

Reinhard Scholz, Michael Beckmann und Christian Malek, Clausthal-Zellerfeld¹

Drallbrennkammer zur schadstoffarmen Verbrennung von schwierigen gasförmigen und flüssigen Brennstoffen²

1. Einleitung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 134 der Deutschen Forschungsgemeinschaft befaßt sich das Institut für Energieverfahrenstechnik der TU Clausthal mit der Verbrennung von über-

schweren Rückstandsölen. In diesem Beitrag wird auf die Eignung eines Drallbrennkammersystems [1] für die Heißentschwefelung und schadstoffarme Verbrennung hochsiedender, schwefelreicher Erdölfraktionen eingegangen. Neben der „vollständigen“ Verbrennung steht die Minderung von Schadstoffemissionen bei diesem Projekt im Vordergrund. Die daraus resultierenden Erfahrungen hinsichtlich der schadstoffarmen Verbrennung sind allerdings nicht nur auf diese überschweren Rückstandsöle beschränkt. Sie lassen sich allgemein auch auf andere „schwierige“ gasförmige, flüssige und staubförmige Brennstoffe übertragen, so daß daraus unmittelbar Verfahrenskonzepte für die Verbrennung schwieriger Brennstoffe entwickelt werden.

¹ Prof. Dr.-Ing. *Reinhard Scholz*, Dipl.-Ing. *Michael Beckmann* und Dipl.-Ing. *Christian Malek*, Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik/Clausthaler Umweltinstitut

² Vortrag anlässlich der 6. Fachtagung Thermischer Apparatebau am 26. und 27. Juni 1990 in Magdeburg

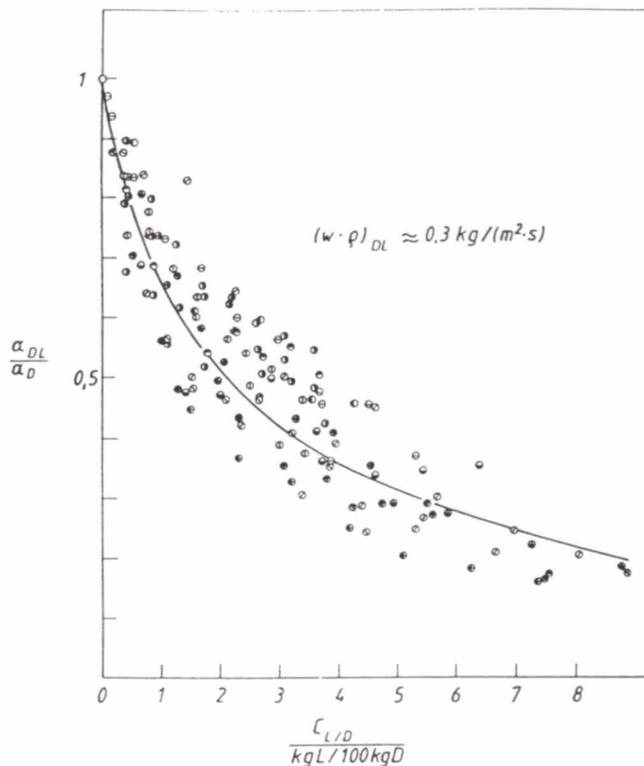


Bild 3. Verhältnis des Wärmeübergangskoeffizienten eines Wasserdampf-Luft-Gemisches zu dem des reinen Wasserdampfes bei Oberflächenkondensation

bar, wenn die Meßergebnisse unter Lufteinfluß den unter sonst gleichen Versuchsbedingungen theoretisch zu erreichenden ohne Lufteinfluß gegenübergestellt werden.

Ausgangspunkt aller Meßreihen sind dabei Meßwerte von Vorversuchen ohne Lufteinfluß, so daß eine Verfälschung der Meßergebnisse bezüglich dieses Lufteinflusses weitestgehend ausgeschlossen werden kann.

Im Bild 3 sind die Versuchsergebnisse dargestellt, wobei im Bereich $0 < C_{L/D} < 0,5$ aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht alle Meßwerte aufgeführt sind. α_{DL}/α_D ist dabei das Verhältnis des Wärmeübergangskoeffizienten des Dampf-Luft-Gemisches zu dem des reinen Dampfes, $C_{L/D}$ das Verhältnis von kg Luft zu 100 kg Dampf. Aus den durchgeführten Regressions-Korrelations-Analysen der Versuchswerte nach der Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate wurden ingenieurmäßig anwendbare Kriteriale Gleichungen für die untersuchten Bereiche abgeleitet, die die Versuchswerte genügend genau approximieren. Der dargestellte Kurvenzug entspricht dabei der Funktion

Tabelle 1. Regressionskoeffizienten der Kriteriale Gleichungen

Kondensation an	y	x	Regressionskoeffizienten			Definitionsbereich
			a	b	c	
Rohren	α_{DL}/α_D	$C_{L/D}$	0,328	-2	1,116	$0 < x \leq 0,2$
			1,03	-0,5	-0,05	$0,2 < x \leq 10$
Rieselstrahlen	$\varepsilon_{DL,R}/\varepsilon_{D,R}$	$C_{L/D,R}$	1,042	0,0012	-0,059	$0 < x \leq 50$

$$y = a(x + 1)^b \cdot e^{c(x + 1)} \quad (1)$$

Die Regressionskoeffizienten der Kriteriale Gleichung sind in Abhängigkeit vom Definitionsbereich in Tabelle 1 aufgeführt.

Die unterschiedlichen Meßpunktsymbole kennzeichnen verschiedene Versuchsbedingungen – z. B. Luftabsaugeventilstellungen und Anordnungen von Luftabsaugbohrungen –, die jedoch für die grundsätzlichen Aussagen in diesem Bericht nicht relevant sind.

4.2. Kondensation an Rieselstrahlen

Für den am Rieselstrahl kondensierenden Dampfmassestrom gilt

$$\dot{m}_{D,R} = \dot{m}_{R,E} \frac{h_{R,A} - h_{R,E}}{h_D - h_{R,A}} \quad (2)$$

Der theoretisch kondensierbare Dampfmassestrom $\dot{m}_{D,R,th}$ wird erreicht, wenn die Aufwärmung des Rieselstrahls bis zur Siedetemperatur erfolgt.

Damit kann für das im Schrifttum als „Erwärmungszahl“ bezeichnete Verhältnis der tatsächlichen Wärmeleistung zur theoretisch möglichen geschrieben werden:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{D,R,th}(h_D - h_{R,A})}{\dot{m}_{D,R,th}(h_D - h_{S'})} \quad (3)$$

Die unter den in 4.1. beschriebenen Randbedingungen gewonnenen Versuchsergebnisse zur Kondensation an Rieselstrahlen sind im Bild 4 dargestellt, wobei der Bereich $C_{L/DR} > 18$ dort nicht wiedergegeben wird.

$\varepsilon_{DL}/\varepsilon_D$ ist dabei das Verhältnis der Erwärmungszahl des Dampf-Luft-Gemisches zu der des reinen Dampfes, $C_{L/D,R}$ wiederum das Verhältnis kg Luft zu 100 kg Dampf. Für die unterschiedlichen Meßpunktsymbole gelten die unter 4.1. getroffenen Aussagen.

Die analog 4.1. ermittelten Regressionskoeffizienten der Kriteriale Gleichung werden ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt.

5. Zusammenfassung

Für Oberflächenkondensation an senkrechten Rohren und Mischkondensation an freifallenden Rieselstrahlen wurden ex-

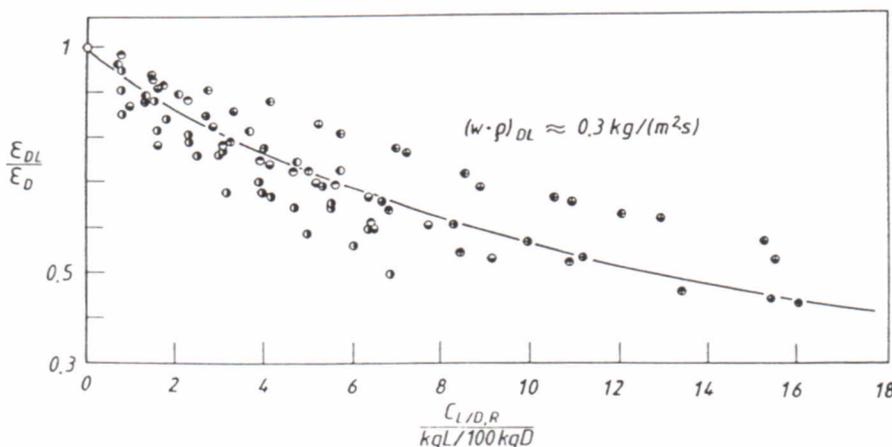


Bild 4. Verhältnis der Erwärmungszahl eines Wasserdampf-Luft-Gemisches zu der des reinen Wasserdampfes bei Mischkondensation

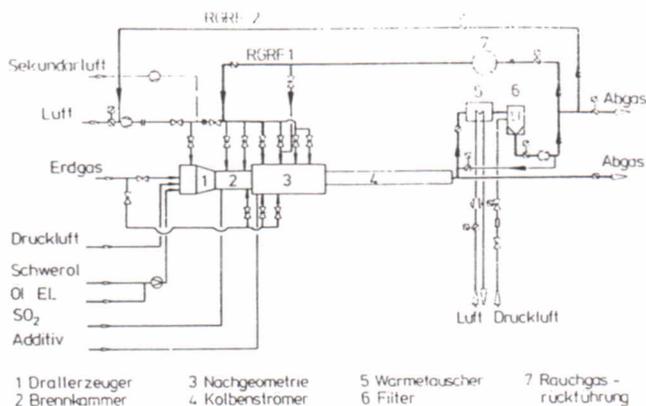


Bild 1. Grundfließbild der Versuchsanlage

2. Beschreibung der Versuchsanlage

Das Grundfließbild der Versuchsanlage ist im Bild 1 wiedergegeben. Kern der Versuchsanlage ist die Drallbrennkammer (0,5 bis 1 MW (th.)). Sie besteht aus den Hauptkomponenten Drallerzeuger, Brennraum, Brennstofflanze und Anschlußgeometrie. Über entsprechende Zuleitungen wird die Verbrennungsluft (evtl. vorgewärmt) dem Drallerzeuger zugeführt. Durch verstellbare Klappen erfolgt die Steuerung des Dralls. Der Brennstoff wird am Brennraumeintritt durch die zentral angeordnete Brennstofflanze eingebracht und vermischt sich mit der Luft. Die durch die Anschlußgeometrie gegebene unstetige Querschnittserweiterung am Brennraumaustritt führt dort zu einer Entkopplung zwischen der stromabwärts gerichteten, stark verdrallten Strömung und der sich bei überkritischem Drall einstellenden inneren Rezirkulationszone, so daß die Rückströmung nahezu unverdrallt in den Brennraum eintritt und eine gute Vermischung bewirkt. Gleichzeitig dient die Anschlußgeometrie als Nachverbrennungsstufe mit tangentialer Sekundärluftzuführung und als möglicher Entschwefelungsreaktor mit radialer Additiveindüsung (Bild 2).

Wegen der guten Vermischungseigenschaften des Drallbrennkammersystems sind einerseits hohe Energieumsetzungsdichten bei sehr gutem Ausbrand möglich, andererseits führt dies auch zu einer relativ homogenen Temperaturverteilung in den Hauptzonen.

Das die Drallbrennkammer verlassende staubbeladene Verbrennungsgas kann einem Heißgaszyklon zugeführt werden. Nach

der Wärmeauskopplung werden die Abgase gereinigt und dem Kamin zugeführt.

Ein wesentliches Merkmal des Verbrennungskonzeptes mit der Drallbrennkammer ist neben der Luft- und Brennstoffstufung die Entkopplung der Prozessstufen Verbrennung und Wärmeübertragung. Dadurch werden Quencheffekte vermieden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, jede Prozessstufe für sich weitgehend zu optimieren. Es kann von einer im technischen Sinne adiabaten Verbrennung mit „heißen“ Wänden gesprochen werden. Das Temperaturniveau in der Drallbrennkammer kann sowohl mit variierender Luftzahl als auch mit Rauchgasrückführung eingestellt werden. Die Möglichkeit, einen isothermen Reaktor bereitzustellen, ist z. B. für die unterschiedlichen Reaktionsmechanismen wichtig.

3. Ausbrandverhalten

Die gute Vermischungsintensität der Drallbrennkammer bewirkt kurze Reaktionszeiten bei einem hohen Ausbrand. Im Bild 3 sind die CO-Konzentration und Rußzahlen für eine gestufte Rückstandsölflamme in Abhängigkeit von der Primärluftzahl dargestellt. Es zeigt sich, daß bei gestuften Flammen (Sekundärluft Anschlußgeometrie) die CO-Konzentration erst bei einer Primärluftzahl unterhalb $\lambda = 0,5$ stark ansteigt. Auch bei einer ungestuften Flamme steigen die CO-Konzentrationen erst bei einer nahstöchiometrischen Betriebsweise an.

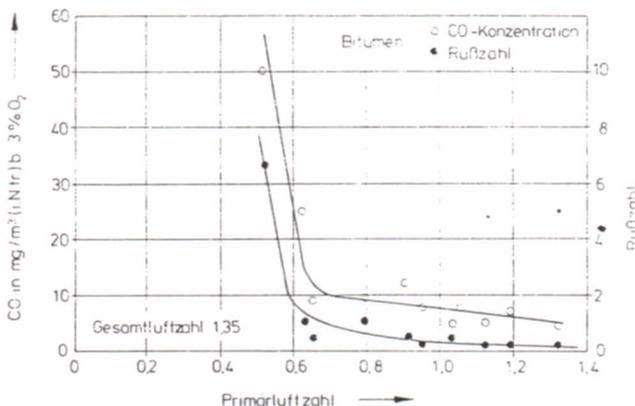


Bild 3. Ausbrand (CO, Ruß) für eine gestufte Rückstandsölflamme in Abhängigkeit von der Primärluftzahl [2]

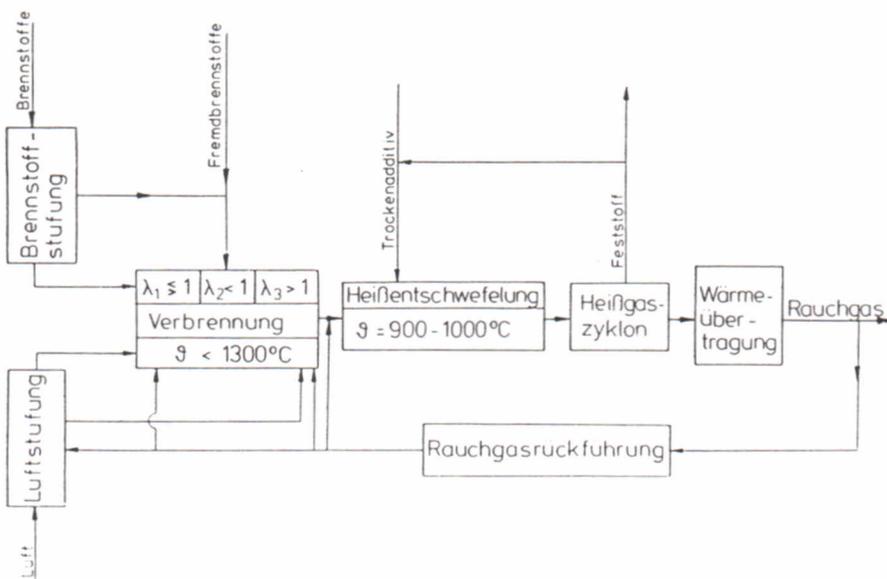


Bild 2. Konzept für eine schadstoffarme Verbrennung schwieriger Brennstoffe

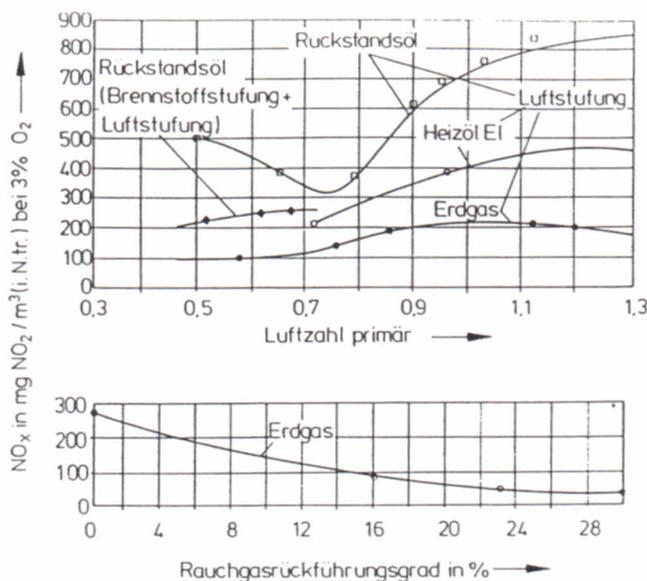


Bild 4. NO-Minderungsmaßnahmen bei unterschiedlichen Brennstoffen

4. Stickstoffoxidminderung durch Primärmaßnahmen bei der Rückstandsölverbrennung

Eine Hauptschadstoffkomponente bei der Verbrennung von schwierigen Brennstoffen ist das NO_x, dessen Emission vom Gesetzgeber reglementiert wird. Auf die einzelnen NO-Bildungsmechanismen, die eine Schematisierung in thermisches NO, Brennstoff-NO und Prompt-NO ermöglichen, soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden [3], [4].

Aus den unterschiedlichen NO-Bildungsmechanismen ergeben sich feuerungstechnische Maßnahmen, z. B. die Luftstufung, Rauchgasrückführung und Brennstoffstufung.

Im dem Drallbrennkammersystem wird eine Luftstufung dadurch realisiert, daß die sogenannte Primärluft über den Drallerzeuger und die sogenannte Sekundärluft tangential der Anschlußgeometrie zugeführt wird. Der Brennraum stellt dadurch die erste, die Anschlußgeometrie die zweite Verbrennungsstufe dar.

Im Bild 4 oben sind für unterschiedliche Brennstoffe (Erdgas, Heizöl EL und Rückstandsöl) die NO_x-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Luftzahl in der ersten Stufe dargestellt. Es ist zu erkennen, daß mit steigender Luftstufung bzw. abnehmender Luftzahl in der ersten Verbrennungsstufe die NO_x-Konzentrationen zunächst sinken, jedoch nach dem Durchschreiten eines Minimums wieder ansteigen. Qualitativ ähnliche Verläufe ergeben sich auch für Heizöl EL und Erdgas, jeweils auf einem niedrigeren Niveau. Mit der Luftstufung bei Rückstandsölflammen konnte eine NO-Minderung bis auf etwa 350 mg NO₂/m³ (i. N. tr.) bei 3% O₂ erreicht werden.

Der mindernde Effekt bei der Rückführung kalter Rauchgase (externe Rückführung durch Entnahme von Abgas hinter dem Wärmetauscher, zu unterscheiden von interner Rückführung heißer Gase infolge Unterdruckes im Brennraum) wird aufgrund einer Absenkung des Sauerstoffpartialdruckes und der Temperatur erwartet. Aus Bild 4 unten ist zu erkennen, daß die Rauchgasrückführung bei Erdgasflammen einen sehr beachtlichen Einfluß auf die NO_x-Konzentration ausübt. Es wird eine NO-Reduzierung um 90% erreicht. Für schwere Rückstandsöle läßt sich ein solcher Einfluß durch die Rauchgasrückführung jedoch nicht feststellen. Bei Erdgasflammen und schweren Rückstandsölflammen liegen für die NO_x-Bildung unterschiedliche Mechanismen vor. Während bei Erdgasflammen hauptsächlich die Temperatur für die Bildung von thermischem NO maßgeblich ist, beeinflusst bei schweren Rückstandsölflammen der Sauerstoffpartialdruck die Bildung von Brennstoff-NO mehr.

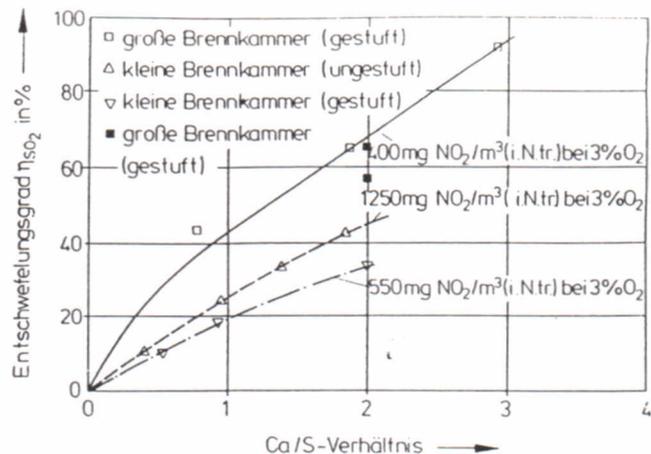


Bild 5. Simultane Entschwefelung und Entstickung bei einer Rückstandsölflamme [7]

Eine weitere Variante der Stufenverbrennung ist die Brennstoffstufung. Diese Minderungsmaßnahme umfaßt grundsätzlich drei Stufen. Die Primärzone wird zusätzlich mit einem Luftverhältnis größer eins betrieben. Durch die Zugabe eines Zusatzbrennstoffs in die Verbrennungsgase der ersten Stufe werden brennstoffreiche Zonen erzeugt. Die hohe Konzentration an CH-Radikalen bewirkt die Reduktion von vorhandenem Stickstoffoxid. In einer dritten Zone wird Tertiärluft zugegeben. Diese soll den Ausbrand des sekundären Brennstoffs gewährleisten. Eine in Kombination zur Luftstufung angewandte Brennstoffstufung führt zu einer weiteren Verbesserung der NO_x-Emission. Mit dieser Maßnahme verringert sich diese bis auf 250 mg NO₂/m³ (i. N. tr.) bei 3% O₂.

5. Heißentschwefelung mit Additiven im Drallbrennkammersystem

Unter Heißentschwefelung wird hier das Einblasen von Trockenadditiven auf Calciumbasis (Kreide, Kalkstein, Calciumhydroxid) in die Flamme verstanden. Bezüglich der dafür geltenden Bruttoreaktionen bzw. der Reaktionskinetik sei auf [5], [6] verwiesen.

6. Simultane Entschwefelung und Stickstoffoxidminderung

Das Ziel eines Verbrennungskonzeptes muß die simultane Schadstoffminderung sein. Damit genügt es nicht, die Einzelminderungsmaßnahmen für sich zu optimieren. Bei dem Versuch einer simultanen Entschwefelung und Entstickung durch Luftstufung ergab sich eine geringe NO_x-Konzentration, gleichzeitig stiegen jedoch die SO₂-Emissionen (Bild 5).

Durch die Luftstufung wird eine Nachverbrennung in der Anschlußgeometrie erzeugt. Diese bewirkt einen Temperaturanstieg, was ein Totbrennen des Kalkes zur Folge hat. Mit der Verlängerung des Brennraumes und der Anschlußgeometrie wurde eine Entkopplung beider Maßnahmen erzielt. Bei einer optimalen Kombination beider Betriebsparameter konnte bei dem Schwerölbetrieb eine simultane Entschwefelung und Entstickung durchgeführt werden. Für unterschiedliche Verbrennungsführungen (Luftstufung, Rauchgasrückführung) und für die große und kleine Drallbrennkammerausführung sind die Entschwefelungsgrade in Abhängigkeit vom molaren Ca/S-Verhältnis im Bild 5 vergleichend gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, daß bei einem optimalen System sowohl Entschwefelung als auch Entstickung mit gutem Erfolg simultan durchgeführt werden können. Der Ausbrand (CO < 20 ppm) ist dabei ebenfalls sehr gut.

7. Zusammenfassung

Ziel des vorgestellten Drallbrennkammersystems ist die vollständige Verbrennung von gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffen bei gleichzeitiger Minderung von Schadstoffen. Durch die gute Durchmischung in der Drallbrennkammer und die Entkopplung der Prozeßstufen Verbrennung und Wärmeübertragung ist die Möglichkeit gegeben, ein definiertes Temperaturniveau gleichmäßig einzustellen und so gezielt Schadstoffminderungsmaßnahmen zu optimieren.

Versuche zur Stickstoffoxidminderung haben gezeigt, daß die Einzelminderungsmaßnahmen (Brennstoffstufung, Luftstufung, Rauchgasrückführung) den NO_x -Anteil im Abgas auf mehr als 70 % reduzieren können, wobei die Art des verwendeten Brennstoffs zu berücksichtigen ist. Nach einer Abstimmung der Maßnahmen von Entstickung und Entschwefelung ergaben die Untersuchungen zur simultanen NO_x -Minderung (durch Luftstufung) und Direktentschwefelung bei gleichzeitig gutem Ausbrand ($\text{CO} < 20 \text{ ppm}$, Rußzahl ≤ 1) zufriedenstellende Ergebnisse. Hinsichtlich des Teilaspektes NO_x war die Rauchgasrückführung bei schweren Rückstandsölflammen weniger wirksam. Jedoch läßt sich durch die rezirkulierenden Rauchgase das Temperaturniveau für die jeweils erforderlichen Verhältnisse gezielt einstellen. Dabei treten keine erhöhten Abgasverluste auf. Die Erfahrungen bei der Verbrennung von schweren Rückstandsölen führten zu einem Verbrennungskonzept zur schadstoffarmen Verbrennung, das sich nicht nur auf Rückstandsöle, sondern allgemein auf „schwierige Brennstoffe“ bezieht.

Literatur

- [1] Jeschar, R., Scholz, R., Schopf, N., und Klöppner, G.: Schadstoffarme Verbrennung in einem Drallbrennkammersystem. Die Industrie-feuerung 38 (1986)
- [2] Jeschar, R., Scholz, R., Schopf, N., Klöppner, G., und Malek, Ch.: Verbrennungstechnik von schwersiedenden Erdölfraktionen und Erdölrückständen und Entschwefelung bei der Verbrennung schwersiedender Erdölfraktionen und Erdölrückstände. Sonderfor-schungsbereich 134 „Erdöltechnik und Erdölchemie“ an der TU Clausthal. Arbeits- und Ergebnisbericht 1989
- [3] De Soete, G.: Physikalisch-chemische Mechanismen in der Stick-stoffoxidbildung in industriellen Flammen. Gas-Wärme-International 30 (1981)
- [4] Fenimore, C. P.: Reactions of Fuel-Nitrogen in Rich Flame Gases. Combustion and Flame 25 (1976)
- [5] Jeschar, R., Scholz, R., und Schopf, N.: Heißentschwefelung in Drall-brennkammersystemen und einem isothermen Rohrreaktor. 12. Deutscher Flammentag am 10./11. September 1985, Karlsruhe, und VDI-Bericht 574 (1985), S. 673–687
- [6] Jeschar, R., Scholz, R., Schopf, N., und Hünlich, Th.: Direct Sulphur Capture at High Temperatures in a Combustion Chamber System With Swirl. IX. International Symposium on Combustion Proces-ses, Wisla-Jawornik, Poland, at June 17-20, 1985
- [7] Scholz, R., und Schopf, N.: Environmental Protective Combustion Process for Waste Fuels. Proceedings of the First European Confe-rence on Industrial Furnaces and Boilers, 21-24. March 1988, Lisbon (Portugal). S. 1-9