,5 mm	%	28,3	27,4	25,0	28,5
<i>Dilatometertest</i>					
Kontraktion	%	19	21	20	20
Dilatation	%	22	31	38	37
<i>Kohlenarten</i>					
Gasflammkohle	%	8	7	6	6
Gaskohle	%	24	21	27	27
Obere Fettkohle	%	13	11	18	20
Untere Fettkohle	%	34	38	22	21
Obere Eßkohle	%	21	23	25	24
Untere Eßkohle	%	—	—	2	2

mung. Bei dem vorgenannten Versuch kam eine Kokskohle zum Einsatz, deren Gehalt an Flüchtigen Bestandteilen 2% niedriger lag als bei den übrigen drei Versuchen. Die Ursache hierfür ist der geringere Anteil an Gaskohle und oberer Fettkohle bei einem entsprechend höheren Anteil an unterer Fettkohle.

In der Tab. 2 sind zunächst die Verkokungsbedingungen zusammengestellt. Für die Versuche bei 1200°C Heizzugtemperatur stellte sich eine Garungszeit von 23 Stunden ein. Entsprechend betrug die Garungszeit bei 1300°C Heizzugtemperatur 18,75 Stunden.

Das Schüttgewicht der Kokskohle zeigte bei allen Versuchen eine gute Übereinstimmung und beträgt im Mittel 807 kg/m³ (feucht). Die während der einzelnen Versuche gemessene mittlere Heizzugtemperatur wich nur geringfügig von der angestrebten Solltemperatur ab.

Weiterhin enthält die Tab. 2 die wichtigsten Angaben über die erzielten Temperaturen in der Koksofenkammer und über den spezifischen Wärmeverbrauch, der als wichtigste Bezugsgröße beim Vergleich der Austauschgase anzusehen ist, da er über den Gasverbrauch eine unmittelbare Beziehung zur Bewertung des Hochofengases darstellt.

Die bisher vorliegenden Betriebswerte über den Wärmeverbrauch bei Hochofengasbeheizung im Vergleich zur Koksofengasbeheizung fanden ihren Niederschlag in dem bereits erwähnten »Krueger-Gutachten«. Der in dem Gutachten

Tab. 2 *Versuchsbedingungen und Versuchsergebnisse bei der Beheizung mit Hochofengas*

Beheizungsart	Hochofengas	Koksofengas	Hochofengas	Koksofengas
Heizungstemperatur (Solltemperatur)	1200	1200	1300	1300
Garungszeit	23	23	18,75	18,75
Schüttgewicht der Kokskehle (feucht)	803	809	808	810
Schüttgewicht der Kokskehle (wf)	731	730	730	734
Mittlere Heizungstemperatur, optisch gemessen	1200	1201	1290	1294
Optisch gemessene Kammerwandtemperatur: 400 mm unter Kokskehlenoberkante	1012	1001	1048	1048
400 mm über Ofensohle	1046	1034	1078	1079
Mittlere Temperaturdifferenz der Kammerwand	34	33	30	31
Mittlere Kokskehletemperatur	1053	1076	1075	1086
Gassammelraumtemperatur	728	724	793	772
Wärmeverbrauch je kg Kokskehle (feucht)	540	498	573	525
Wärmeverbrauch je kg Kokskehle (10% H ₂ O)	548	499	577	530
Abgasverlust	13,7	10,6	15,6	12,3
Oberflächenverlust	8,4	8,5	7,3	7,4
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	77,9	80,9	77,1	80,3
Verkockungswärme je kg Kokskehle (10% H ₂ O)	427	404	445	426

angegebene Wärmemehrverbrauch bei Beheizung der Koksöfen mit Hochofengas gegenüber Koksofengas beträgt ca. 10%. Aus den beim Steinkohlenbergbauverein verfügbaren Unterlagen über Garantienachweise mit Hochofengas und Koksofengas an neuerbauten Koksofengruppen geht aus den garantierten Werten ein Mehrverbrauch von etwa 20 bis 30 kcal/kg Kohle oder ca. 4–6% hervor. Die erreichten Wärmeverbrauchsdaten zeigten aber im allgemeinen eine größere Differenz zwischen Koksofengas- und Hochofengasbeheizung, da bei Koksofengasbeheizung die Unterschreitung der Garantiewerte größer war. Demgegenüber stehen die Untersuchungen von A. STEDING [2]. In seinen theoretischen Betrachtungen über den Einfluß der Garungszeit auf den Unterfeuerungsverbrauch von Koksöfen bei der Beheizung mit Hochofengas versucht A. STEDING, ausgehend von den auf der Versuchskokerei ermittelten Feststellungen über den Wärmeverbrauch bei Beheizung von Koksöfen mit Koksofengas, den Wärmebedarf bei Verwendung von Hochofengas zu ermitteln. STEDING errechnet bei einer Garungszeit von 17,25 Stunden einen Mehrverbrauch von etwa 10 kcal/kg und bei 26 Stunden Garungszeit einen Mehrverbrauch von etwa 5 kcal/kg. Der Verfasser betont in seinem Aufsatz allerdings, daß eine Reihe von Faktoren sich der rechnerischen Ermittlung entziehen, so daß diese mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet bleiben muß. STEDING führt aus, daß in der Praxis bei einem Heizwert des Hochofengases von 900 kcal/Nm³ mit einem Mehrverbrauch von etwa 20 kcal/kg gerechnet werden muß. Dieser Differenzbetrag dürfte aber noch als zu niedrig angenommen sein, wie die eigenen Versuchsergebnisse zeigen werden.

Die Ursache für den Wärmemehrverbrauch bei Hochofengasbeheizung ist durch Messungen und Berechnungen nicht allein nachzuweisen, da hierfür noch andere Faktoren maßgebend sein dürften.

Der Gasverlust, der bei jeder Umstellung durch Verdrängen des Heizgases durch Abgas aus dem mit Heizgas gefüllten Regenerator entsteht, beträgt nur etwa 0,2% der Unterfeuerungs-gasmenge; er spielt also eine untergeordnete Rolle. Einen viel größeren Einfluß üben Vorverbrennungen und Übertritte von Hochofengas im Unterofen auf den Wärmeverbrauch aus, die infolge der unterschiedlichen Druckverhältnisse, durch Poren und Haarrisse in den Regeneratortrennwänden hervorgerufen werden.

Die Abnahme des Hochofengas-Heizwertes in den letzten Jahren von rd. 1050 kcal auf etwa 850–900 kcal und das damit verbundene andersartige Brennverhalten des Hochofengases dürfte ebenfalls von Einfluß auf den Wärmemehrverbrauch sein. Bei einem weiteren Absinken des Heizwertes steht zu befürchten, daß nicht nur der Wärmemehrverbrauch durch eine geringere Flammentemperatur weiter ansteigt, sondern auch die Leistung des Koksovens beeinträchtigt wird. Als weiterer Faktor ist die Schwierigkeit anzusehen, bei einem Verbundofen die Verteilung der Gas- und Luftmengen für beide Gasarten optimal vorzunehmen, da infolge des unterschiedlichen Heizwertes der Gase die Mengen beträchtlich variieren. Diese Schwierigkeit wird noch wesentlich vergrößert, wenn größere Schwankungen in der Zusammensetzung und damit im Heizwert des Hochofengases auftreten. Im Verlauf der hier beschriebenen Versuche wurden täglich mehrfach größere Heizwertschwankungen festgestellt, die

bis zu 300 kcal/Nm³ betragen, das sind über 30% des Gichtgasheizwertes von 900 bis 950 kcal/Nm³. Durch Abgaskontrollen wurden an Öfen, die bei einem durchschnittlichen Heizwert des Hochofengases einen richtig bemessenen Luftüberschuß aufwiesen, während hoher Heizwertspitzen CO-Gehalte gefunden, die auf eine unvollständige Verbrennung des Heizgases hinweisen. Andererseits ist bei extrem niedrigen Heizwerten natürlich mit einem zu hohen Luftüberschuß zu rechnen, der ebenfalls den Wärmeverbrauch ungünstig beeinflusst.

Bei der Betrachtung der eigenen Versuchsergebnisse für den Wärmeverbrauch (Tab. 2), die bei gleichbleibenden Versuchsbedingungen erhalten wurden, wird festgestellt, daß bei den gewählten Heizzugtemperaturen von 1200 und 1300°C bei Hochofengasbeheizung ein Wärmemehrverbrauch von 49 bzw. 47 kcal/kg Kohle ermittelt wurde. Das entspricht einem Mehrverbrauch an Unterfeuerungsenergie gegenüber Koksofengas von rd. 9 bis 10%.

Die Temperaturdifferenz in vertikaler Richtung an den Kammerwänden war bei beiden Gasarten gut und betrug im Mittel ca. 30–33°C.

Auffällig sind die Differenzen in der Verkokungswärme. Unter Berücksichtigung des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades ergeben sich Differenzen von 23 kcal/kg oder 5,7% bei 1200°C und 19 kcal/kg oder 4,5% bei 1300°C.

SIMONIS u. a. [3] haben nachgewiesen, daß die Nachprüfung der im Betrieb ermittelten Verkokungswärmen bei Koksofengasbeheizung durch die Ermittlung der Verkokungsenthalpie möglich ist. Die Ermittlung der Verkokungsenthalpie beschränkt sich allerdings nur auf die Einsatzkohle und die Verkokungsprodukte, wobei alle anderen Einflüsse keine Berücksichtigung finden. Die hier festgestellten Differenzen in den »Verkokungswärmen« sind also auf das unterschiedliche Verhalten der Unterfeuerungsgase zurückzuführen, bzw. auf deren wärmetechnische Auswirkungen. Auch LITTERSCHEIDT [4] kommt in seiner Arbeit über die Verkokungswärme zu dem Schluß, daß es keine theoretische Verkokungswärme gibt, die außerhalb des Verkokungsprozesses festgestellt werden könnte, sondern daß sich die Verkokungswärme als Differenz von Wärmeverbrauch und gemessenen Verlusten nur auf Grund einer Wärmebilanz an einer bestehenden Anlage ermitteln läßt und daher auch mit Meßfehlern behaftet ist, die bei solchen Betriebsmessungen unvermeidlich sind.

Die Tab. 3 gibt einen Überblick über die verbrennungstechnischen Kennzahlen bei Hochofengasbeheizung, im Vergleich zu Koksofengas. Auffällig sind die besonders hohen Luftüberschußzahlen bei Hochofengasbeheizung. Dieser überhöhte Luftüberschuß, der mit 27% nur wenig unter dem Wert bei Koksofengasbeheizung liegt, war bei den immer wieder auftretenden größeren Heizwertschwankungen erforderlich, um unverbrannte Gasbestandteile im Abgas zu vermeiden und damit eine zufriedenstellende Temperaturverteilung in den Heizwänden in horizontaler Richtung zu erreichen. Wie stark sich überhöhter Luftüberschuß auf den Abgasverlust auswirkt, hat STEDING [2] errechnet. Danach bewirkt eine um 0,1 größere Luftüberschußzahl eine Zunahme des Abgasverlustes um 0,6%. Bei Anlieferung eines Hochofengases mit konstantem Heizwert – vielfach wird heute auf den Hüttenwerken das Hochofengas mit einem höherkalorigen Gas auf einen konstanten Heizwert eingeregelt – hätte für die

Tab. 3 *Verbrennungstechnische Kennzahlen bei der Beheizung mit Hochofengas*

Beheizungsart	°C			
	Hochofen- gas	Koksofen- gas	Hochofen- gas	Koksofen- gas
Heizungstemperatur (Solltemperatur)	1200	1200	1300	1300
Verbrennungswärme des Heizgases	kcal/Nm ³	4813	4809	4809
Heizwert des Heizgases	kcal/Nm ³	914	4236	4232
Dichte des Heizgases	kg/Nm ³	1,323	0,470	0,458
Luftbedarf bei theoretischer Verbrennung	Nm ³ /Nm ³	0,738	4,271	0,757
Luftbedarf bei theoretischer Verbrennung	Nm ³ /1000 kcal (<i>H_u</i>)	0,807	1,008	0,806
Abgasmenge bei theoretischer Verbrennung	Nm ³ /Nm ³	1,583	4,955	4,999
Abgasmenge bei theoretischer Verbrennung	Nm ³ /1000 kcal (<i>H_u</i>)	1,732	1,170	1,181
Errechnete Abgaszusammensetzung (feucht):				
CO ₂	%	22,6	5,9	6,0
H ₂ O	%	2,7	19,4	19,2
O ₂	%	2,3	4,2	4,2
N ₂	%	72,4	70,5	70,6
Gefundene Abgaszusammensetzung (trocken):				
CO ₂	%	23,6	7,1	23,2
O ₂	%	2,4	5,3	2,5
N ₂	%	74,0	87,6	74,3
Luftüberschußzahl	<i>n</i>	1,273	1,293	1,274
Luftmenge bei <i>n</i> > 1	Nm ³ /Nm ³ Heizgas	0,939	5,522	0,964
Luftmenge bei <i>n</i> > 1	Nm ³ /1000 kcal (<i>H_u</i>)	1,027	1,304	1,027
Abgasmenge, feucht bei <i>n</i> > 1	Nm ³ /Nm ³ Heizgas	1,811	6,290	1,816
Abgasmenge, feucht bei <i>n</i> > 1	Nm ³ /1000 kcal (<i>H_u</i>)	1,981	1,485	1,934
Luftmenge zu Abgasmenge	%	51,8	87,8	53,1
Gasmenge zu Abgasmenge	%	55,2	15,9	55,1
Luftmenge zu Gasmenge	%	93,9	552,2	96,4
Abgasatemperatur	°C	210	229	236

Versuche eine Luftüberschußzahl von 1,2 bei optimaler Einstellung der Batterie ausgereicht die zu einem etwas geringen Wärmeverbrauch geführt hätte.

Die Abgastemperaturen bei Hochofengasbeheizung liegen über den theoretischen Werten [5], in erster Linie ist dies eine Folge der Vorverbrennungen von Hochofengas im Regeneratorteil des Koksofens.

Besonders deutlich wird der Wärmemehrverbrauch bei Hochofengasbeheizung charakterisiert durch den Abgasverlust. Er liegt bei beiden Temperaturen bei Hochofengas rd. 3% (absolut) höher als bei Koksofengas. Hier wird der Kompromiß deutlich, der beim Bau eines Verbundofens gemacht werden muß, da der Wirkungsgrad des Regenerators für Hochofengas immer unter dem für Starkgas liegt, weil bei gleicher Austauschfläche bei Hochofengasbeheizung wesentlich größere Abgasmengen zu übertragen sind. Aus der Tab. 3 geht hervor, daß die für 1 Nm³/1000 kcal berechneten Abgasmengen feucht bei $n > 1$ für Hochofengas rd. 30% höher liegen als bei Koksofengas. Der hierdurch bedingte höhere Abgasverlust muß durch eine höhere Wärmezufuhr ausgeglichen werden, die ihrerseits erneut zu einer weiteren Belastung des Regenerators führt. Beim Abgasverlust des Versuches mit Koksofengas ist ferner zu berücksichtigen, daß bei dem vorliegenden Unterbrennersystem eine erhebliche Vorwärmung des Koksofengases in den Regeneratortrennwänden erfolgt, wodurch eine merkliche Senkung des Abgasverlustes bewirkt wird. STEDING [5] hat nachgewiesen, daß die Starkgasvorwärmung beim Unterbrennerofen eine Senkung des Abgasverlustes von fast 5% bewirken kann.

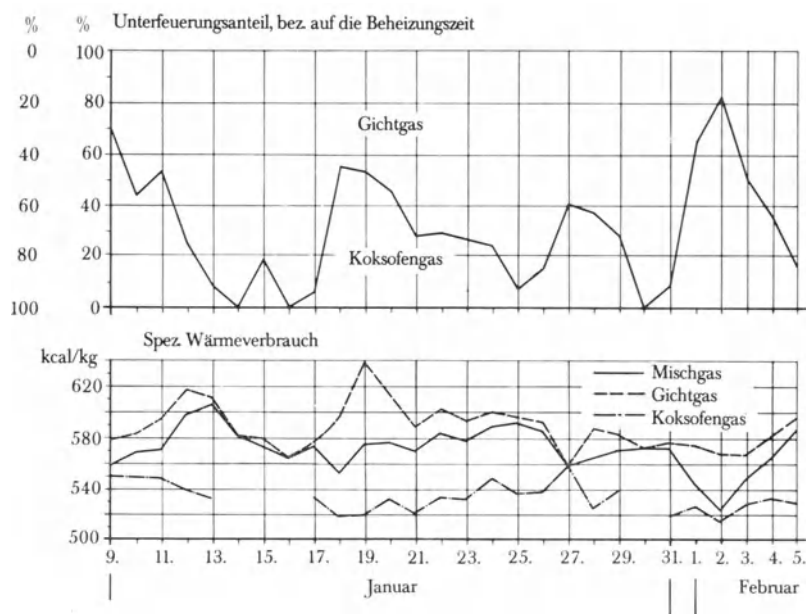


Abb. 3 Unterfeuerungsanteil und Wärmeverbrauch bei häufigem Wechsel der Gasart

Die bisher beschriebenen Versuche wurden durchgeführt, ohne einen Wechsel in der Beheizungsart vorzunehmen. Die ständige Kontrolle der Versuchsleitung ermöglichte es, auf Schwankungen von Heizwert, Druck und Temperatur des Unterfeuerungs-gases durch eine entsprechende Veränderung der Gasmenge zu reagieren. Die Koksöfen konnten also in diesem Fall sowohl bei der Beheizung mit Hochofengas als auch mit Koksofengas auf den feuerungstechnisch günstigsten Zustand eingestellt werden. Es erhob sich nun die Frage, ob die unter solchen Bedingungen erhaltenen Wärmeverbrauchszahlen auch im Dauerbetrieb ohne zusätzliche Überwachung bei ungleichmäßiger Anlieferung des Hochofengases, d. h., wenn die Öfen häufig in verschieden großen und nicht voraussehbarem Umfang auf Starkgas und anschließend wieder auf Hochofengas umgestellt werden müssen, zu erreichen sind. Eine gleichbleibend optimale feuerungstechnische Einstellung der Koksöfen ist bei dieser Betriebsweise nicht möglich. Der Versuch, der sich über einen Zeitraum von vier Wochen erstreckte, wurde bei einer Heizzugtemperatur von 1300°C durchgeführt. Aus der Abb. 3 ist der zeitliche Anteil des Koksofengases und Hochofengases an der Beheizung zu erkennen. Der Koksofengasanteil schwankt von 0 bis 82% und der Anteil an Hochofengas bewegte sich zwischen 18 und 100%. Der ebenfalls in der Abb. 3 aufgetragene Wärmeverbrauch ergab im Mittel für Hochofengas 592 kcal/kg Kohle und für Koksofengas 535 kcal/kg Kokskohle. Der Wärmeverbrauch steigt also bei häufigem Wechsel von Koksofengas auf Hochofengas um weitere 15 kcal/kg Kohle an. Das bedeutet also eine weitere Erhöhung des Wärmemehrerverbrauches bei Hochofengasbeheizung gegenüber Koksofengasbeheizung auf 10,6% gegenüber 9% bei dem Versuch mit gleichmäßiger Anlieferung von Hochofengas.

b) Beheizung mit Generatorgas

Die Versuche mit Koksgeneratorgas wurden an einer Ofengruppe durchgeführt, die aus 35 kopfbeheizten Regelstrom-Verbundöfen bestand. Die wichtigsten Ofenabmessungen sind folgende:

Kammerlänge zwischen den Türstopfen	11 070 mm
Kammerhöhe bis Scheitel	3 400 mm
mittlere Kammerbreite	450 mm
Läufersteinstärke	100 mm

Bei Beginn der Versuche war die Ofengruppe etwa fünf Jahre in Betrieb. Mit Generatorgasbeheizung wurden drei Versuche bei Heizzugtemperaturen von 1100, 1200 und 1300°C durchgeführt. Aus betrieblichen Gründen war nur ein Vergleichsversuch mit Koksofengasbeheizung bei 1300°C möglich. Nach Erreichen des Beharrungszustandes erstreckte sich jeder Versuch über einen Zeitraum von fünf Tagen.

Die Zusammensetzung des Generatorgases während der Versuche war im Mittel etwa folgende:

CO ₂	5,0%
O ₂	0,2%
CO	27,3%
H ₂	9,5%
N ₂	58,0%

Die mittlere Verbrennungswärme des Generatorgases lag bei etwa $H_o = 1115$ kcal/Nm³. Größere Schwankungen traten weder in der Zusammensetzung noch im Heizwert auf.

Die Untersuchungsergebnisse der bei den vier Versuchen verkokten Kokskohlen sind aus Tab. 4 zu ersehen. In ihrem Gehalt an Flüchtigen Bestandteilen und im Aschegehalt besteht gute Übereinstimmung, lediglich im Siebanteil unter 0,5 mm sind kleinere Unterschiede festzustellen. Die Aufteilung nach Kohlenarten ergibt für den Versuch mit Koksofengasbeheizung einen etwas höheren Anteil an Gaskohle und oberer Fettkohle.

Die Tab. 5 enthält die Versuchsbedingungen sowie die wichtigsten wärmetechnischen Versuchsergebnisse.

Für die gewählten Heizzugtemperaturen von 1100, 1200 und 1300°C ergaben sich Garungszeiten von 26, 22 und 18 Stunden. Die bei den einzelnen Versuchen erzielten Schüttgewichte zeigen mit Ausnahme des Versuches bei 1100°C eine

Tab. 4 Kennzahlen der Kokskohlen

Beheizungsart		Generator- gas	Generator- gas	Generator- gas	Koksofen- gas
Heizzugtemperatur °C		1100	1200	1300	1300
Wasser	%	10,5	9,5	10,3	9,6
Asche (wf)	%	7,5	7,1	6,8	6,8
Flüchtige Bestandteile					
(waf)	%	26,1	26,8	26,3	26,4
Siebanteil < 2,0 mm	%	75,1	78,7	72,8	76,3
Siebanteil < 0,5 mm	%	37,5	41,7	33,8	37,7
<i>Dilatometertest</i>					
Kontraktion	%	19	17	12	18
Dilatation	%	113	122	119	158
<i>Kohlenarten</i>					
Gaskohle	%	19	16	13	22
Obere Fettkohle	%	22	25	20	24
Untere Fettkohle	%	58	58	62	52
Obere Eßkohle	%	1	1	5	2

Tab. 5 Versuchsbedingungen und Versuchsergebnisse bei der Beheizung mit Generatorgas

Beheizungsart	Generatorgas	Generatorgas	Generatorgas	Generatorgas	Koksfofengas
Heizungstemperatur (Solltemperatur)	°C	1100	1200	1300	1300
Garungszeit	h	26	22	18	18
Schüttgewicht der Kokskehle (feucht)	kg/m ³	829	809	811	810
Schüttgewicht der Kokskehle (wf)	kg/m ³	742	732	728	732
Mittlere Heizungstemperatur, optisch gemessen	°C	1099	1198	1295	1302
Optisch gemessene Kammerwandtemperatur: 400 mm unter Kokskehlenoberkante	°C	951	1019	1070	1082
400 mm über Ofensohle	°C	983	1047	1098	1114
Mittlere Temperaturdifferenz der Kammerwand	°C	32	28	28	32
Mittlere Kokskehletemperatur	°C	1003	1107	1168	1185
Gassammelraumtemperatur	°C	689	697	725	716
Wärmeverbrauch je kg Kokskehle (feucht)	kcal/kg	497	515	553	518
Wärmeverbrauch je kg Kokskehle (10% H ₂ O)	kcal/kg	493	519	551	522
Abgasverlust	%	13,2	15,2	15,2	12,5
Oberflächenverlust	%	10,9	10,1	8,7	8,9
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	%	75,9	76,7	76,1	78,6
Verkokungswärme je kg Kokskehle (10% H ₂ O)	kcal/kg	374	398	419	410

gute Übereinstimmung. Die angestrebten Solltemperaturen wurden bei allen Versuchen praktisch erreicht.

Der Wärmeverbrauch bei Generatorgasbeheizung und einer Heizzugtemperatur von 1300°C betrug 551 kcal/kg Koks-kohle mit 10% Wasser. Der entsprechende Versuch bei Koksofengasbeheizung ergab einen Wärmeverbrauch von 522 kcal/kg Kohle. Das entspricht einem Wärmemehrverbrauch bei Generatorgasbeheizung von 29 kcal oder 5,5%. Aus betrieblichen Gründen konnten bei 1100 und 1200°C Heizzugtemperatur keine entsprechenden Vergleichsversuche mit Koksofengas durchgeführt werden. Es zeigt sich aber, daß die mit Generatorgasbeheizung bei 1200 und 1300°C erzielte Differenz im Wärmeverbrauch von 32 kcal dem Wärmemehrverbrauch bei gleichartiger Steigerung der Heizzugtemperatur mit Koksofengasbeheizung nach den Untersuchungen auf der Versuchskokerei [1] entsprechen. Es kann also angenommen werden, daß sich auch bei den Heizzugtemperaturen von 1100 und 1200°C ein Wärmemehrverbrauch bei Generatorgasbeheizung gegenüber Koksofengasbeheizung von ca. 5 bis 6% einstellt.

In dem vorangegangenen Abschnitt über die Beheizung mit Gichtgas wurde dargelegt, welche Ursachen für einen höheren Unterfeuerungsverbrauch bei Beheizung mit Hochofengas gegenüber Koksofengas maßgebend sein können. Da der Beheizungsvorgang mit Generatorgas der gleiche ist wie bei der Unterfeuerung mit Hochofengas, treffen für beide Gasarten die gleichen verbrennungstechnischen Voraussetzungen zu. Der ermittelte Wärmemehrverbrauch kann demnach auf dieselben Ursachen zurückgeführt werden. Im Vergleich zum Hochofengas ist aber die Zusammensetzung und damit der Heizwert des Generatorgases gleichmäßiger. Es war daher zu erwarten, daß die Verluste, die durch unverbranntes Heizgas oder durch zu hohen Luftüberschuß bei starken Heizwertschwankungen entstehen, beim Generatorgas weitgehend vermieden werden.

Dementsprechend muß der Wärmemehrverbrauch bei Generatorgasbeheizung gegenüber Koksofengasbeheizung niedriger sein als bei Hochofengasbeheizung ohne Heizwertregelung.

Hinsichtlich der Wärmeverteilung in vertikaler Erstreckung sind keine wesentlichen Unterschiede bei den einzelnen Temperaturstufen festzustellen. Die erreichte Differenz von im Mittel 30°C ist als gut zu bezeichnen.

Bei der Betrachtung der Abgasverluste zeigt sich mit Ausnahme des Versuches bei 1100°C Heizzugtemperatur der erwartete Anstieg mit steigender Heizzugtemperatur. Der verhältnismäßig hohe Abgasverlust bei 1100°C ist zurückzuführen auf den hohen Luftüberschuß von 54% (Tab. 6) sowie auf die Abgastemperatur von 200°C, die im Vergleich zu der Temperatur bei 1200°C zu hoch liegt.

Bei der beheizungstechnischen Einstellung der Öfen zeigte es sich jedoch, daß bei dem vorliegenden Ofensystem eine optimale Verteilung der Luft- und Gas-mengen bei Heizzugtemperaturen von 1100°C nicht möglich ist. Untersuchungen an Abgasproben, die aus den einzelnen Heizzügen verschiedener Heizwände vorgenommen wurden, bestätigen dann auch die ungleichmäßige Verteilung der Gas- und Luftmengen bei 1100°C Heizzugtemperatur. Um eine vollständige Verbrennung in allen Heizzügen zu erzielen, mußte der Kaminzug so stark

Tab. 6 *Verbrennungstechnische Kennzahlen bei der Beheizung mit Generatorgas*

Beheizungsart	Generator-gas				Koksofen-gas
	1100	1200	1300	1300	
Heizungstemperatur (Solltemperatur)	°C				1300
Verbrennungswärme	1114	1115	1116	4692	
Heizwert	1062	1065	1066	4129	
Dichte des Heizgases	1,205	1,211	1,220	0,472	
Luftbedarf bei theoretischer Verbrennung	0,867	0,862	0,871	4,148	
Luftbedarf bei theoretischer Verbrennung	0,816	0,809	0,817	1,005	
Abgasmenge bei theoretischer Verbrennung	1,683	1,678	1,687	4,845	
Abgasmenge bei theoretischer Verbrennung	1,585	1,576	1,583	1,173	
Errechnete Abgaszusammensetzung (feucht):					
CO ₂	14,4	16,3	16,9	6,5	
H ₂ O	6,7	7,4	6,6	19,9	
O ₂	4,5	2,7	2,3	3,2	
N ₂	74,4	73,6	74,2	70,4	
Gefundene Abgaszusammensetzung (trocken):					
CO ₂	16,0	17,9	18,0	7,8	
O ₂	4,6	2,8	2,5	4,2	
N ₂	79,4	79,3	79,4	88,2	
Luftüberschußzahl	1,543	1,296	1,242	1,214	
Luftmenge bei $n > 1$	1,338	1,118	1,082	5,035	
Luftmenge bei $n > 1$	1,260	1,050	1,014	1,219	
Abgasmenge, feucht bei $n > 1$	2,196	1,990	1,933	5,767	
Abgasmenge, feucht bei $n > 1$	2,068	1,869	1,813	1,397	
Luftmenge zu Abgasmenge	60,9	56,2	55,9	87,3	
Gasmenge zu Abgasmenge	45,5	50,3	51,7	17,3	
Luftmenge zu Gasmenge	133,8	111,8	108,2	503,5	
Abgasatemperatur	200	217	250	269	

erhöht werden, daß sich ein mittlerer Luftüberschuß von 54% ergab. Dieselben Schwierigkeiten ergaben sich auch bei der gleichmäßigen Verteilung der Gas- mengen auf die einzelnen Heizzüge, wenn man berücksichtigt, daß bei 1100°C nur 61% der Gasmenge verbraucht wird, die bei 1300°C erforderlich ist. Die hierdurch bedingten unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten des Gases bringen eine zusätzliche Erschwernis für die Einstellung einer gleichmäßigen Beheizung mit sich.

Die Abb. 4 zeigt deutlich die ungünstigen Verbrennungsverhältnisse bei der Heizzugtemperatur von 1100°C. Der theoretische Luftbedarf, bezogen auf 1000 kcal/H_u, der sich aus der Heizgasanalyse errechnet, ist bei allen Versuchen praktisch konstant. Die verhältnismäßig geringfügigen Abweichungen ergeben sich aus den Unterschieden der Heizgasanalyse. Zwangsläufig ändern sich auch die theoretischen Abgasmengen nur gering. Die Luftüberschußzahl von 1,543 bei

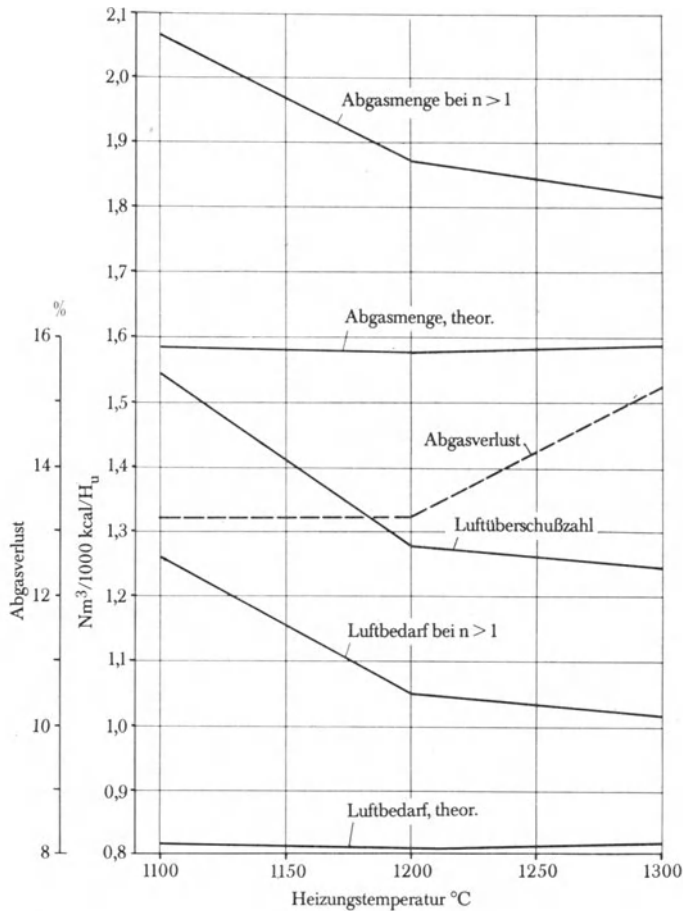


Abb. 4 Verbrennungstechnische Kennzahlen bei Generatorgasbeheizung