

Peter NAGELER, BSc

ENTWICKLUNG EINES KOHLE-SLURRY- KESSELS

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr. Christoph Hochenauer
Institut für Wärmetechnik

Beurteiler

Univ.-Prof. Dr. Christoph Hochenauer
Institut für Wärmetechnik

Graz, im Oktober 2014

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,
.....
(Signature)

KURZFASSUNG

Titel: Entwicklung eines Kohle- Slurry- Kessels

Autor: Peter Nageler

1. Stichwort: Kohle- Slurry
2. Stichwort: Brenner/ Zerstäubung
3. Stichwort: Luft/ Reinsauerstoff- Verbrennung

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wird die Entwicklung eines Kohle- Slurry- Kessels behandelt. Ein bereits vorhandener Ölkessel (1,4 MW) soll dafür mit einer Vorbrennkammer adaptiert werden. Verbrennungsversuche mit Kohle- Slurry, die aus einem Kohlepartikel- Wasser- Gemisch bestehen, sollen mit Luft und Reinsauerstoff durchgeführt werden.

Zunächst wird der Stand der Technik erhoben. Anhand von Beispielen aus der Praxis werden Kohle- Slurry- Brenner, Zerstäubung der Slurry sowie die Luft/Reinsauerstoff- Verbrennung näher erläutert. Danach werden Spray- und Verbrennungsversuche mit unterschiedlichen Slurries, Stützfeuer und Slurry- Lanzen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Sprayversuche zeigen, dass Slurry ohne geeignetes Dispergiermittel zu Verstopfungen in der Slurry- Lanze oder Düse führt. Als Dispergiermittel wurde Natrium Ligninsulfonat verwendet, mit dem ein einwandfreier Transport und die Zerstäubung der Slurry sichergestellt werden konnte. Aus den Verbrennungsversuchen kann schlussgefolgert werden, dass mit der verwendeten Slurry, mit einem Wassergehalt von 53 wt%, keine vollständige Verbrennung, weder mit Luft noch mit Reinsauerstoff, erzielt werden kann. Bei weiterer Adaption der Vorbrennkammer und einer Erhöhung des Kohlegehaltes in der Slurry ist eine vollständige Verbrennung mit Reinsauerstoff durchaus möglich. Es ist gelungen die Flamme während der Verbrennung mit einem Erdgasbrenner (Reinsauerstoff) als Stützfeuer stabil zu halten.

ABSTRACT

Title: Development of a Coal Slurry Boiler

Author: Peter Nageler

1st keyword: coal- slurry

2nd keyword: burner/ atomization

3rd keyword: air/ oxygen combustion

The present paper describes the development of a coal slurry boiler. An existing oil-fired boiler (1,4MW) was adapted for combustion using a precombustion chamber. Combustion tests with coal slurry - a coal particle water mixture - were executed with air and pure oxygen.

First, the state of the art was explicated. Coal slurry burners, slurry atomization and combustion into air and pure oxygen were explained with examples from praxis. In addition, spray and combustion experiments with different slurries, supporting fire and slurry lances were conducted.

The results of the spray tests showed that the slurry, without a suitable stabilizer, causes clogging in the nozzle or the slurry lance. Sodium lignosulfonate was used as a dispersant and with it a perfect transport and atomization of the slurry was ensured. The results of the combustion experiments showed that with the used slurry (water content of 53 wt%) a complete combustion, either with air or pure oxygen, is unachievable. However, by adjusting the pre-combustion chamber and increasing the coal content of the slurry complete combustion with pure oxygen is entirely possible. During the combustion of slurry, it was possible to keep the flame stable with a natural gas (pure oxygen) burner.

VORWORT

Ich möchte mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. Christoph Hochenauer für die exzellente Betreuung im Rahmen der Diplomarbeit sehr herzlich bedanken. Weiters gilt mein Dank der Firma Effective Energy Technologies GmbH und der Firma Messer Austria GmbH, welche das Zustandekommen dieser Diplomarbeit ermöglicht haben, sowie DI Bernhard Mayr, der mich fachlich und inhaltlich betreut hat. Ein besonderer Dank gilt Herrn Klein und Dr. Martin Demuth für die gute Zusammenarbeit während der gesamten Laufzeit des Projektes. Auch den Mitarbeitern der Institutswerkstatt ist ein Dank auszusprechen, die mir immer hilfreich zur Seite standen.

Einen besonderen Dank möchte ich meinen Eltern und meiner Freundin aussprechen, die mich stets unterstützt und mir das Absolvieren des Studiums erleichtert haben.

Graz, Oktober 2014

Peter Nageler

INHALTSVERZEICHNIS

1	<u>EINLEITUNG</u>	1
2	<u>STAND DER TECHNIK</u>	3
2.1	Kohle- Slurry	3
2.1.1	Einsatzmöglichkeiten	3
2.1.2	Anforderungen an Kohle- Slurries	4
2.1.3	CWS Präparation	6
2.2	Kohle- Slurry Verbrennung	7
2.2.1	Verbrennungsprozess CWS	7
2.2.2	Verbrennungsprozess eines Einzeltropfens	9
2.2.3	CWS Brenner	14
2.2.4	Verbrennungsbeispiele in Luft	17
2.2.5	CWS Wirbelschichtverbrennung	27
2.2.6	CWS Verbrennungssimulation	30
2.2.7	CWS Wärmetauscher	33
2.2.8	Weitere CWS Anwendungen in China	34
2.3	Kohle- Slurry Zerstäubung	37
2.3.1	Zerstäubungsmechanismen	37
2.3.2	CWS Zerstäubung	39
2.3.3	Düsenmaterial	44
2.4	Kohle- Slurry Verbrennung mit Reinsauerstoff und mit Sauerstoff angereicherter Luft	48
2.4.1	Reinsauerstoffverbrennung von Kohle	48
2.4.2	CWS Reinsauerstoff Verbrennung	49
2.4.3	CWS Verbrennungsbeispiele in Sauerstoff angereicherter Luft	51
3	<u>KOHLE- WASSER- SLURRY VERBRENNUNGSRECHNUNG</u>	55
4	<u>VERSUCHE</u>	62
4.1	Versuchsaufbau	62
4.2	Verbrennungsversuch mit Ölbrenner als Stützfeuer	66
4.2.1	Aufgabenstellung	66
4.2.2	Versuchsdurchführung	66
4.2.3	Ergebnisse des Versuches	68
4.2.4	Interpretation des Versuches	70
4.3	Slurry Präparation	71
4.3.1	Slurry- Homogenisierung	71
4.3.2	Slurry- Trockenschrankversuch	73
4.3.3	Interpretation des Versuches	74
4.4	Einbau und Adaption der Vorbrennkammer	74
4.5	Erdgasbrenner als Stützfeuer	79
4.5.1	Aufgabenstellung	79
4.5.2	Versuchsdurchführung	79
4.5.3	Ergebnisse des Versuches	80
4.5.4	Interpretation des Versuches	81
4.6	Sprayversuche	81
4.6.1	Aufgabenstellung	82

4.6.2	Versuchsaufbau	82
4.6.3	Versuchsdurchführung ohne Dispergiermittel	83
4.6.4	Versuchsdurchführung mit Dispergiermittel	88
4.6.5	Interpretation der Ergebnisse	89
4.7	Brennstoffanalyse	90
4.8	Verbrennungsversuch mit Erdgasbrenner als Stützfeuer	92
4.8.1	Aufgabenstellung	92
4.8.2	Versuchsdurchführung	92
4.8.3	Ergebnisse des Versuches	93
4.8.4	Interpretation der Ergebnisse	98
4.9	Versuch 18.9.2014	100
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	102
	LITERATUR	105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung der Energiepreise von fossilen Brennstoffen in Deutschland [1].....	1
Abbildung 2-1: Rheogramm von COS bei unterschiedlichen Kohlekonzentrationen [2]	5
Abbildung 2-2: Rheogramm CWS [4].....	6
Abbildung 2-3: Effekte von Additiven und Inkohlungsgrad auf die Slurry Viskosität [2]	6
Abbildung 2-4: Mechanismen der CWS Verbrennung [2].....	8
Abbildung 2-5: Temperaturverlauf eines LWS Tropfens [6]	10
Abbildung 2-6: Effekt der Tropfengröße auf die Verbrennungszeit von LWS [6]	11
Abbildung 2-7: Verdampfungszeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes eines LWS Tropfens [6]	11
Abbildung 2-8: Zündverzugszeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes eines LWS Tropfens [6]	12
Abbildung 2-9: Zündverzugszeit in Abhängigkeit der flüchtigen Bestandteile eines LWS Tropfens [6].....	12
Abbildung 2-10: Abhängigkeit der Kohlenstoffverbrennungsdauer von dem gebundenen Kohlenstoffgehalt in der Kohle eines LWS Tropfens [6].....	13
Abbildung 2-11: typische Messergebnisse bei der Verbrennung eines CWS Einzeltropfens [7]	14
Abbildung 2-12: CWS Brenner [8]	15
Abbildung 2-13: CWS Brenner mit Rezirkulation der Verbrennungsgase [9].....	16
Abbildung 2-14: CWS Brenner mit Vorverdampfung [10].....	17
Abbildung 2-15: Verbrennungssystem von CWS/CWLS [11].....	18
Abbildung 2-16: Verlauf der Kesselaustrittstemperatur während der Zündphase von CWS/CWLS [11].....	19
Abbildung 2-17: Partikelgrößenverteilung von Kraftwerkskohle [13]	21
Abbildung 2-18: Partikelgrößenverteilung von rückgewonnenen Kohlepartikeln [13]	21
Abbildung 2-19: schematische Darstellung eines Kohlestaubbrenners mit CWS Reburning [14]	22
Abbildung 2-20: NO _x Profil bei Feuerung von 70 % pulverisierter Kohle und 30 % CWS Reburning [14].....	23
Abbildung 2-21: CWS Verbrennungssystem in einem umgerüsteten Ölbrenner [16]	24
Abbildung 2-22: Versuchsstand Tropfenverbrennung [17]	25
Abbildung 2-23: schematische Darstellung einer CWS Vorverdampfungseinheit [18].....	26
Abbildung 2-24: Partikelströmung einer CWS Wirbelschichtverbrennung [17]	27
Abbildung 2-25: Flussdiagramm einer CWS Wirbelschichtverbrennungstechnologie [19].....	28
Abbildung 2-26: CWS Wirbelschichtbrenner [20]	29
Abbildung 2-27: schematische Darstellung eines COS/COWS Wirbelschichtvergasers [21].....	30
Abbildung 2-28: Rauchgaszusammensetzung, der Gasstrom und die Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Luftstromes [22].....	31
Abbildung 2-29: Verbrennungssimulation a) Entgasungsrate; b) Verbrennungsgeschwindigkeit; c) Temperatur; d) SO _x - Konzentration [24].....	33
Abbildung 2-30: Wärmetauscher und CWS Brennkammer [25]	34
Abbildung 2-31: schematische Darstellung der Strahlauftrennung [33].....	38
Abbildung 2-32: Auftrennungstypen bei coaxialen Luft-Wasser-Strahlen: a) Rayleigh Auftrennung [34] b) Membran Auftrennung [33] c) Fiber Auftrennung [33] d) Zerstäubung [34]	39
Abbildung 2-33: Auftrennungsmechanismen in Abhängigkeit der We- und Oh-Zahl [34]	41
Abbildung 2-34: CWS LSI- Bild [37].....	42
Abbildung 2-35: CWS Geschwindigkeitsfeld [37]	42
Abbildung 2-36: Radiale Verteilung der Tropfendurchmesser [37].....	43
Abbildung 2-37: schematische Darstellung einer schäumenden Düse [38].....	44
Abbildung 2-38: a) Zerstäuber b) Düsengeometrie [40]	44
Abbildung 2-39: Vergrößerung des Düsenlochdurchmessers in Abhängigkeit der Betriebsdauer [40].....	45
Abbildung 2-40: Düsenabnutzung nach 120h a) Al ₂ O ₃ /(W,Ti)C b) WC/Co c) 1Cr18Ni9Ti [40].	46
Abbildung 2-41: SEM Aufnahme der Düsenoberfläche nach 120 Betriebsstunden [39].....	47

Abbildung 2-42: Abnutzung in Schnittdarstellung einer a) spannungsfreien Düse b) c) geschichteten Düsen [41]	48
Abbildung 2-43: Prinzipdarstellung einer Reinsauerstoffverbrennung [42]	49
Abbildung 2-44: CWS Brenner [43]	50
Abbildung 2-45: Luftverbrennung [43].....	50
Abbildung 2-46: Reinsauerstoff Verbrennung [43]	51
Abbildung 2-47: Brenner für Flüssigbrennstoff mit Sauerstoffanreicherung [44]	51
Abbildung 2-48: Brennervariante für Flüssigbrennstoff mit Sauerstoffanreicherung [44]	52
Abbildung 2-49: Zündverzugszeit [45]	53
Abbildung 2-50: Drallbrenner mit Sauerstoff angereicherter Verbrennungsluft [46].....	54
Abbildung 3-1: Heizwert CWS	56
Abbildung 3-2: adiabate Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei stöchiometrischer Verbrennung.....	58
Abbildung 3-3: adiabate Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Wassergehaltes bei stöchiometrischer Verbrennung	58
Abbildung 3-4: adiabate Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei einem Wassergehalt von 40 wt%	59
Abbildung 3-5: Rauchgaszusammensetzung in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei stöchiometrischer Verbrennung.....	60
Abbildung 3-6: Rauchgaszusammensetzung in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei einem Luftverhältnis von 1,3	60
Abbildung 3-7: Wassergehalt der CWS und Sauerstoffgehalt der Luft in Abhängigkeit der adiabaten Verbrennungstemperatur bei stöchiometrischer Verbrennung	61
Abbildung 4-1: Funktionsprinzip Ölkessel [50][51]	63
Abbildung 4-2: Versuchsstand.....	64
Abbildung 4-3: Ölkessel offen.....	65
Abbildung 4-4: Ölbrenner und Slurry- Lanze von innen	65
Abbildung 4-5: Anordnung Slurry- Lanze von Messer Austria GmbH.....	67
Abbildung 4-6: Slurry- Düse	67
Abbildung 4-7: Slurry- Kreislauf zur Homogenisierung	72
Abbildung 4-8: Mörtel Rührer.....	73
Abbildung 4-9: angelieferte Vorbrennkammer	75
Abbildung 4-10: Schamottsteine	76
Abbildung 4-11: ausgebaute Kesseltüre	76
Abbildung 4-12: Montage der Vorbrennkammer auf der Kesseltüre.....	77
Abbildung 4-13: gedämmte Vorbrennkammer	78
Abbildung 4-14: eingebaute Vorbrennkammer	78
Abbildung 4-15: Versuchsaufbau Erdgasbrenner mit Sauerstoff als Oxidator	80
Abbildung 4-16: linkes Bild: Erdgasflamme mit 3 Nm ³ /h Methan und 8 Nm ³ /h Sauerstoff; rechtes Bild: Erdgasflamme mit 3 Nm ³ /h Methan und 6,3 Nm ³ /h Sauerstoff.....	81
Abbildung 4-17: Versuchsaufbau für Sprayversuche	82
Abbildung 4-18: Slurry Düse von Effective Energy Technologies GmbH	83
Abbildung 4-19: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (kurze Lanze von Effective Energy Technologies GmbH/ Düsendurchmesser 7,5 mm).....	84
Abbildung 4-20: Slurry- Lanze und Düse von Effective Energy Technologies GmbH.....	84
Abbildung 4-21: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (lange Lanze von Effective Energy Technologies GmbH/ Düsendurchmesser 7,5 mm).....	85
Abbildung 4-22: Lanze und Spraybild von CTP-DUMAG GmbH mit 5,5 mm Düsendurchmesser bei ca. 80 kg Slurry/h.....	85
Abbildung 4-23: Lanze von CTP-DUMAG GmbH mit 6,5 mm Düsendurchmesser	86
Abbildung 4-24: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (CTP-DUMAG GmbH/ Düsendurchmesser 6,5mm)	86
Abbildung 4-25: Spraybild bei der CTP-DUMAG GmbH Lanze mit 6,5 mm Düsendurchmesser	87
Abbildung 4-26: Lanze und Düse von Messer Austria GmbH	87

Abbildung 4-27: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (CTP-DUMAG GmbH/ Düsendurchmesser 6,5 mm)	88
Abbildung 4-28: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (lange Lanze von Effective Energy Technologies GmbH/ Düsendurchmesser 8 mm)	89
Abbildung 4-29: Partikelgrößenverteilung und Dichteverteilung [55].....	91
Abbildung 4-30: System Kühlwasser bei der Slurry Verbrennung mit Erdgasbrenner als Stützfeuer.....	95
Abbildung 4-31: links Slurry- und Erdgasflamme; rechts Rauchgas bei Slurry- und Erdgasverbrennung.....	96
Abbildung 4-32: System Kühlwasser bei der Slurry Verbrennung mit Reinsauerstoff	97
Abbildung 4-33: links Slurry- Flamme bei Reinsauerstoff; rechts Rauchgas bei Slurry Verbrennung	98
Abbildung 4-34: Flammenvergleich von links nach rechts: Erdgasflamme; Slurry- und Erdgasflamme; Slurry- Flamme mit angereicherter Luft; Slurry- Flamme mit Reinsauerstoff	98
Abbildung 4-35: Verbrennungsrückstände in der Vorbrennkammer.....	99
Abbildung 4-36: Flamme und Rauchgas bei der CWS Verbrennung mit Sauerstoff angereicherter Luft	101
Abbildung 4-37: Verbrennungsrückstände bei der CWS Verbrennung	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: CWS Anwendungen in China [26].....	35
Tabelle 3-1: Kohlezusammensetzung [47].....	55
Tabelle 3-2: typische Slurry- Zusammensetzung bei 40 wt% Wasser.....	55
Tabelle 4-1: Rauchgaszusammensetzung bei reinem Ölbetrieb	68
Tabelle 4-2: Rauchgaszusammensetzung bei kombiniertem Slurry- und Ölbetrieb	68
Tabelle 4-3: Äquivalente Rauchgaszusammensetzung bei kombiniertem Slurry- und Ölbetrieb.....	68
Tabelle 4-4: Ölzusammensetzung [47]	69
Tabelle 4-5: berechnete Rauchgaszusammensetzung	69
Tabelle 4-6: Zusammensetzung Slurry und Heizöl	70
Tabelle 4-7: Analyseergebnisse der Slurry [55]	90
Tabelle 4-8: gemessene Rauchgaszusammensetzung Slurry mit Stützfeuer.....	94
Tabelle 4-9: gemessene Rauchgaszusammensetzung Slurry ohne Stützfeuer	97
Tabelle 4-10: gemessene Rauchgaszusammensetzung bei der Slurry Verbrennung mit Stützfeuer.....	100
Tabelle 4-11: gemessene Rauchgaszusammensetzung bei der Slurry Verbrennung mit Sauerstoff angereicherter Luft	100

Nomenklatur

Abkürzungen und Indizes:

1Cr18Ni9Ti		rostfreier Stahl
Al ₂ O ₃		Aluminiumoxid
Al ₂ O ₃ /TiC		Aluminiumoxid/Titancarbid (Keramik)
Al ₂ O ₃ /(W,Ti)C		Aluminiumoxid/(Wolfram- und Titancarbid) (Keramik)
CFD	Computational Fluid Dynamics	numerische Strömungsmechanik
CMS	coal- methanol- slurry	Kohle- Methanol- Slurry
COS	coal- oil- slurry	Kohle- Öl- Slurry
COWS	coal- oil- water- slurry	Kohle- Öl- Wasser- Slurry
CWLS	coal- waste liquid- slurry	Kohle- Abwasser- Slurry
CWS	coal- water- slurry	Kohle- Wasser- Slurry
Fe ₂ O ₃		Eisenoxid
HCN		Blausäure
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle	Kombiprozess mit integrierter Vergasung
LSI	Laser Sheet Imaging	Laser sheet Bildverarbeitung
LWS	lignite- water- slurry	Braunkohle- Wasser- Slurry
NH ₃		Ammoniak
NO _x		Stickoxide
ppm	parts per million	Teile von einer Million
SiO ₂		Siliziumdioxid
SEM	scanning electron microscope	Rasterelektronenmikroskop
SMD		Sauterdurchmesser
SO ₃		Schwefeltrioxid
SO _x		Schwefeloxide
Vol%	Volume Percent	Volumprozent
WC/Co		Wolframcarbit/ Cobalt (Hartmetall)
wt%	Weigt Percent	Massenprozent
(W,Ti)C		Wolfram- und Titancarbid

Formelzeichen:

A_t	technische Arbeit	J
c	Kohlenstoffmassenanteil im Brennstoff	wt%
CO	Kohlenmonoxid im Rauchgas	kmol/(kg Br)
CO_2	Kohlendioxid	kmol/(kg Br)
d_0	Initialdurchmesser des Tropfens	mm
d_{50}	Halbwerts Korngröße	mm
E_a	äußere Energie	J
h	Wasserstoffmassenanteil im Brennstoff	wt%
H''	Enthalpie der Rauchgase	kJ/kg
H_2O	Wasserdampf im Rauchgas	kmol/(kg Br)
H_U	Heizwert	kJ/(kg Br)
H_B	Enthalpie des Brennstoffes	kJ/(kg Br)
H_L	Enthalpie der Luft	kJ/(kg L)
L	Intakte Strahllänge	mm
μ	Massenanteile	wt%
m	Masse	kg
\dot{m}_{KW}	Kühlwassermassenstrom	kg/s
m_{KW_Kessel}	Kühlwassermasse im Kessel	kg
λ	Luftverhältnis	-
n	Stickstoffmassenanteil im Brennstoff	wt%
n_i	Stoffmenge der jeweiligen Rauchgaskomponente	kmol/(kg Br)
N_2	Stickstoff im Rauchgas	kmol/(kg Br)
v	Molanteile	Vol%
$V_{CO_2,f}$	Kohlendioxidmolanteil im feuchten Rauchgas	Vol%
$V_{H_2O,f}$	Wassermolanteil im feuchten Rauchgas	Vol%
$V_{N_2,f}$	Sauerstoffmolanteil im feuchten Rauchgas	Vol%
$V_{O_2,f}$	Sauerstoffmolanteil im feuchten Rauchgas	Vol%
$V_{O_2_Oxidator}$	Sauerstoffmolanteile im Oxidator	Vol%
$V_{SO_2,f}$	Schwefeldioxidmolanteil im feuchten Rauchgas	Vol%
o	Sauerstoffmassenanteil im Brennstoff	wt%
O_2	Sauerstoff	kmol/(kg Br)
O_{2min}	Sauerstoffbedarf	kmol/(kg Br)
Oh	Ohnesorgezahl	-
Q_a	zugeführte Wärme	J
\dot{Q}_{Erdgas}	zugeführter Wärmestrom des Erdgasbrenners	kW
\dot{Q}_{Slurry}	zugeführter Wärmestrom des Slurry- Brenners	kW
$\dot{Q}_{Verlust}$	Verlustwärmestrom	kW
Re	Reynoldszahl	-
RG_f	feuchtes Rauchgas	kmol/(kg Br)

σ	Oberflächenspannung	N/m
s	Schwefelmassenanteil im Brennstoff	wt%
SO ₂	Schwefeldioxid im Rauchgas	kmol/(kg Br)
t _{ad}	adiabate Verbrennungstemperatur	°C
t _{BD}	Brenndauer	s
t _{Br}	Brennstofftemperatur	°C
t _c	Kohlenstoffverbrennungsdauer	s
T _f	Flammpunkt	K
t _f	Flammenlebensdauer	s
T _{KW_Kessel}	Kühlwassertemperatur im Kessel	°C
T _{KW_RL}	Kühlwasserrücklauftemperatur	°C
T _{KW_VL}	Kühlwasservorlauftemperatur	°C
t _i	Zündverzugszeit	s
t _L	Frischlufftemperatur	°C
U	innere Energie	J
w	Wassermassenanteil im Brennstoff	wt%
We	Weberzahl	-

1 EINLEITUNG

Die steigenden Preise der fossilen Brennstoffe und die knapper werdenden Ressourcen sind ein dominierendes Thema in unserer Gesellschaft. In Abbildung 1-1 ist die aktuelle Preisentwicklung von Kohle, Erdgas und Rohöl dargestellt. Da Kohle und Petrolkoks weniger stark von den Preissteigerungen betroffen sind und noch deutlich mehr Ressourcen vorhanden sind, gewinnt der Einsatz von Kohle- Slurry immer mehr an Bedeutung.

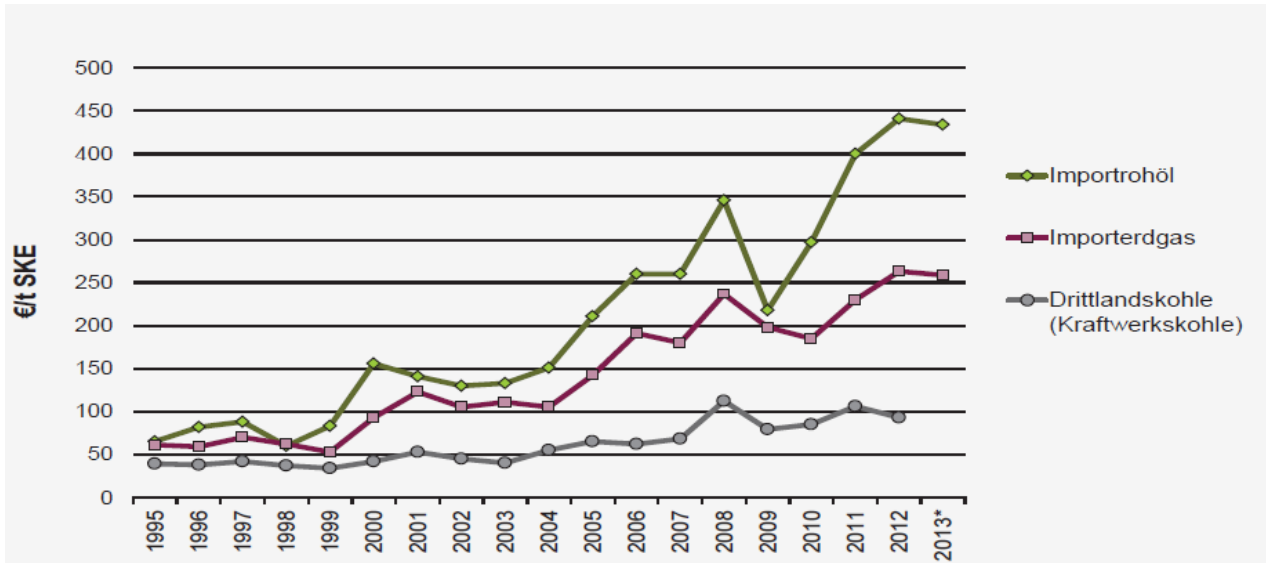


Abbildung 1-1: Entwicklung der Energiepreise von fossilen Brennstoffen in Deutschland [1]

Das Konzept der Kohle- Slurry ist kein neues und die Erfolgsgeschichte war immer eng mit dem Ölpreis gekoppelt. 1879 wurden die ersten Kohle- Öl- Slurries von Smith und Munsell getestet und erste Patente angemeldet. Durch den relativ niedrigen Ölpreis konnte allerdings kein Durchbruch erzielt werden. In den 1920er Jahren verlor der Einsatz von Kohle- Slurry durch billiges Öl wiederum an Attraktivität. 1950 wurden in der USSR Kohle- Wasser- Slurry zum Transport von Kohle in Pipelines eingesetzt. Ein weiterer Versuch in den USA und Westdeutschland stellte sich 1970 erneut als unwirtschaftlich heraus, bis in den frühen 1970ern die Ölpreise stark anstiegen. Während der Ölkrise zwischen 1973 und 1980 entstanden zahlreiche Anwendungen für Kohle- Slurries, wie industrielle Dampferzeuger, Heizkessel und Hochöfen. Nach der Ölkrise wurden die Anwendungen wieder unattraktiver. [2]

Heute beschränkt sich die Einsatzmöglichkeit nicht nur auf neu errichtete Kessel, sondern es ist auch mit geringem Aufwand möglich, alte Ölkessel umzurüsten. Mit dieser Idee können kleine und mittlere Ölkessel mit schlechter Effizienz auf modernen Stand gebracht werden. Weltweit gesehen ist die Kohle- Slurry Verbrennung derzeit in China am weitesten verbreitet. Es werden Kessel mit kleinen Leistungen von 1,5 MW bis zu sehr großen Leistungen gebaut oder umgerüstet. 2008 wurde in Guangdong Nanhai Changhai ein Kessel mit 670 t Slurry/h zur

Energieerzeugung neu errichtet. [26] Dies entspricht einer Leistung von ca. 2,5 GW. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Verwertung von Abfallprodukten. Einerseits kann Kohlestaub bei der Kohlegewinnung zur Herstellung von Slurry verwendet werden. Andererseits kann auch toxisches Abwasser aus der Industrie bei der Slurry Verbrennung kostengünstig entsorgt werden. Diese Methode ist in China weit verbreitet und wird zur Entlastung der Umwelt angewandt.

Bei der Kohle- Slurry Verbrennung kann neben Luft auch mit Sauerstoff angereicherte Luft oder Reinsauerstoff als Oxidator verwendet werden. Angereicherte Luft oder Reinsauerstoff beinhalten weniger bzw. kein Inertgas (Stickstoff), dadurch können einige Verbrennungsprobleme beseitigt werden. Die Temperatur im Brennraum nimmt stark zu, da das Inertgas nicht mehr aufgeheizt werden muss. Die Probleme bei der Zündung der Slurry und der Flammenstabilität durch den Wassergehalt sind durch die höheren Temperaturen leichter zu bewältigen.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, den Stand der Technik von Kohle- Slurry- Kessel mittels einer Literaturrecherche zur Zerstäubung und Verbrennung von Kohle- Slurry in Luft und Reinsauerstoff zu erfassen. Anhand von Beispielen aus der Praxis soll die Theorie näher erläutert werden. Der wesentliche Teil der Arbeit besteht darin, dass ein bestehender Ölkessel für die Slurry Verbrennung adaptiert werden soll. Ziel ist es, mittels einer Reihe von Versuchen eine stabile Verbrennung der Slurry zu erreichen. Die Verbrennungsversuche sollen mit Luft, mit Sauerstoff angereicherter Luft und mit Reinsauerstoff durchgeführt werden.

2 STAND DER TECHNIK

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von Kohle- Sauerstoff- Brennern, die der Verbrennung von Kohle- Wasser- Slurry dienen, anhand von Beispielen aus der Praxis erklärt. Zunächst werden die verschiedenen Arten von Kohle- Slurries definiert und deren Einsatzmöglichkeiten beschrieben. Weiters wird anhand der zwei wesentlichsten Kohle- Slurries auf deren Anforderungen und Präparation näher eingegangen. Anschließend folgt die Erläuterung der Grundlagen über die Kohle- Slurry Verbrennung, die Zerstäubung der Kohle- Slurries und die Verbrennung mit Reinsauerstoff und Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft.

2.1 Kohle- Slurry

Der Begriff "Slurry" bezeichnet einen pulverisierten festen Brennstoff, der mit Hilfe einer oder mehrerer Flüssigkeiten zu einer Suspension vermischt wird. Bei der Kohle- Slurry werden feine Kohlepartikel mit Flüssigkeiten, wie Wasser, Öl oder Methanol vermischt. In der technischen Literatur werden verschiedene Arten von Kohle- Slurries mit unterschiedlichen Komponenten beschrieben [2]:

- Kohle- Methanol- Slurry (CMS): Suspension von Kohle in Methanol
- Kohle- Öl- Slurry (COS): Suspension von Kohle in Öl mit bis zu 10 % Wasser
- Kohle- Wasser- Slurry (CWS): Suspension von Kohle in Wasser
- Kohle- Öl- Wasser- Slurry (COWS): Suspension von Kohle in Öl und Wasser ab 10 %

In weiterer Folge wird hauptsächlich auf die Verbrennung von CWS eingegangen.

2.1.1 Einsatzmöglichkeiten

Die Kohle- Methanol- Slurry weist mit einem hohen Heizwert hervorragende Verbrennungseigenschaften auf. Sie wird jedoch aufgrund der hohen Kosten von Methanol selten eingesetzt. COS wurde bis 1980 bevorzugt verwendet, stellte sich jedoch in weiterer Folge, wegen steigender Ölpreise im Vergleich zur CWS als unwirtschaftlich heraus. Der Einsatz von CWS hat sich als Brennstoff in Dampferzeugern, Industriekesseln oder Hochöfen bewährt, obwohl dabei typischerweise eine Leistungsminderung von 10- 40 % auftritt. Ein Grund für den Einsatz ist die einfache Lagerung der CWS, da keine Explosionsgefahr (Staubexplosion) besteht. Wie in der Einleitung erläutert, werden Öl befeuerte Kessel häufig mit geringem Aufwand auf eine CWS Verbrennung umgerüstet. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist der Kohletransport in Pipelines, da die Kohle durch das Beimengen von Wasser pumpbar gemacht wird. [2]

2.1.2 Anforderungen an Kohle- Slurries

Die wichtigsten Anforderungen an Kohle- Slurries sind [2]:

- Pumpbarkeit
- Stabilität
- Zerstäubbarkeit im Kessel

Als weitere Anforderungen können genannt werden [2]:

- gute Flammencharakteristik
- hoher Heizwert
- Flammenstabilität
- ausreichend schnelle Verbrennung, damit eine vollständige Verbrennung in der kurzen Verweilzeit der Kohlepartikel in einem umgerüsteten Ölkessel erfolgen kann.

Diese Eigenschaften werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

Zur Erfüllung der wesentlichsten Anforderungen müssen bestimmte rheologische Eigenschaften der Kohle- Slurry gegeben sein. Die meisten Kohle- Slurries weisen ein scherverdünnendes Bingham- Verhalten auf. Die Eigenschaft eines Bingham Fluides ist, dass das Fluid erst ab einer gewissen Grenzscherspannung in Bewegung versetzt wird, der sogenannten Fließgrenze. Die Fließgrenze wirkt dem Absinken der schwereren Kohlepartikel entgegen, wodurch sich die Stabilität verbessert. Weiters verringert das scherverdünnende Verhalten die Viskosität bei hohen Schergeschwindigkeiten und erleichtert somit das Zerstäuben im Kessel. Dadurch vermindert sich die erforderliche Pumpleistung beim Kohle- Slurry Transport vom Speicher bis zum Kessel. [2]

Untersuchungen von Kohle- Öl- Slurries haben gezeigt, dass die COS mit niedriger Kohlekonzentration (ca. 10 %) ein newtonsches Verhalten aufweist. Mit höherer Konzentration kann ein Bingham- Verhalten angenommen werden, wobei die Meinungen über die Grenze zwischen newtonschem Verhalten und Bingham- Verhalten in der Literatur auseinander gehen. In Abbildung 2-1 ist ein Rheogramm von COS bei unterschiedlichen Kohlekonzentrationen dargestellt. Es zeigt einerseits, dass mit steigender Kohlekonzentration die Fließgrenze der COS und andererseits die Steigung der Geraden zunehmen. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Scherspannung und der Schergeschwindigkeit. [2]

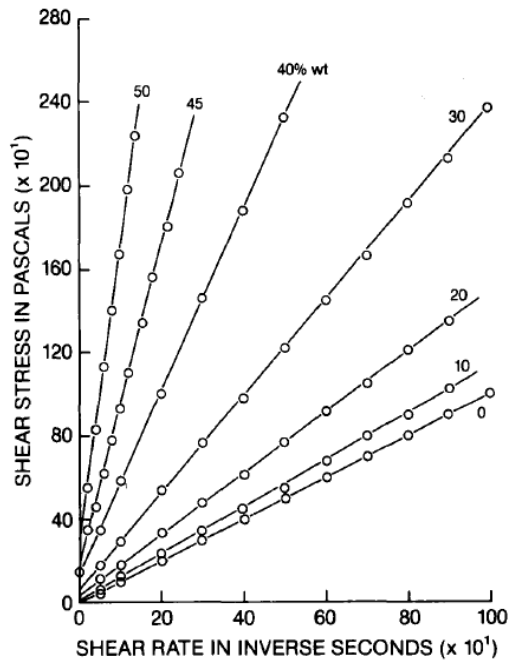


Abbildung 2-1: Rheogramm von COS bei unterschiedlichen Kohlekonzentrationen [2]

Das Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry von der University of Toronto hat aufgrund der steigenden Nachfrage von Kohle- Öl- Slurries zur Reduktion des Heizölverbrauches bei Energiedienstleistern und Industriekesseln, eine Studie zu den rheologischen Eigenschaften von Kohle- Öl- Slurries veröffentlicht [3]. Das wesentliche Ergebnis der Arbeit ist, dass die Partikelgrößenzusammensetzung einen entscheidenden Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften hat. Es existiert eine optimale Partikelgrößenzusammensetzung, mit der eine geringstmögliche Viskosität erreicht werden kann. [3]

Die Istanbul Technical University hat, im Rahmen einer Studie über die Effekte der Partikelgrößenverteilung, die rheologischen Eigenschaften von CWS untersucht [4]. Dabei wurden Versuche mit zwei türkischen Braunkohlearten (Soma und Istanbul- Agacli) und einer bituminösen Sibirischen Kohle durchgeführt. Abbildung 2-2 zeigt das Rheogramm der drei CWS. Zur Bestimmung des Rheogramms diente ein RVDV-2 type Brookfield Viskosimeter. Alle drei CWS wurden mit einer Halbwerts Korngröße (d_{50}) von $19 \mu\text{m}$ mittels einer Kugelmühle aufbereitet. Die Versuche zeigten, dass die CWS ein scherverdünnendes Verhalten aufweisen und die Viskosität der Slurries bei steigendem Inkohlungsgrad (Grad der Umwandlung von pflanzlichen Stoffen in Kohle [5]) und gleichbleibender Partikelgrößenverteilung abnimmt. Daraus lässt sich folgern, dass bei hohem Inkohlungsgrad eine höhere Kohlepartikelbeladung der Slurry möglich ist und die Viskosität bei steigender Dichte der Slurry zunimmt.

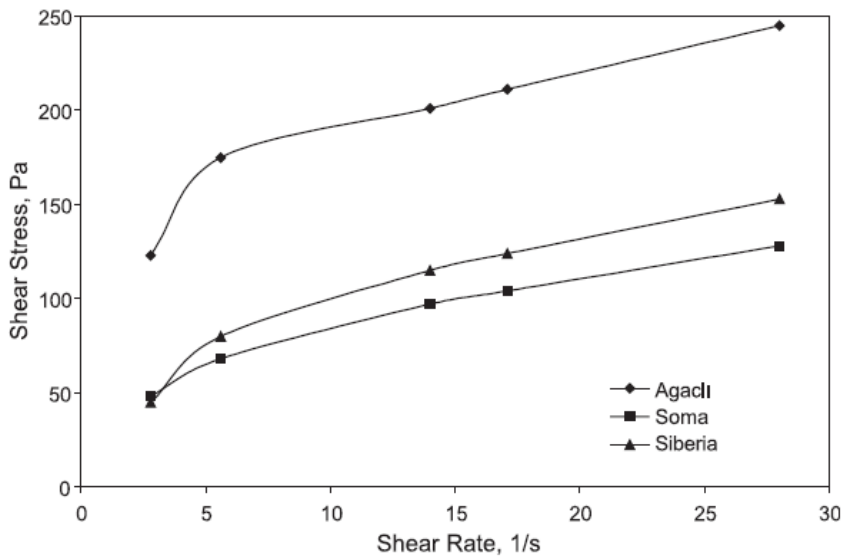


Abbildung 2-2: Rheogramm CWS [4]

2.1.3 CWS Präparation

Das Ziel bei der Präparation der CWS ist einen hohen Heizwert bei niedriger Viskosität, die eine geringe Pumparbeit bedingt, zu erreichen. Dabei ist die Partikelgrößenverteilung einer der wichtigsten Parameter. Eine optimale Partikelgrößenverteilung ist bei einer maximalen Kohlekonzentration und einer minimalen Viskosität gegeben. Dabei sollte die maximale Partikelgröße den Wert von 250 μm nicht übersteigen. 70- 80 % der Kohlepartikel sollten eine Partikelgröße unter 74 μm aufweisen. Eine weitere Reduktion der Viskosität kann nur mehr mit der Beimischung von chemischen Additiven (z.B.: Natrium Polystyrene Sulphonate) erzielt werden. Abbildung 2-3 zeigt den Einfluss chemischer Additive und den Inkohlungsgrad auf die Viskosität in Abhängigkeit der Kohlekonzentration. Um das Absinken der Kohlepartikel zu hemmen, werden weitere chemische Additive zur Verbesserung der Stabilität (z.B.: Natriumsalz von Carboxymethylcellulose) verwendet. Eine typische CWS beinhaltet 60- 75 % Kohle, 25- 40 % Wasser und ungefähr 1 % chemische Additive. [4]

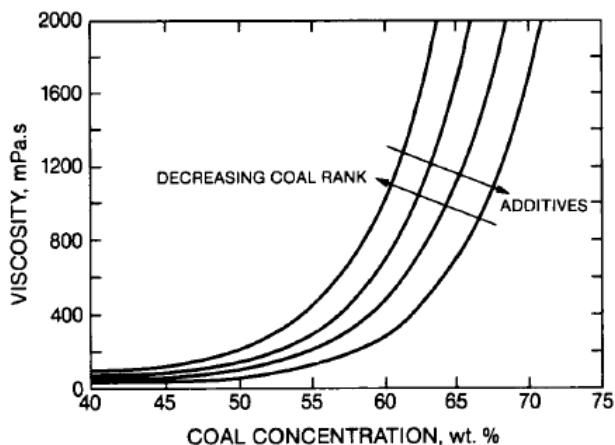


Abbildung 2-3: Effekte von Additiven und Inkohlungsgrad auf die Slurry Viskosität [2]

2.2 Kohle- Slurry Verbrennung

Kohle- Slurry stellt eine technische Alternative für den Einsatz in adaptierten Ölkesseln dar.

Einige Vorteile dafür sind [6]:

- geringere Rohstoffkosten
- geringer Aufwand zur Umrüstung von bereits existierenden mit Öl befeuerten Kesseln
- Abwasser aus dem Kohlereinigungsprozess kann bei der Kohle- Slurry Verbrennung entsorgt werden
- keine Explosionsgefahr bei der Speicherung von CWS durch eine Staubexplosion
- ähnliche Verbrennungseigenschaften wie Schweröl

Demgegenüber stehen auch einige Nachteile sowie technische Herausforderungen [6]:

- steigende Abnutzung und Verstopfungsgefahr der mechanischen Bauteile
- Flammeninstabilität
- Änderung der Wärmeübertragung im Wärmetauscher
- Stabilität der CWS
- Strömungsprobleme während des Pumpvorganges
- Leistungsminderung durch latente Verdampfungswärme des Wassers

In diesem Kapitel werden einige dieser Eigenschaften behandelt und mit Beispielen aus der Praxis erklärt.

2.2.1 Verbrennungsprozess CWS

Der Verbrennungsprozess der CWS lässt sich in 3 Stufen unterteilen [2]:

- Aufheizen und Trocknung der CWS
- Entgasung und Verbrennung der flüchtigen Bestandteile
- Kohlenstoffverbrennung

Abbildung 2-4 zeigt die Mechanismen der CWS Verbrennung. In der ersten Stufe werden die zerstäubten CWS Tröpfchen aufgeheizt, bis der Kern der Tröpfchen den Siedepunkt (100-150 °C) erreicht. Nachdem das Wasser verdampft ist, reduziert sich die Masse des Tropfens auf die Kohlemasse. Die Zeitdauer der Stufe hängt vom Wassergehalt und der Kesseltemperatur ab. Während der Verdampfung des Wassers und des Aufheizens der trockenen Kohlepartikel formen sich diese zu Agglomeraten mit irregulärer Form, die Lunker beinhalten. In der nächsten Stufe erfolgt die Entgasung der flüchtigen Bestandteile. Durch die austretenden Gase aus den Lunkern entstehen Impulse, die das Agglomerat in Rotation versetzen. Bei der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile läuft eine exotherme Reaktion ab,

welche zu einem raschen Anstieg der Oberflächentemperatur der Tröpfchen führt. Durch die Fliehkräfte der Rotation lösen sich die Agglomerate während der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile und der Kohlenstoffverbrennung auf. Die Verbrennung von COS verläuft ähnlich, jedoch überlagern sich die Verbrennungsstufen der Kohle und des Öls. [2] [7]

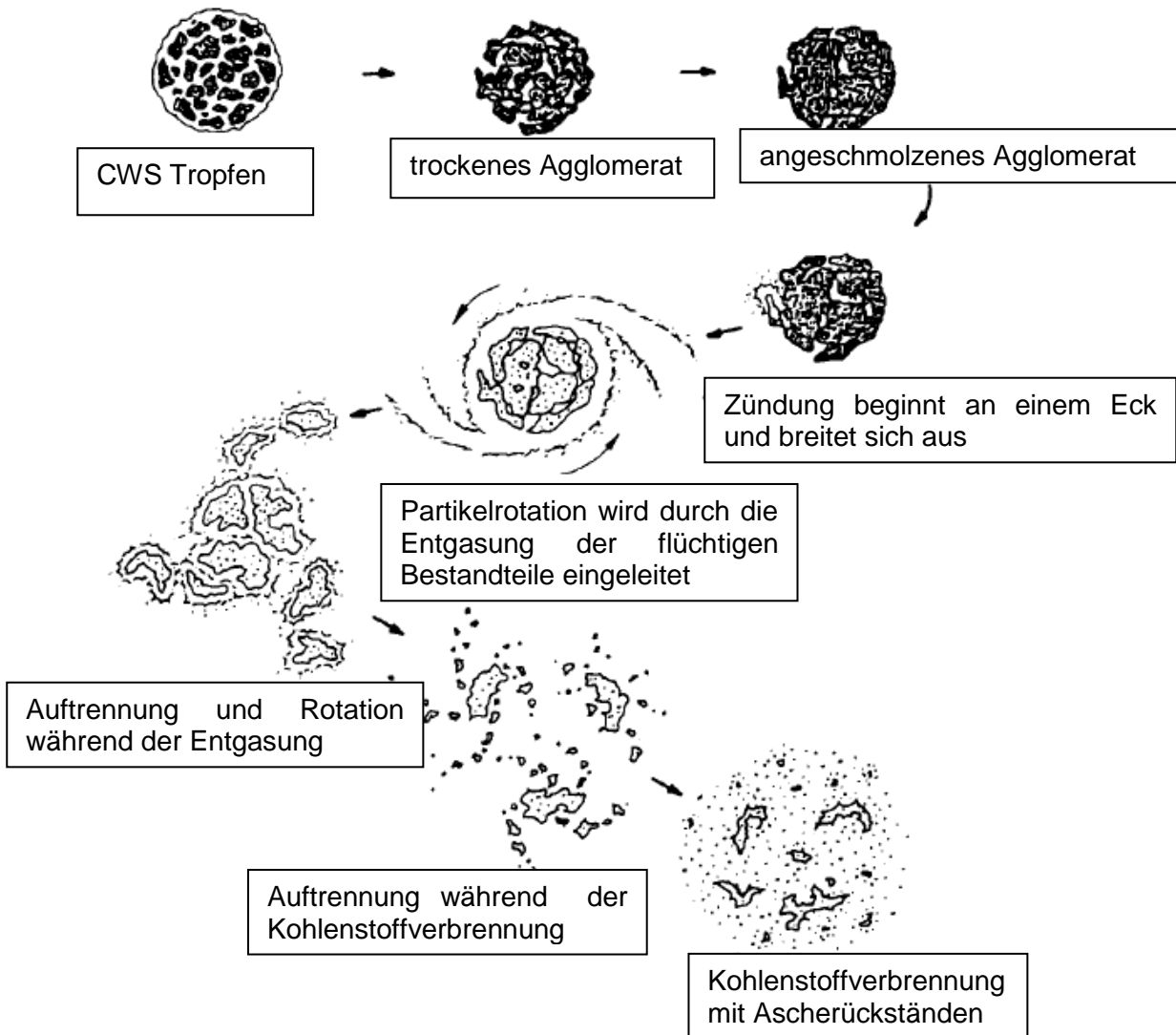


Abbildung 2-4: Mechanismen der CWS Verbrennung [2]

Die Verbrennungsgeschwindigkeit hängt stark von der Größe der Partikeloberfläche ab. CWS, die einen hohen Schwellgrad der Kohle aufweist, quillt vor der Zündung auf und formt sich zu einem Agglomerat. Das führt zu einem sehr porösen Rückstand mit großer Oberfläche, welche die Oxidation beschleunigt. Kohle mit hohem Schwellgrad verbrennt daher schneller als Braunkohle, die ein nicht aufquellendes Verhalten aufweist. [6]

2.2.2 Verbrennungsprozess eines Einzeltropfens

Die Untersuchung der Verbrennungscharakteristik anhand eines Einzeltropfens ist weit verbreitet. Der Vorteil dabei ist, dass der Tropfen während des Verbrennungsprozesses gut beobachtet werden kann. Besonderes Augenmerk wird auf die Zündverzugszeit, Flammenform, Oberflächen- und Kerntemperatur und die Verbrennungsgeschwindigkeit gelegt. [6]

Das Chemical Engineering Department an der Istanbul Technical University führte Versuche über die Verbrennung von Braunkohle- Wasser- Slurries (LWS) durch [6]. Der Hintergrund der Studie war das große Braunkohlevorkommen in der Türkei und das bis dahin noch weitgehend unerforschte Gebiet der CWS mit minderwertiger Kohle. Das Hauptziel der Arbeit war die Untersuchung der Verbrennungseigenschaften verschiedener türkischer Braunkohlearten bei der Verbrennung eines Einzeltröpfchens in den Verbrennungsstufen der Trocknung, Zündverzug, Flammendauer und Kohlenstoffverbrennung. Es wurde auf die wichtigsten Parameter bei der Präparation der CWS, wie Wassergehalt und Anteil der flüchtigen Bestandteile, eingegangen. Abbildung 2-5 zeigt den typischen Temperaturverlauf bei der Verbrennung eines Braunkohle- Slurry- Tropfens. Der Initialdurchmesser des Tropfens betrug 1,49 mm bei einer Flammpunkttemperatur von 1113 K. Die Verbrennungsstufen des Tropfens sind die Verdampfungs- und Zündverzugsperiode t_i , Flammenperiode t_f und Kohlenstoffverbrennung t_c . Die Temperatur steigt während der Verdampfungsperiode auf Siedetemperatur und hat mit Beginn der Flammenperiode den Flammpunkt erreicht. Das Temperaturmaximum wird zu Beginn der Kohlenstoffverbrennung erreicht und fällt danach leicht ab. Die wichtigsten Ergebnisse der Studie sind [6]:

- kein Auflösen oder Auseinanderreißen des Tröpfchens während des Verbrennungsprozesses
- Zündverzug des Tröpfchens sinkt mit steigendem Anteil an flüchtigen Bestandteilen, was die Verwendung von Braunkohle bestätigt
- mit sinkendem Wassergehalt steigt die Verbrennungsgeschwindigkeit

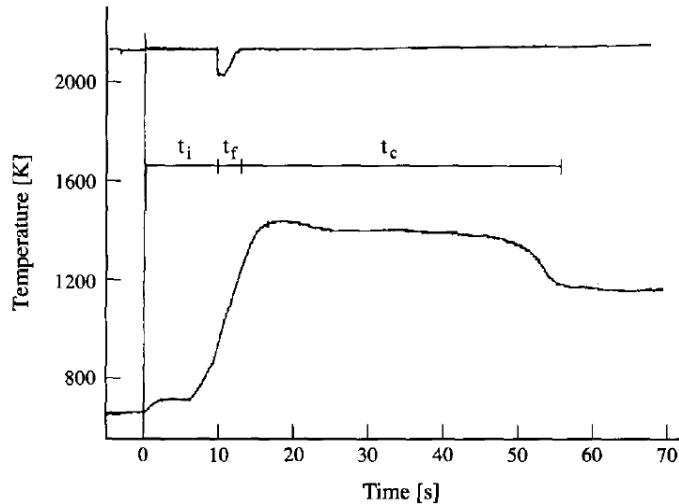


Abbildung 2-5: Temperaturverlauf eines LWS Tropfens [6]

Die wichtigsten Einflussparameter auf die Verbrennungsdauer sind die Tropfengröße, der Wassergehalt, der Anteil der flüchtigen Bestandteile und der Kohlenstoffgehalt. Diese Abhängigkeiten der Parameter werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt und erläutert. Abbildung 2-6 zeigt den Effekt der Tropfengröße auf die Verbrennungsscharakteristik von Braunkohle- Wasser- Slurries. Es besteht ein linear, steigender Zusammenhang zwischen der Tropfengröße und der Gesamtverbrennungsdauer. [6] In der Abbildung sind die Verdampfungszeit, Zündverzugszeit und Flammendauer auf der linken Ordinate und die Kohlenstoffverbrennung sowie die Gesamtverbrennungszeit auf der rechten Ordinate aufgetragen. Zur Veranschaulichung ist in die Abbildung ein Ablesebeispiel eingetragen. Bei einem Tropfendurchmesser von 1,1 mm setzt sich die Gesamtverbrennungszeit von 37,5 s aus der Zündverzugszeit von 6,5 s, einer Flammenlebensdauer von 2 s und der Kohlenstoffverbrennungsdauer von 29 s zusammen, wobei die Verdampfungszeit des Wassers 3,6 s beträgt.

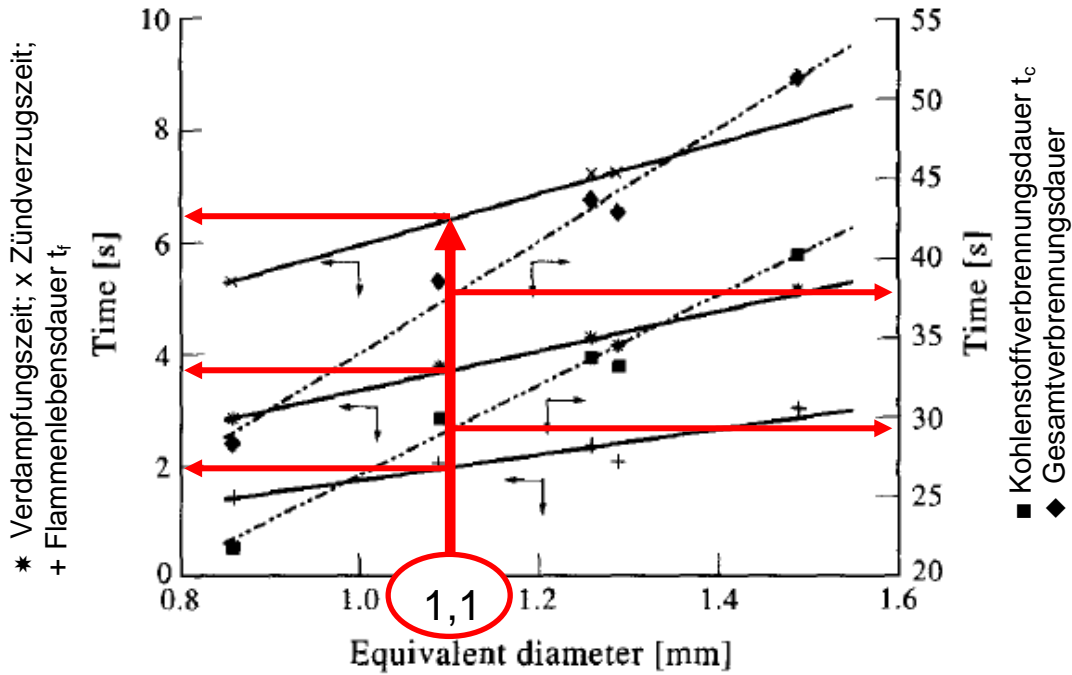


Abbildung 2-6: Effekt der Tropfengröße auf die Verbrennungszeit von LWS [6]

In Abbildung 2-7 ist die Verdampfungszeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Braunkohle-Wasser- Slurry bei einer Kesseltemperatur von 1073 K und 1113 K dargestellt. Die Slurry wurde aus verschiedenen türkischen Braunkohlearten hergestellt. Es besteht ein linear steigender Zusammenhang zwischen der Verdampfungszeit und dem totalen Wassergehalt, der sich aus dem Wassergehalt der Kohle und dem beigemischten Wasser zur Slurry zusammensetzt. Es ist ersichtlich, dass die Verdampfungsrate mit steigender Kesseltemperatur zunimmt. [6]

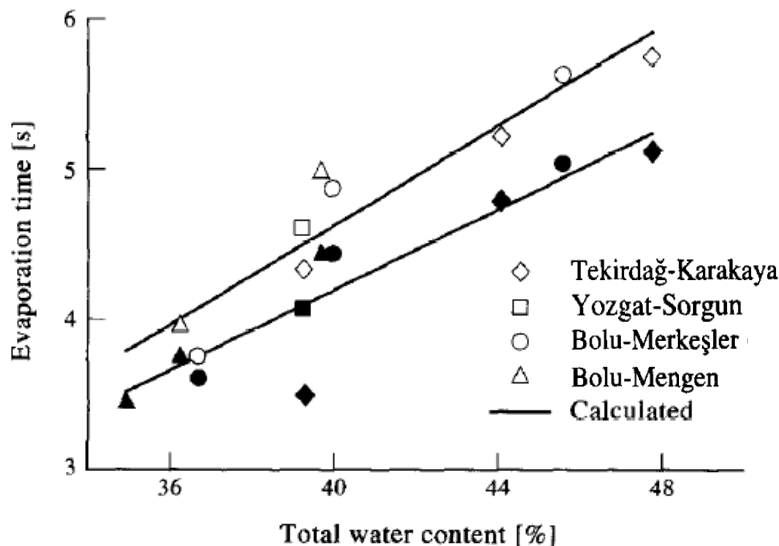


Abbildung 2-7: Verdampfungszeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes eines LWS Tropfens: $d_0=1,15$ mm; ○ Kesseltemperatur 1073 K; ● Kesseltemperatur 1113 K [6]

Die Zündverzugszeit ist vom totalen Wassergehalt und dem Anteil der flüchtigen Bestandteile beeinflusst. Es bestehen einerseits ein linear steigender Zusammenhang zwischen der

Zündverzugszeit und dem totalen Wassergehalt und andererseits ein linear fallender Zusammenhang zwischen der Zündverzugszeit und dem Anteil der flüchtigen Bestandteile. In Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9 sind diese Zusammenhänge dargestellt. Es zeigt sich, dass die Zündverzugszeit mit höherem Inkohlungsgrad der Kohle sinkt, da dabei der Wassergehalt der Kohle sinkt. Eine Reduktion der Zündverzugszeit wird mit steigender Kesseltemperatur in Abhängigkeit des Wassergehaltes und steigendem Anteil an flüchtigen Bestandteilen erreicht. Dabei ist der Effekt des Wassergehaltes signifikanter, als der Effekt der flüchtigen Bestandteile. [6]

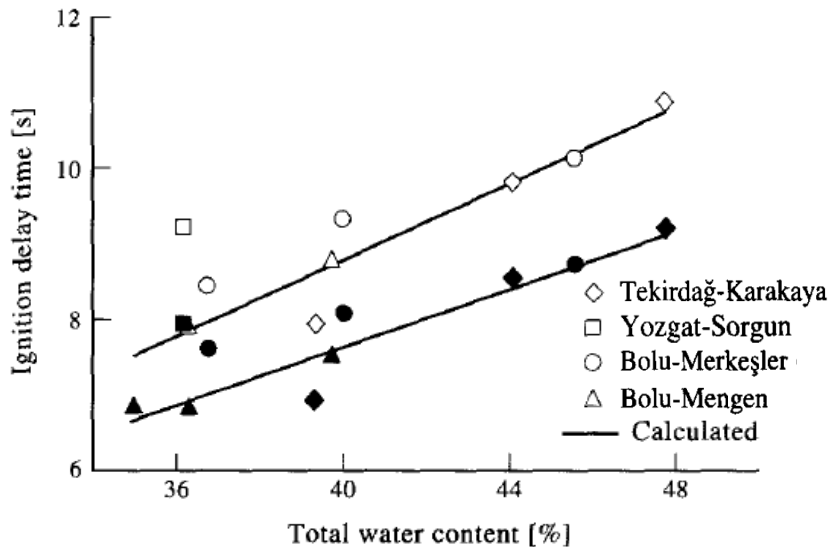


Abbildung 2-8: Zündverzugszeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes eines LWS Tropfens: $d_0=1,15$ mm; ○ Kesseltemperatur 1073 K; ● Kesseltemperatur 1113 K [6]

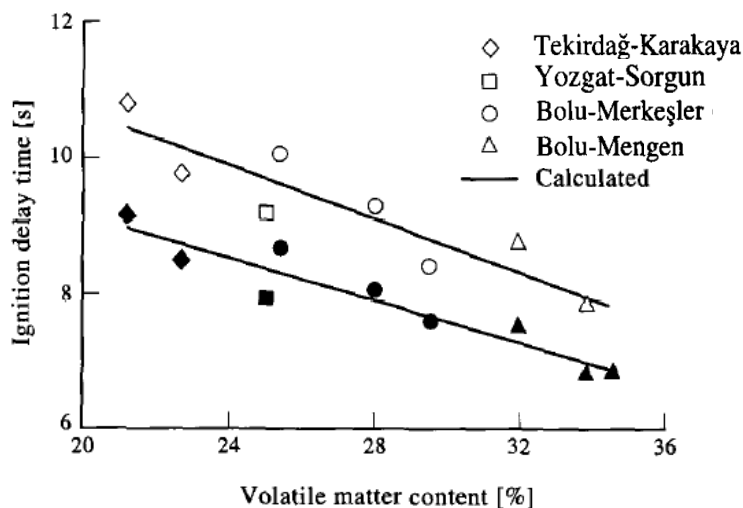


Abbildung 2-9: Zündverzugszeit in Abhängigkeit der flüchtigen Bestandteile eines LWS Tropfens: $d_0=1,15$ mm ○: Kesseltemperatur 1073 K ●: Kesseltemperatur 1113 K [6]

Abbildung 2-10 zeigt den Zusammenhang zwischen der Kohlenstoffverbrennungsdauer und dem gebundenen Kohlenstoffgehalt in der Kohle. Der Einfluss auf die Kohlenstoffverbrennungsdauer nimmt mit steigendem Kohlenstoffgehalt ab. [6]

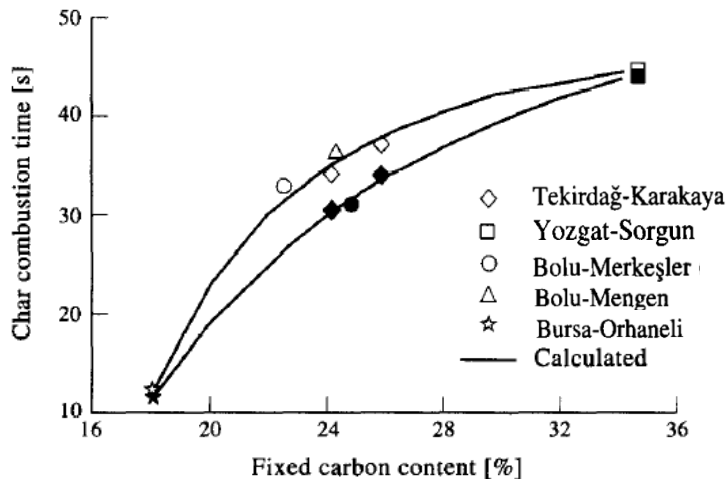


Abbildung 2-10: Abhängigkeit der Kohlenstoffverbrennungsdauer von dem gebundenen Kohlenstoffgehalt in der Kohle eines LWS Tropfens: $d_0=1,15$ mm; ○ Kesseltemperatur 1073 K; ● Kesseltemperatur 1113 K [6]

Nagasaki Research and Development Center und Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. führten eine Studie über Verbrennungsprozesse von CWS durch [7]. Der Verbrennungsprozess wurde anhand eines einzelnen Tropfens untersucht. Die wichtigen Verbrennungseigenschaften, wie Kern- und Oberflächentemperatur, Masseänderung, Wassergehalt und Durchmesser, wurden bei einem Versuch gemessen und numerisch simuliert. Mit Hilfe einer sphärischen Tropfenaufnahme wurden Tropfen mit verschiedenen Größen untersucht. Die untersuchten Tropfen waren 5- 10 mal größer als Tröpfchen aus einer Einspritzdüse. Die Oberflächentemperatur, die viel größer als die Temperatur im Kern ist, wurde zur Berechnung der Reaktionsrate verwendet. Die Umgebungsbedingungen in einem Verbrennungskessel wurden durch eine externe Wärmequelle modelliert. Dazu wurde ein YAG Laser, der den Tropfen gleichmäßig bestrahlt, verwendet. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 2-11 dargestellt, in der der Wassergehalt, die Massereduktion, die Verbrennungsgasgeschwindigkeit und die Oberflächen- und Kerntemperatur in Abhängigkeit der Verbrennungsdauer abzulesen sind. In der Abbildung sind die drei Verbrennungsstufen, die sich aus der Trocknung (I), Verbrennung der flüchtigen Bestandteile (II) und der Kohlenstoffverbrennung (III) zusammensetzt, eingezeichnet. Es ist ersichtlich, dass die Oberflächentemperatur während des Trocknungsprozesses stark ansteigt, während die Temperatur im Kern des Tropfens erst bei der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile stark ansteigt, da die Wasserverdampfung eine Temperatur senkende Wirkung hat. Während der Kohlenstoffverbrennung tritt keine große Temperaturänderung im Kern und an der Oberfläche auf und der Wassergehalt des Tropfens hat sich auf den Wasserdampfgehalt der Umgebungsluft reduziert. Der Verlauf der Massereduktion des Tropfens lässt sich während des Verbrennungsprozesses auf die Wasserverdampfung, gefolgt von der Entgasung und der Kohlenstoffverbrennung zurückführen. Am Ende des Verbrennungsprozesses verbleibt ein Ascherückstand, der aus unverbrannter Kohle und Mineralstoffen besteht. Weiters wurde der Verbrennungsprozess numerisch

simuliert. Dabei konnte eine gute Annäherung an die experimentell ermittelten Werte erreicht werden. [7]

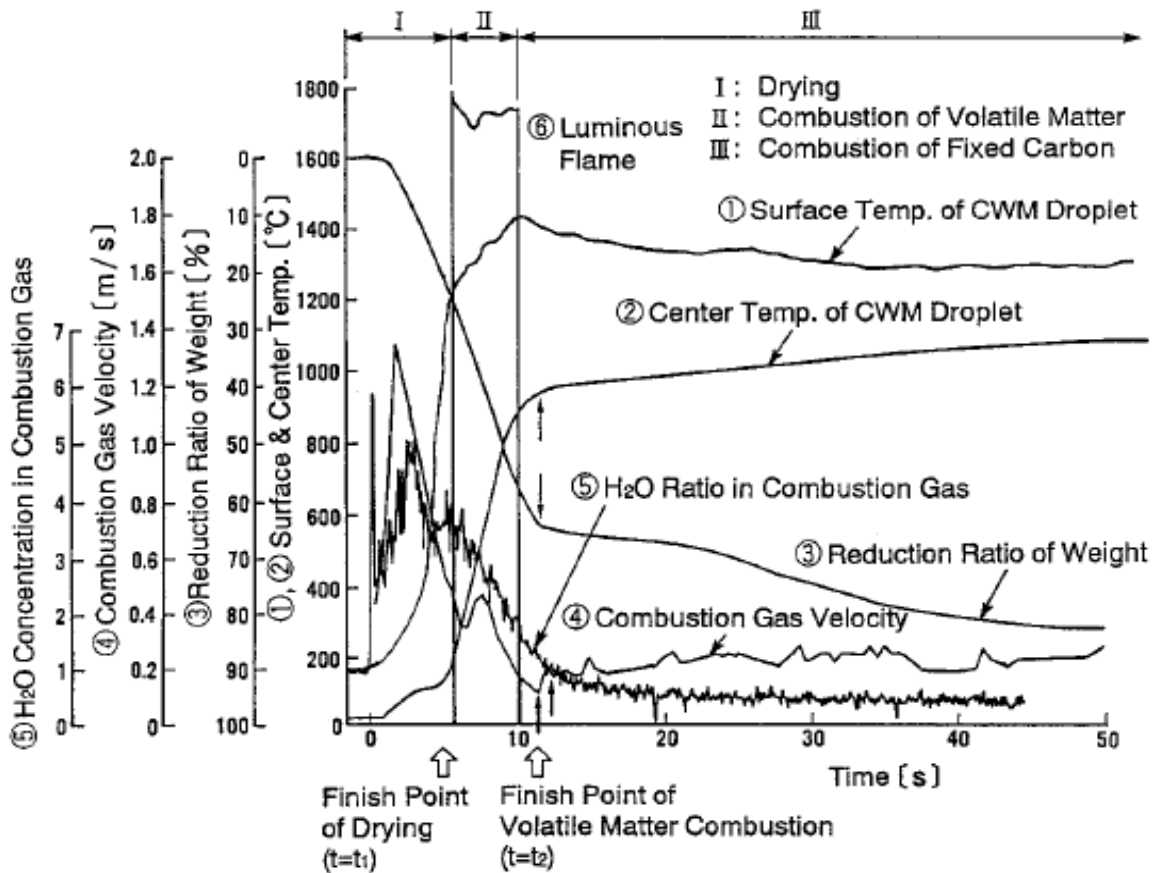


Abbildung 2-11: typische Messergebnisse bei der Verbrennung eines CWS Einzeltropfens: $d_{50}=30\ \mu\text{m}$; Wassergehalt 36,4 wt%; $d_0=2\ \text{mm}$; externe Laserleistung 20 W [7]

2.2.3 CWS Brenner

Zündung und Flammenstabilität sind wichtige Bedingungen bei der Verbrennung von CWS. Die Zündung muss nahe am Brenner erfolgen, ansonsten wird die Flamme instabil und erlischt. Gegensteuernde Maßnahmen sind ein höherer Anteil an flüchtigen Bestandteilen, vorgeheizte Luft oder eine Rezirkulation der Flamme. Die Zerstäubung der CWS beeinflusst die Effizienz der Verbrennung wesentlich. [2]

a) CWS Brenner mit Kühlsystem

Abbildung 2-12 zeigt einen CWS Brenner mit einem Hochdruck Drall- Zerstäuber für Kessel oder Öfen. Ziel des Patentes (1987) war es, die Verbrennungcharakteristik, wie Flammenstabilität, Verbrennungseffizienz sowie kontinuierliche und sichere Betriebsbedingungen, von CWS zu verbessern. Die Verbrennung erfolgt ohne zusätzliche Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft und ohne Stützfeuer. Die Kohle- Wasser- Slurry Zufuhr befindet sich in einem Rohr in der Mitte des Brenners (14) und wird durch eine, unter

Hochdruck stehende, koaxial angeordnete unbeheizte Primärluft (20) zerstäubt. Ein zirkulierendes Kühlsystem (Vorlauf 35, Rücklauf 37) ist rund um den Brenner angeordnet, um die Betriebstemperatur zu regulieren. Mit Hilfe von aufgeheizter Sekundärluft (39) entsteht eine Rezirkulation der heißen Verbrennungsgase zurück zur Zündzone. [8]

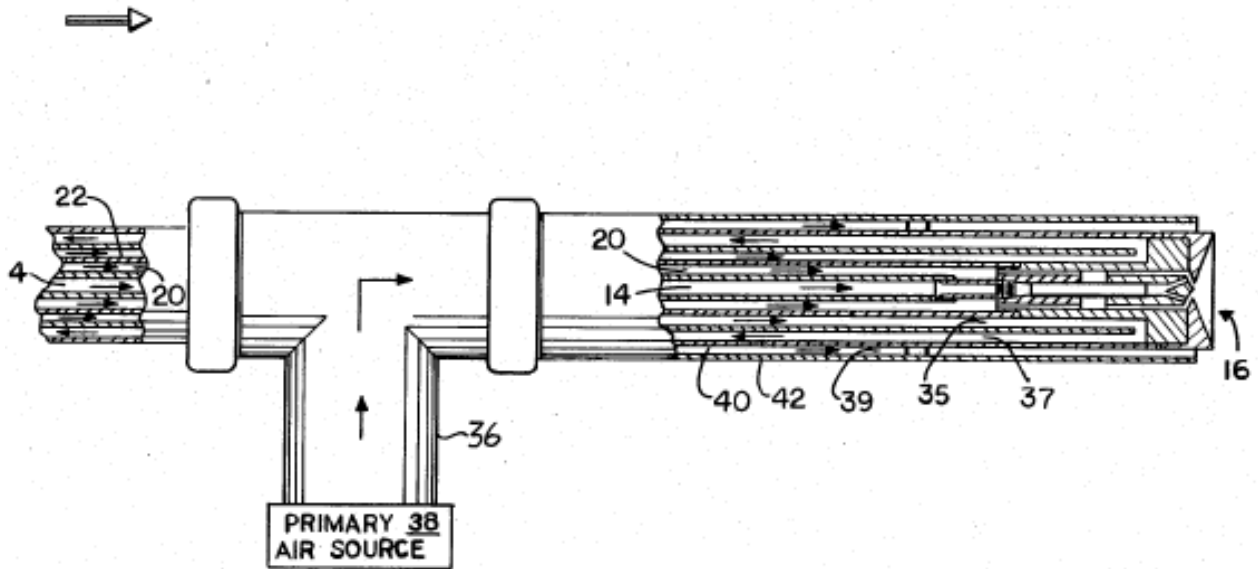


Abbildung 2-12: CWS Brenner [8]

b) CWS Brenner mit Rezirkulation

Abbildung 2-13 zeigt einen Brenner zur Verbrennung von CWS. Die CWS wird in einer konisch geformten primären Vorbrennkammer (4) zerstäubt. Dabei wird Primärluft (2) mit Drall unterstöchiometrisch zugeführt. Durch die unterstöchiometrische Verbrennung in der primären Vorbrennkammer (4) wird eine Zone niedrigen Drucks um den Slurry Strahl erzeugt und dadurch werden heiße Verbrennungsgase aus der sekundären Vorbrennkammer (5) angesaugt. Das Wasser der Kohle- Wasser- Slurry verdampft durch die heißen Verbrennungsgase. Die Slurry wird noch in der primären Vorbrennkammer (4) gezündet und verbrennt in der sekundären Vorbrennkammer (5). Durch die unterstöchiometrische Verbrennung kann die Bildung von Stickoxiden reduziert werden. Danach wird Sekundärluft (3) mit Drall zugeführt und die CWS verbrennt vollständig. [9]

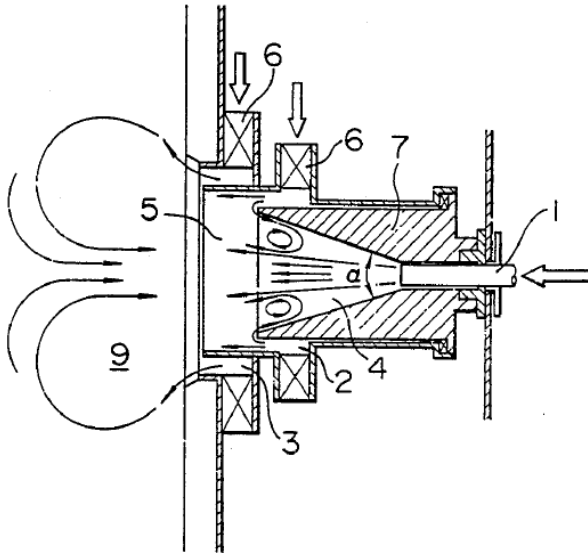


Abbildung 2-13: CWS Brenner mit Rezirkulation der Verbrennungsgase [9]

c) CWS Brenner mit Vorverdampfung

Die Kernforschungsanlage Jülich GmbH hat ein Verfahren zur Verbrennung von CWS im Jahr 1981 patentiert [10]. Das Ziel war die Verbrennung der CWS so durchzuführen, dass es zu keinen Ausscheidungen in den Wärmetauschern kommt und, dass die Verbrennung stöchiometrisch erfolgen soll. In Abbildung 2-14 ist der CWS Brenner dargestellt. In einem zylinderförmigen Brennerkopf (10) mit der Zuleitung (2) ist die Verbrennungsluftleitung (5) eingesetzt. In die bis zur Verdampfungstemperatur vorgewärmte CWS (Wärmetauscher Zone 3) wird die gesamte vorerhitzte Verbrennungsluft (Wärmetauscher Zone 8) durch eine luftdurchlässige poröse Keramikschicht (6) noch vor der Brenneröffnung eingeführt. Der Energiegehalt der Verbrennungsluft ist so zu wählen, dass das Wasser in der Slurry vollständig verdampft. Dadurch wird ein Kohlestaub- Wasserdampf- Luftgemisch in den Brennraum eingeführt. Die benötigte Wärmemenge zur CWS Vorwärmung und Aufheizung der Verbrennungsluft wird vom Abgas über einen Rekuperator aufgebracht. [10]

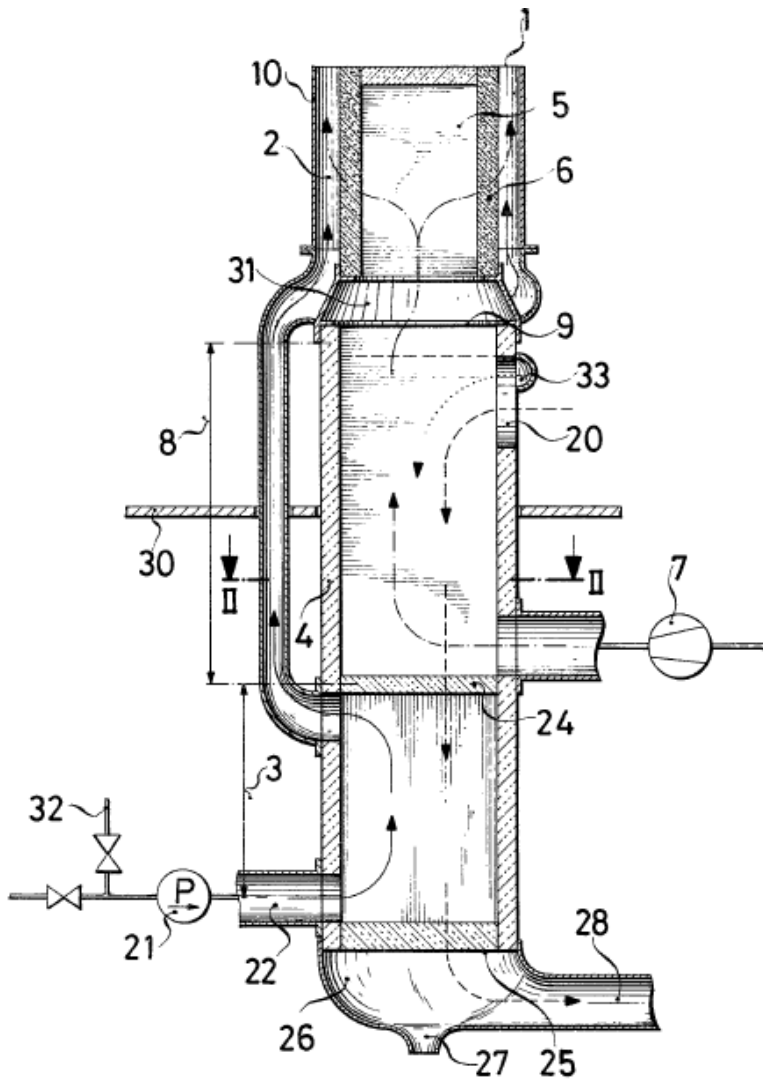


Abbildung 2-14: CWS Brenner mit Vorverdampfung [10]

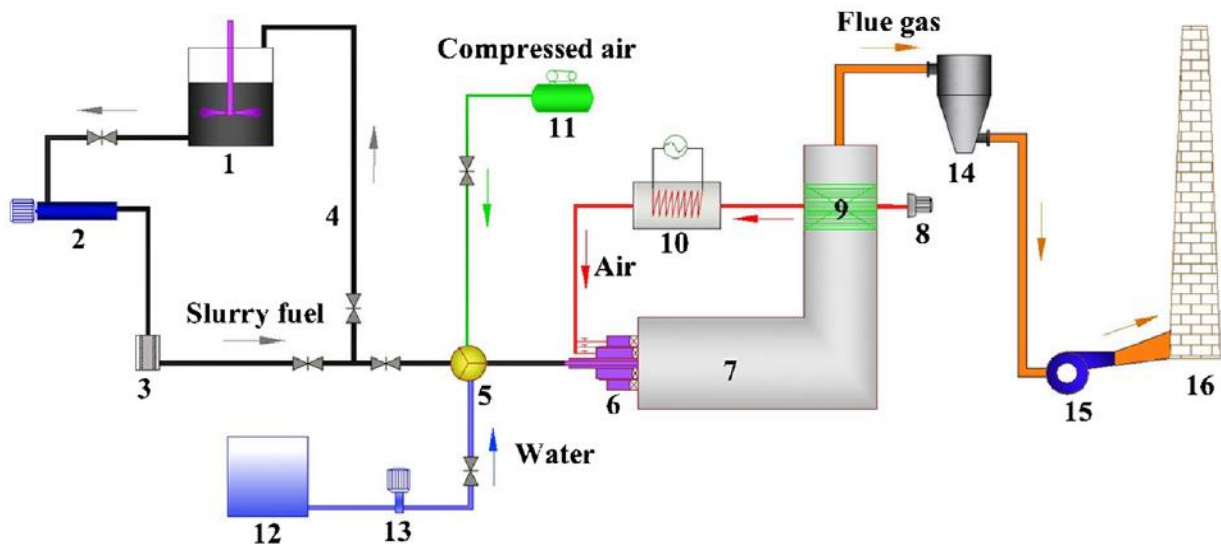
2.2.4 Verbrennungsbeispiele in Luft

Nachfolgend sind einige CWS Verbrennungsbeispiele aus der Praxis erläutert.

a) Untersuchung der Slurry Aufbereitung, Verbrennungs- und Schlackenbildungscharakteristik mit industriellem Abwasser aufbereiteter Kohle- Slurry

Das Key Lab of Clean Energy Utilization von der Zhejiang University hat eine Studie über Slurry Präparation, Verbrennung und Schlackenbildung von Kohle- Slurry, die mit industriellem Abwasser aufbereitet wurde, erstellt [11]. Kohle Slurry mit industriellem Abwasser aufzubereiten wurde als Möglichkeit untersucht, um die Umweltverschmutzung in China, die durch enorme Mengen von toxischen Abwässern entstanden ist, in den Griff zu bekommen. In einem Versuchsmaßstab gebauten Verbrennungssystem wurden zwei unterschiedliche Kohle-Abwasser- Slurries (CWLS) und ein CWS getestet und verglichen. Untersucht wurden die Herstellung der Slurries, Zündungs- und Verbrennungseigenschaften sowie die Schadstoffe im

Abgas. Die Arbeit soll als Grundlage für den Bau von industriellen Kesseln zur Abwasserbeseitigung dienen. Hauptbestandteile des Abwassers sind organische Bestandteile, Alkalimetallionen, Schwefel und Nitro Komponenten. Aufgrund der aktiven Bestandteile in der CWLS verbessert sich die Oberflächenaktivität der Kohlepartikel. Es ist eine deutliche Reduktion der Viskosität erkennbar. Dadurch konnte gänzlich auf Additive verzichtet werden. Die Verbrennung wurde während der Zündung und der stabilen Verbrennung untersucht. In Abbildung 2-15 ist ein, im Versuchsmaßstab gebautes, Verbrennungssystem schematisch dargestellt. Die Slurry wird mit Hilfe einer Pumpe aus einem Tank (1) zur Düse (6) befördert, wobei eine Bypass- Schaltung (4) möglich ist. Die Slurry- Leitung kann mit Druckluft (11) oder Wasser (12) gereinigt werden. Die für die Verbrennung benötigte Luft (8), wird mit einem Abgaswärmetauscher (9) und einer elektrischen Heizung (10) vorgewärmt. Das Abgas wird mit einem Zyklonabscheider (14) gereinigt. [11]



1. Slurry storage tank; 2. Slurry pump; 3. Filter; 4. Slurry return circuit; 5. Three way valve; 6. Slurry burner; 7. Horizontal furnace; 8. Air blower; 9. Air preheater; 10. Air electrical heater; 11. Air compressor; 12. Water storage tank; 13. Water pump; 14. Cyclone; 15. Suction fan; 16. Stack.
Abbildung 2-15: Verbrennungssystem von CWS/CWLS [11]

In Abbildung 2-16 wird der Verlauf der Rauchgastemperatur am Kesselaustritt während der Zündphase von CWLS in Vergleich zu CWS dargestellt. Ein einstündiger Anfahrvorgang wurde mit Hilfe eines Ölbrenners durchgeführt. Es zeigt sich, dass eine stabile Verbrennung mit CWLS früher erreicht wird, da eine schnellere Zündung erfolgt. Die maximale Kesseltemperatur erhöht sich ebenfalls geringfügig. [11]

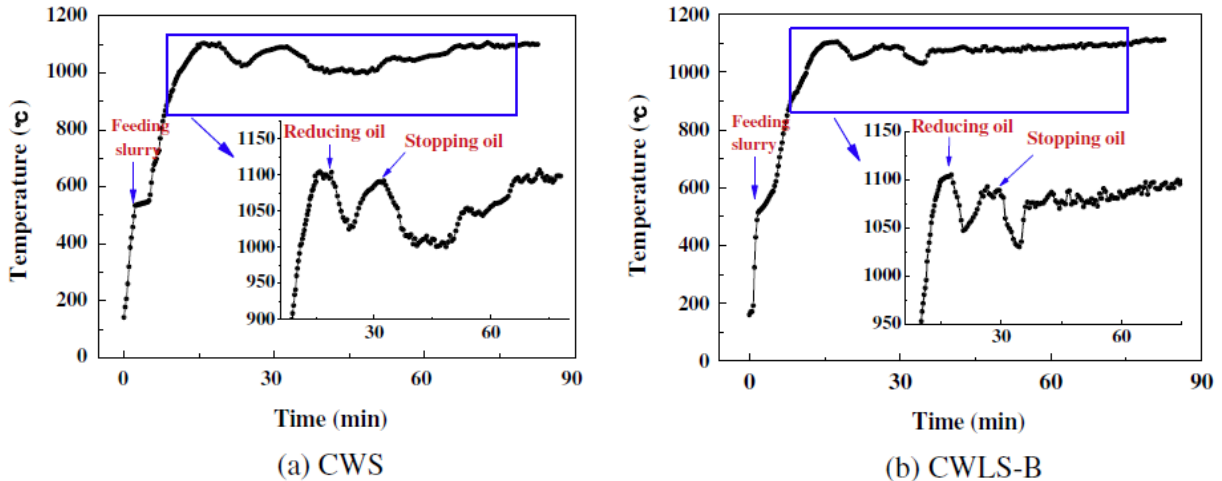


Abbildung 2-16: Verlauf der Kesselaustrittstemperatur während der Zündphase von CWS/CWLS [11]

Die Schlackenbildung wurde mit Hilfe eines Silizium Karbid Stabes untersucht, der im Kessel an verschiedenen Positionen angebracht wurde. Die Ablagerungen der Schlacke wurden auf Aussehen und Menge untersucht. Es zeigt sich, dass bei CWLS deutlich mehr Schlacke entsteht, da die Schmelztemperatur der Asche aufgrund des hohen Alkalimetallionengehaltes sinkt. Die Abgasmessungen ergaben, dass mit CWLS die SO_2 und NO_x Werte gesenkt werden können. [11]

b) Effekte der Poren Fraktal Struktur, das rheologische Verhalten und die Verbrennungscharakteristik von ultrafeiner Kohle- Wasser- Slurry

Die Zhejiang University und die Liaoning Technical University haben die Effekte der Poren Fraktal Struktur, das rheologische Verhalten und die Verbrennungsdynamik von ultrafeiner Kohle- Wasser- Slurry untersucht [12]. Ziel war es, eine Grundlage für die weitere Entwicklung von ultrafeiner CWS als alternativen Brennstoff in Gasturbinen und in Dieselverbrennungsmotoren zu schaffen. Für diese Anwendungen muss der Aschegehalt in der Kohle auf 1-2 % gesenkt werden, dies wurde mit Hilfe einer Wäsche in Säure durchgeführt. Dieses Verfahren ist für eine ökonomische Anwendung zu teuer und führt zu einer Veränderung der Porenstruktur der Kohlepartikel. Daher ist das Verfahren für eine industrielle Anwendung nicht geeignet. Die Porenstruktur hat einen entscheidenden Einfluss auf die Aufbereitung von CWS und die Verbrennungseigenschaften. Deshalb wurde die nichtlineare Porosität der festen Partikel mit einer neuen Fraktal Theorie untersucht und daraus die Poren Fraktal Dimension berechnet. Die Kohle wurde mit einer Kugelmühle 4, 8 und 32 Stunden gemahlen. Die Partikelgröße betrug 1-10 μm . Die Partikelgröße sinkt mit zunehmender Mahldauer, während die spezifische Oberfläche und die Porenfraktal Dimension steigt. Dies führt zu einer steigenden Viskosität der Slurry, weil dies zu einer besseren Wasseradsorption auf den Kohlepartikeln führt und die freie Wassermenge zwischen den Partikeln geringer wird. Die Verbrennungsdynamik

wurde mit einer thermographimetrischen Messung bei unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeiten durchgeführt. Es zeigt sich, dass mit steigender Poren Fraktal Dimension die Start-, Spitzen-, und Endtemperatur fällt. Dies ist auf eine verbesserte Wärmeleitung in den kleinen Partikeln und einer steigenden Sauerstoffdiffusion zurückzuführen. Außerdem sinkt mit steigender Poren Fraktal Dimension die Zündtemperatur und die Aktivierungsenergie. [12]

c) CWS Verbrennungsanalyse eines Gemisches aus Kraftwerkskohle und recyceltem Kohlestaub

Die PRAIRIE VIEW A&M UNIVERSITY hat eine Analyse einer CWS Verbrennung durchgeführt [13]. Der Hintergrund der Arbeit war, den enormen Kohleabfall bei der Kohlegewinnung und dem Kohlesäuberungsprozess zu nutzen und dadurch eine Verbesserung der Umweltsituation zu erreichen. Deshalb wurde bei der Slurry- Herstellung (53,3 % Feststoffanteil) ein Kohlegemisch verwendet, das zu 15 % aus rückgewonnenen Kohlepartikeln aus dem Abwasser der Kohlewäsche und zu 85 % aus Kraftwerkskohle besteht. Zur Untersuchung der Verbrennungscharakteristik wurde ein im Versuchsmaßstab gebauter Verbrennungskessel mit einer Drall- Brennkammer verwendet. Es wurden drei unterschiedliche Wärmeleistungen, bei drei verschiedenen Brennereinstellungen untersucht. Mit der X-Ray Fluoreszenz Analyse wurden die Partikelgrößenverteilung der rückgewonnenen Kohle und der CWS, die Abgaszusammensetzung und die chemischen Bestandteile der Asche gemessen. Die schädlichsten Oxide in der Asche sind SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 , wobei SiO_2 die größte Konzentration aufwies. Die NO_x Emissionen lagen unter 500 ppm und die SO_2 Emissionen bei ca. 2500 ppm. Die SO_2 Emissionen hängen nicht von den Kesselbetriebsbedingungen ab, sondern sind proportional der Menge an Schwefelgehalt im Brennstoff. In Abbildung 2-17 und Abbildung 2-18 ist die Partikelgrößenverteilung von Kraftwerkskohle und rückgewonnener Kohlepartikel aus dem Abwasser der Kohlewäsche dargestellt. Ein Vergleich der zwei Partikelgrößenverteilungen zeigt, dass sich das Maximum der Gewichtsverteilung von 36 bis 88 μm auf 3 bis 27 μm verschiebt. [13]

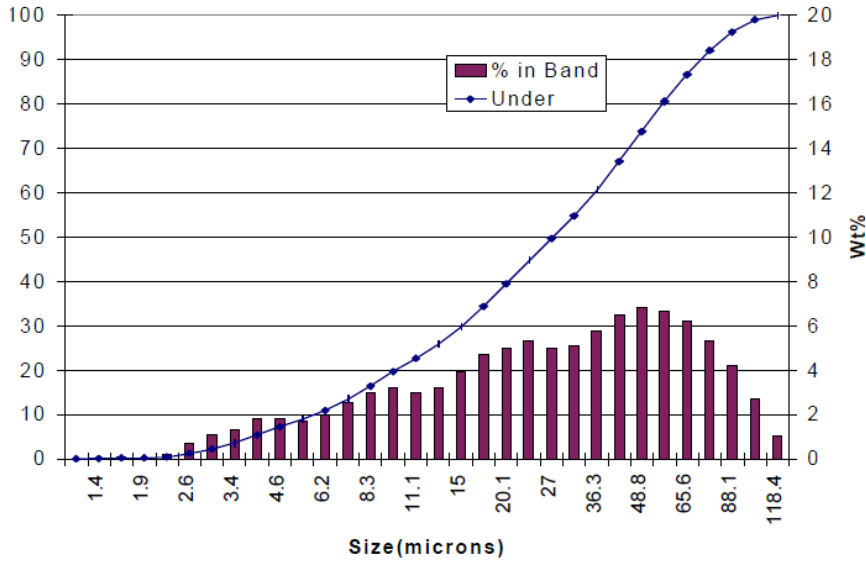


Abbildung 2-17: Partikelgrößenverteilung von Kraftwerkskohle [13]

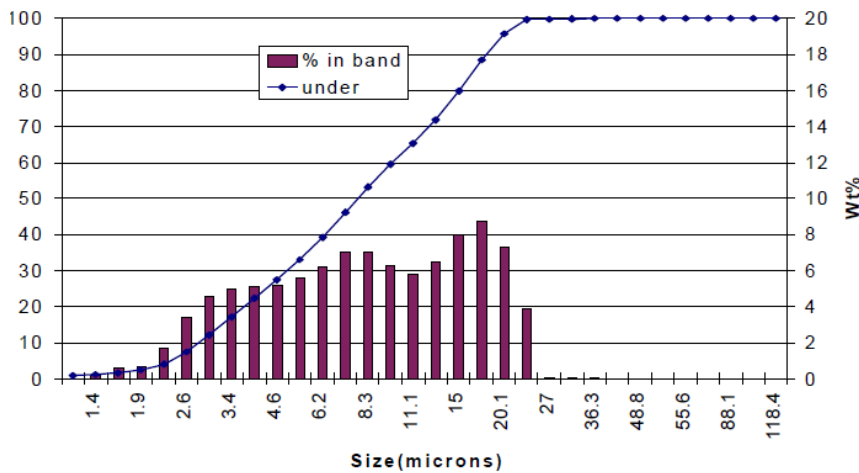


Abbildung 2-18: Partikelgrößenverteilung von rückgewonnenen Kohlepartikeln [13]

d) NO_x Reduktion in einem Kohlestaubbrenner durch CWS Reburning

Die Penn State University hat die Möglichkeiten der NO_x Reduktion, in einem Kohlestaubbrenner, untersucht [14]. Reburning mit CWS ist eine Möglichkeit zur Reduktion der Stickoxide. Der Zweck der Studie war, die Mechanismen der NO_x Reduktion zu untersuchen, wenn als Zusatzbrennstoff CWS eingesetzt wird. Der CWS Anteil lag bei 0, 10, 20, 30% des gesamten Heizwertes. Die Gaszusammensetzung (O_2 , CO und NO_x) wurde an verschiedenen Stellen im Kessel gemessen. Das Verbrennungssystem ist in Abbildung 2-19 dargestellt. Der Kohlebrennstoff wird zentral gefeuert und die CWS wird bei Port 2 zugeführt. Bei Port 3 wird zusätzlich Luft für die vollständige Verbrennung zugeführt. Weiters sind die Reburningzonen in die Abbildung eingezeichnet. [14]

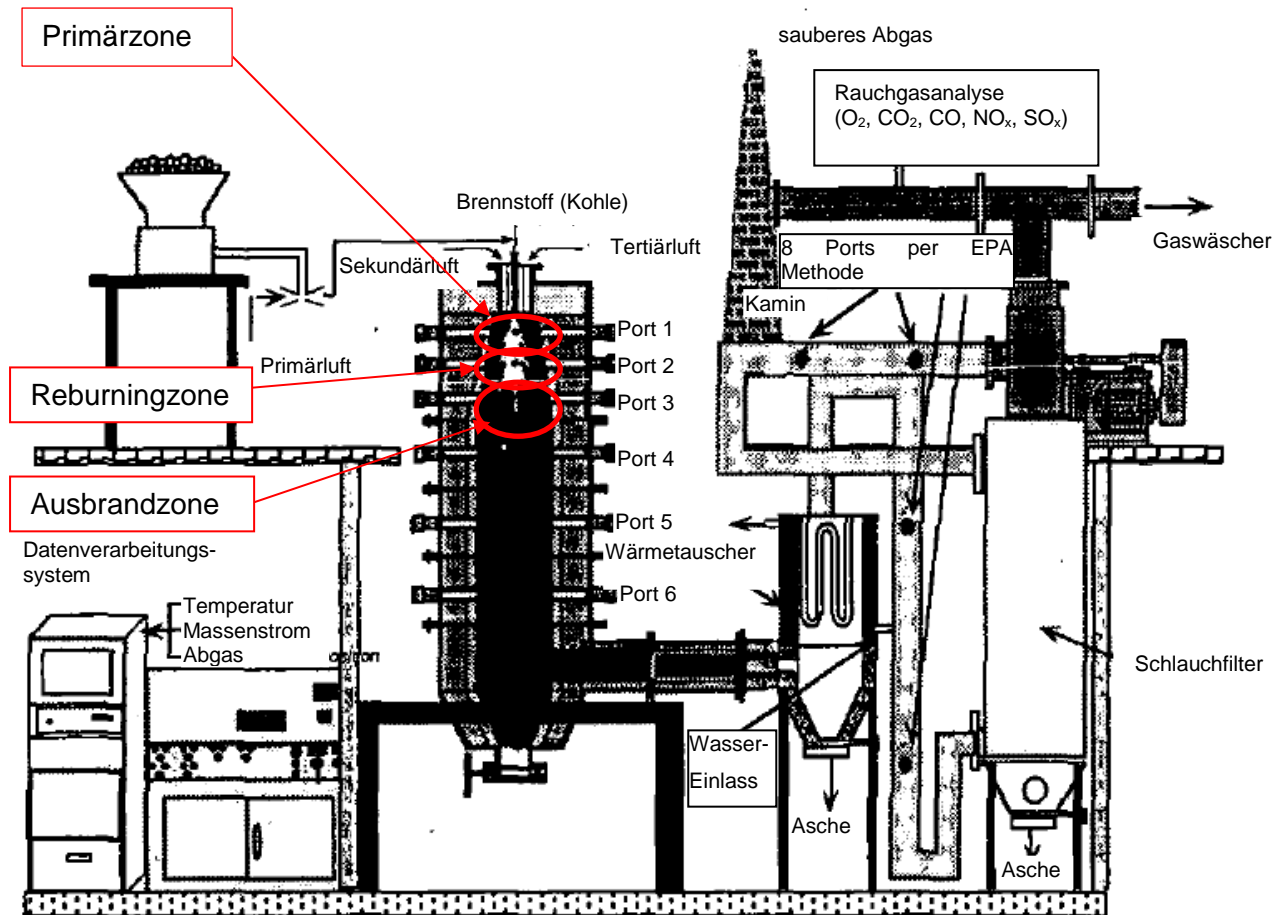


Abbildung 2-19: schematische Darstellung eines Kohlestaubbrenners mit CWS Reburning [14]

Der Reburning Prozess lässt sich in drei Zonen einteilen [11]:

- In der Primärzone erfolgt ca. 80 % der gesamten Wärmeabgabe.
- Nach der Primärzone werden ca. 10- 30 % Brennstoff in die Reburningzone zugeführt. In dieser Zone kommt es zu einer Reduktion der Stickoxide. Die primär gebildeten Stickoxide und der zugeführte Brennstoff in der Reburningzone reagieren mit Kohlenwasserstoffen. Als Zwischenprodukte werden NH_3 und HCN gebildet.
- In die Ausbrandzone wird zusätzlich Luft zugeführt. Durch die mageren Bedingungen zerfallen Stickstoffverbindungen, wie NH_3 , HCN oder NO , zu NO_x oder molekularem Stickstoff.

Bei einem mit 100 % Kohle befeuerten Brenner zeigt sich, dass die NO_x Konzentration mit zunehmenden Abstand vom Brenner abnimmt. Diese Abnahme kann durch den Reburn Mechanismus erklärt werden. Bei einem Brenner mit zusätzlicher CWS ist, wie in Abbildung 2-20 dargestellt eine Abnahme der Initialstickoxide ersichtlich, die durch eine niedrigere Verbrennungstemperatur erklärt werden kann. Nach der Primärzone kommt es aber zu keiner wesentlichen Senkung der Stickoxide. Es kommt zu einer Verschlechterung des Kohlenstoffausbrandes. Weiters zeigt sich, dass eine unterschiedliche Stickoxidkonzentration

an der Wand und in der Brennraummitte entsteht, da es zu keiner optimalen Durchmischung in der Brennkammer kommt. [14]

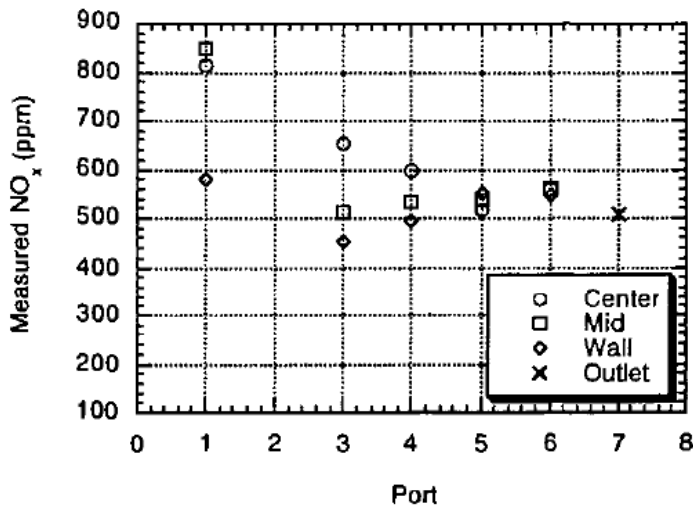


Abbildung 2-20: NO_x Profil bei Feuerung von 70 % pulverisierter Kohle und 30 % CWS Reburning [14]

e) Verbrennungscharakteristik von Biomasse- COWS

Die Fuzhou University in China hat die Verbrennungscharakteristik von Biomasse- Kohle- Öl- Wasser- Slurry (Biomasse- COWS) untersucht [15]. Zur Bestimmung der Verbrennungscharakteristik wurde eine thermische Analyse mittels der Thermogravimetrie durchgeführt. In einem thermischen Analysegerät (STA409PG von NETZSCH) wurden 50 mg Proben, von Raumtemperatur auf 800 °C erwärmt. Die Masseänderung der Probe wurde während der Aufheizphase untersucht. [15]

Die Biomasse- COWS wurde mit Fujian Anthrazit, Wasserhyazinthen, Wasser, Schweröl und chemischen Additiven prepariert. Als Biomasse wurden frische Wasserhyazinthen verwendet, die 24 Stunden bei 120 °C getrocknet und danach gemahlen wurden. Getrocknete Wasserhyazinthen haben einen niedrigen Kohlenstoffgehalt von 34,43 % und einen hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen von ungefähr 60 %. [15]

Es konnte gezeigt werden, dass mit Biomasse- COWS die Zündtemperatur im Vergleich mit CWS um 15- 24 % sinkt. Die Aktivierungsenergie sinkt mit steigendem Biomassegehalt. Außerdem konnte ein besserer Ausbrand erreicht werden. [15]

f) Saubere CWS Verbrennung in einem umgerüsteten Ölbrenner

Die Pennsylvania State University hat die Verwendung von CWS in einem Industriekessel für das United States Department of Energy und die Commonwealth of Pennsylvania untersucht [16]. Es wurde ein Industriekessel untersucht, der für die Verbrennung von Öl konstruiert, aber auf CWS Verbrennung umgerüstet wurde. Dabei soll es zu keinen nachteiligen Effekten der Kesselleistung, Instandhaltbarkeit, Ausfallsicherheit oder Verfügbarkeit, kommen. Der Kessel kann ca. 6800 kg Dampf/h erzeugen. Es wurde eine CWS verbrannt, die einen Aschegehalt von 3 % und einen Schwefelgehalt von 0,9 % beinhaltet. Der Kessel wurde einem 1000 Stunden Testprogramm unterzogen. Dabei wurden die Verbrennungscharakteristik, Wärmeabgabe, Fouling, Schlackenbildung, Korrosion, Erosionseigenschaften, CWS Transport und Speicherung untersucht. Abbildung 2-21 zeigt das CWS Verbrennungssystem eines umgerüsteten Ölbrenners. Der Speichertank (ca. 60 m³) wird zweimal täglich 30- 45 Minuten umgerührt, um das Setzen der Kohlepartikel zu verhindern. Der tägliche Bedarf an Slurry wird in einen kleineren Tank (ca. 7,5 m³) gepumpt und abermals 15 Minuten umgerührt. Die benötigte Slurry wird vorgeheizt und mittels einer Pumpe zur Slurry- Lanze befördert. [16]

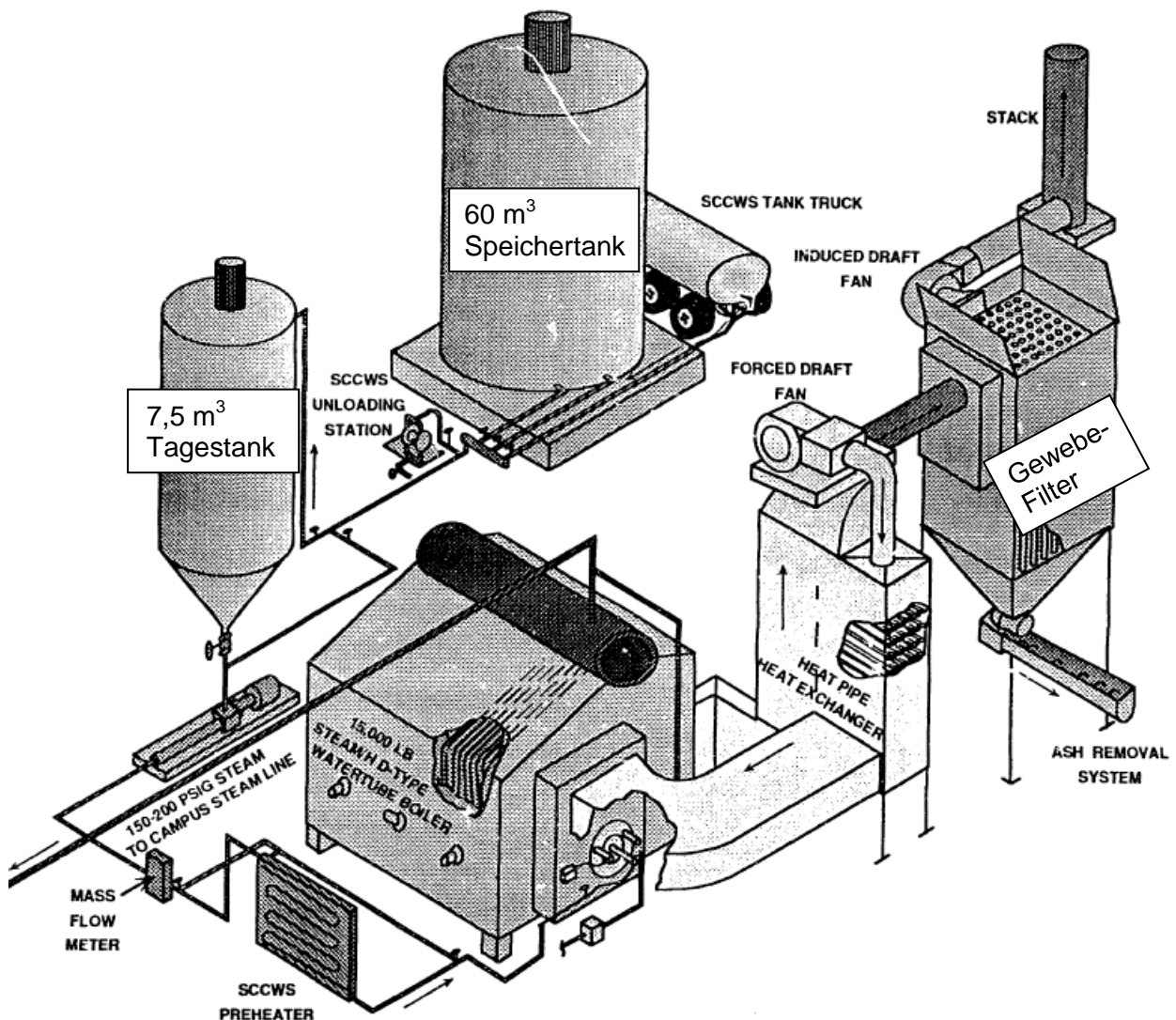
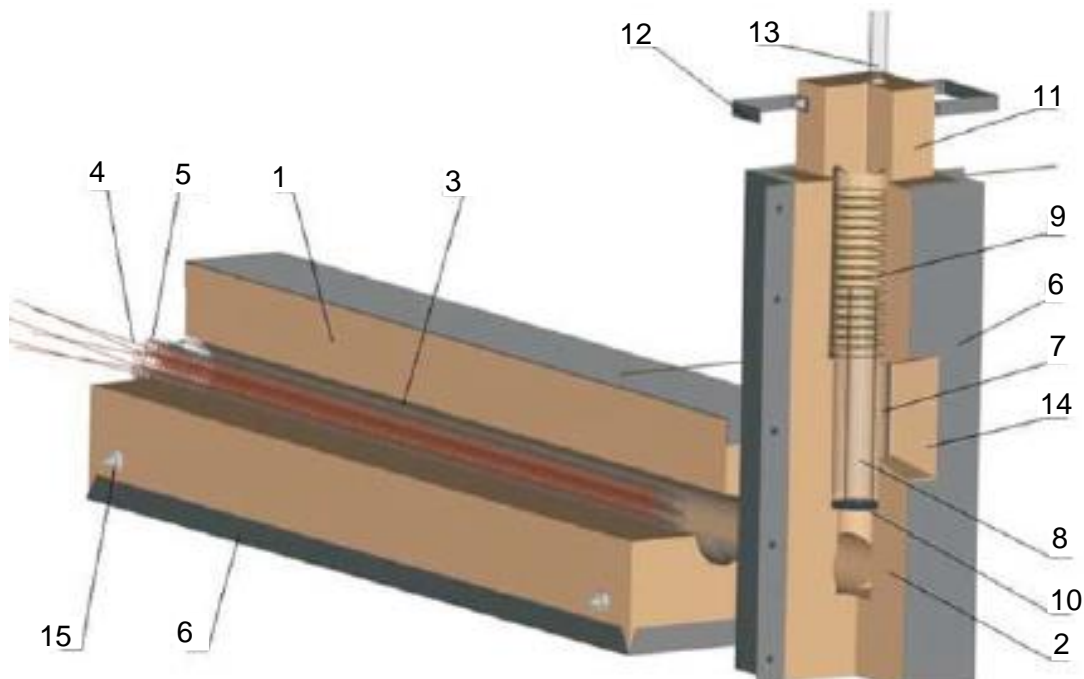


Abbildung 2-21: CWS Verbrennungssystem in einem umgerüsteten Ölbrenner [16]

g) Analyse einer kontinuierlichen und zyklischen Verbrennung von CWS

Die Czestochowa University of Technology hat die Verbrennung von CWS Tropfen, mit dem in Abbildung 2-22 dargestellten Versuchsstand, in einer Wirbelschicht und in Luft untersucht [15]. Der Versuchsstand besteht aus Keramikblöcken (1, 2), in denen ein Quarzrohr (3, 7) eingelegt ist. Die Luft wird mit Hilfe von Heizelementen (3) vorgeheizt und gelangt über einen Keramikfilter (10) in die Brennkammer (7, 8). Untersucht wurden eine kontinuierliche Verbrennung sowie eine zyklische Verbrennung, die durch abwechselnde Luft- und Stickstoffzufuhr realisiert wurde. Das zyklische Verbrennungsverhalten kann auf die Bewegung des losen Materials der Wirbelschicht zurückgeführt werden. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Betriebsbedingungen gelegt. Zur schnellen und gleichmäßigen Untersuchung wurde ein Plan erstellt, der durch paralleles Ändern der Parameter die Zusammenhänge untersucht. Der Temperaturverlauf in der Brennkammer wurde, in Abhängigkeit des Wassergehaltes, der Gasgeschwindigkeit und der Masseänderung während der Verbrennung untersucht. Neben den experimentellen Versuchen wurde auch ein mathematisches Modell entwickelt, das die physikalischen und chemischen Phänomene bei der CWS Verbrennung beschreibt. Das Modell beinhaltet eine Gleichung, welche die Verbrennung in Luft oder Wirbelschicht und abwechselndes Zünden und Auslösen der Flamme beschreibt. [17]



1, 2, Keramikblöcke; 3 Quarzrohr; 4 Heizelement; 5 Quarzrohr; 6 Stahlblech; 7,8 Brennkammer; 9 Wärmetauscher; 10 Keramikfilter; 11 Keramikblock; 12 Haltegriffe; 13 Rauchgasabzug; 14 Schauglas; 15 Schrauben

Abbildung 2-22: Versuchsstand Tropfenverbrennung [17]

h) Vorverdampfung von CWS

Die Institute für angewandte Energie in Tokio und Sapporo haben eine Technologie zur Vergasung von Kohle- Wasser- Slurry mit Vorverdampfung untersucht [18]. Bei dieser Technologie wird das Wasser der CWS verdampft. Danach werden die trockene Kohle und der Dampf dem Vergaser zugeführt. Ein Vorteil ist, dass kein Zerstäubungsprozess mehr benötigt wird. Weiters findet der Verdampfungsprozess nicht mehr in der Flammenzone statt, dadurch ist die Gefahr der Flammenauslöschung durch den großen latenten Wärmebedarf beseitigt. [18]

Es wurde eine Versuchseinheit mit 2 Tonnen Kohle pro Tag gebaut und untersucht, die in Abbildung 2-23 dargestellt ist. Die Slurry wird im ersten Heizelement vorerhitzt und im zweiten und dritten Heizelement wird das Wasser in der Slurry verdampft. Danach werden die trockene Kohle und der Wasserdampf in die Brennkammer eingeblasen. Als Slurries wurden zwei unterschiedliche Kohlearten, Naphtalinsulfonat Formaldehyd (oberflächenaktive Bestandteile) und Wasser verwendet, die auf 573 K bei 100 bar in einem Vorerhitzer erwärmt und anschließend verdampft wurden. Als Heizmedium wurde, wegen der hohen thermischen Leitfähigkeit und der hohen Temperaturen, geschmolzenes Salz verwendet. Die Zuleitung zum Kessel wurde auf Verstopfungen untersucht. Die entscheidenden Parameter sind dabei die Fluidgeschwindigkeit und die Länge des Überhitzers. Mit einer hohen Fluidgeschwindigkeit von ca. 6,5 m/s sind keine Verstopfungen aufgetreten. [18]

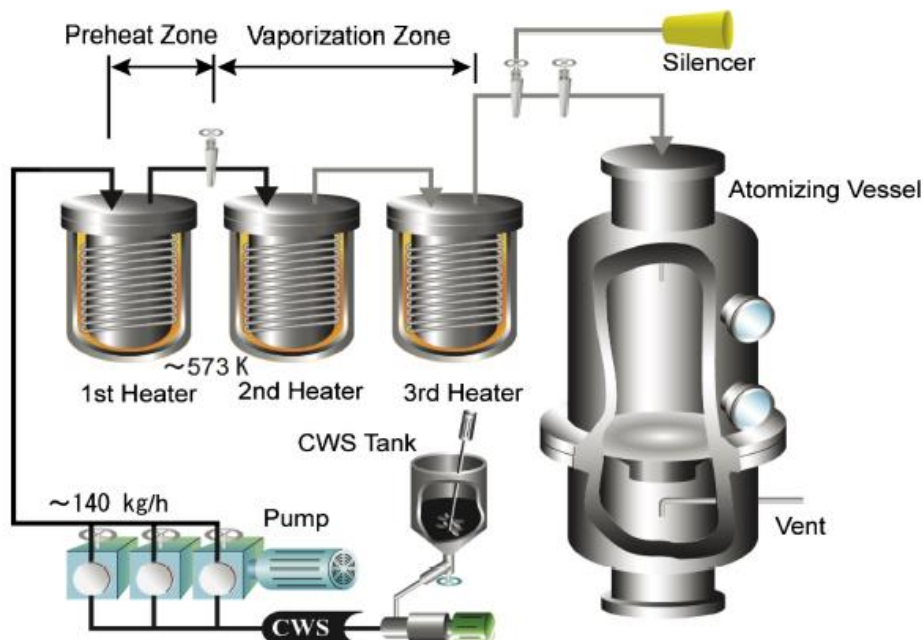


Abbildung 2-23: schematische Darstellung einer CWS Vorverdampfungseinheit [18]

Mit einem empirischen Rechenmodell, das mit Wärmeübertragung und Druckabfällen rechnet, konnte der Temperatur- und Druckverlauf berechnet werden. Die berechneten Werte stimmen gut mit den Versuchsdaten überein. [18]

2.2.5 CWS Wirbelschichtverbrennung

Eine weitere Möglichkeit zur Verbrennung von CWS stellt die Wirbelschichtverbrennung dar. Es handelt sich um eine effiziente und saubere Technologie. Abbildung 2-24 zeigt schematisch das Wirbelschichtverfahren. Das Bettmaterial wird mit Hilfe eines von unten kommenden Luftstromes fluidisiert. Danach wird der CWS- Brennstoff in Tröpfchenform hinzugefügt. [17] Der Tropfen durchläuft einen Trocknungsprozess und danach verbrennen die flüchtigen Bestandteile. Kleine Kohlepartikel wandern von der dichten Bettschicht aufwärts und gelangen in die Verdünnungszone, wo sie verbrennen. Größere Partikel im Abgas werden mit einem Gas/Feststoff Zyklonabscheider abgeschieden und zum Verbrennungskessel zurückgeführt. Damit wird der Ausbrand verbessert und der Verlust des Bettmaterials kann reduziert werden. [19]

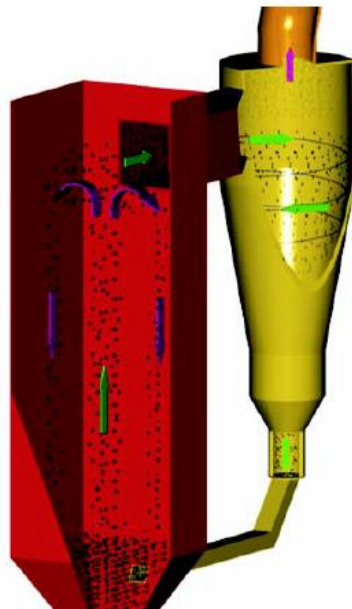


Abbildung 2-24: Partikelströmung einer CWS Wirbelschichtverbrennung [17]

a) CWS Wirbelschichtverbrennung

Das Harbin Institute of Technology und die Shanghai Jiao Tong University haben eine neue Verbrennungstechnologie von Kohle- Wasser- Slurries untersucht [19]. Die Wirbelschicht Verbrennung von CWS ist als neue Ölalternative entwickelt worden. Mit Hilfe dieser Technologie können kleine und mittlere Kessel mit schlechter Effizienz auf einen modernen Standard umgerüstet werden. Durch diese effiziente und saubere Kohletechnologie kann ein beträchtlicher wirtschaftlicher und ökologischer Nutzen erreicht werden. [19]

Abbildung 2-25 zeigt schematisch das Wirbelschichtverfahren. Im vertikalen Verbrennungskessel wird Primärluft am Kesselboden eingeblasen und das Bettmaterial aus inertem Quarzsand wird durch den Luftstrom (9) fluidisiert. CWS Tropfen (4- 10 mm) werden

von der Kesseldecke (5) auf die heiße Bettoberfläche aufgebracht. Beim Aufheizvorgang wird die Wirbelschicht mit Hilfe eines Öl- oder Gasbrenners (8) aufgeheizt. [19]

Die niedrigen Verbrennungstemperaturen von 850- 950 °C haben den Vorteil, dass es zu keiner Schlackenbildung kommt und die NO₂- Emissionen sehr gering sind. Durch die Zugabe von Kalkstein kommt es in diesem Temperaturbereich zu einer Entschwefelung und die SO₂ Emissionen können deutlich gesenkt werden. Weiters wird ein Kesselwirkungsgrad von bis zu 91 % erreichbar. [19]

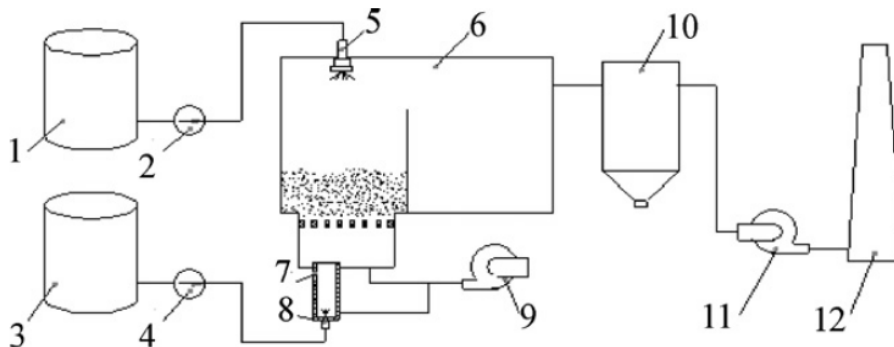


Abbildung 2-25: Flussdiagramm einer CWS Wirbelschichtverbrennungstechnologie [19]

b) Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Verbrennungscharakteristik einer CWS Wirbelschichtverbrennung

Die Shanghai Jiao Tong University und die Chinese Academy of Science haben den Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Verbrennungscharakteristik bei einer CWS Wirbelschichtverbrennung untersucht [20]. Die wesentlichen Einflussgrößen sind die Betttemperatur, die Gasgeschwindigkeit und die Betthöhe der Wirbelschicht. Wegen der komplexen Wirbelschichtverbrennung wurde die Grey Relationsanalyse gewählt, die zum Lösen komplizierter Beziehungen zwischen mehreren Faktoren und Variablen geeignet ist. [20]

Zur Vereinfachung der Untersuchungen wurden künstlich hergestellte CWS Kugeln in die Wirbelschicht zugeführt. Dazu wurde Quarzsand in einem Muffelofen auf 650- 950 °C erwärmt. Danach wurden CWS Tropfen mit einem Durchmesser von 3- 10 mm auf den heißen Quarzsand aufgebracht, die sich zu glatten Kugeln formten. Die Verbrennungsexperimente wurden mit einem Wirbelschichtverbrennungskessel in Modellgröße durchgeführt, der in Abbildung 2-26 dargestellt ist. Die vorgewärmte Luft (4) wird mit Hilfe eines Kompressors (5) von unten in den Brennraum (2) eingebracht und fluidisiert das Bettmaterial. [20]

Es zeigt sich, dass die Betthöhe den kleinsten Einfluss auf die CWS Verbrennung hat. Die Fluidisierungszahl (Verhältnis der Gasgeschwindigkeit zur Fluidisierungsgeschwindigkeit)

beeinflusst die Verbrennung am stärksten in der früheren und der späteren Phase des Verbrennungsprozesses und die Betttemperatur in der Phase dazwischen. [20]

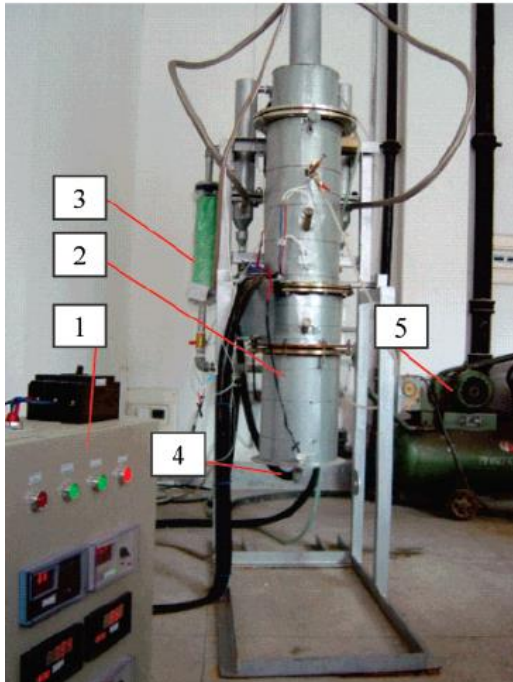


Abbildung 2-26: CWS Wirbelschichtbrenner [20]

c) COS/COWS Wirbelschichtvergasung

Das Institute of Chemical Process Fundamentals of the ASCR, University of Jan Evangelista Purkyně und Institute of Chemical Technology hat die Wirbelschichtvergasung von Kohle- Öl- (COS) und Kohle- Öl- Wasser- Slurries (COWS), mit dem in Abbildung 2-27 dargestellten Wirbelschichtvergaser, untersucht [21]. Als Slurry wurden deutsche Braunkohle- Rapsöl, polnische Kohle- Rapsöl und polnische Kohle- Öl- Wasser Emulsionen verwendet. Der Vergaser wurde elektrisch in einem Temperaturbereich von 800- 925 °C beheizt. Als Vergasungsmittel wurde Sauerstoff- Wasserdampf und Sauerstoff- Kohlendioxid eingesetzt. [21]

Die COS und COWS Zerstäubung erfolgte mit Hilfe von Stickstoff, der durch Bohrungen entlang der Düse mit hoher Geschwindigkeit (ca.12 m/s) eingeblasen wurde. Mit einem hohen Gas/Slurry Massenverhältnis (ca. 1,5 kg Gas/kg Slurry) konnte die Bildung von Agglomeraten verhindert werden. [21]

Der Heizwert von COS (28-30 MJ/kg) liegt deutlich über jenem von COWS (15-25 MJ/kg). Die COWS hat ein schlechteres Langzeitstabilitätsverhalten und weist je nach Zusammensetzung ein scherverdünnendes, scherverdickendes oder ein newtonsches Verhalten auf. [21]

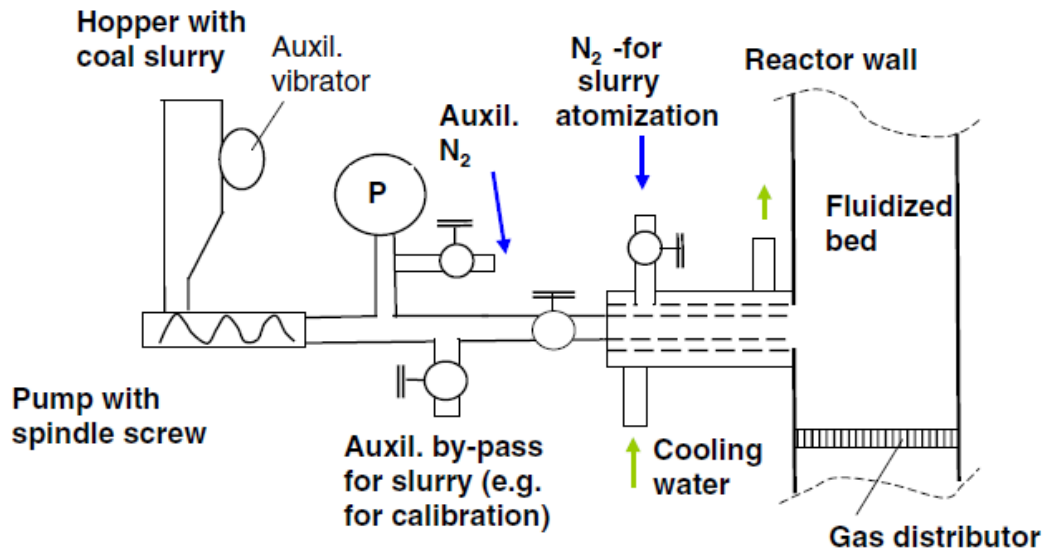


Abbildung 2-27: schematische Darstellung eines COS/COWS Wirbelschichtvergasers [21]

2.2.6 CWS Verbrennungssimulation

Durch die Entwicklung neuer Computer mit verbesserter Rechenleistung können hochaufgelöste Simulationen durchgeführt werden, wo Experimente aufwendig oder teuer sind. Nachfolgend sind Simulationsbeispiele angeführt.

a) Mechanismen und mathematische Modellierung einer CWS Verbrennung

Die Siberian State Industrial University hat die Verbrennungsmechanismen von CWS in einer adiabaten Drall- Brennkammer beschrieben und darauf basierend ein mathematisches Modell entwickelt, das zur Modellierung und Optimierung von stationären Verbrennungsvorgängen verwendet werden kann [22]. Das Modell basiert auf der thermodynamischen Modellierung von Massen- und Energiebilanzgleichungen und kann zur Abschätzung des Verbrennungsprozesses verwendet werden. Es wurde dazu das Programm „TERRA“, das von der Moscow State Technical University entwickelt wurde, verwendet und damit ein Vergleich mit Laborergebnissen durchgeführt. Dieses Modell wurde zur Berechnung eines dynamischen mathematischen Modells eingesetzt, das den physikalischen und chemischen Prozess in einer Drall Brennkammer modelliert. Dazu wurde eine Differenzialgleichung zur Beschreibung der dynamischen Strukturveränderungen in der Gasphase in einer CWS Brennkammer gefunden. Das Modell kann für die Entwicklung von Verbrennungsverfahren und Kontrollsystemen für automatisierte Energieversorgungsanlagen verwendet werden. [22]

Es wurden die Gaszusammensetzung, der Volumenstrom und die Verbrennungstemperatur der CWS Verbrennung bei variablem Luftverhältnis berechnet. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2-28 ersichtlich. Der CWS Massenstrom betrug 90 kg/h mit einer Aschekonzentration von 32,3 % und einem Wassergehalt von 39,2 %. Die Luftzufuhr wurde zwischen 283 und

617 m³/h variiert. Mit steigender Luftzufuhr sinken die unverbrannten Bestandteile im Rauchgas. CO und H₂ wandeln sich in CO₂ und H₂O um, bis bei etwa 437 m³/h die stöchiometrische Verbrennung erreicht wird. Bei der stöchiometrischen Verbrennung wird die höchste Verbrennungstemperatur von etwa 1205 °C erzielt. Eine weitere Steigerung der Luftzufuhr führt zur vollständigen CO Verbrennung und der Sauerstoffgehalt nimmt im Rauchgas zu. Der Rauchgasvolumenstrom steigt zunächst mit steigender Luftzufuhr bis zur stöchiometrischen Verbrennung stark an und flacht mit weiterer Steigerung ab. [22]

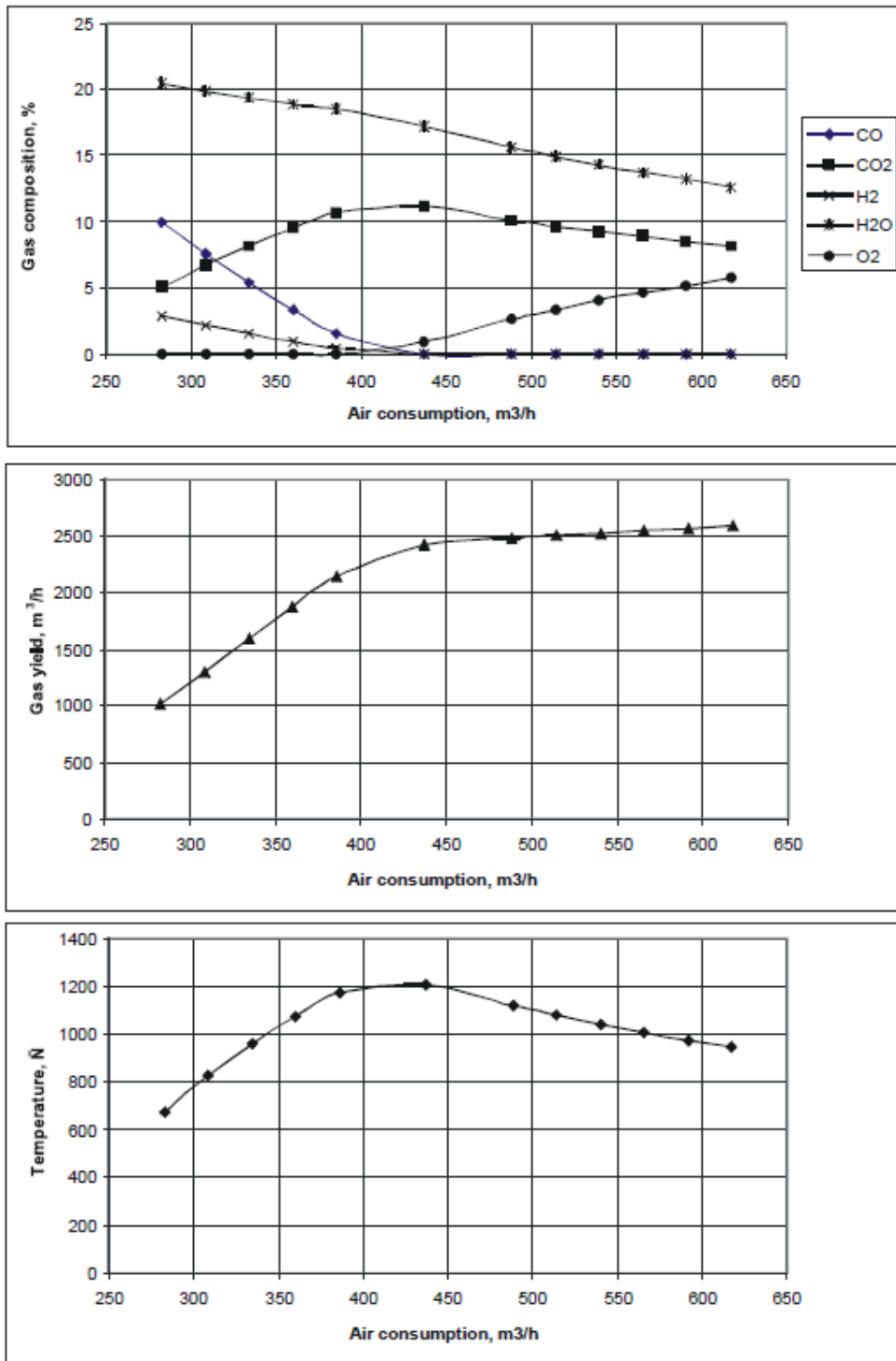


Abbildung 2-28: Rauchgaszusammensetzung, der Gasstrom und die Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Luftstromes [22]

b) Numerische Analyse einer innovativen CWS Reinsauerstoff- Verbrennungstechnologie

Die Italian National Agency for new Technologies hat eine numerische Simulation über flüssigen Brennstoff und CWS Verbrennung durchgeführt [23]. Ein chemischer Oxidationsreaktor wurde zur Beseitigung von industriellem und giftigem Abfall simuliert. Damit eine komplette Zersetzung der Schadstoffe erreicht wird, ist eine Temperatur von über 2000 °C notwendig. Zur Homogenisierung der Temperatur in der Brennkammer erfolgt eine Rezirkulation der Verbrennungsgase, die rückgekühlt und mit Sauerstoff wiederaufbereitet werden. Die heißen rezirkulierenden Verbrennungsgase werden zur Zündung der CWS verwendet. Die Flamme ist nicht länger sichtbar und die Verbrennung ist annähernd über die gesamte Brennkammer verteilt. Die Temperaturspitzen in der Flamme können reduziert werden. Dadurch kann das mittlere Temperaturlevel bei reduziertem Stickoxidgehalt angehoben werden. [23]

Es wurden CFD Simulationen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen mit FLUENT (V6.3) durchgeführt. Zuerst wurde die Verbrennung mit einem Eddy Dissipation Konzeptmodell bei einem vereinfachten Reaktionsmechanismus modelliert und danach wurde eine 3- Stufen-Verbrennung hinzugefügt. Zur Turbulenzmodellierung wurde ein k-ε Modell verwendet und der Strahlungswärmetransport wurde mit einem diskreten Ordinatenmodell modelliert. [23]

Die CWS Zerstäubung wurde nicht simuliert, sondern es wurde eine Rosin- Rammler Durchmesserverteilung angenommen. Die Simulation wurde bei einer Rezirkulationsgasmenge von 2480 kg/h, Sauerstoffanreicherung von 1100 kg/h und einer CWS von 509 kg/h mit 28 Vol% Wasseranteil durchgeführt. [23]

Die gleiche Brennkammertechnologie, die beim vorhin angeführten Paper „Numerical Analysis of Liquid Fuel and Coal Water Slurry Combustion in an Innovative Reactor“ [21] verwendet wurde, wurde für eine weitere Simulation angewandt. Für diese Simulation wurde ein Rechengitter von ungefähr 500000 Hexaeder und Tetraeder Zellen verwendet. Die Betriebsbedingungen waren ein Kohlemassenstrom von 254 kg/h, ein Slurry Wassergehalt von 47 %, Betriebsdruck von 4 bar, Wandtemperatur von 1600 K und ein rezirkulierender Gasstrom von 1870 kg/h. Abbildung 2-29 zeigt die Entgasungsrate, Verbrennungsgeschwindigkeit, Temperatur und die SO_x Konzentration. [24]

Es zeigt sich, dass die Drallkomponente zu schwach ist um den Brennstoffstrahl zu beeinflussen und bei kurzem Abstand von der Düse komplett verloren geht. Die Trocknung des Brennstoffes findet im ersten Drittel der Brennkammer und die Entgasung der flüchtigen Bestandteile hauptsächlich in der ersten Brennkammerhälfte statt. In der zweiten

Brennkammerhälfte folgt die Kohle Verbrennung und ein nicht vernachlässigbarer Teil trifft noch unverbrannt auf die Brennkammerwand. Die Simulation zeigt eine gleichmäßige Temperaturverteilung in der Brennkammer. [24]

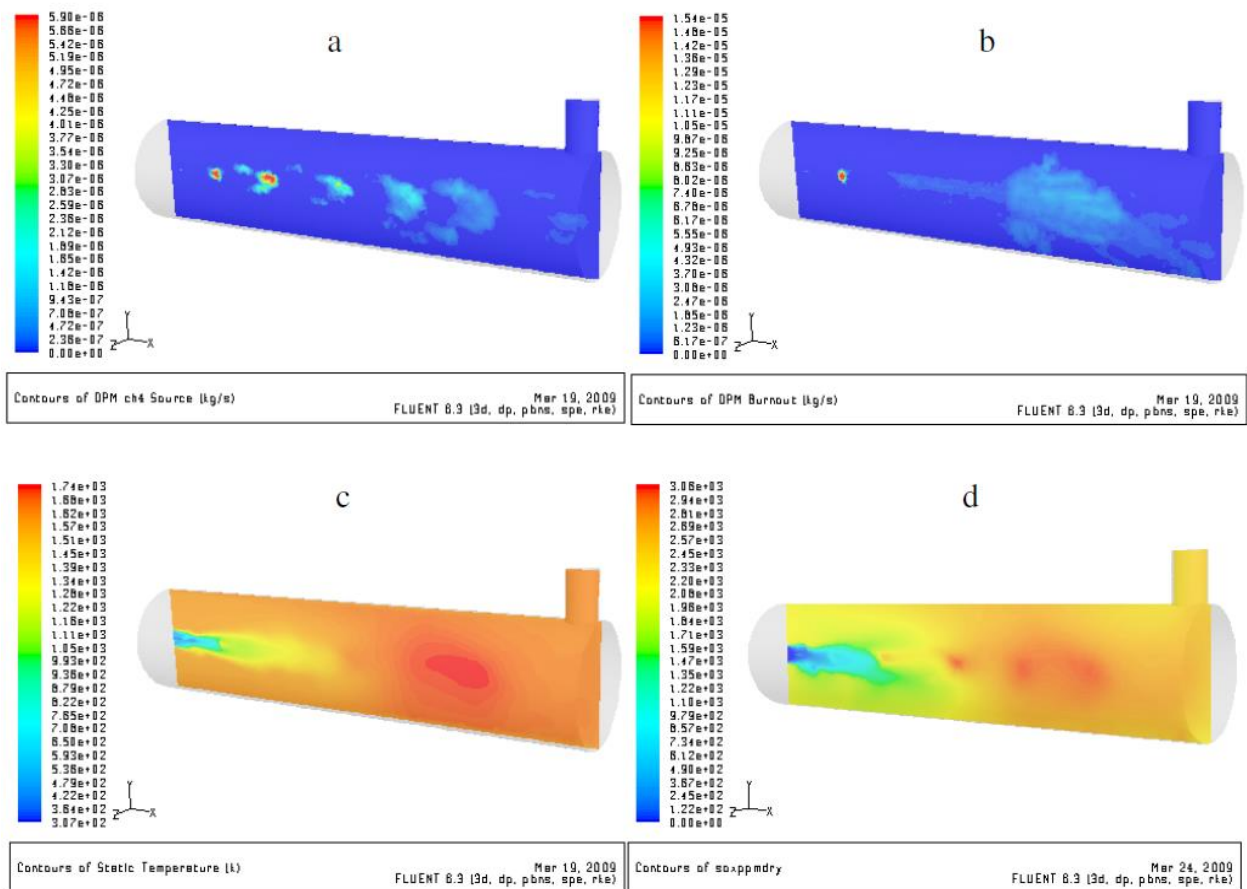


Abbildung 2-29: Verbrennungssimulation a) Entgasungsrate; b) Verbrennungsgeschwindigkeit; c) Temperatur; d) SO_x - Konzentration [24]

2.2.7 CWS Wärmetauscher

Die Zhejiang University hat das Strömungsverhalten von Abgas in Wärmeübertragern einer CWS Brennkammer im Versuchsmaßstab, die in Abbildung 2-30 dargestellt ist, untersucht [25]. Das Strömungsverhalten wurde experimentell in einem vertikalen Kessel bei einem CWS Massenstrom von 250 kg/h untersucht. Das Verständnis der Strömungscharakteristik ist wichtig für die Verbesserung der Wärmeübertragung im Wärmetauscher. Die Untersuchung wurde mit einer 2-dimensionalen Particle Image Velocimetry (PIV) durchgeführt. Die Methode funktioniert mit Flugasche im heißen Abgas. Die Flugasche wurde beleuchtet und mit einer Kamera wurden 15 Bilder pro Sekunde abgebildet. Die Bewegung der Partikel wurde zur Berechnung des Strömungsfeldes verwendet. Zur Abbildung der tatsächlichen Turbulenzen werden statistische Durchschnittsgeschwindigkeiten mit einer zeitlichen Durchschnittsmethode berechnet. [25]

Der turbulente Abgasstrahl wird mit einem Zyklon- Gasseparator an die Kesselwand abgeleitet. Dadurch wird die mittig angeordnete Wärmeübertragerfläche nicht durch erosive Partikel abgetragen. Es zeigt sich, dass sich die Temperaturverteilung gut mit dem Geschwindigkeitsfeld in der Wärmeübertragungskammer deckt. Die Temperatur und die Geschwindigkeit ist an der Wärmeübertragungsfläche viel geringer als an der Kesselwand. [25]

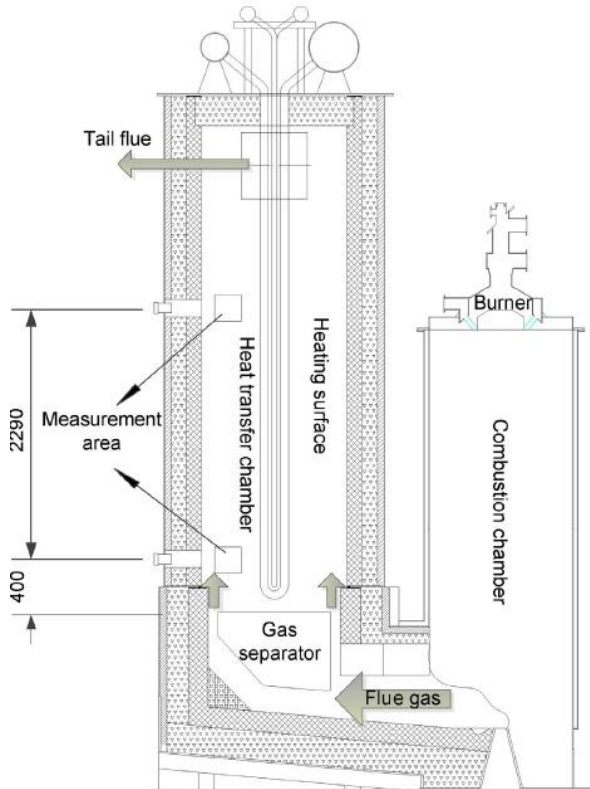


Abbildung 2-30: Wärmetauscher und CWS Brennkammer [25]

2.2.8 Weitere CWS Anwendungen in China

Weltweit am weitesten verbreitet, ist die Kohle- Slurry Verbrennung derzeit in China. Die CWS Technologie, die von der Zhejiang University entwickelt wurde, wurde in 90 Dampf- und Energieerzeugungsanlagen mit einer Leistung von 1,5 bis 200 MW eingesetzt. Derzeit sind 20 Fabriken zur Aufbereitung von CWS in Betrieb, die 4 Millionen Tonnen CWS pro Jahr herstellen. Die Zahl der mit Öl befeuerten Kessel liegt bei ca. 5000 mit einem Ölverbrauch von ca. 39 Millionen Tonnen Öl pro Jahr, die auf CWS Verbrennung umgerüstet werden können. In Tabelle 2-1 sind umgerüstete und neue CWS Anlagen in China aufgelistet (Stand 2008). [26]

Tabelle 2-1: CWS Anwendungen in China [26]

Anwender	Kesselleistung bzw. Brennstoffmassenstrom	neu/ umgerüstet	Inbetriebnahme
Zhejiang University	1,5 MW Kessel	neu	1983
erste Papierfabrik in Peking	20 t/h Ölkessel	umgerüstet	10.1985
erste Papierfabrik in Peking	60 t/h Ölkessel	umgerüstet	11.1989
erste Papierfabrik in Peking	2 x 35 t/h Ölkessel	neu	1991
Shengli Erdölfeld	3 MW Wasserboiler	umgerüstet	4.1994
Shengli Erdölfeld	7 MW Wasserboiler	umgerüstet	1994
Ölfeuerungsanlage in einem Wohngebiet in Henan	4 t/h Kettenrostkessel	umgerüstet	1995
Shandong Bayi Kohlebergwerk	4 t/h 10 t/h Kettenrostkessel	umgerüstet	1998 2001
Shandong Baiyanghe Energieerzeuger	3 x 220 t/h Ölkessel	umgerüstet	1992- 1999
Shengli Erdölfeld Energieerzeugung	10 t/h Ölkessel	umgerüstet	10.2000
Shengli Erdölfeld Shengnan in Wohngebiet	14 MW Wasserboiler	umgerüstet	12.2000
Jilin Erdölfeld	1,75 MW Wasserboiler	umgerüstet	12.2000
Guangdong Maoming Energieerzeuger	2 x 220 t/h Ölkessel	umgerüstet	2000- 2001
Qingdao Haizhong Co.	6x 10 t/h	neu	8.2000- 4.2001
Fujian Kohletransport und Verkaufsgesellschaft	Keramiktrockenkammer	umgerüstet	9.2000
Shantou Wanfeng Wärmekraftwerk	220 t/h Ölkessel	umgerüstet	6.2001- 3.2006
Datong Huihai Corporation	4 t/h	umgerüstet	2.2001
Shengli Erdölfeld	18 x 7 MW & 14 MW Wasserboiler	neu	11.2001
Huainan Kohlebergwerk	10 t/h	neu	9.2002
Xinwen Kohlebergwerk	2 x 4 t/h Kessel	umgerüstet	2002
Liaohu Erdölfeld	20 t/h Heizkessel	umgerüstet	2002
Daqing Wohngebäude	7 MW Wasserkessel	umgerüstet	2002
Suzhou Lintong Cemie Co.	4 t/h	umgerüstet	2002
Jiangsu Huabei Chemiefabrik	20 t/h	umgerüstet	4.2003
Shanghai Xianeng Co.	3 x 10 t/h	neu	2003- 2004
Shenyang Paraffinfabrik	75 t/h Wirbelschicht	umgerüstet	6.2003
Jilin petrochemische Erdölraffinerie	2 x 65 t/h Ölkessel	umgerüstet	9.2003
Shandong Qilu petrochemische Fabrik	2 x 65 t/h Ölkessel	umgerüstet	10.2003
Jilin petrochemische Ethylenfabrik	75 t/h	neu	10.2003
Maoming Energieerzeugung	2 x 410 t/h Ölkessel	umgerüstet	4.2003- 9.2005
Suzhou Jinxiang Seidefabrik	6 t/h Kessel	neu	4.2005
Qingdao Kaiyuan Group	2 x 130 t/h	neu	2004
Shandong Zaozhuang Bergwerk	130 t/h	neu	10.2004
Nahai Longguang Group	670 t/h	neu	9.2005
Zhuhai Lederfabrik	2 x 33 MJ Heizkessel	neu	9.2005
Dongguan Fuan Textilfabrik	150 t/h	neu	2007
Guangdong Nanhai Changhai Energieerzeugung	670 t/h	neu	2008
Shenyang Paraffinfabrik	75 t/h Wirbelschicht	umgerüstet	2008

Nachfolgend ist weitere Literatur über CWS Anwendungen angeführt, die im Volltext nicht zur Verfügung steht:

a) umgerüsteter Öl befeuerter Kessel mit 220 Tonnen Öl/Stunde auf CWS

Ein mit Öl befeuerter Kessel mit 220 Tonnen Öl pro Stunde wurde von der Wanfeng Thermal Power Co Ltd auf eine CWS Verbrennung umgerüstet. Die Anwendung zeigt, dass Zündung und Verbrennung stabil sind. [27]

b) CWS Brenner mit hoher Kohlekonzentration

Konstruktion und Betrieb eines neuen CWS Brenners mit hoher Kohlekonzentration sind von der University of Science and Technology Beijing im Detail beschrieben. Insbesondere wurden das Betriebsverhalten, Verbrennungsstabilität, Aufheizvorgang, CWS Düsenlebensdauer und deren Schadstoffemission untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Brenner in einem weiten industriellen Bereich eingesetzt werden kann. [28]

c) CWS Verbrennung in einem 65 t/h Ölbrenner

Die Zhejiang University hat eine Studie über CWS Verbrennung in einem umgerüsteten 65 t/h Ölbrenner durchgeführt. Es konnte eine CWS Beladung von bis zu 60 t/h bei einer Verbrennungseffizienz von 97 % erreicht werden. Die nationalen Abgasstandards konnten eingehalten werden. [29]

d) CWS/Schweröl Brenner

Die Maoming Thermal Power Plant hat einen Brenner für die Verbrennung von Schweröl und CWS untersucht. [30]

e) Zerstäubungsperformance einer CWS Düse

Die Zhongyuan University of Technology hat Untersuchungen über CWS Düsen bei einem CWS Massenstrom von 300 kg/h durchgeführt. Es wurden die Effekte der Düsenform auf die Partikelverteilung bei der Zerstäubung, die Einflüsse des Sauterdurchmessers und der Zerstäubungswinkel untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem kleinen Sauterdurchmesser die beste Zerstäubung erreicht werden kann. [31]

2.3 Kohle- Slurry Zerstäubung

Der Brennstoff wird in flüssiger Phase in die Brennkammer eingebracht und zerstäubt, um die Verbrennung zu verbessern. Die Verbrennung erfolgt dann in der gasförmigen Phase und hängt wesentlich von der Zerstäubung ab. Je feiner die Partikel in den Brennraum eingebracht werden, umso schneller läuft die Verbrennung ab und umso besser ist der Ausbrand. Der Zerstäubungsprozess läuft üblicherweise in einer turbulenten Umgebung ab. [32] In den folgenden Unterkapiteln werden die Grundlagen der Zerstäubung erklärt. Danach wird auf einzelne Zerstäuber und deren Düsenmaterial näher eingegangen.

2.3.1 Zerstäubungsmechanismen

Die Zerstäubung eines Flüssigkeitsstrahles kann in eine primäre und in eine sekundäre Zerstäubung unterteilt werden. Die primäre Zerstäubung ist die initiale Auftrennung des Flüssigkeitsstrahles in große und kleine Flüssigkeitsstrukturen in der Nähe der Einspritzdüse. Die sekundäre Zerstäubung ist die nachfolgende Auftrennung der Flüssigkeitsstrukturen in kleinere Tröpfchen, die einen Sprühnebel bilden. [32]

Zunächst werden die Auftrennungsmechanismen erklärt, wenn ein Flüssigkeitsstrahl in ein ruhendes Gas eingebracht wird. Dabei wird der Strahl instabil und bricht in Tropfen auf. Bei niedrigen Strahlgeschwindigkeiten bricht der Strahl infolge von hydrodynamischen Instabilitäten, die aufgrund von Oberflächenspannungen auftreten. Die Viskosität hat einen stabilisierenden Effekt und reduziert die Auftrennungsgeschwindigkeit. Wird die Reynoldszahl erhöht, wird der Strahl durch aerodynamische Kräfte wellig. Bei noch größeren Reynoldszahlen (ca. 10^5) wird der Strahl zerstäubt und bricht in Tropfen, die viel kleiner als der Strahldurchmesser sind. [33]

Nun wird eine technisch relevante Strahlauftrennungstechnik untersucht, bei der der Flüssigkeitsstrahl mit Hilfe eines coaxial schnelleren Gasstrahls aufgetrennt wird. Dabei treten fundamental unterschiedliche Auftrennungsmechanismen auf. Wenn das umhüllende schnellere Gas einen höheren Impulsfluss als der Flüssigkeitsstrahl aufweist, erfolgt die Auftrennung des Flüssigkeitsstrahles durch Übertragung von kinetischer Energie vom Gas auf die Flüssigkeit. In Abbildung 2-31 ist eine schematische Darstellung der Flüssigkeitsauftrennung mit den wichtigsten Geometrien abgebildet. Die intakte Strahllänge (L) ist die Länge des ungebrochenen Flüssigkeitsstrahles. [33]

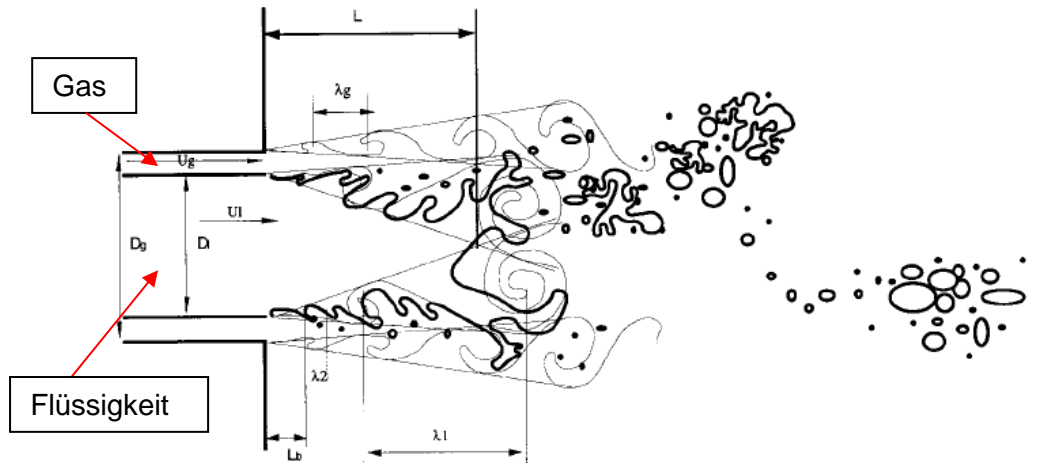


Abbildung 2-31: schematische Darstellung der Strahlauftrennung [33]

Die Weberzahl und die Ohnesorgezahl sind die wichtigsten Parameter bei der primären Zerstäubung. Die Weberzahl We ist das Verhältnis der deformierenden aerodynamischen Kräfte zur stabilisierenden Oberflächenspannung σ , wobei ρ_g die Dichte des Gases, D_0 der Durchmesser des Flüssigkeitsstrahles am Düsenaustritt, und u_g die Gasgeschwindigkeit und u_l die Geschwindigkeit der Flüssigkeit ist. Die Weberzahl berechnet sich nach Gl. 2-1. Die Ohnesorgezahl ist das Verhältnis der viskosen Kräfte zu den Oberflächenspannungskräften und berechnet sich nach Gl. 2-2. [34]

$$We = \frac{\rho_g \cdot D_0 \cdot (u_g - u_l)^2}{\sigma} \quad \text{Gl. 2-1 [34]}$$

$$Oh = \frac{\mu_l}{(\rho_l \cdot D_0 \cdot \sigma)^{0,5}} \quad \text{Gl. 2-2 [34]}$$

Bei Variation der Weberzahl stellen sich verschiedene Zerstäubungsmechanismen zwischen dem Gas und der Flüssigkeit ein. Es lassen sich folgende Typen bei der primären Auftrennung des Strahles unterscheiden. Diese sind in Abbildung 2-32 dargestellt [34]:

- Rayleigh Auftrennung
- Membran Auftrennung
- Fiber Auftrennung
- Zerstäubung

Die Rayleigh Auftrennung entsteht bei geringen Austrittsgeschwindigkeiten aus der Düse und es formt sich ein laminarer Flüssigkeitsstrahl. Bedingt durch Anfangsstörungen bilden sich entlang des Strahles rotationssymmetrische Schwingungen. Die Schwingungen werden vom

koaxialen Gasstrahl verstärkt und führen zur Abschnürung einzelner Tropfen. Die abgelösten Tropfen weisen ungefähr die doppelte Größe wie der Strahldurchmesser auf. [35] Die Membran Auftrennung entsteht bei steigender Weberzahl. Es kann das Entstehen von Bändern beobachtet werden. Aufgrund der kleinen Radien der Bögen verschwinden die Spitzen der Bänder und es formen sich Ausbeulungen. Der aerodynamische Druck vom Gasstrahl bläst die Bögen nach den Ausbeulungen in Taschen oder Membranen auf. [33] Bei der Fiber Auftrennung trennen sich dünne Flüssigkeitsfäden vom Strahl ab. Bei großer Gasgeschwindigkeit tritt die Zerstäubung auf, wobei alle Tropfen sehr fein aufgetrennt werden. [34] Eine genaue Beschreibung der Zerstäubungsmechanismen wurde von Lefebvre (1989) durchgeführt. [36]

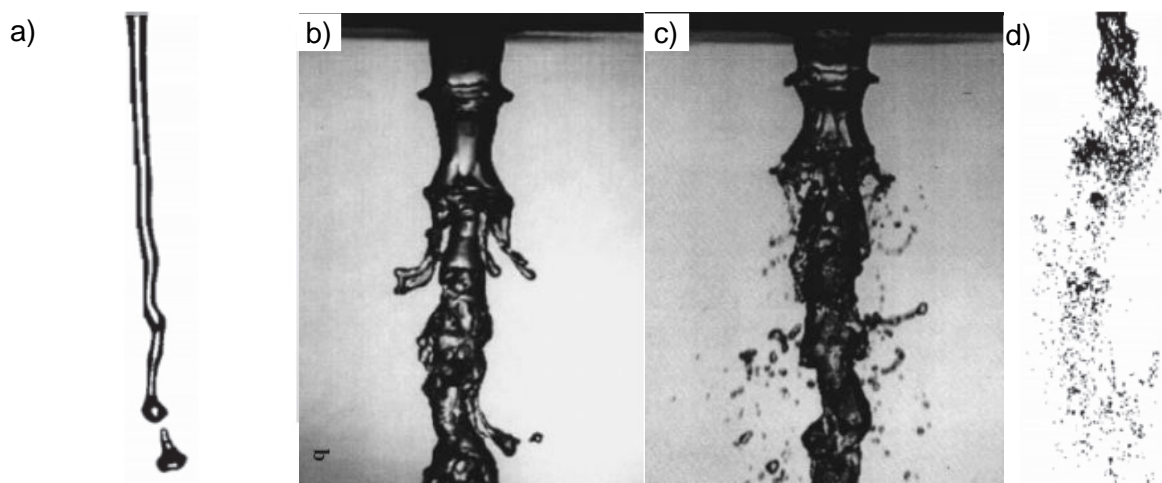


Abbildung 2-32: Auftrennungstypen bei koaxialen Luft-Wasser-Strahlen: a) Rayleigh Auftrennung [34] b) Membran Auftrennung [33] c) Fiber Auftrennung [33] d) Zerstäubung [34]

Die sekundäre Auftrennung lässt sich in eine Scher- Auftrennung und in eine turbulente Auftrennung unterteilen. Um eine Scher- Auftrennung handelt es sich, wenn ein Tropfen plötzlich einem Luftstrom mit konstanter Geschwindigkeit ausgesetzt ist und die Weberzahl einen kritischen Wert übersteigt. Die turbulente Auftrennung findet statt, wenn Flüssigkeitsstrukturen einem turbulenten Gas ausgesetzt sind und die turbulenten Spannungen größer als die Oberflächenspannung und die viskosen Kräfte sind. [33]

Weiters können aufgrund der Turbulenz einzelne Tropfen kollidieren und es besteht die Möglichkeit der Koaleszenz. Wenn zwei Tropfen miteinander kollidieren, entsteht zwischen den beiden Tropfen ein Luftpuffer, der den Koaleszenzvorgang hemmt. Wenn die kinetische Energie der Tropfen hoch genug ist, können sie den Puffer überwinden und es tritt Koaleszenz auf. [33]

2.3.2 CWS Zerstäubung

Die Zerstäubung von CWS wird anhand von Beispielen aus der Praxis erläutert.

a) Auftrennen und Zerstäuben eines runden CWS Strahles mit einem coaxialen Luftstrahl

Die Entwicklung von Hochgeschwindigkeitskameras hat die Untersuchung von Zerstäubungsprozessen wesentlich vereinfacht. Somit ist es möglich eine morphologische Analyse über die Zerstäubung von coaxialen Wasser- Luft- Strahlen durchzuführen. Das Key Laboratory of Coal Gasification and Energy Chemical Engineering of Ministry of Education von der East China University of Science and Technology hat eine Studie über das Auftrennen und Zerstäuben von CWS mit Luft bei atmosphärischem Druck und bei Raumtemperatur durchgeführt [34]. Die primäre Auftrennung wurde mit Versuchen erforscht. Dabei wurden die Morphologie der Zerstäubung, die intakte Strahllänge und die Schwingungsfrequenz gemessen. Die Weberzahl und die Ohnesorgezahl werden als die beiden wichtigsten Kennzahlen bei der Zerstäubung angesehen. In Abbildung 2-33 sind Bereiche der Auftrennungstypen in Abhängigkeit der beiden Kennzahlen eingezeichnet. Weiters wurde mit den Kennzahlen versucht, eine vereinfachte mathematische Formulierung zu finden, welche die intakte Strahllänge und die Schwingungsfrequenz berechnet. Die wichtigsten Ergebnisse der Studie sind [34]:

- Es wird bei Kohle- Wasser- Slurry keine Membran Auftrennung sondern eine Rayleigh Auftrennung beobachtet.
- Die intakte Strahllänge konnte als dimensionslose Größe berechnet werden. Sie steigt mit dem Impulsflussverhältnis sowie der Weberzahl und fällt mit der Ohnesorgezahl.
- Bei hohen Luftgeschwindigkeiten oszilliert ein Kohle- Wasser- Slurry Strahl, wenn er eine hohe Viskosität besitzt. Die Frequenz steigt mit der Luftgeschwindigkeit. Es konnte eine Formel gefunden werden, die gut mit den Messdaten übereinstimmt.

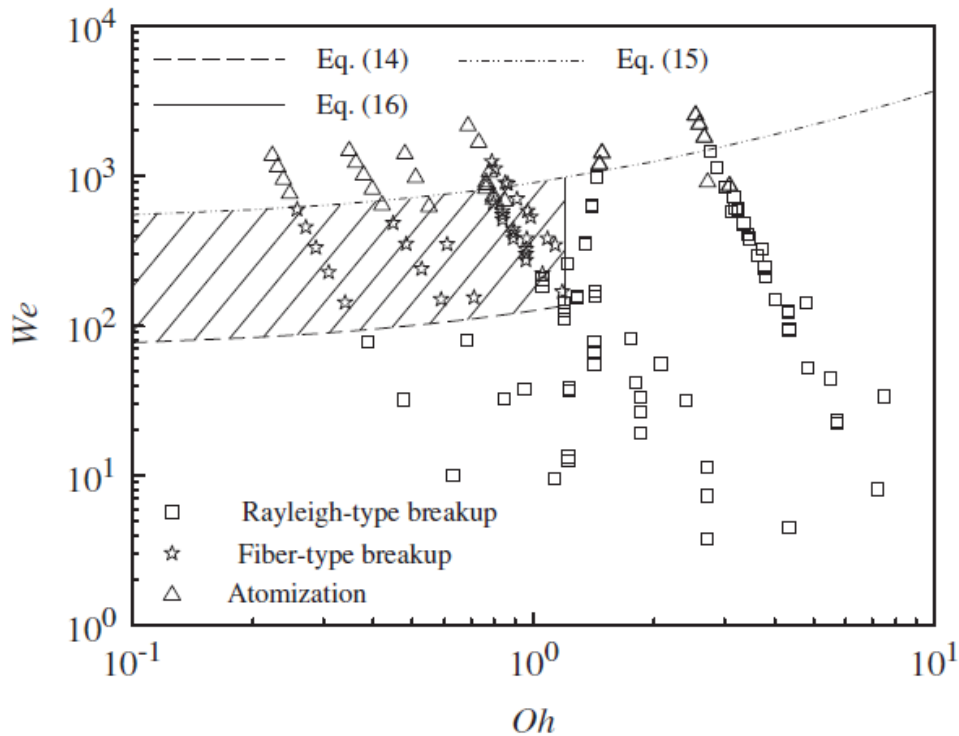


Abbildung 2-33: Auftrennungsmechanismen in Abhängigkeit der We - und Oh -Zahl [34]

b) Zerstäubungsperformance einer Petrolkoks- und Kohle- Wasser- Slurry

Die Carleton University und die CanmetENERGY haben Zerstäubungscharakteristiken von Petrolkoks und Kohle- Wasser- Slurries untersucht [37]. Der Hintergrund der Arbeit war, die Vergasungsgeräte bei der IGCC- Technologie mit den gewonnenen Zerstäubungsparametern weiterzuentwickeln. Als Zerstäuber wurde ein Drall- Zerstäuber verwendet, der intern Slurry mit Stickstoff mischt. Die geometrischen Eigenschaften spielen bei der Zerstäubung eine große Rolle und wurden daher eingehend untersucht. Die wichtigsten Parameter sind der Sprühwinkel, die Tropfenviskosität, die Verteilung der Tropfengröße und das Design des Vergasungsgerätes. [37]

Als Messgeräte wurden ein Phasen Doppler Anemometer, das gleichzeitig die Geschwindigkeit und die Tropfengröße misst, sowie die Mie-Streuungstechnik, welche die Asymmetrie des Strahles misst, verwendet. Der Düsenstrahlwinkel hängt hauptsächlich von der Geometrie der Düse, der Reynoldszahl und dem Dichteverhältnis der Fluide ab. Zur Strahlwinkelbestimmung wurde die LSI Technik verwendet. Die LSI Bilder deuten auf eine Abweichung der Strahlachse zur Düsenachse hin, die in Abbildung 2-34 gezeigt ist. [37]

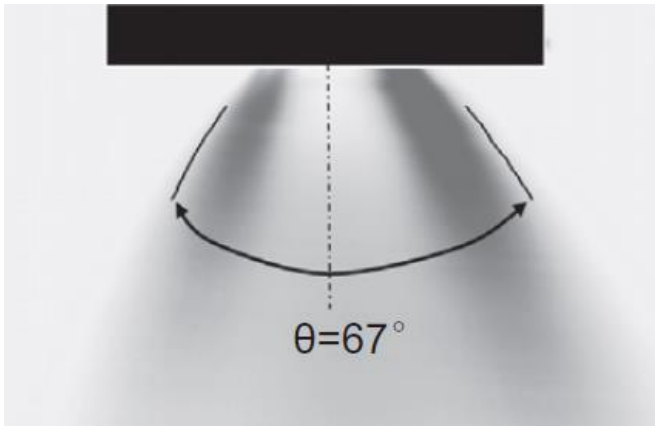


Abbildung 2-34: CWS LSI- Bild [37]

Abbildung 2-35 zeigt, dass die Geschwindigkeitsverteilung, mit zunehmenden Abstand vom Düsenaustritt einer Gaußschen Verteilung ähnelt. Abbildung 2-36 zeigt die radiale Verteilung der mittleren Tropfendurchmesser. Tropfen mit kleinen Durchmessern befinden sich nahe der Strahlachse. Je größer die Tropfen werden, umso weiter entfernen sie sich von der Strahlachse. [37]

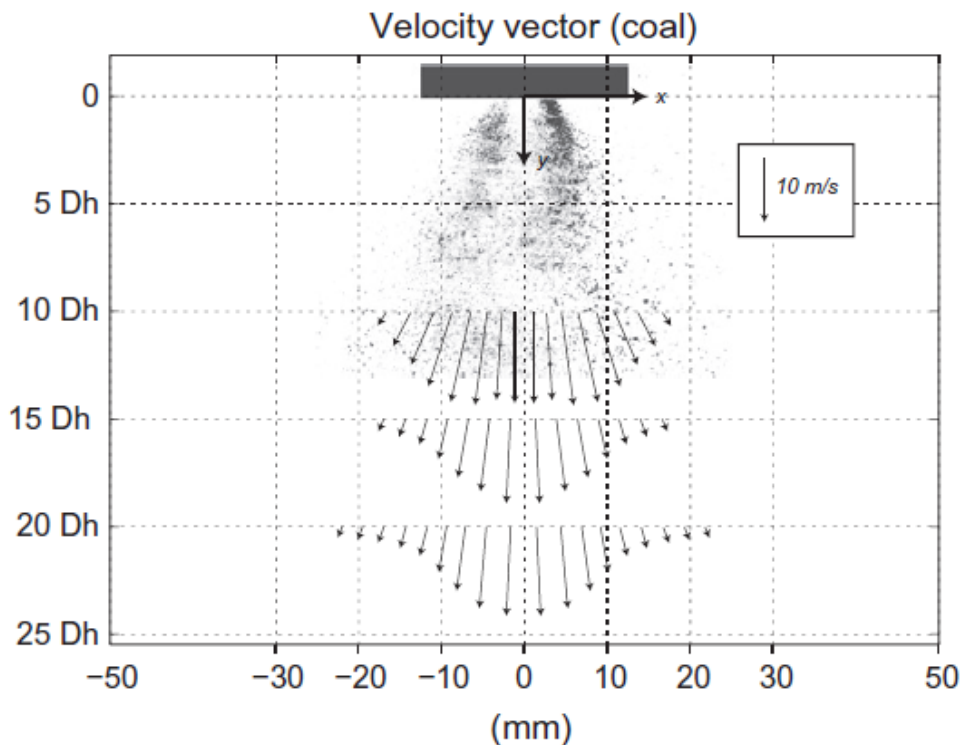


Abbildung 2-35: CWS Geschwindigkeitsfeld [37]

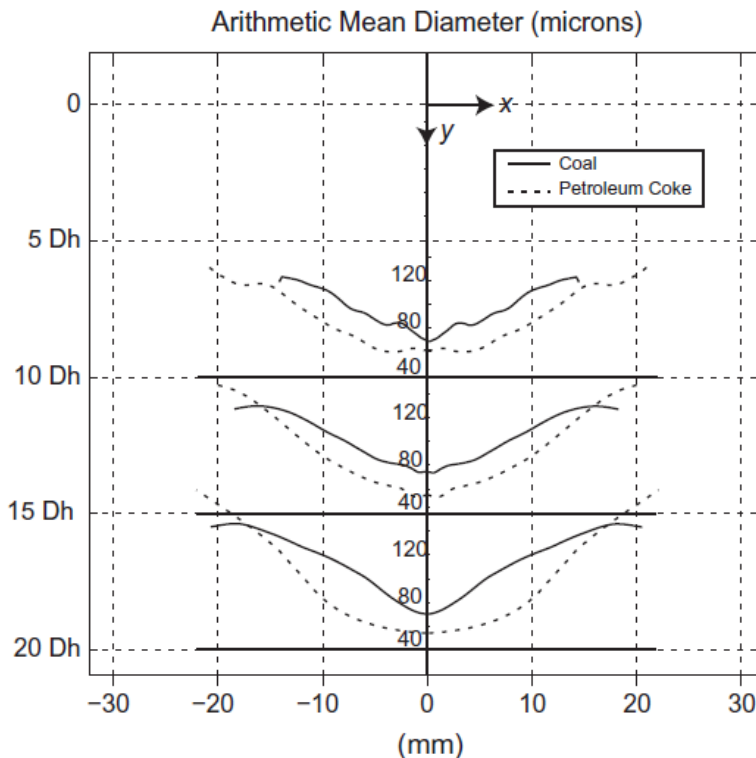


Abbildung 2-36: Radiale Verteilung der Tropfendurchmesser [37]

c) Zerstäubung einer Petrolkoks- Schlamm- Slurry mit einem schäumenden Zerstäuber

Die School of Energy and Environment von der Southeast University hat Untersuchungen über die Zerstäubung einer Petrolkoks- Schlamm- Slurry durchgeführt [38]. Die Slurry ist ein viskoelastisches nicht newtonsches Fluid und besteht aus Petrolkoks, Abwasserschlamm, Wasser und chemischen Additiven. Im Detail wurden die Effekte des Luftdrucks bei der Luftzufuhr, das Luft/Flüssigkeitsverhältnis, der Düsenaustrittsdurchmesser und die rheologischen Eigenschaften untersucht. Die Ergebnisse wurden mit einer Petrolkoks- Wasser Slurry verglichen. Der Sauterdurchmesser SMD wurde gewählt, um die Zerstäubungsperformance zu charakterisieren. Er ist definiert als die durchschnittliche Partikelgröße, welche das gleiche Verhältnis von Volumen zu Oberfläche aufweist, wie das tatsächliche Partikel. Bei zu grober Zerstäubung kann der Verbrennungsprozess nicht mehr vollständig abgeschlossen werden. [38]

Als Zerstäuber wurde eine schäumende Düse verwendet, die in Abbildung 2-37 dargestellt ist. Die Luft gelangt über eine poröse Schicht in die Slurry. Durch die Zugabe von Luft entsteht eine zwei- Phasen- Blasenströmung. Die Blasen verlassen die Düse mit hoher Energie und platzen nach dem Austritt aus der Düse auf. Es entsteht eine feine Zerstäubung. Petrolkoks hat eine stark wasserabweisende Oberfläche. Deshalb tritt während des Zerstäubungsprozesses eine Separation der Kohlepartikel und der Flüssigkeit auf, die den SMD senkt. Der Abwasserwasserschlamm hat eine verzögernde Wirkung auf die Separation und es wird die

Zerstäubungszeit verlängert. Durch Koaleszenzvorgänge können die Tropfendurchmesser mit steigendem Düsenabstand wieder zunehmen. Es zeigt sich, dass kleinere Düsendurchmesser und hohe Luftdruckzufuhr zu kleineren Tropfen führen, weil der Slurry Massenstrom gesenkt wird und dadurch die Blasenströmung verbessert wird. Der Abwasserschlamm hat eine dämpfende Wirkung auf diesen Effekt. [38]

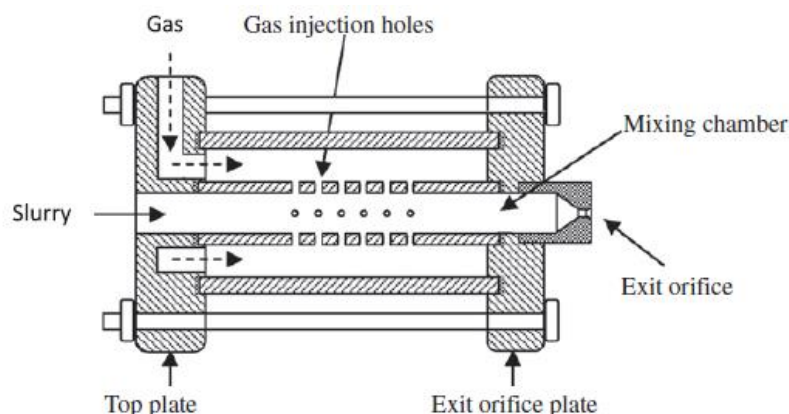


Abbildung 2-37: schematische Darstellung einer schäumenden Düse [38]

2.3.3 Düsenmaterial

Die Düse ist das Hauptelement bei der Zerstäubung. Die Umgebungstemperaturen der Düse können Temperaturen von bis zu 1000 °C erreichen. Deshalb handelt es sich bei der Düse um das am höchst beanspruchte Bauteil in Kesseln. Daher muss das Material der Düse eingehend untersucht werden. [39]

a) Oberflächenabnutzung von CWS Düsen in industriellen Kesseln

Die Hunan University of Technology und die Shandong University haben die Abnutzungsmechanismen an Düsen bei der CWS Zerstäubung untersucht [40]. Abbildung 2-38 zeigt die schematische Darstellung des Zerstäubers und die Geometrie der Düse. Als Düsenmaterialien wurden $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W}, \text{Ti})\text{C}$ Keramik, WC/Co Hartmetall und 1Cr18Ni9Ti rostfreier Stahl untersucht. [40]

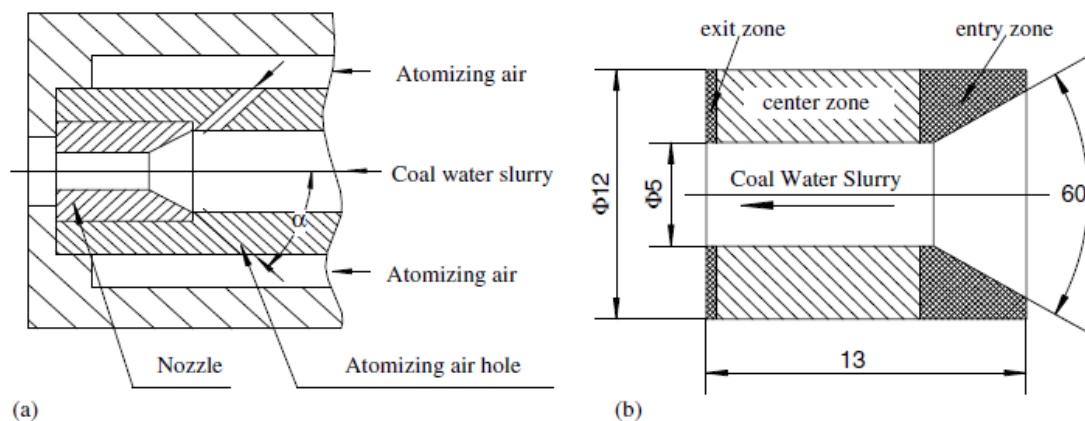


Abbildung 2-38: a) Zerstäuber b) Düsengeometrie [40]

Es zeigt sich, dass die Hauptabnützungsmechanismen bei Keramik Spröbruch, Polier- Effekte, thermische Rissbildung und Absplitterung sind. Thermische Rissbildung tritt am Düsenaustritt auf, weil dort der Temperaturgradient aufgrund der geringen Wärmeleitung von Keramik sehr groß ist. Es treten Eigenspannungen im Bauteil auf, die zur Rissbildung führen. Die Folge ist, dass große Teile von der Oberfläche des Düsenaustrittes absplittern. [40]

Die Hauptabnützungsmechanismen von Hartmetall sind Spröbruch und Polier- Effekte. Cobalt hat im Hartmetall die Aufgabe, die Wolframcarbitkörner zu einem Gefüge zu verbinden. Der große Aufprallwinkel der abrasiven Partikel in der CWS führt in der Düseneingangszone zu einer stetigen Absplitterung des Cobalt- Metallbinders. Durch den fehlenden Metallbinder werden die freien Wolframcarbitkörner aus dem Gefüge herausgelöst. [40]

Bei rostfreiem Stahl sind die abrasiven Partikel der CWS härter als der Stahl. Deshalb wird die Oberfläche des Düsen Eintrittes plastisch deformiert. Die Mitte- und Austrittsoberfläche werden zerkratzt und durch Micro- Abtragungen abgetragen. Der Abnützungswiderstand bei rostfreiem Stahl ist gering und deshalb wächst der Düsendurchmesser stark mit der Betriebsdauer an. Dies wird in Abbildung 2-39 dargestellt. [40]

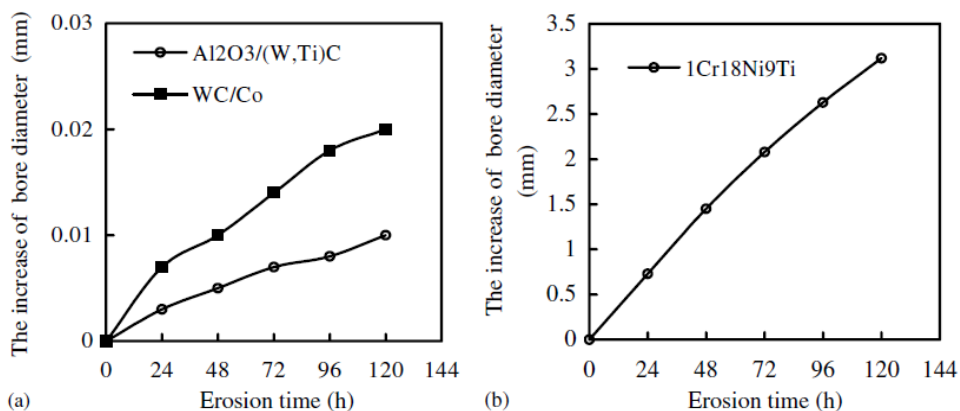


Abbildung 2-39: Vergrößerung des Düsenlochdurchmessers in Abhängigkeit der Betriebsdauer [40]

Abbildung 2-40 zeigt die Abnützung des Düsenlochdurchmessers nach 120 Stunden Betriebsdauer. Der Durchmesser der Keramik- oder Hartmetalldüse wachsen deutlich langsamer als der von rostfreiem Stahl.

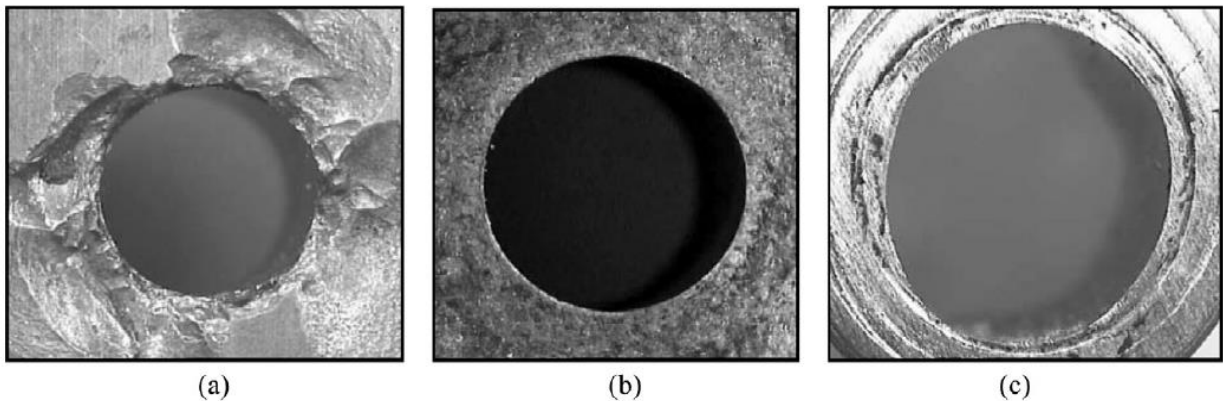


Abbildung 2-40: Düsenabnutzung nach 120h a) $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ b) WC/Co c) $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ [40]

b) Abnutzung von CWS $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W}, \text{Ti})\text{C}$ -Keramikdüsen

Die Shandong University hat daher die Abnutzungsmechanismen von Düsen in CWS Industriekessel untersucht [39]. Als Düsenmaterial wurde $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W}, \text{Ti})\text{C}$ Keramik gewählt. Die Erosionsrate der Düse wurde gemessen und die abgenutzte Oberfläche wurde mit einem Rasterelektronenmikroskop (SEM) untersucht. Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode wurde die Temperatur, der Temperaturgradient und Thermospannungen in der Düse berechnet. Ergebnisse zeigen, dass sich der größte Temperaturgradient am Düsenaustritt befindet und es daher dort zu Sprödbruch kommt. Die Untersuchung der Oberfläche, nach einer Betriebszeit von 120 h, mit dem Elektronenmikroskop zeigt, dass in der Mitte der Düse Poliereffekte der dominierende Abnutzungsmechanismus sind, da die Keramikoberfläche härter als Quarz- oder Eisenpartikel in der CWS ist. Die Gefügestruktur ist klar zu erkennen. Die hellen Körner sind $(\text{W},\text{Ti})\text{C}$, die schwarzen Al_2O_3 . Am Düsenaustritt kann die Rissbildung gut erkannt werden und es kommt zu größeren Absplitterungen. Die SEM Aufnahmen sind in Abbildung 2-41 abgebildet. [39]

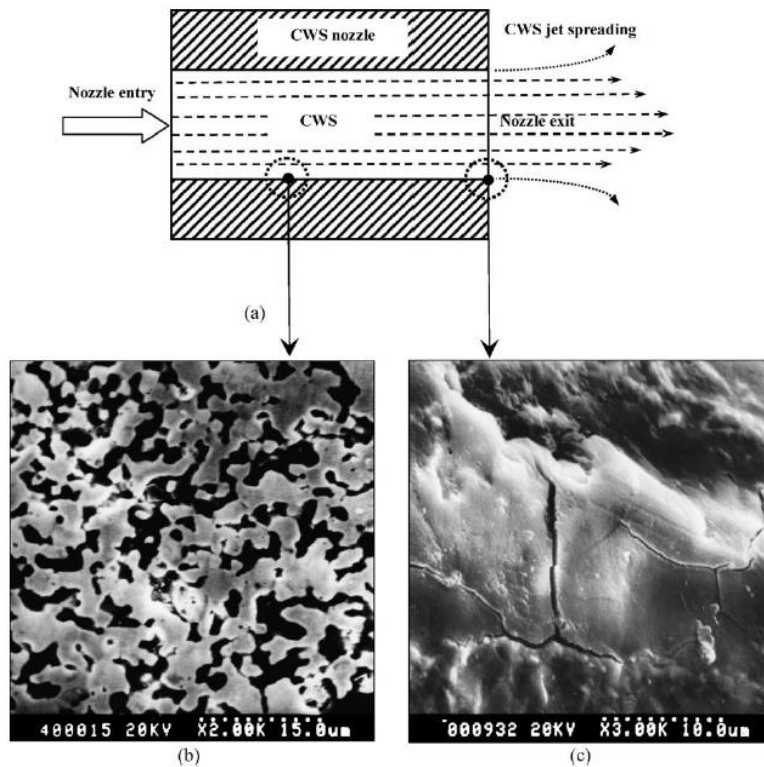


Abbildung 2-41: SEM Aufnahme der Düsenoberfläche nach 120 Betriebsstunden [39]

c) Geschichtete Keramikdüse

Die Shandong University und die Xiangtan University haben das Erosions- und Abnutzungswiderstandsverhalten von Düsen in industriellen CWS Kesseln untersucht [41]. Die limitierenden Faktoren bei Keramikdüsen sind die hohen Temperaturgradienten und Thermospannungen am Düsenaustritt. Deswegen wurden geschichtete Keramikdüsen mit verschiedenen Dickenverhältnissen untersucht und mit einer spannungsfreien Referenzkeramikdüse verglichen. Als Keramikmaterial wurde $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ und $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ verwendet. [41]

Durch das Paaren von unterschiedlichen Keramikwerkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten werden oberflächennahe Druckeigenstressungen erzeugt. Druckeigenstressungen führen zu einer Steigerung der Oberflächenhärte und der Bruchzähigkeit. Ein Versuch zeigt, dass unter gleichen Testbedingungen der Lochdurchmesser der geschichteten Keramikdüse weniger stark als bei der Referenzdüse zunimmt. Das ist in Abbildung 2-42 nach 120 Betriebsstunden dargestellt. [41]

Zur Bestimmung des Temperaturgradienten und der Thermospannungen, die am Düsenaustritt am höchsten sind, wurde eine dreidimensionale Finite Elemente Analyse durchgeführt. Es zeigt sich, dass der Temperaturgradient und die Thermospannungen bei geschichteten

Keramikdüsen wesentlich niedriger sind. Dadurch kann die Rissbildung am Düsenaustritt gesenkt werden. [41]

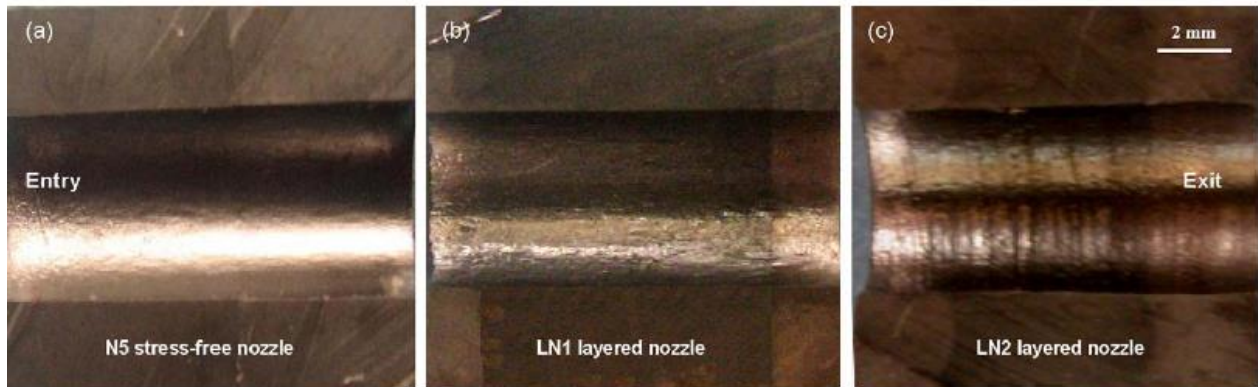


Abbildung 2-42: Abnutzung in Schnittdarstellung einer a) spannungsfreien Düse b) c) geschichteten Düsen [41]

2.4 Kohle- Slurry Verbrennung mit Reinsauerstoff und mit Sauerstoff angereicherter Luft

In diesem Unterkapitel wird die Verbrennung von CWS mit Sauerstoff angereicherter Luft und Reinsauerstoff behandelt. Zunächst wird die Thematik anhand der Kohleverbrennung mit Reinsauerstoff eingeleitet. Danach wird auf die Verbrennung von CWS näher eingegangen.

2.4.1 Reinsauerstoffverbrennung von Kohle

Die Universität Stuttgart hat die Kohleverbrennung mit Reinsauerstoff untersucht [42]. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag bei der Verbrennung von pulverisierter Kohle mit rezirkulierendem Abgas. Dabei wurde auch ein 3- dimensionales CFD Verbrennungsmodell erstellt. Hintergrund der Arbeit war es, dass der globale CO_2 Ausstoss nur durch eine Verbesserung der Verbrennungseffizienz oder durch eine CO_2 Separation im Abgas erfolgen kann. Durch eine Verbrennung mit Sauerstoff erhöht sich der CO_2 Gehalt im Abgas, dadurch lässt sich eine größere Reduktion der CO_2 Emissionen bei der CO_2 Speicherung erzielen. Bei der Verbrennung mit Sauerstoff ergeben sich folgende Probleme: rezirkulierendes Abgasverhältnis, Zündung und Stabilität der Flamme, Wärmeübertragung, Verbrennungscharakteristik, Schadstoffbildung und Schadstoffreduktion. Der Wärmeübergang wird durch die Verbrennung mit Sauerstoff verschlechtert, da aufgrund des sinkenden Abgasmassenstroms und der Kesselaustrittstemperatur, der konvektive Wärmeübergang sinkt. Mit Hilfe des rezirkulierenden Abgases kann eine gewünschte Verbrennungstemperatur und Wärmeübertragung eingestellt werden. Ein großer Vorteil der Verbrennung mit Sauerstoff ist, dass die NO_x Emissionen durch den Mangel an Stickstoff in der Verbrennungssphäre gesenkt werden können. Weiters lässt sich ein besserer Ausbrand der Kohle erzielen. Ein Nachteil sind die steigenden Konzentrationen von HCN , NH_3 , SO_2 und SO_3 im Rauchgas (totale Menge der Schadstoffe sinkt), dies führt bei erhöhtem Wassergehalt zu korrosiven Effekten. In

Abbildung 2-43 ist eine Prinzipdarstellung einer Reinsauerstoffverbrennung abgebildet. Der Sauerstoff wird in einer Separationseinheit (a) von der Luft abgetrennt und gelangt in den Kessel (b). Das Abgas wird gereinigt (c, e) und ein Teil des Abgases rezirkuliert (d) in den Kessel zurück. Weiters besteht die Möglichkeit einer Wasser- und CO₂-Abscheidung (f, g). [42]

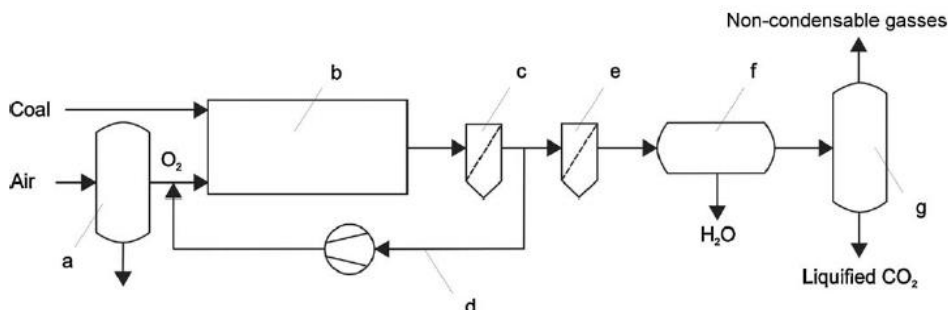


Abbildung 2-43: Prinzipdarstellung einer Reinsauerstoffverbrennung [42]

2.4.2 CWS Reinsauerstoff Verbrennung

THE BABCOCK & WILCOX COMPANY hat ein Patent zur Verbrennung von CWS für umgerüstete Öl- und Gas befeuerte Industrie- und Kraftwerkskessel im Jahr 1985 angemeldet [43]. Als Zerstäubungsmedien dienen Reinsauerstoff, Sauerstoff angereicherte Luft und ein Wasserstoff- Sauerstoff Gemisch. Aus früheren Studien wurden die Probleme bei der Zündung von CWS erkannt, die durch den Temperatur senkenden Effekt bei der Wasserverdampfung auftritt. Ziel war es, eine stabile Zündung für CWS in einem kalten Kessel bei minimaler Luft und Kesselvorheizung zu erreichen. Eine Möglichkeit ist eine Steigerung der Wärmeabgabe während der Initialzündung. Das kann durch eine Reinsauerstoffzerstäubung erreicht werden. Bei der Reinsauerstoffverbrennung ist eine adiabate Verbrennungstemperatur bis zu 3870 °C erreichbar. Die Verbrennungsgeschwindigkeit steigt, weil die Diffusion von Sauerstoff zu den Kohlepartikeln wegen des höheren Sauerstoff Partialdrucks ansteigt. Außerdem wird der Abgasmassenstrom bei der Reinsauerstoff Verbrennung deutlich reduziert. [43]

In Abbildung 2-44 ist der CWS Brenner dargestellt. Während des Aufheizvorganges wird die CWS mit Reinsauerstoff (37) aus dem Sauerstoffspeicherbehälter (36) zerstäubt. Die Zündung erfolgt mit Hilfe eines elektrischen Funkens (46), der einen Sekundärbrennstoff (44) entzündet. Durch die hohe Sauerstoffkonzentration erhöht sich die Wärmeabgabe in der Zündungszone und es wird eine Kettenreaktion im Primärbrennstoff ausgelöst. Der Primärbrennstoff brennt auch nach Abschalten der Zündquelle weiter. In Abbildung 2-45 und Abbildung 2-46 ist ein Zündvergleich zwischen Luftverbrennung und Reinsauerstoffverbrennung dargestellt. Die Gründe für die verbesserte Zündung sind die gesteigerte Flammentemperatur von ca. 2200 °C auf ca. 3900 °C und die gesteigerte Verbrennungsgeschwindigkeit, die durch eine verbesserte Diffusion des Sauerstoffes zu den Kohlepartikeln zustande kommt. Nachdem der Kessel aufgewärmt ist, wird auf die normale Zerstäubungsmethode (Luft oder Dampf) mit einem 3-

Wegeventil (40) gewechselt. Die Zerstäubung mit Sauerstoff angereicherter Luft funktioniert ähnlich. Zur Einstellung des gewünschten Mischungsverhältnisses wird eine Mischkammer (41) verwendet. [43]

Die Herstellung von Wasserstoff und Sauerstoff erfolgt mittels Elektrolyse von Wasser. Die Speicherung erfolgt in Druckbehältern. Es zeigt sich, dass ein Wasserstoff- Sauerstoff Gemisch sehr effektiv bei der Zündung ist, da der Wasserstoff die Verbrennung unterstützt. [43]

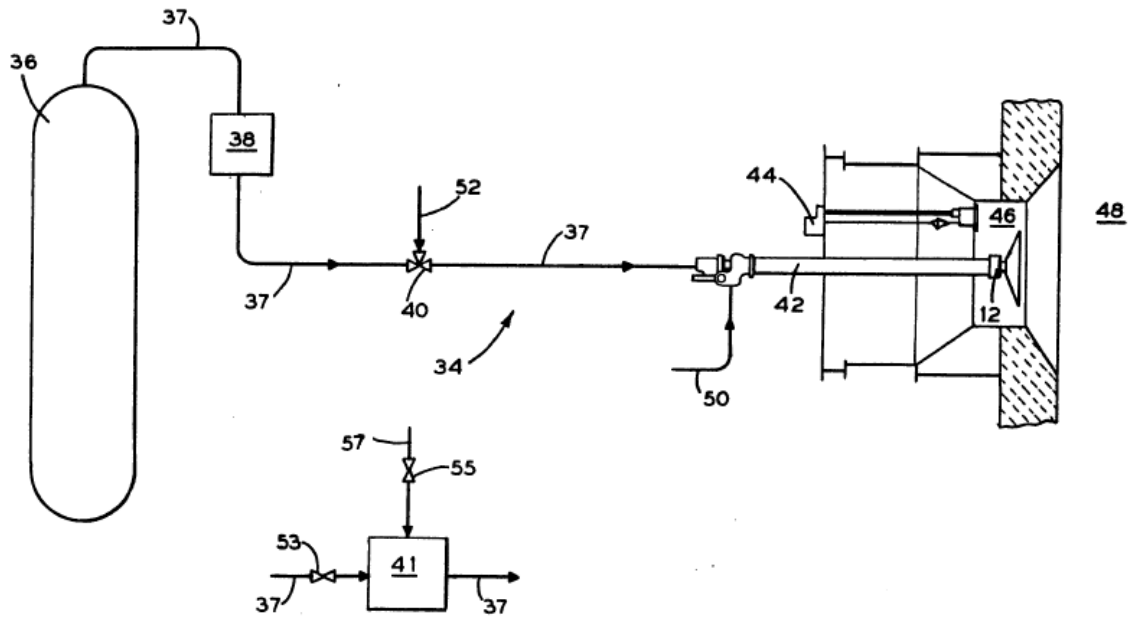


Abbildung 2-44: CWS Brenner [43]

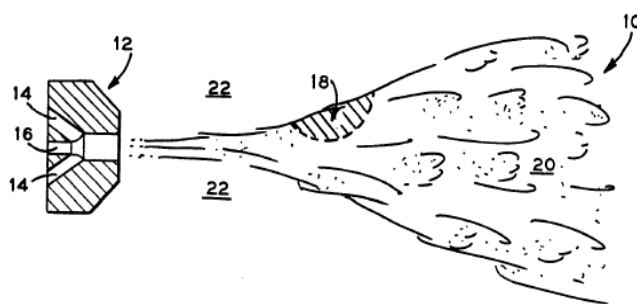


Abbildung 2-45: Luftverbrennung [43]

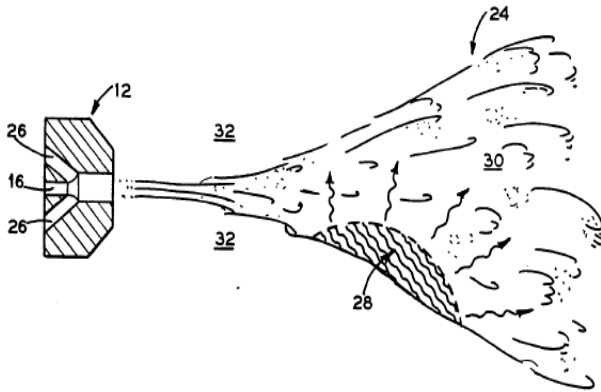


Abbildung 2-46: Reinsauerstoff Verbrennung [43]

2.4.3 CWS Verbrennungsbeispiele in Sauerstoff angereicherter Luft

a) Flüssigbrennstoff Verbrennungsapparat

Die OSAKA GAS CO., LTD hat ein Patent über Verbrennungsapparate für die Verbrennung von flüssigen Brennstoffen mit hoher Viskosität (z.B.: Schweröl, CWS) im Jahr 1983 verfasst [44]. Der Verbrennungsvorgang wird mit Sauerstoff angereicherter Luft (23- 31 Vol% Sauerstoff) durchgeführt, die mit Hilfe einer permselektiven Membrane erzeugt wird. In dem Patent wurden drei Verbrennungsvarianten präsentiert. [44]

In Abbildung 2-47 wird der Flüssigbrennstoff (3) mit Hilfe eines gasförmigen Brennstoffes (6) (z.B.: Stadtgas) zerstäubt. Als Primärluft dient Sauerstoff angereicherte Luft (9), als Sekundärluft (12) wird atmosphärische Luft verwendet. Die Primärluft (16) wird mit einem Wärmetauscher (14) vor der Membrane (15) vorgewärmt, um eine höhere Sauerstoffkonzentration in der Luft zu erreichen. Die hohe Verbrennungstemperatur, die wegen der mit Sauerstoff angereicherten Primärluft entsteht, erhöht den thermischen Wirkungsgrad, die Bildung von NO_x im Abgas erhöht sich ebenfalls. [44]

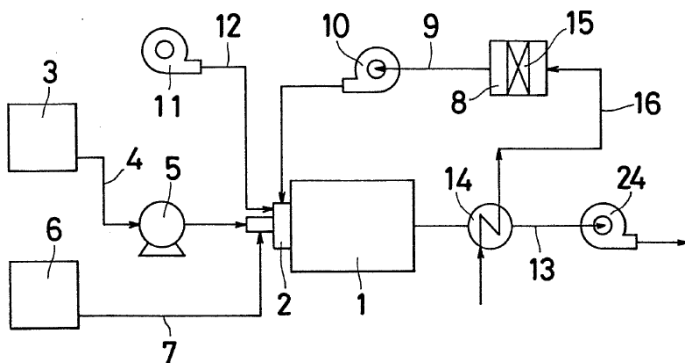


Abbildung 2-47: Brenner für Flüssigbrennstoff mit Sauerstoffanreicherung [44]

In Abbildung 2-48 ist ein Verbrennungsapparat mit drei Kanälen dargestellt. Im ersten Kanal (I) befindet sich der flüssige Brennstoff, der mit Hilfe der Sauerstoff angereicherten Primärluft im zweiten Kanal (II) zerstäubt wird. Im dritten Kanal (III) befindet sich atmosphärische Sekundärluft. Mit diesem Verfahren lassen sich sehr hohe Verbrennungstemperaturen verwirklichen. [44]

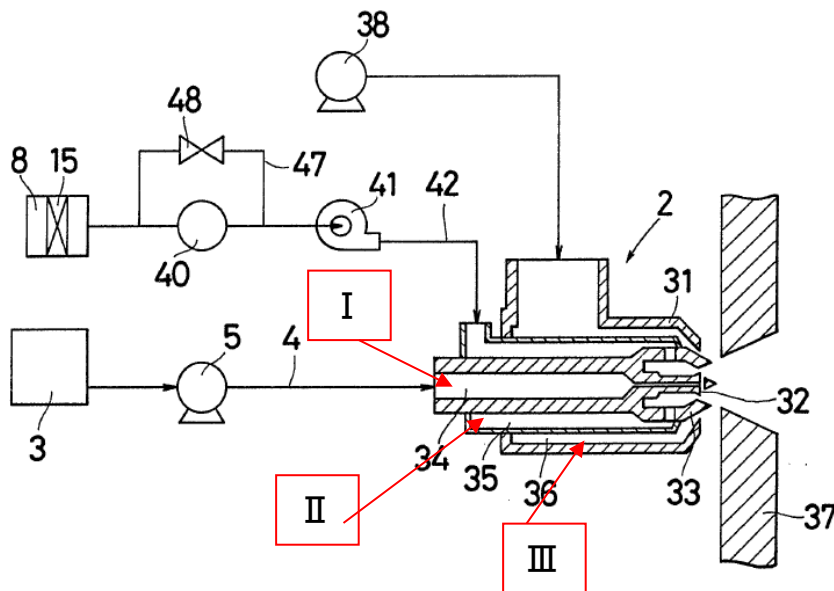


Abbildung 2-48: Brennervariante für Flüssigbrennstoff mit Sauerstoffanreicherung [44]

b) Zündverzugszeit und Kohlenstoffausbrand der CWS mit Sauerstoff angereicherter Luft

Die Firma AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC. hat ein Patent zur Verbesserung von CWS Verbrennung mit Sauerstoff angereicherter Luft im Jahr 1985 verfasst [45]. Die Verbrennung wurde bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen, die zwischen 21- 28 Vol% variierten, untersucht. Der Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Zündverzugszeit in der Brennkammer und den Kohlenstoffausbrand im CWS wurde untersucht. Die Zündverzugszeit beeinflusst die Stabilität der Flamme wesentlich und dauert bei CWS ca. 4 bis 8 Millisekunden. Je länger sie dauert desto schlechter ist die Flammenstabilität. Die Verbrennung wurde bei einer der CWS mit 50- 75 % Kohleanteil und mit 20 % Luftüberschuss untersucht, die mit einem Primärluftstrom (15 %) und Sekundärluftstrom (85 %) zugeführt wird. Es zeigt sich, dass sich sowohl die Zündverzugszeit, als auch der Kohlenstoffausbrand mit zunehmender Sauerstoffkonzentration verbessern. Der Sauerstoff muss an der richtigen Position zugeführt werden, sonst verschlechtert sich der Effekt. Die Sauerstoff angereicherte Luft sollte mit der Primärluft zugeführt werden. In Abbildung 2-49 ist der CWS Brenner und die Flamme mit der Zündverzugszeit schematisch dargestellt. [45]

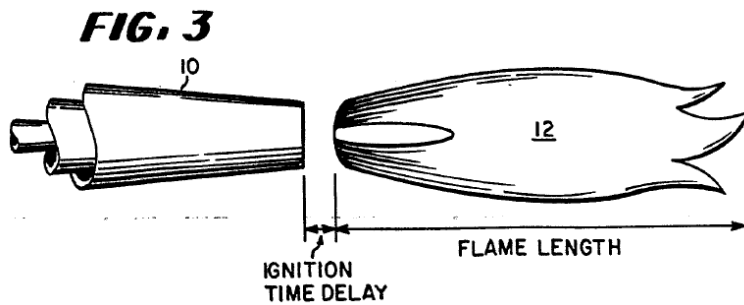


Abbildung 2-49: Zündverzugszeit [45]

c) CWS Brenner mit Sauerstoffanreicherung

Die Firma Air Products and Chemicals, Inc. hat im Jahr 1990 ein Patent über einen CWS Brenner mit Sauerstoffanreicherung verfasst [46]. Bei der Sauerstoffanreicherung in einem CWS Brenner treten mehrere Probleme auf [46]:

- Ein großes Problem bei der CWS Verbrennung ist die Stabilität der Flamme. Die Flamme kann weggeblasen werden, wenn bei sehr hohen Axialgeschwindigkeiten der Luft noch zusätzlich Sauerstoff zugeführt wird. Daher kommt es bei großen Sauerstoffmengen zu einer Destabilisation der Flamme.
- Die Sauerstoffanreicherung sollte nicht in direkten Kontakt mit der Düse kommen, da sehr hohe Temperaturen entstehen und der Werkstoff geschädigt werden kann.

In Abbildung 2-50 wird CWS mit Luft zerstäubt. Leitschaufeln (38) sind am Umfang einer hohlen Diffusorplatte (36) verteilt befestigt, durch die Leitschaufelhinterkanten tritt Sauerstoff aus. Die Leitschaufeln sind gekrümmt, ein Teil der Primärluft und des Sauerstoffs erfahren dadurch einen Drall. Es wird eine gute Durchmischung des Brennstoffes und der Luft erreicht, dadurch kann die Flammenstabilität verbessert werden. Außerdem wird der Sauerstoff sehr nahe an den Brennstoffstrahl herangeführt, bläst aber die Flamme nicht weg und kommt nicht direkt mit der Düse in Kontakt. [46]

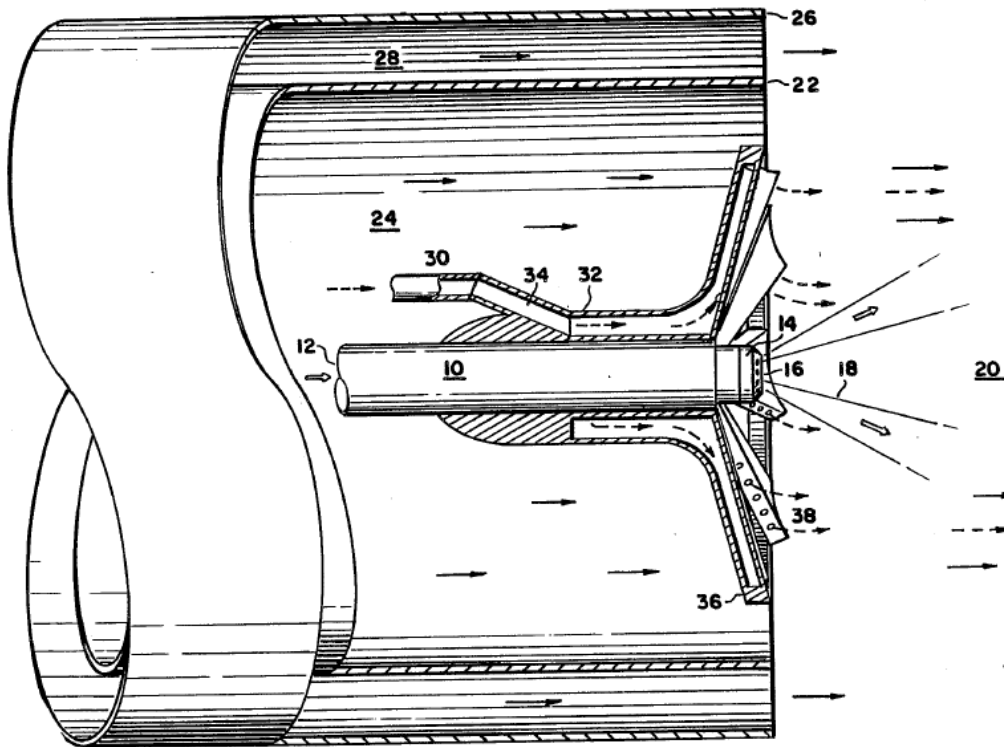


Abbildung 2-50: Drallbrenner mit Sauerstoff angereicherter Verbrennungsluft [46]

3 KOHLE- WASSER- SLURRY VERBRENNUNGSRECHNUNG

Um die Abhängigkeiten der Betriebsparameter untereinander zu erläutern, wurde eine Verbrennungsrechnung von CWS durchgeführt. Insbesondere sollen die Einflüsse des Wassergehaltes der CWS und der Sauerstoffgehalt des Oxidators auf die Verbrennungstemperatur untersucht werden. Die CWS Verbrennung wurde in Microsoft Excel 2010 berechnet. Die Eingabeparameter in die Verbrennungsrechnung waren die Kohlezusammensetzung, der Wassergehalt der Slurry, das Luftverhältnis und die Zusammensetzung des Oxidators. Berechnet wurden die Rauchgaszusammensetzung und die adiabate Verbrennungstemperatur.

Die Slurry setzt sich aus Kohle und Wasser zusammen. Die für die Berechnung verwendete typische Kohlezusammensetzung setzt sich aus Kohlenstoff c, Schwefel s, Stickstoff n, Wasserstoff h und Sauerstoff o zusammen und ist in Tabelle 3-1 dargestellt. Mit der angeführten Kohlezusammensetzung, einem typischen Wassergehalt von beispielsweise 40 wt% und einem Aschegehalt von 10,5 wt% lässt sich die Zusammensetzung der Slurry, die in Tabelle 3-2 angegeben ist, berechnen. Nach der Verbrennung bleiben ca. 10,5 wt% Asche übrig.

Tabelle 3-1: Kohlezusammensetzung [47]

c	s	n	h	o
73,6 wt%	1,1 wt%	0,5 wt%	5,1 wt%	19,7 wt%

Tabelle 3-2: typische Slurry- Zusammensetzung bei 40wt% Wasser

c	s	n	h	o	w	a
36,4 wt%	0,54 wt%	0,24 wt%	2,5 wt%	9,75 wt%	40 wt%	10,5 wt%

Der Heizwert der Slurry berechnet sich nach der Näherungsgleichung von Boie nach Gl. 3-1. In Abbildung 3-1 ist der Heizwert von CWS in Abhängigkeit des Wassergehaltes dargestellt. Der Heizwert H_u der CWS nimmt mit zunehmendem Wassergehalt linear ab. Ab einem Wassergehalt von ca. 82,5 wt% wird der Heizwert negativ.

$$H_u = 34835 \cdot c + 93870 \cdot h + 6280 \cdot n + 10465 \cdot s - 10800 \cdot o - 2440 \cdot w \quad \text{Gl. 3-1 [48]}$$

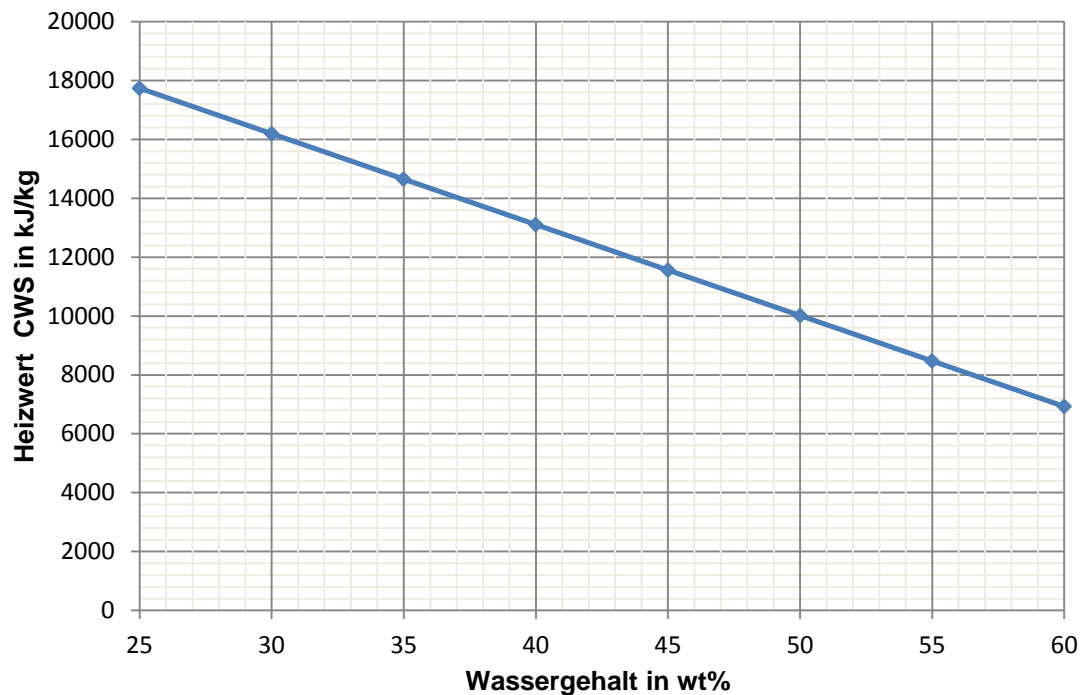


Abbildung 3-1: Heizwert CWS

Der stöchiometrische Sauerstoffbedarf, in kmol je kg Brennstoff, berechnet sich bei der Verbrennung fester und flüssiger Brennstoffe nach Gl. 3-2. Der Sauerstoffbedarf der Slurry ergibt sich aus den Elementarreaktionen von Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel. Der im Brennstoff bereits vorhandene Sauerstoff vermindert den Sauerstoffbedarf [48].

$$O_{2\min} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s-o}{32} \quad \text{Gl. 3-2 [48]}$$

Die Rauchgaszusammensetzung in kmol je kg Brennstoff berechnet sich bei vollständiger Verbrennung nach Gl. 3-3 bis Gl. 3-7, die feuchte Rauchgasmenge in kmol je kg Brennstoff nach Gl. 3-8. In weiterer Folge können die Molanteile v_i der Rauchgaskomponenten berechnet werden, indem die einzelnen Komponenten der Rauchgaszusammensetzung n_i durch die feuchte Rauchgasmenge RG_f dividiert werden (Gl. 3-9).

$$N_2 = (1 - v_{O_2\text{-Oxidator}}) \cdot L + \frac{n}{28} \quad \text{Gl. 3-3 [48]}$$

$$CO_2 = \frac{c}{12} \quad \text{Gl. 3-4 [48]}$$

$$H_2O = \frac{h}{2} + \frac{w}{18} \quad \text{Gl. 3-5 [48]}$$

$$SO_2 = \frac{s}{32} \quad \text{Gl. 3-6 [48]}$$

$$O_2 = O_{2\min} \cdot (\lambda - 1) \quad \text{Gl. 3-7 [48]}$$

$$RG_f = N_2 + CO_2 + H_2O + SO_2 + O_2 \quad \text{Gl. 3-8 [48]}$$

$$v_i = \frac{n_i}{RG_f} \quad \text{Gl. 3-9 [48]}$$

Die adiabate Verbrennungstemperatur wurde mittels Energiebilanz einer stationären Gleichdruckverbrennung berechnet. Der Heizwert H_u der CWS, die Enthalpie der eingebrachten Brennstoffe H_B ($t_B=20$ °C) und der eingebrachten Luft H_L ($t_L=20$ °C) wurden nach Gl. 3-1, Gl. 3-10 und Gl. 3-11 berechnet und müssen gleich der Enthalpie der Rauchgase $H^*(t_{ad})$ sein. Die adiabate Verbrennungstemperatur wurde nach Gl. 3-12 berechnet. Die Berechnung erfolgte iterativ, da die gemittelten molaren Wärmekapazitäten [49] von der adiabaten Verbrennungstemperatur abhängig sind. Diese iterative Berechnung wurde mit Hilfe des Excel Solvers durchgeführt. Die Dissoziation der Verbrennungsgase wurde bei der Verbrennungsrechnung nicht berücksichtigt.

$$H_B = t_B \cdot c_{pB} \Big|_0^{t_B} \quad \text{Gl. 3-10 [48]}$$

$$H_L = t_L \cdot \lambda \cdot c_{mpL} \Big|_0^{t_L} \quad \text{Gl. 3-11 [48]}$$

$$t_{ad} = \frac{H_u + H_B + H_L}{\sum n_i \cdot c_{mpi} \Big|_0^{t_{ad}}} \quad \text{Gl. 3-12 [48]}$$

Die Verbrennungsrechnung zeigt, dass bei stöchiometrischer Verbrennung die adiabate Verbrennungstemperatur mit steigendem Wassergehalt der CWS sinkt und mit steigender Sauerstoffkonzentration im Oxidator steigt. Dies ist in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 dargestellt. Wird die Luftzufuhr weiter erhöht, erfolgt die Verbrennung überstöchiometrisch. Dabei sinkt die adiabate Verbrennungstemperatur, da die überschüssige Luft und der Stickstoff erwärmt werden müssen. In Abbildung 3-4 ist die adiabate Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes des Oxidators bei einem Wassergehalt von 40 wt% dargestellt.

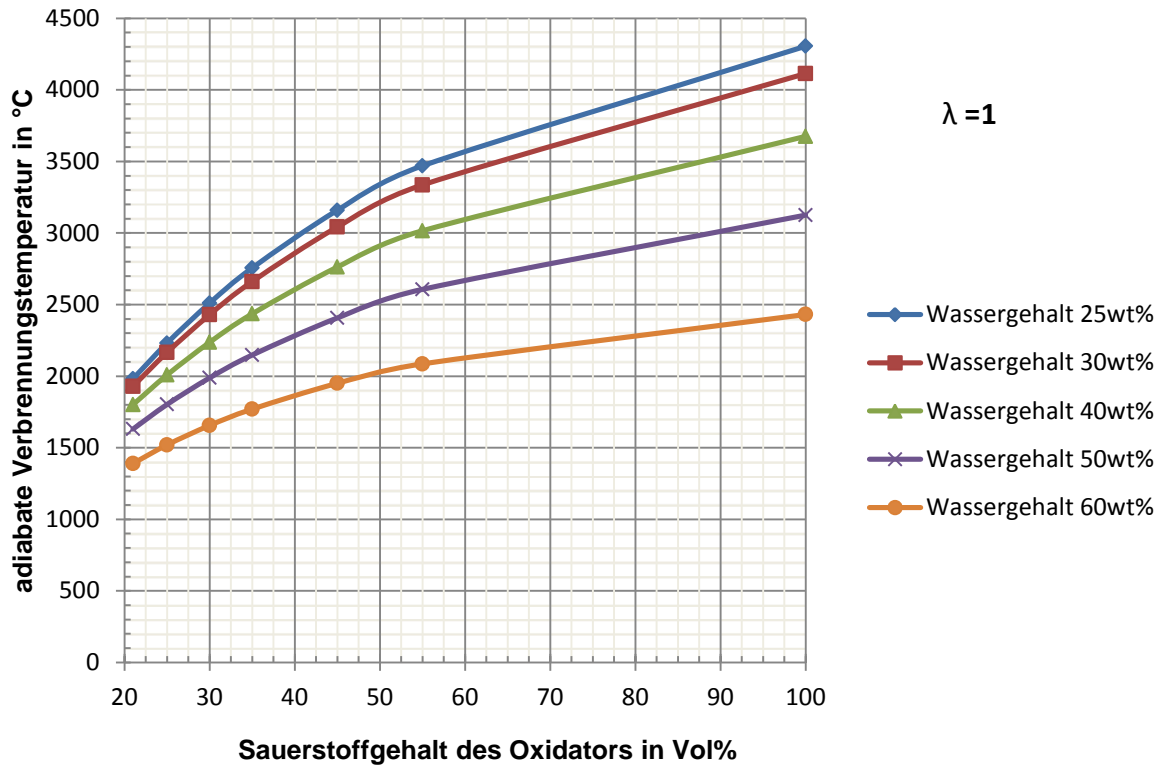


Abbildung 3-2: adiabate Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei stöchiometrischer Verbrennung ohne Dissoziation

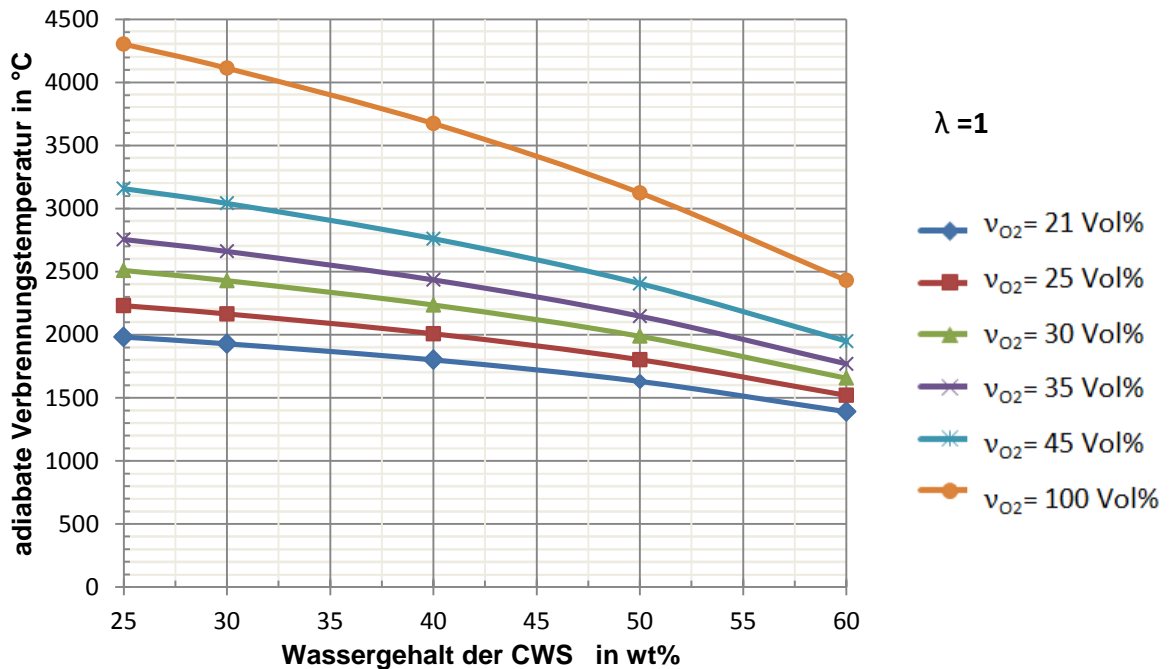


Abbildung 3-3: adiabate Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Wassergehaltes bei stöchiometrischer Verbrennung ohne Dissoziation

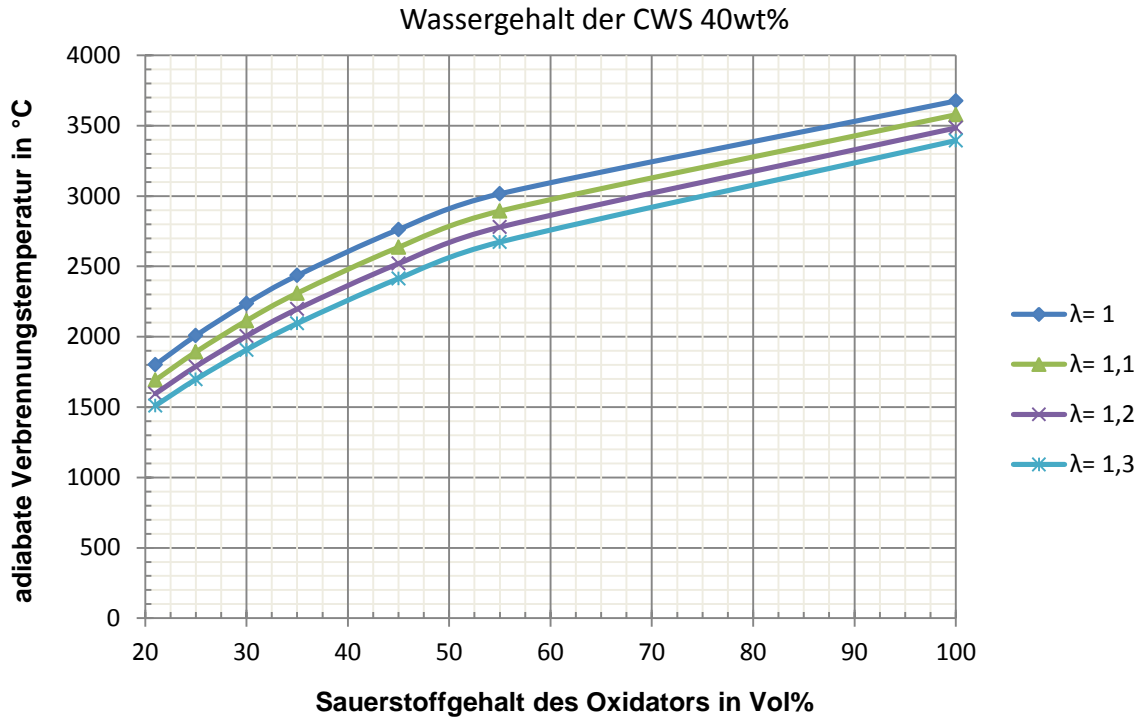


Abbildung 3-4: adiabate Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei einem Wassergehalt von 40 wt% ohne Dissoziation

Die Rauchgaszusammensetzung ist in Abbildung 3-5 bei stöchiometrischer Verbrennung und in Abbildung 3-6 bei überstöchiometrischer Verbrennung dargestellt. Die Zusammensetzung der Slurry ist in Tabelle 3-2 aufgelistet. Mit steigendem Luftverhältnis nimmt der Sauerstoffgehalt im Rauchgas zu. Weiters nimmt mit steigendem Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft der Stickstoffgehalt im Rauchgas ab. Bei der Reinsauerstoffverbrennung ist im Rauchgas kein Stickstoff mehr vorhanden und es steigt der Gehalt an Kohlendioxid, Wasserdampf und Schwefeldioxid.

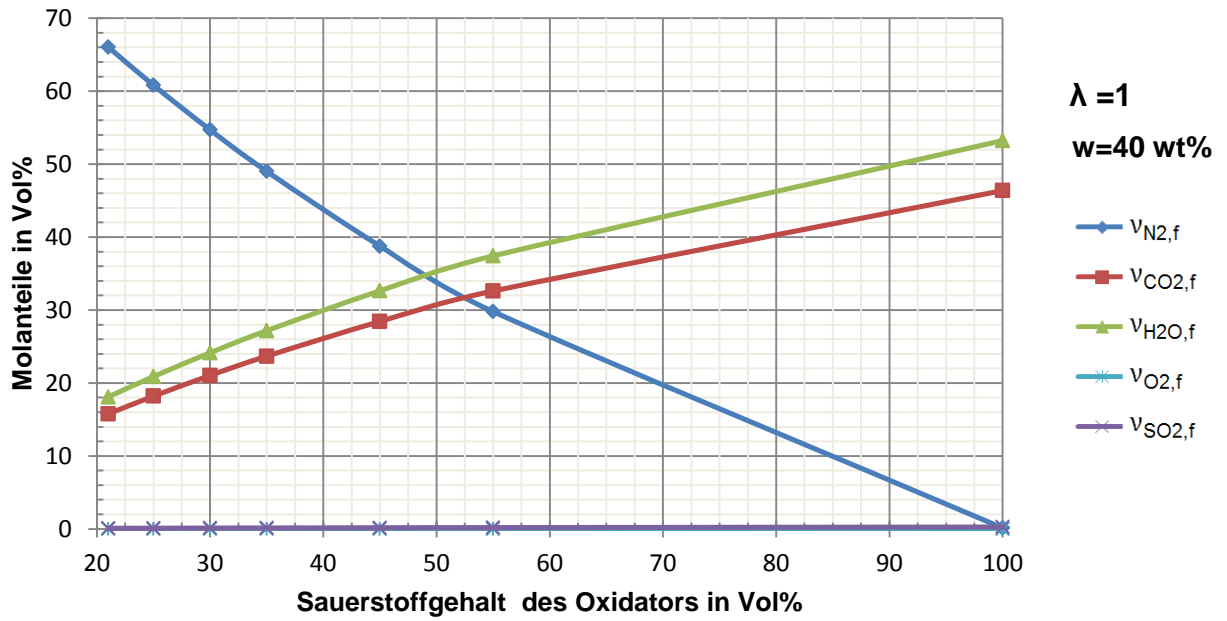


Abbildung 3-5: Rauchgaszusammensetzung in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei stöchiometrischer Verbrennung ohne Dissoziation

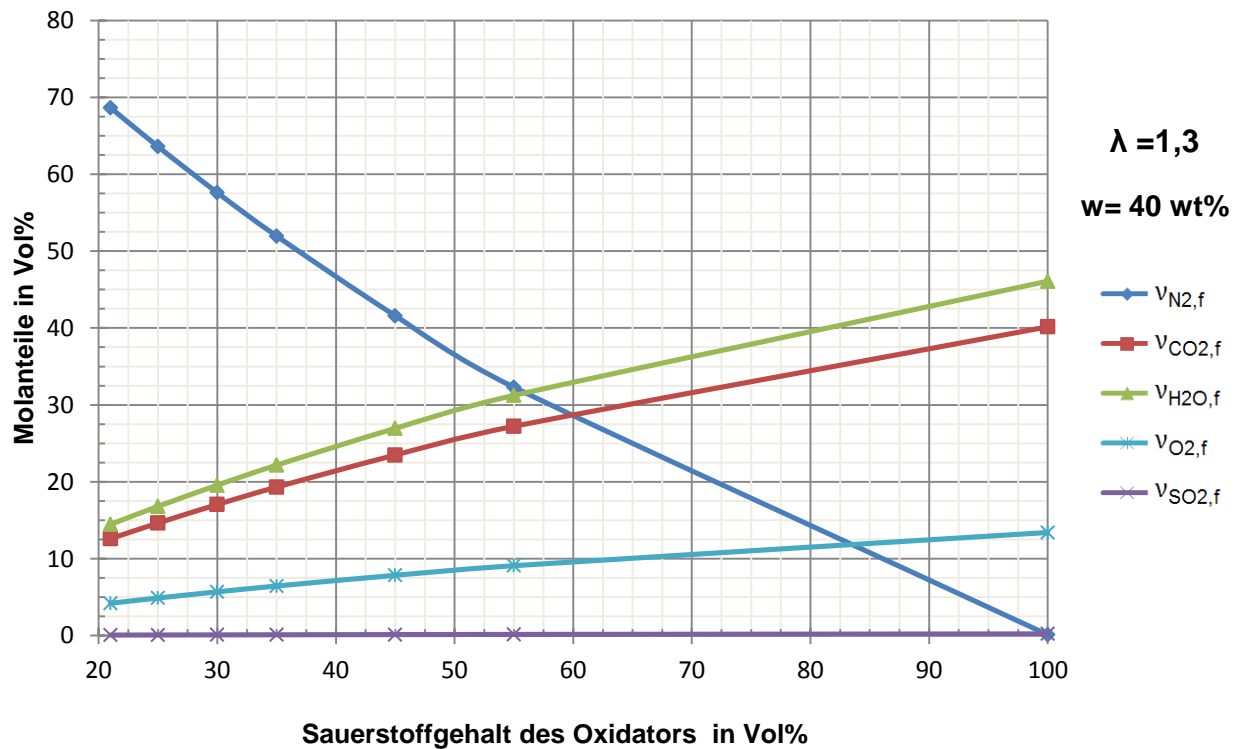


Abbildung 3-6: Rauchgaszusammensetzung in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei einem Luftverhältnis von 1,3 ohne Dissoziation

Wenn der Wassergehalt der CWS verändert wird, kann der Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft variiert werden, um die gleiche adiabate Verbrennungstemperatur zu erzielen. In Abbildung 3-7 sind Isothermen in Abhängigkeit des Wassergehaltes der CWS und des Sauerstoffgehaltes der Verbrennungsluft eingezeichnet.

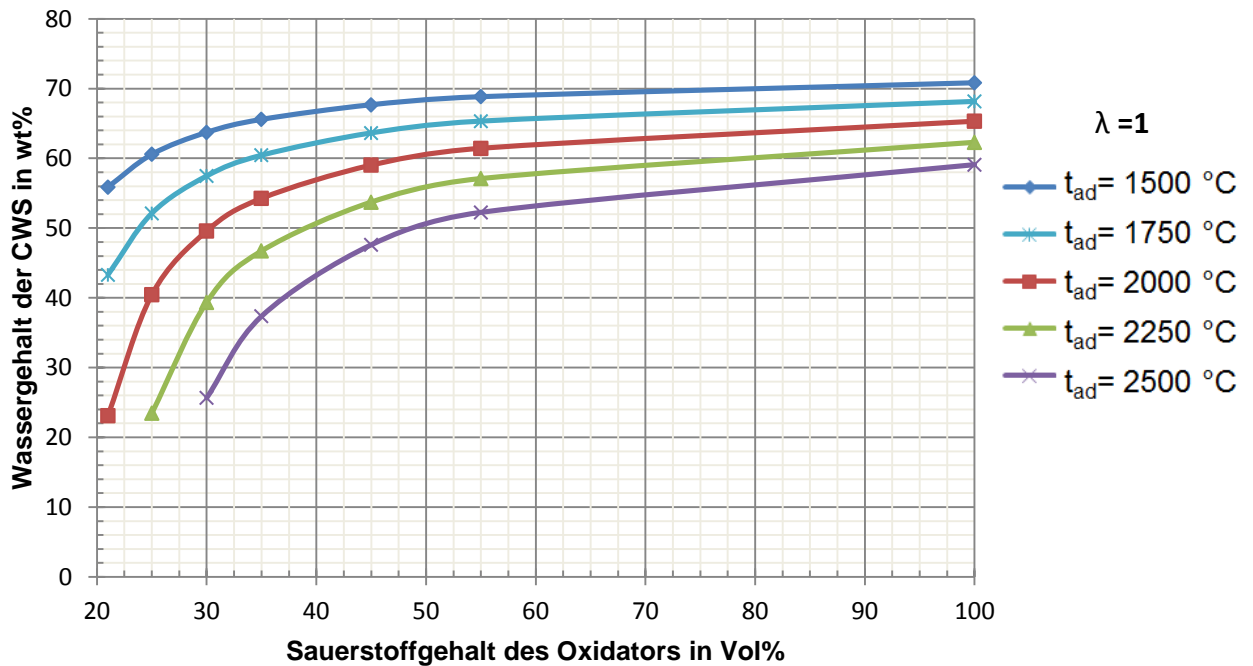


Abbildung 3-7: Wassergehalt der CWS und Sauerstoffgehalt der Luft in Abhängigkeit der adiabaten Verbrennungstemperatur bei stöchiometrischer Verbrennung ohne Dissoziation

4 VERSUCHE

In einem adaptierten Ölkessel der Firma Effective Energy Technologies GmbH wurden Versuche zur Verbrennung von CWS durchgeführt. Zunächst wird der Versuchsaufbau für die CWS Verbrennung beschrieben, danach werden die einzelnen Versuche im Detail erläutert.

4.1 Versuchsaufbau

Der Ölkessel (Pyronox LRR) ist für eine Leistung von ca. 1,4 MW ausgelegt. Das Funktionsprinzip des Ölkessels ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Pyronox LRR sind Stahl-Dreizug- Flammrohr- Rauchrohrkessel, die mit einer in Low- NO_x Technologie ausgestattet sind. Der Kesselwirkungsgrad beträgt 92,1 %. Die heißen Rauchgase werden durch ein Rauchgasabströmsystem (3) in den zweiten Rauchgaszug (2) geleitet und strömen zur Kesseltür (11), wo sie umgelenkt und im dritten Rauchgaszug (5) zum Abgasstutzen (4) befördert werden. Die Wärmeabfuhr erfolgt durch ein Kühlsystem. Kaltes Wasser gelangt über den Kühlwasservorlauf (6) in das Kühlwassersystem (9) und das aufgeheizte Kühlwasser wird über den Kühlwasserrücklauf (8) aus dem Kessel entfernt. Das Wasservolumen im Kessel beträgt 1560 l. Das Kühlwasser ist mittels Trennwände (10) vom Rauchgas getrennt. Der zweite und dritte Rauchgaszug werden gekühlt. Der dritte Rauchgaszug ist mit Turbulatoren (5) bestückt, die eine verstärkte Turbulenz der heißen Rauchgase erzeugen und so den Wärmeübergang vom Rauchgas auf das Kühlwasser verbessern. Der Kessel ist mit einer 100 mm Glasfasermatte gedämmt. [50]

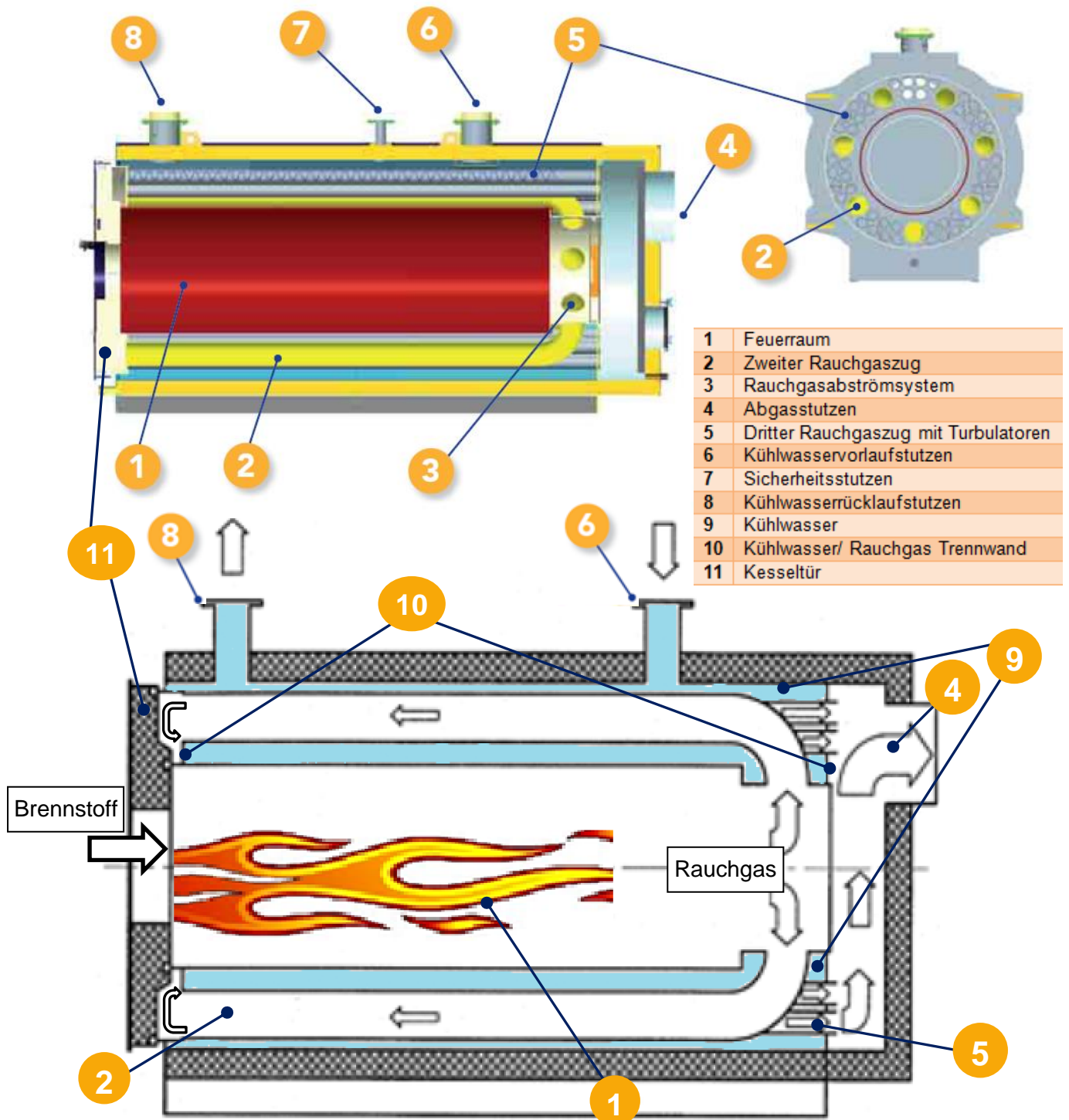


Abbildung 4-1: Funktionsprinzip Ölkessel [50][51]

Ein Ölbrenner mit einer Leistung von ca. 500 kW dient zur Aufheizung des Brennraumes und kann als Stützfeuer bei der CWS Verbrennung verwendet werden. Zur Untersuchung der CWS Verbrennung kann über eine zusätzliche Bohrung in der Kesseltüre eine Slurry- Lanze in die Brennkammer eingeführt werden. Die Slurry wird mit einer Exzentrerschneckenpumpe zur Slurry- Lanze befördert und mit Hilfe von koaxialer Primärluft oder Primärsauerstoff zerstäubt. Sekundärluft wird zusätzlich zur vollständigen Verbrennung eingeblasen. Der Ölkessel wird

mittels Kühlwasser gekühlt. Die wichtigsten Komponenten des Versuchsstandes sind in Abbildung 4-2 dargestellt.

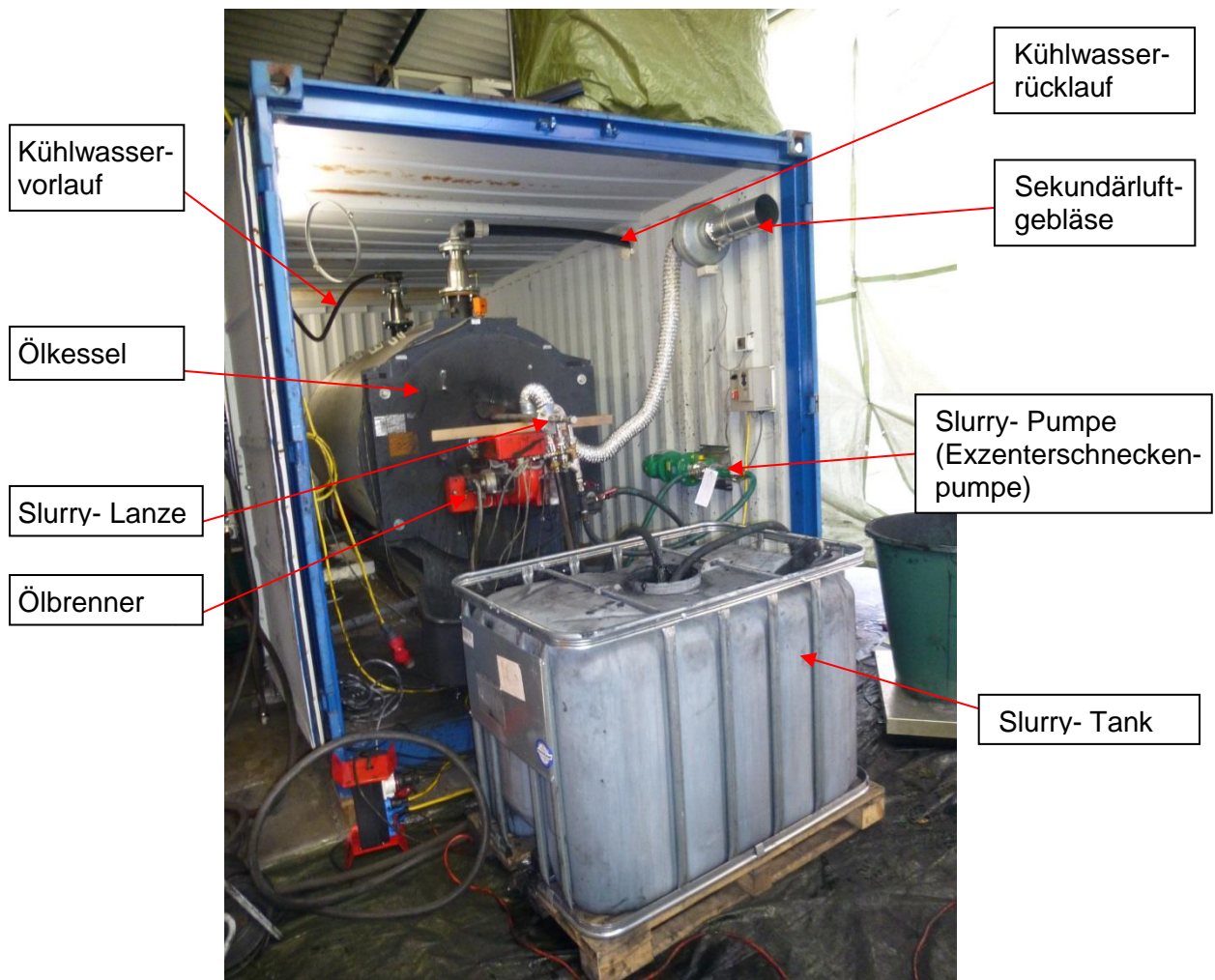


Abbildung 4-2: Versuchsstand

Abbildung 4-3 zeigt den Ölkessel in geöffnetem Zustand. Die Kesseltür ist zur einfachen Reinigung ausschwenkbar. Dadurch ist ein guter Zugang zur Brennkammer und den Rauchgaszügen gegeben. Die Turbulatoren im dritten Rauchgaszug verbessern den Wärmeübergang und sind nach vorne ausziehbar, um den Rauchgaszug zu reinigen. Die Brennkammer mit einer Länge von 2280 mm und einem Durchmesser von 710 mm weist ein Brennkammervolumen von ungefähr 1 m^3 auf.

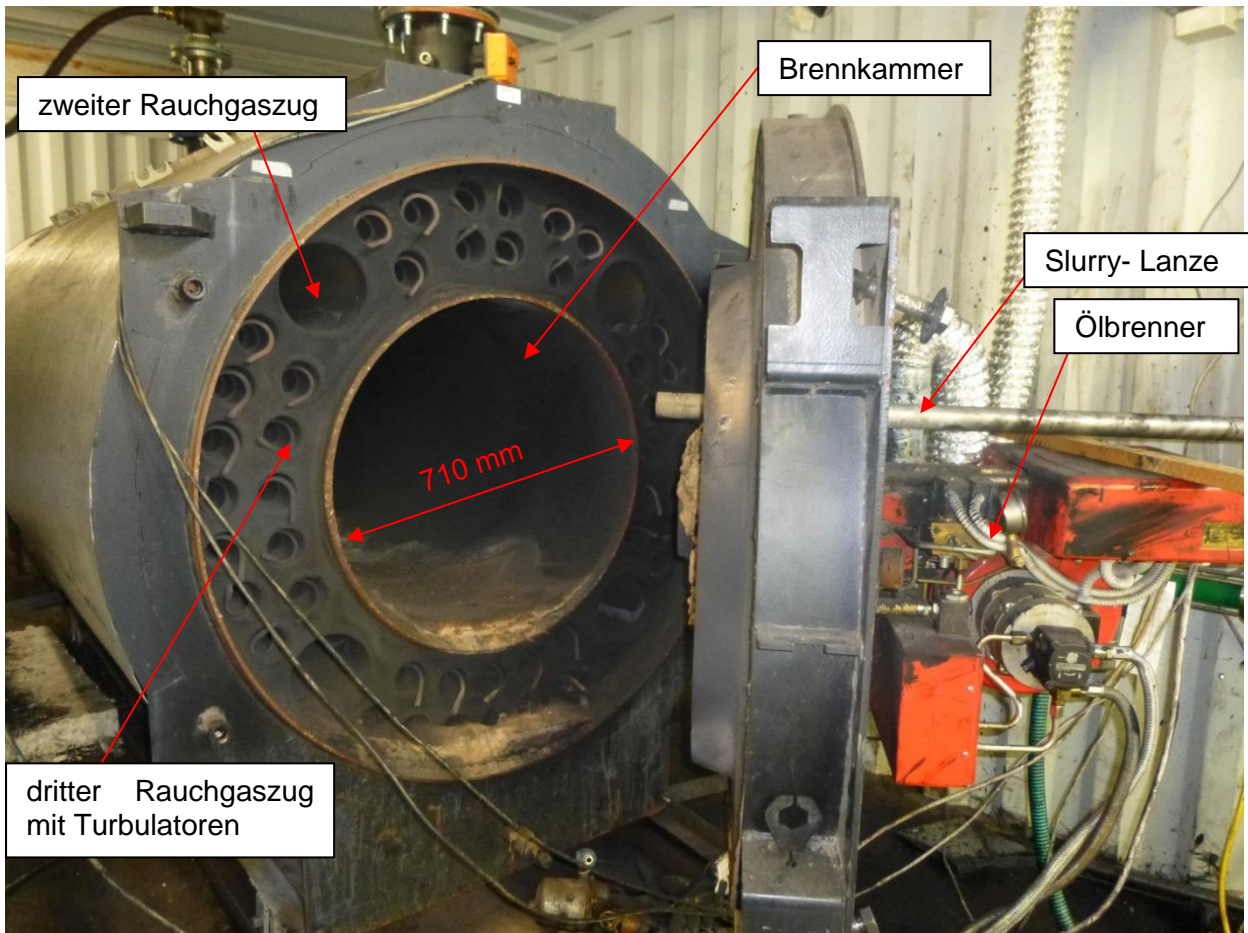


Abbildung 4-3: Ölkessel offen

Abbildung 4-4 zeigt die Slurry- Lanze und den Ölbrenner von innen. Die Düsenmitte weist einen Abstand von 192 mm zur Ölbrennermitte auf. Die Wärmedämmung der Kesseltür besteht aus einer hochtemperaturbeständigen Keramikfaser. Die Keramikfaser hat eine niedrige Wärmeleitung, die die Bereitschaftsverluste des Kessels senken.

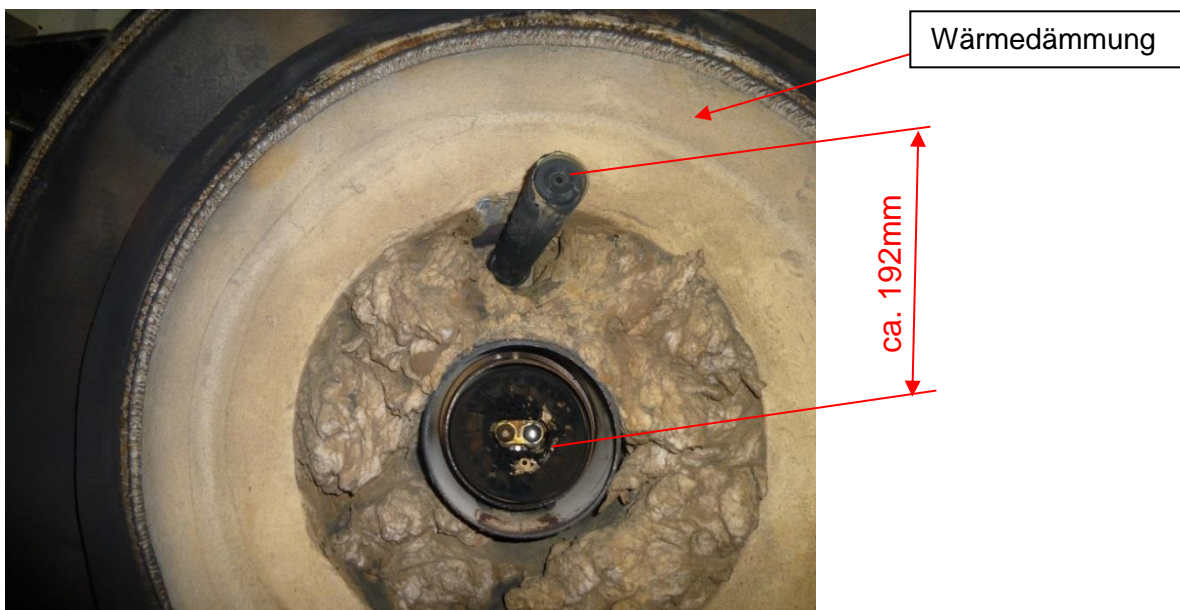


Abbildung 4-4: Ölbrenner und Slurry- Lanze von innen

Der Sauerstoff wird in flüssigem Zustand in einem Sauerstofftank gespeichert. Der benötigte Sauerstoff wird über einen Verdampfer geführt. Der Volumenstrom von Primär- und Sekundärsauerstoff kann separat mit einer Sauerstoffregelstrecke eingestellt werden.

4.2 Verbrennungsversuch mit Ölbrenner als Stützfeuer

Der Versuch wurde am 21.5.2014 am IWT Institut in Kooperation mit der Firma Messer Austria GmbH durchgeführt.

4.2.1 Aufgabenstellung

Ziel des Versuches war, die Betriebscharakteristik einer Kohle- Slurry bei Reinsauerstoffverbrennung in einem adaptierten Ölkessel zu untersuchen. Darüber hinaus sollten der Heizwert und der Wassergehalt der Slurry anhand der Rauchgaszusammensetzung bestimmt werden.

4.2.2 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde mit dem, unter Kapitel 4.1 beschriebenen, adaptierten Ölkessel bei ca. 20 °C Umgebungstemperatur durchgeführt. Zunächst wurde der Ölkessel mit Hilfe des Ölbrenners auf Betriebstemperatur (ca. 800 °C) gebracht. Dem Ölkessel wurde ein Ölmassenstrom $\dot{m}_{\text{öl}}$ von ca. 37,11 kg/h ($\cong 434,6$ kW) zugeführt [52]. Dieser Wert stammt aus früheren Versuchen.

Nach der Aufheizphase wurde der Kessel zusätzlich mit einer Slurry aus Estland, die aus alten zermahlenden Reifenteilen besteht, beheizt. Dazu wurde die Slurry- Lanze von Messer Austria GmbH verwendet. Der Slurry-Massenstrom \dot{m}_{slurry} wurde mittels gravimetrischer Messung, mit Hilfe von Waage und Stoppuhr bestimmt und betrug 110 kg/h. Der Volumenstrom der Sauerstoffzufuhr kam auf 95 Nm³/h und der Primärsauerstoff auf 45 Nm³/h.

Die Anordnung der Slurry- Lanze ist in Abbildung 4-5 abgebildet und zeigt die Zufuhr des Primär- und Sekundärsauerstoffes sowie der Slurry. Abbildung 4-6 zeigt die Slurry- Düse bei der gravimetrischen Durchflussmessung, wobei weder die Primär- noch die Sekundärsauerstoffzufuhr aktiviert sind. Der Slurry- Strahl tritt in der Mitte der Düse über eine Öffnung mit 4,2 mm Durchmesser aus und wird in einem Abwasserbehälter, der auf einer Waage steht, aufgefangen. Der Primärsauerstoff ist koaxial um den Slurry- Auslass angeordnet und soll im Betrieb den Slurry- Strahl zerstäuben. Weiters dient er als Oxidator bei der unterstöchiometrischen Verbrennung. Der Sekundärsauerstoffauslass ist ebenfalls koaxial angeordnet und dient als Oxidator zur vollständigen Verbrennung der Slurry.

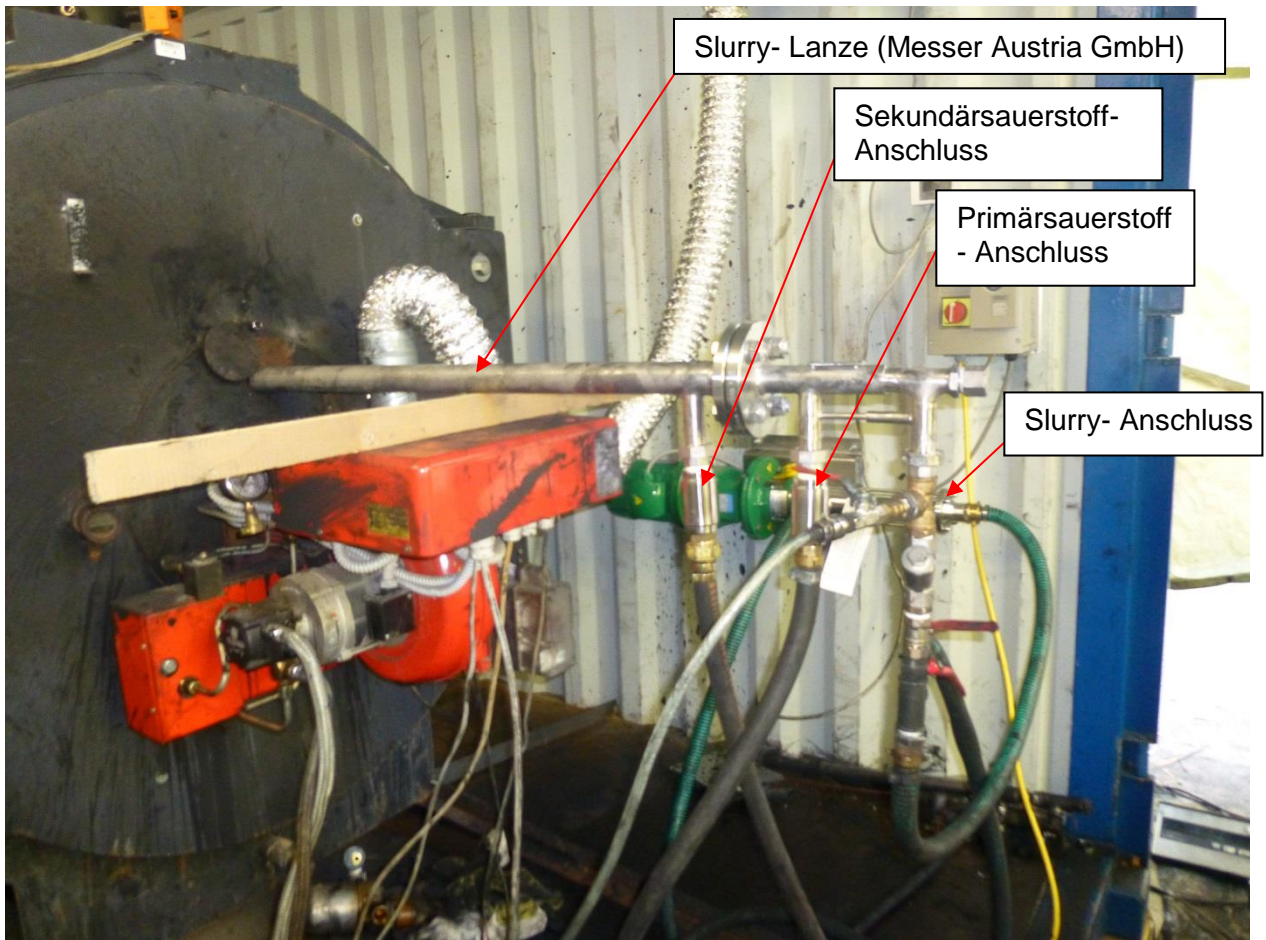


Abbildung 4-5: Anordnung Slurry- Lanze von Messer Austria GmbH

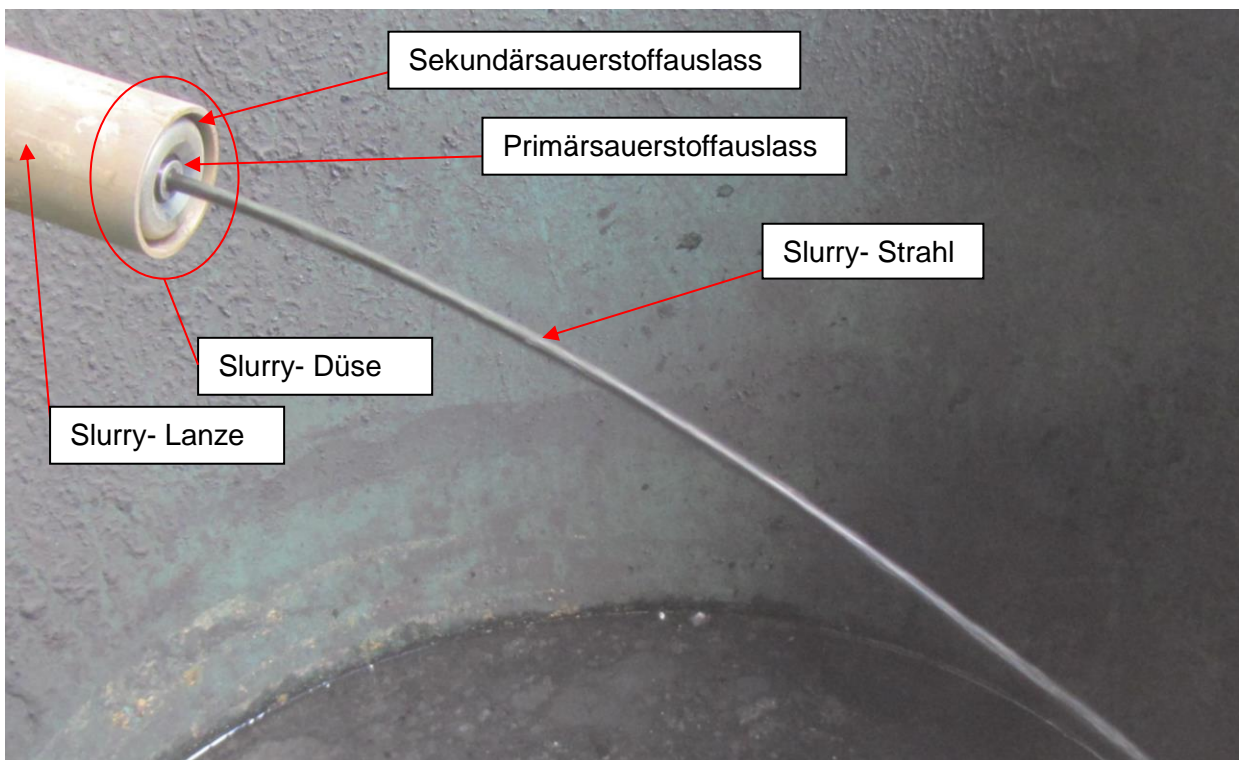


Abbildung 4-6: Slurry- Düse

Ein reiner Slurry Betrieb war nicht möglich, da die Flamme im Brennraum nach Abschaltung des Ölbrenners sofort erlosch.

4.2.3 Ergebnisse des Versuches

Die trockene Rauchgaszusammensetzung bei reinem Ölbetrieb ist in Tabelle 4-1 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Verbrennung überstöchiometrisch erfolgt. Über eine Verbrennungsrechnung konnte, mittels bekannter Rauchgaszusammensetzung, der Luftvolumenstrom von ca. 477 Nm³/h bei einem Luftverhältnis von 1,156 berechnet werden.

Tabelle 4-1: Rauchgaszusammensetzung bei reinem Ölbetrieb (Bezug RG_{tr})

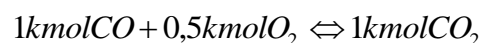
O ₂	2,99	Vol%
CO ₂	13,21	Vol%
CO	95	ppm

Bei einem kombinierten Slurry- und Ölbetrieb ergibt sich mit dem Luftvolumenstrom des Ölbrenners und dem Sauerstoffvolumenstrom der Slurry ein Volumenstrom von 572 Nm³/h. Mit der Sauerstoffkonzentration der Luft (21 Vol%) und dem Reinsauerstoff lässt sich eine resultierende Sauerstoffkonzentration von 34,1 Vol% berechnen. In Tabelle 4-2 ist die gemessene trockene Rauchgaszusammensetzung bei kombiniertem Slurry- und Ölbetrieb tabelliert.

Tabelle 4-2: Rauchgaszusammensetzung bei kombiniertem Slurry- und Ölbetrieb (Bezug RG_{tr})

O ₂	16,99	Vol%
CO ₂	12,8	Vol%
CO	2118	ppm

Der hohe CO Wert im Rauchgas weist auf eine unvollständige Verbrennung hin. Um den nicht verbrannten Kohlenstoff in die Heizwertberechnung mit einfließen zu lassen, wird der CO Gehalt des Rauchgases nach Gl. 4-1 auf eine äquivalente trockene Rauchgaszusammensetzung umgerechnet, die in Tabelle 4-3 angeführt ist. Zur Verbrennung von ca. 0,2 Vol% CO wird 0,1 Vol% O₂ benötigt und reagiert zu 0,2 Vol% CO₂.



Gl. 4-1

Tabelle 4-3: Äquivalente Rauchgaszusammensetzung bei kombiniertem Slurry- und Ölbetrieb (Bezug RG_{tr})

O ₂	16,89	Vol%
CO ₂	13	Vol%
CO	0	ppm

Mit der äquivalenten Rauchgaszusammensetzung kann eine iterative Verbrennungsrechnung durchgeführt werden. Zunächst wird die chemische Zusammensetzung des Brennstoffes berechnet, der sich aus der Slurry und dem Öl zusammensetzt. Da aber die chemische Zusammensetzung der Slurry nicht bekannt ist, wurde zur Vereinfachung der weiteren Berechnungen die chemische Zusammensetzung von Kohle anstatt von Reifen verwendet, da sie nur geringfügig von der Reifenzusammensetzung abweicht. Die chemische Zusammensetzung der Kohle wurde bereits in Tabelle 3-1 aufgelistet. Die chemische Zusammensetzung von Öl ist in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: Ölzusammensetzung [47]

c	s	n	h	o
85,9 wt%	0,7 wt%	0 wt%	13 wt%	0,4 wt%

Mit der chemischen Zusammensetzung der Kohle und des Öls, deren Massenströme und variablem Wassergehalt der Slurry, können die Massenanteile μ_i der resultierenden Brennstoffzusammensetzung nach Gl. 4-2 berechnet werden.

$$\mu_{i_Br} = \frac{\mu_{i_Slurry} \cdot \dot{m}_{Slurry} + \mu_{i_öl} \cdot \dot{m}_{öl}}{\dot{m}_{Slurry} + \dot{m}_{öl}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Die Molanteile v_i der trockenen Rauchgase werden berechnet, indem die einzelnen Komponenten der Rauchgaszusammensetzung durch die trockene Rauchgasmenge dividiert werden. Die Rauchgaskomponenten werden wie im Kapitel 3 mit der Gl. 3-2 bis Gl. 3-7 und der trockenen Rauchgasmenge nach Gl. 4-3 berechnet.

$$RG_{tr} = N_2 + CO_2 + SO_2 + O_2 \quad \text{Gl. 4-3 [48]}$$

In der Verbrennungsrechnung wird der Wassergehalt der Slurry solange variiert, bis eine ausreichende Annäherung der berechneten Rauchgaszusammensetzung an die äquivalente Rauchgaszusammensetzung erreicht ist. Ein Vergleich der berechneten Rauchgaszusammensetzung (Tabelle 4-5) und der äquivalenten Rauchgaszusammensetzung bei kombiniertem Slurry- und Ölbetrieb (Tabelle 4-3) zeigt, dass bei einem Slurry- Wassergehalt von 81,5 wt% eine gute Übereinstimmung erzielt wird. Die Zusammensetzung der Slurry und des Heizöls berechnet sich nach Gl. 4-2 und ist in Tabelle 4-6 dargestellt.

Tabelle 4-5: berechnete Rauchgaszusammensetzung (Bezug RG_{tr})

V_{N_2}	V_{CO_2}	V_{H_2O}	V_{SO_2}	V_{O_2}
69,3 Vol%	13,17 Vol%	- Vol%	459 ppm	17,48 Vol%

Tabelle 4-6: Zusammensetzung Slurry und Heizöl

c	s	n	h	o	w
31,85wt%	0,328wt%	0,07wt%	3,99wt%	2,83wt%	60,94wt%

Bei dieser Rauchgaszusammensetzung ergibt sich ein gesamter Heizwert der Slurry und des Öls ($H_{u_{\text{Öl}}} = 42,2 \text{ MJ/kg}$) von ca. 10850 kJ/kg nach der Näherungsgleichung von Boie (Gl. 3-1). Der Heizwert der Slurry $H_{u_{\text{Slurry}}}$ berechnet sich nach Gl. 4-4 und beträgt ca. 287 kJ/kg. Weiters berechnet sich bei kombiniertem Betrieb eine adiabate Verbrennungstemperatur von 1391°C nach Gl. 3-10 bis Gl. 3-12.

$$H_{u_{\text{Slurry}}} = \frac{\dot{m}_{\text{Br}} \cdot Hu_{\text{Br}} - \dot{m}_{\text{Öl}} \cdot Hu_{\text{Öl}}}{\dot{m}_{\text{Br}} - \dot{m}_{\text{Öl}}} \quad \text{Gl. 4-4}$$

Darüber hinaus wurde der Wassergehalt der Slurry mittels Messungen im Trockenschrank bestimmt, wozu jeweils eine Slurry- Probe von ca. 200 g am Behälterboden und an der Oberfläche entnommen wurde. Diese Proben wurden über 24h im Trockenschrank bei ca. 85 °C aufbewahrt und deren Masse wurde vor (m_{Vorher}) und nach (m_{Nachher}) der Trockenschrankmessung gemessen. Der Wassergehalt der Slurry wurde nach Gl. 4-5 berechnet und betrug am Behälterboden 60 wt% ($H_u = 6927 \text{ kJ/kg}$) Wasser, an der Oberfläche 92 wt% ($H_u = -2956 \text{ kJ/kg}$) Wasser.

$$\mu_{\text{Wasser}} = \frac{m_{\text{Vorher}} - m_{\text{Nachher}}}{m_{\text{Vorher}} - m_{\text{Behälter}}} \quad \text{Gl. 4-5}$$

4.2.4 Interpretation des Versuches

Der berechnete Wassergehalt beim Verbrennungsversuch liegt mit 81,5 wt% zwischen den gemessenen Werten bei der Trockenschrankmessung. Die berechneten und die gemessenen Werte des Wassergehaltes stimmen größtenteils überein, da beim Verbrennungsversuch die Slurry etwa aus der Tankmitte mit der Exzentrerschneckenpumpe entnommen wurde. An der Behälteroberfläche hat die Slurry einen negativen Heizwert. Der Heizwert der Kohle reicht nicht mehr aus, um das Wasser zu verdampfen. Mit dem Versuch konnte gezeigt werden, dass die verwendete Slurry mit einem Wassergehalt von 81,5 wt% und einem Heizwert von 287 kJ/kg, zur Verbrennung mit Reinsauerstoff nicht geeignet ist, und ohne Stützfeuer des Ölbrenners nicht möglich ist. Die CO Werte des Rauchgases weisen darauf hin, dass die Slurry in der Brennkammer nicht vollständig verbrennt und die Flamme nach Abschaltung des Ölbrenners

vollständig erlischt. Für weitere Versuche sollte eine Slurry mit niedrigerem Wassergehalt verbrannt werden.

Daraus ergibt sich, dass der Einsatz einer gemauerten Vorbrennkammer erforderlich ist, um das Rauchgas in der Verbrennungszone von den mit Wasser gekühlten Kesselwänden zu trennen. Durch die Strahlungswärme der heißen Wände, welche die Vorbrennkammer abgibt, kann die Rauchgastemperatur erhöht und das Erlöschen der Flamme verhindert werden. Die Installation einer Vorbrennkammer ist des Weiteren notwendig, um die hohen CO Werte zu senken. Durch die damit erzielten höheren Temperaturen wird die Reaktionskinetik verbessert und damit kann ein besserer Ausbrand erzielt werden.

Mit einer Vorbrennkammer und einer Slurry, die einen deutlich geringeren Wassergehalt aufweist, könnte es möglich sein den Verbrennungsprozess soweit zu stabilisieren, dass ein reiner Slurry Betrieb mit Reinsauerstoff als Oxidator möglich ist. Übliche Slurry-Zusammensetzungen beinhalten einen Wassergehalt von ca. 40 wt%.

4.3 Slurry Präparation

Aufgrund der unter Kapitel 4.2 angeführten Probleme mit dem hohen Wassergehalt der Slurry, wurden zwei neue Slurries der Firma Effective Energy Technologies GmbH zur Anwendung gebracht, wobei der zweiten Slurry ein Stabilisator beigemischt wurde. Zunächst wurde die Slurry homogenisiert, danach erfolgte eine Messung des Wassergehaltes mittels Trockenschrankversuch.

4.3.1 Slurry- Homogenisierung

Der Slurry- Tank, der ca. 1 Nm³ Slurry enthält, war nach der Anlieferung entmischt. Die schwereren Kohlepartikel sind auf den Behälterboden abgesunken und im oberen Behälterteil hat sich das leichtere Wasser abgeschieden. Daher musste die Slurry erst wieder homogenisiert werden. Zur Homogenisierung wurden mehrere Methoden angewandt. Zunächst wurde ein Rührwerk verwendet, das mit einer 500 W Bohrmaschine angetrieben wurde. Es konnte keine ausreichende Homogenisierung mit der verwendeten Bohrmaschine erreicht werden, da die Leistung der Bohrmaschine zu gering war und sich nach kurzer Rührzeit wegen Überhitzung abstellte. Weiters war der Schaft des Rührwerkes nicht lang genug und der Rührer konnte nicht ausreichend tief in den Tank eingeführt werden. Ein großer Teil der Kohlepartikel am Behälterboden konnte daher nicht homogenisiert werden.

Weiters wurde versucht, den Tank mit Hilfe der Exzentrerschneckenpumpe zu homogenisieren. In Abbildung 4-7 ist der Versuchsaufbau zur Slurry- Homogenisierung dargestellt. Die

Exzentrerschneckenpumpe saugt Slurry aus dem Tank an und befördert sie über die Druckleitung in den Tank zurück. Es stellte sich ein Slurry- Kreislauf ein, der die Slurry durchmischen soll. Diese Methode stellte sich ebenfalls als unbrauchbar heraus, da die Saugleitung von 25 mm schnell verstopfte. Die Kohleablagerungen hafteten am Behälterboden an und es konnte nur verhindert werden, dass sich die bereits homogenisierte Slurry wieder entmischte.

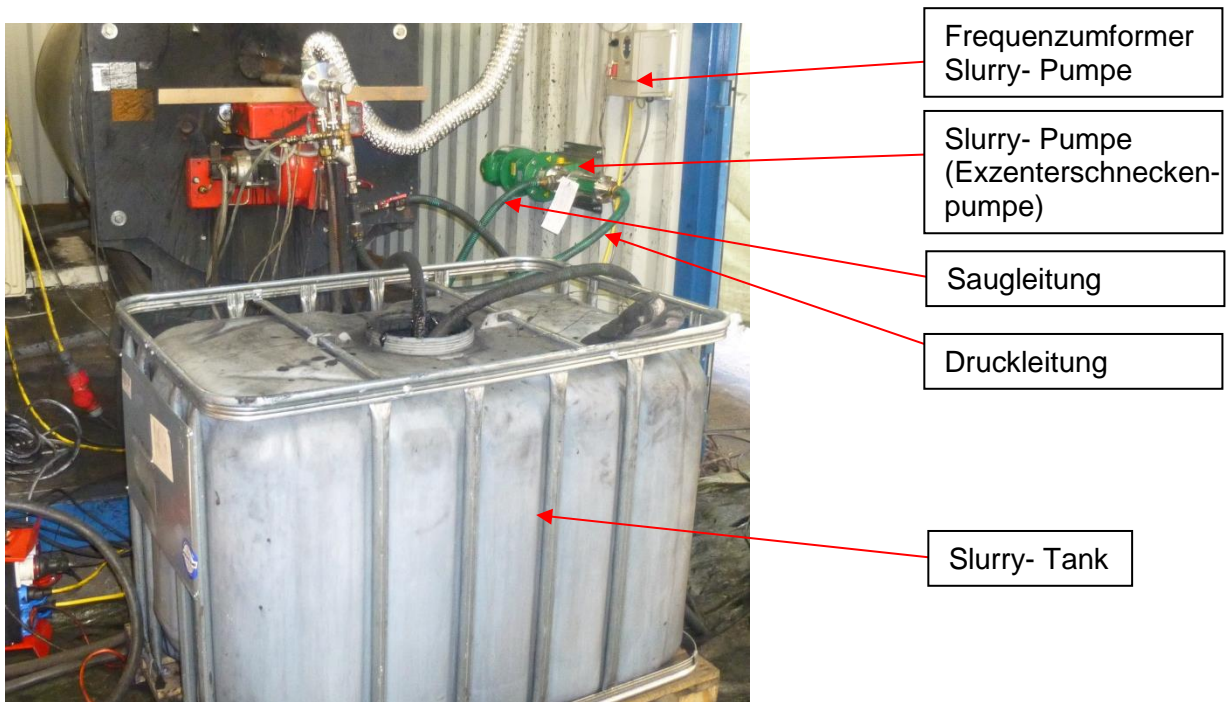


Abbildung 4-7: Slurry- Kreislauf zur Homogenisierung

Aufgrund der Probleme bei der Homogenisierung der Slurry wurde ein weiterer Slurry- Tank von Effective Energy Technologies GmbH angeliefert. Der Slurry wurde ein Stabilisator beigemengt. Weiters wurde ein Mörtel Rührer zur Homogenisierung eingesetzt, dessen Leistung 1,6 kW betrug. Der Mörtel Rührer ist in Abbildung 4-8 ersichtlich. Zwei Haltegriffe ermöglichen eine einfache Handhabung des Rührers und mittels verstellbarer Drehzahl kann die gewünschte Homogenisierung erreicht werden. Der Rührstab wurde verlängert, damit die Slurry am Boden des Tanks ausreichend homogenisiert werden kann. Das Rührwerk weist einen Durchmesser von 160 mm auf. Die Verlängerung des Rührstabes wurde mittels Schraubverbindung durchgeführt. Mit dem Stabilisator in der Slurry und dem Mörtel Rührer konnte eine ausreichende Homogenisierung sichergestellt werden.

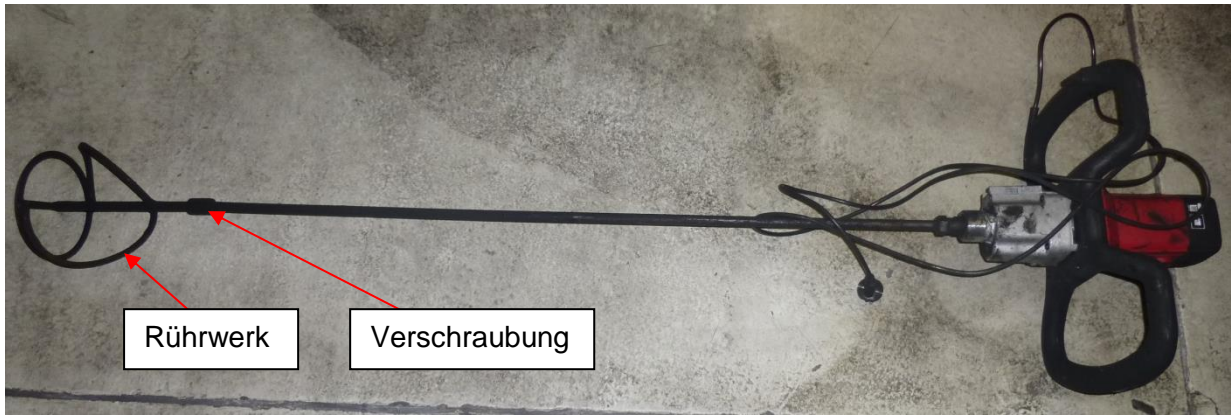


Abbildung 4-8: Mörtel Rührer

4.3.2 Slurry- Trockenschrankversuch

Trotz der Probleme bei der Homogenisierung der Slurry ohne Stabilisator wurde eine Slurry-Probe aus dem Tank zur Bestimmung des Wassergehaltes entnommen. Die Slurry wurde nach der Homogenisierung mit dem Rührer (500 W Bohrmaschine), mit Hilfe der Exzentrerschneckenpumpe, aus dem Slurry- Tank entnommen, wobei sich der Einlass der Saugleitung etwas oberhalb der Tankmitte befunden hat. Die Slurry wurde über die Druckleitung in einen Probebehälter geleitet. Die Slurry- Probe mit ca. 200 g wurde zwei Tage im Trockenschrank aufbewahrt, dann wurde die Massendifferenz bestimmt. Der Wassergehalt der Slurry wurde nach Gl. 4-5 bestimmt und betrug 55 wt% mit einem Heizwert von 8472 kJ/kg.

Als nächsten Versuch wurde, repräsentativ für die Zusammensetzung des gesamten Tanks, zähflüssige Slurry aus der Mitte des Tanks entnommen und ca. 10 Liter wurden in einen Eimer gefüllt. Die geringe Menge der Slurry konnte mit Hilfe des Rührers (500 W Bohrmaschine) gut verrührt werden. Aus dem Eimer wurde händisch eine Slurry- Probe entnommen und mittels Trockenschrankversuch wurde ein Wassergehalt von ca. 35 wt% festgestellt. Dies entspricht einem Heizwert von ungefähr 14648 kJ/kg. Weiters wurde versucht den Wassergehalt zu messen, wenn die Slurry mit der Exzentrerschneckenpumpe angesaugt wird und über die Slurry-Lanze in einen Messbehälter fließt. Dieser Versuch führte aber sofort zu Verstopfung der Slurry-Lanze.

Dieser Versuch wurde wiederholt. Der Slurry wurde zusätzliches Wasser hinzugefügt. Der Trockenschrankversuch ergab bei händischer Entnahme der Slurry einen Wassergehalt von 52 wt%. Zunächst wurde die Slurry über die Spiralspumpe im Kreis befördert und dann über die Slurry- Lanze in einen Messbehälter gefüllt. Auch hier ist ein rasches Verstopfen der Slurry-Düse aufgetreten. Der Wassergehalt, der vor dem Verstopfen gemessen wurde, lag bei 62 wt%, was einem Heizwert von ca. 6310 kJ/kg entspricht.

Ein weiterer Trockenschrankversuch wurde mit der zweiten Slurry der Firma Effective Energy Technologies GmbH (mit Stabilisator) durchgeführt. Zunächst wurde die Slurry mittels eines Mörtel Rührers homogenisiert und danach mit Hilfe der Exzentrerschneckenpumpe aus dem Tank entnommen. Der Wassergehalt der Slurry betrug 55 wt%. Dies entspricht einem Heizwert von 8472 kJ/kg.

4.3.3 Interpretation des Versuches

Durch den Einsatz von Bohrmaschine und Rührwerk war es nicht gelungen den Slurry- Tank zu homogenisieren, da die Bohrmaschine für die Menge an Slurry eine zu geringe Leistung aufwies. Weiters ist das Abfüllen von Slurry- Teilmengen in kleinere Gefäße vor Verbrennungsversuchen nicht zweckmäßig, da der Aufwand der jeweils nötigen Wassergehaltmessung zu groß wäre. Durch die unterschiedlichen Wassergehalte der Slurry können die Verbrennungsversuche nur bedingt miteinander verglichen werden und es müsste immer überprüft werden, ob die jeweils vorbereitete Slurry pumpbar ist und nicht zu Verstopfungen der Düse führt. Mit dem Mörtel Rührer (1,6 kW) und einem Stabilisator in der Slurry vereinfacht sich die Homogenisierung und es können gute Ergebnisse erzielt werden.

Die bereits homogenisierte Slurry entmischt sich ohne Stabilisator innerhalb von vierundzwanzig Stunden wieder vollständig. Das Problem der Entmischung des Slurry- Tanks konnte mit Hilfe eines Stabilisators in der Slurry gelöst werden. Als Stabilisator kann beispielsweise das Natriumsalz von der Carboxymethylcellulose eingesetzt werden.

Durch die Versuche konnte festgestellt werden, dass es bei einer Slurry mit hoher Kohlekonzentration leicht zu Verstopfungen und es vor allem in der Slurry- Lanze zu Ablagerungen der Kohle kommen kann. Der Versuch zeigt, dass es bei einem Wassergehalt von 52 wt% bereits zu Ablagerungen kommt. Die Kohlekonzentration nimmt bereits am Düsenausritt aufgrund von Ablagerungen ab und weist vor der Verstopfung einen Wassergehalt von 62 wt% auf. Der Heizwert der Slurry fällt jedoch mit sinkendem Kohlegehalt. Deshalb können zur Vermeidung von Verstopfungen, chemische Additive beigemischt werden. Zur Reduktion der Viskosität können beispielsweise Natrium Polystyrene Sulphonate oder Natrium Ligninsulfonat eingesetzt werden.

4.4 Einbau und Adaption der Vorbrennkammer

Zur Erreichung der vollständigen Verbrennung ist es nötig den Ölkessel zu adaptieren. Mit dem Einbau einer Vorbrennkammer ist es möglich, die heißen Rauchgase in der Verbrennungszone von den mit kaltem Wasser gekühlten Wänden des Ölkessels zu trennen. Mit Hilfe eines Stützfeuers werden die Schamottsteine in der Vorbrennkammer vorgeheizt. Durch die

Strahlungswärme soll die Verbrennung der Slurry unterstützt werden. Mit dem Stützfeuer und der heißen Schamottsteine soll eine stabile Verbrennung erreicht werden. Die vorgefertigte Vorbrennkammer der Firma Effective Energy Technologies GmbH ist in Abbildung 4-9 ersichtlich. Diese Vorbrennkammer soll adaptiert und auf der Türe des Ölkessels montiert werden.

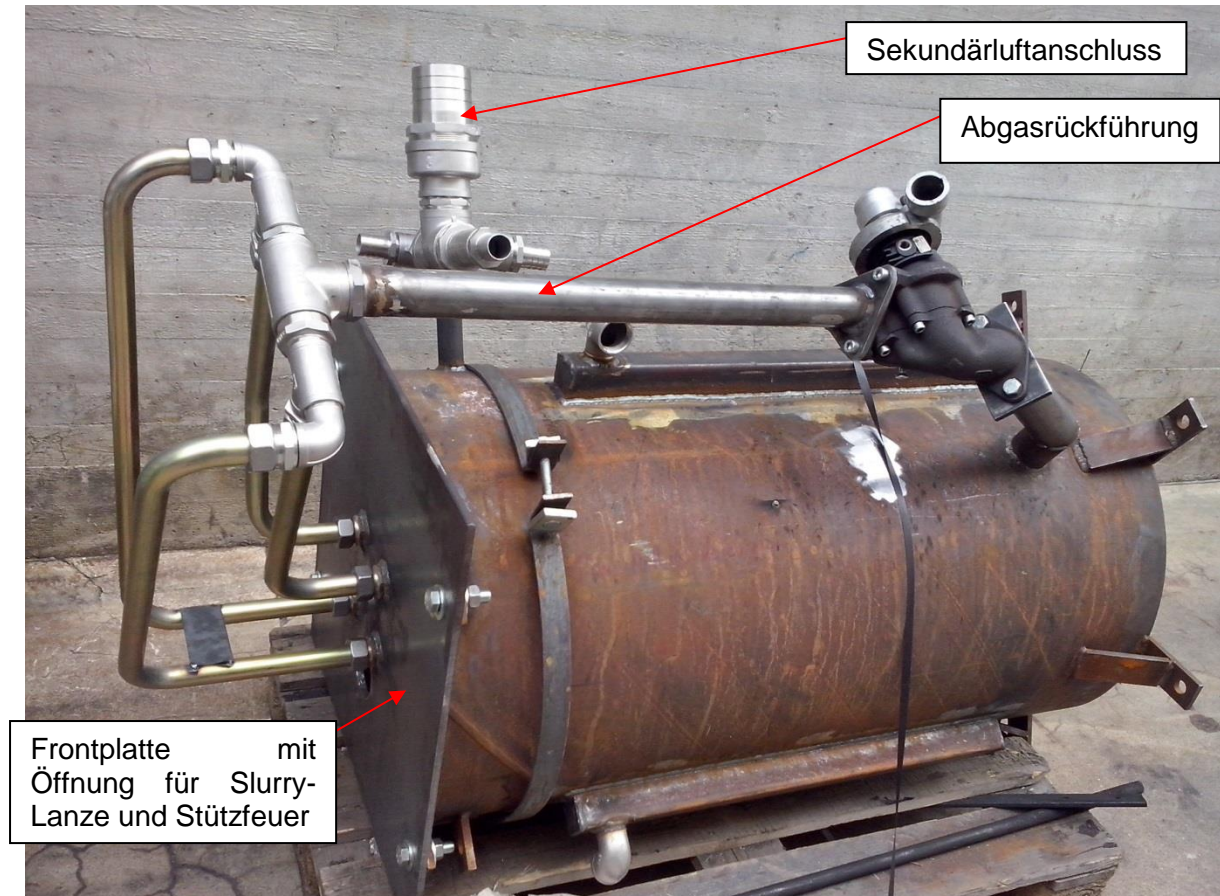


Abbildung 4-9: angelieferte Vorbrennkammer

Die Vorbrennkammer ist mit vier Schamottsteinen ausgekleidet, die einen Innendurchmesser von 390 mm, einen Außendurchmesser von 580 mm und eine Tiefe von 290 mm aufweisen. Die Vorbrennkammer weist eine Gesamtlänge von 1160 mm auf. Um eine etwaige Rissbildung während der Aufheizphase zu vermeiden, sind eine Wandstärke von 80 mm und ein langsames Brennen der Schamottsteine nötig. Die Brenndauer der Schamottsteine betrug 3 Wochen. Die in Abbildung 4-10 dargestellten Schamottsteine, sind mit Bohrungen für die Sekundärluftzufuhr versehen. Die Sekundärluft wird mit Drall in die Vorbrennkammer eingeblasen.

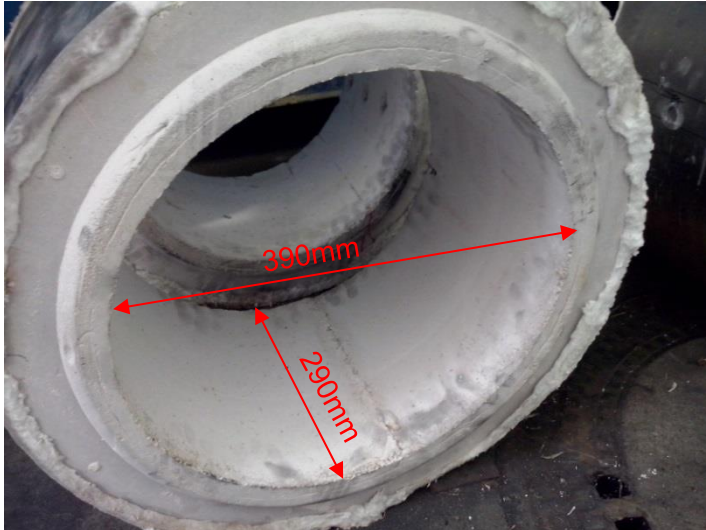


Abbildung 4-10: Schamottsteine

Zunächst werden die Aufbauten der Kesseltüre abmontiert und die Kesseltüre wird mit Hilfe eines Kranes ausgebaut. Die ausgebaute Kesseltüre ist in Abbildung 4-11 ersichtlich. Die bereits vorhandene Öffnung in der Kesseltüre des alten Ölbrenners muss verbreitert werden. Dazu wird zunächst das überschüssige Dämmmaterial entfernt und danach die Stahlplatte mit Hilfe eines Plasmaschneiders ausgeschnitten.



Abbildung 4-11: ausgebaute Kesseltüre

Die Vorbrennkammer wird auf die ausgeschnittene Kesseltüre aufgesetzt und mittels Dämmmaterial abgedichtet und verschraubt. In Abbildung 4-12 ist die montierte

Vorbrennkammer auf der Kesseltüre dargestellt. In dieser Ansicht ist eine Sekundärluftverteilungsleiste ersichtlich, die über Bohrungen in den Schamottsteinen mit dem Brennraum verbunden ist.



Sekundärluftverteilungsleiste

Abbildung 4-12: Montage der Vorbrennkammer auf der Kesseltüre

Nach der Montage der Vorbrennkammer auf der Kesseltüre erfolgt die Dämmung der Vorbrennkammer, mittels einer feuerfesten Keramikfasermatte und einer Aluminiumfolie als Schutz und zur Straffung der Keramikfasermatte. Durch die Wärmedämmung wird das Stahlrohr der Vorbrennkammer nicht mehr von der Umgebungsluft gekühlt. Die daraus resultierende höhere Temperatur des Stahles kann zu einem schnelleren Versagen des Materials durch Heißgaskorrosion führen. Aufgrund der begrenzten Einsatzdauer der Vorbrennkammer ist es wichtiger die Wärmeverluste zu minimieren, um eine ausreichende Erhitzung der Schamottsteine zu gewährleisten. Die gedämmte Vorbrennkammer ist in Abbildung 4-13 dargestellt.



Abbildung 4-13: gedämmte Vorbrennkammer

Die Vorbrennkammer kann mit Hilfe eines hydraulischen Werkstattkranes in den Kessel eingebaut werden. Sie wird mittels geschraubter Stützen stabilisiert. Die Sekundärluftzufuhr erfolgt über ein frequenzgesteuertes Gebläse. Der Sekundärluftstrom wird über einen Verteiler in 3 Luftströme aufgeteilt und wird je Luftstrom über eine Sekundärluftverteilungsleiste (jeweils 120° am Umfang versetzt) eingeblasen. Die Sekundärluftleitung kann jeweils mit einem Kugelhahn geschlossen werden. Abbildung 4-14 zeigt die eingebaute Vorbrennkammer.



Sekundärluftgebläse

Sekundärluftverteiler

verschraubte
Stützen

Abbildung 4-14: eingebaute Vorbrennkammer

4.5 Erdgasbrenner als Stützfeuer

Der Versuch wurde am 8.8.2014 am IWT Institut durchgeführt.

4.5.1 Aufgabenstellung

Ziel des Versuches war, ein geeignetes Stützfeuer für die Kohle- Slurry Verbrennung zu finden. Als Stützfeuer wurde ein umgebauter Erdgasbrenner mit Sauerstoff als Oxidator getestet, da eine Flammentemperatur mit Sauerstoff als Oxidator von 2780 °C erreicht werden kann. Diese liegt um ca. 900 °C über der Flammentemperatur mit Luft als Oxidator. [53] Die erreichbare Temperatur der Schamottsteine mit einem Erdgasbrenner ist zu bestimmen.

4.5.2 Versuchsdurchführung

Zunächst wurde ein bereits vorhandener Versuchsstand eines Methanbrenners mit Sauerstoff als Oxidator umgebaut. Die Erdgaslanze wurde mit einem Neigungswinkel von 7° zur Horizontalen versehen. Dadurch wird die Flamme besser zur Brennraummitte ausgerichtet, um die darüber eingesprühte Slurry besser erwärmen zu können. Anschließend wurden alle Schraubverbindungen mittels Teflonband abgedichtet.

Als Brennstoff wird Erdgas aus der Versorgungsleitung des IWT Instituts verwendet. Das Erdgas wird mit Hilfe eines Membran Vakuum Kompressors (KNF N0150ANE) angesaugt. Der Durchfluss des Erdgases wird mittels Durchflussregler (GSC-C9SA-BB26) eingestellt. Aufgrund des maximalen Durchflusses von 3 Nm³/h beschränkt sich die maximale Leistung des Brenners auf 30,08 kW (bezogen auf 100 % Methan). Der zugeführte Sauerstoff wurde mit einer Sauerstoffregelstrecke von Messer Austria GmbH geregelt und betrug 6,3 Nm³/h, der mittels Durchflussregler (OSC-D9SA-BB12) eingestellt wurde. Die Flamme wurde mit einem Infrarot-Flammendetektor, der an der Erdgaslanze montiert ist, überwacht, um einen sicheren Betrieb des Brenners zu gewährleisten. Bei Erlöschen der Flamme wird die Erdgasversorgung geschlossen, damit sich der Brennraum nicht mit Erdgas füllt und ein erneutes Zünden nicht zu einer Gasexplosion führt. Die Brennersteuerung wurde mit Hilfe eines LabView Programmes visualisiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-15 abgebildet.

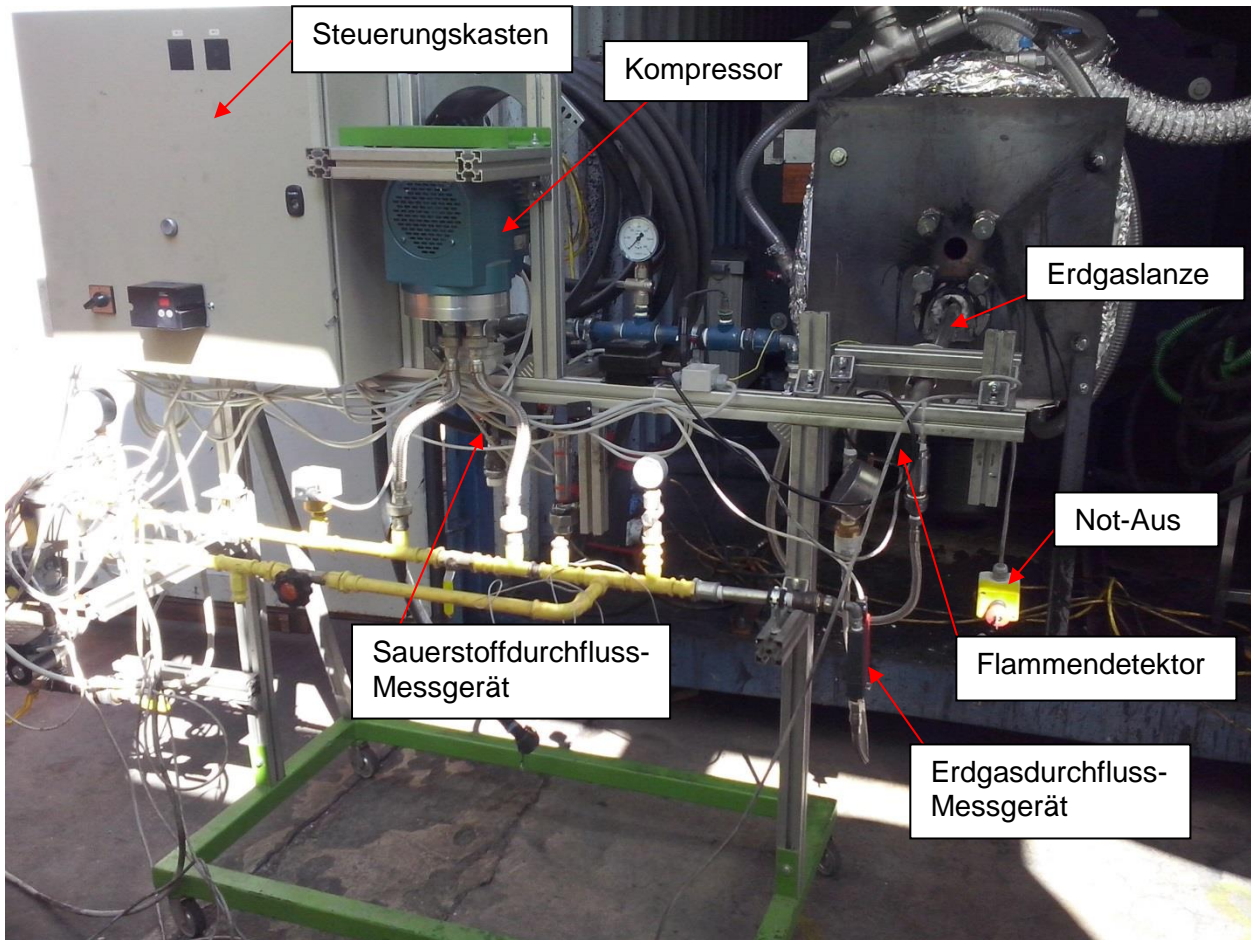
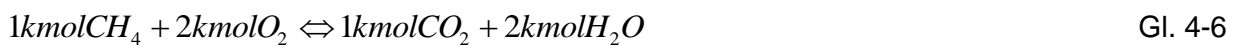


Abbildung 4-15: Versuchsaufbau Erdgasbrenner mit Sauerstoff als Oxidator

4.5.3 Ergebnisse des Versuches

Der stöchiometrische Sauerstoffbedarf bei der Methanverbrennung beträgt nach der Bruttoreaktionsgleichung nach Gl. 4-6 $6 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Dies ergibt ein Luftverhältnis von 1,05 nach Gl. 4-7.



$$\lambda = \frac{O_{2_vorhanden}}{O_{2_stöchiometrisch}} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Nach einer Brenndauer von einer Stunde wurde eine Oberflächentemperatur der Schamottsteine von ca. 510 °C erreicht, die mit einem Thermoelement (Typ K) gemessen wurde. In Abbildung 4-16 ist die Erdgasflamme bei einem Luftverhältnis von 1,33 und 1,05 dargestellt. Bei der Reduktion des Sauerstoffes zeigt sich, dass die Flamme die charakteristische blaue Farbe bei der Erdgasverbrennung annimmt.

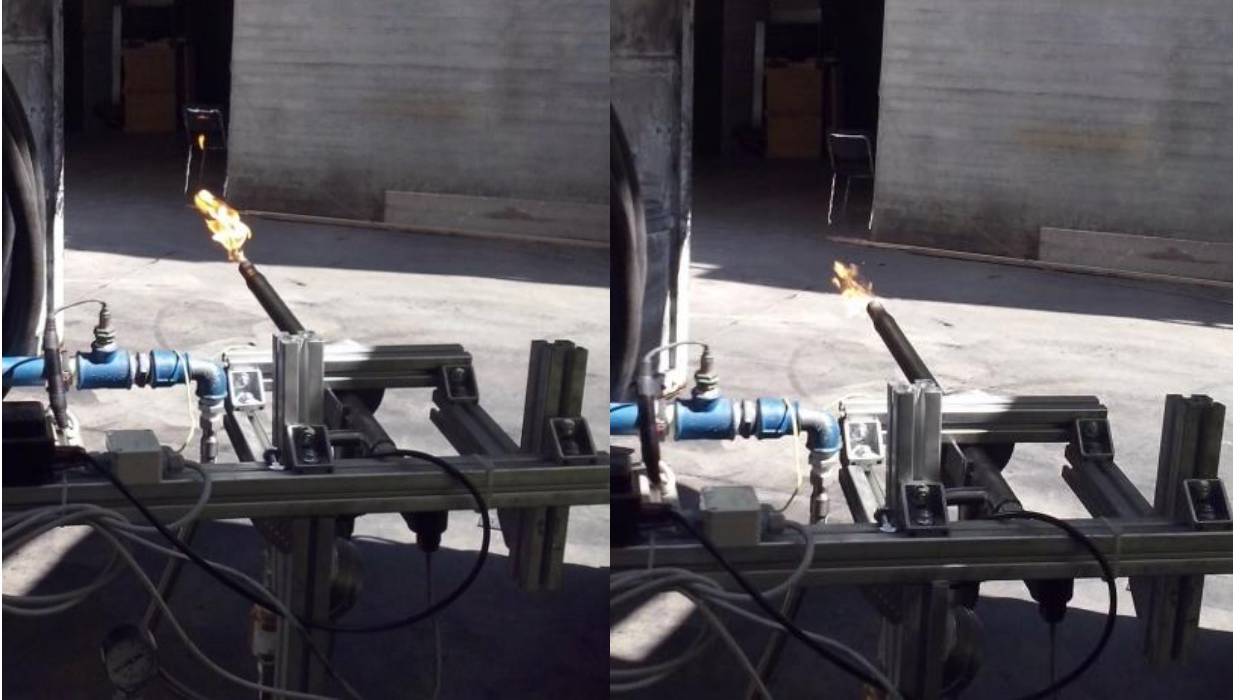


Abbildung 4-16: linkes Bild: Erdgasflamme mit $3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Methan und $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Sauerstoff; rechtes Bild: Erdgasflamme mit $3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Methan und $6,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Sauerstoff

4.5.4 Interpretation des Versuches

Nach einer Stunde Brenndauer konnte keine signifikante Steigerung der Oberflächentemperatur der Schamottsteine festgestellt werden. Die relativ niedrige Oberflächentemperatur der Schamottsteine im Vergleich zu der theoretisch erreichbaren Flammentemperatur von $2780 \text{ }^\circ\text{C}$ zeigt, dass die Leistung des Brenners zu niedrig ist. Die Wärmeverluste durch Strahlung, Konvektion, Wärmeleitung sowie Abgaswärmeverluste sind zu groß um eine weitere Steigerung der Temperatur zu erreichen. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Wärmeverlusten und der eingebrachten Wärmemenge in der Vorbrennkammer ein. Damit eine weitere Steigerung der Temperatur möglich ist, muss die eingebrachte Wärmemenge gesteigert werden. Dies kann über eine Erhöhung des Brennstoffmassenstromes erreicht werden. Da der Durchflussregler des Erdgases das limitierende Bauelement ist, empfiehlt es sich diesen zu wechseln oder auszubauen.

4.6 Sprayversuche

Die Sprayversuche wurden von 19.8- 1.9.2014 am IWT Institut durchgeführt. Zur Versuchsdurchführung wurde eine Slurry mit Stabilisator der Firma Effective Energy Technologies GmbH verwendet, welche in Kapitel 4.3 beschrieben wurde. Die Slurry besteht aus alten zermahlene Reifenteilen, die mit Wasser vermengt wurden. Die Versuche wurden mit und ohne Dispergiermittel in der Slurry durchgeführt.

4.6.1 Aufgabenstellung

Ziel des Versuches war, einen stabilen Transport und die Zerstäubung der Slurry über einen längeren Zeitraum, ohne Verstopfungen, zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, wurden mehrere Slurry- Lanzen von CTP-DUMAG GmbH, Effective Energy Technologies GmbH und Messer Austria GmbH getestet. Darüber hinaus soll der Slurry Massenstrom, in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz der Pumpe ermittelt werden.

4.6.2 Versuchsaufbau

In Abbildung 4-17 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Für die Sprayversuche wurde eine neue Saug- und Druckleitung verwendet, da es bei den vorhergehenden Versuchen zu Verstopfungen in der Saugleitung kam. Der Durchmesser der Saugleitung wurde von 25 mm auf 50 mm erweitert. Zum Transport der Slurry wurde wieder die Exzentrerschnuckenpumpe verwendet. In die Druckleitung ist ein T- Abzweiger mit Absperrventilen eingebaut, damit die Slurry entweder durch die Slurry- Lanze oder zurück in den Slurry- Tank befördert werden kann. Die Netzfrequenz kann durch einen Frequenzumformer umgewandelt werden. Dadurch lässt sich der Durchfluss der Slurry in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz der Pumpe einstellen und durch eine gravimetrische Messung, mit Hilfe einer Waage und einer Stoppuhr, ermitteln.

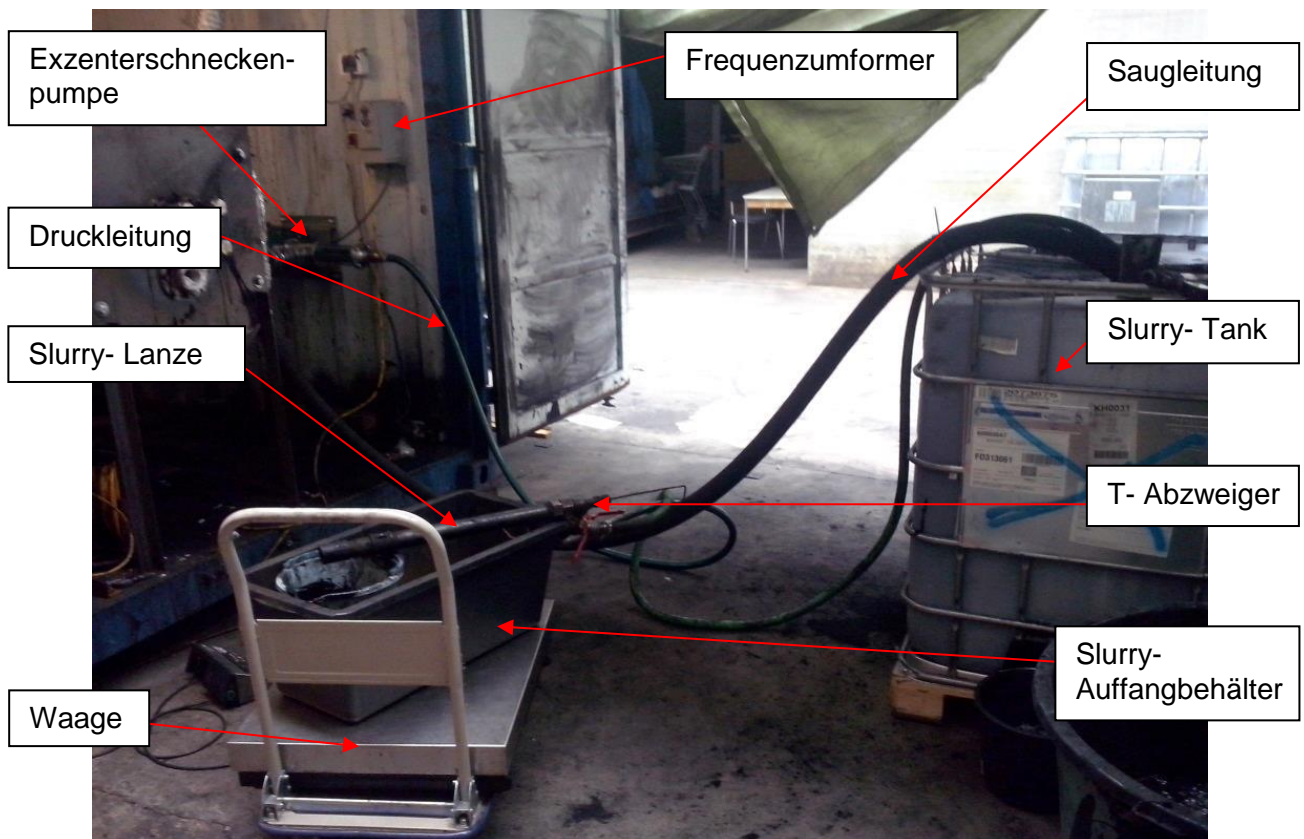


Abbildung 4-17: Versuchsaufbau für Sprayversuche

4.6.3 Versuchsdurchführung ohne Dispergiermittel

Zunächst wurden die Sprayversuche ohne Dispergiermittel in der Slurry durchgeführt. Die Slurry wurde mittels Mörtel Rührer (1,6 kW) homogenisiert. Der Wassergehalt der Slurry wurde mittels Trockenschrankversuch gemessen und betrug 55 wt%. Dies entspricht einem Heizwert von ca. 8471 kJ/kg. Zur Bestimmung des Massenstromes wurde ein gravimetrisches Messverfahren angewandt. Dabei wurde die Slurry in einen Auffangbehälter, der auf einer Waage steht, gesprüht. Die Spraydauer betrug 60 Sekunden. Bei Verstopfung wurde die Düse gereinigt und der Versuch wiederholt. Folgende Slurry- Lanzen wurden verwendet:

- **kurze Lanze von Effective Energy Technologies GmbH**

Es wurde eine Düse mit einem Durchmesser von 7,5 mm verwendet. Der Slurry- Strahl wird mit Luft zerstäubt und tritt mit Drall an der Düse aus. Der Düsenaustritt ist so gestaltet, dass sich bei der Zerstäubung ein Tröpfchenstrahl mit großem Kegelwinkel einstellt. Die Slurry- Düse ist in Abbildung 4-18 dargestellt. Mit dieser Lanze kann ein minimaler Massenstrom von ca. 75 kg/h und ein maximaler Massenstrom von ca. 450 kg/h erreicht werden. Abbildung 4-19 zeigt einen weitgehend linearen Verlauf des Massenstroms in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz der Pumpe. Während der Messungen sind Verstopfungen im Bereich der Düse aufgetreten, daher mussten die Messungen öfters wiederholt werden.

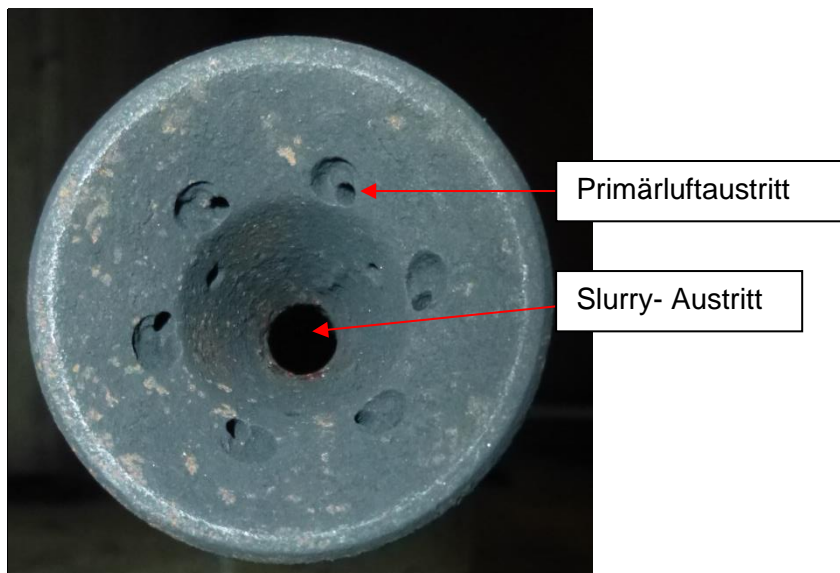


Abbildung 4-18: Slurry Düse von Effective Energy Technologies GmbH

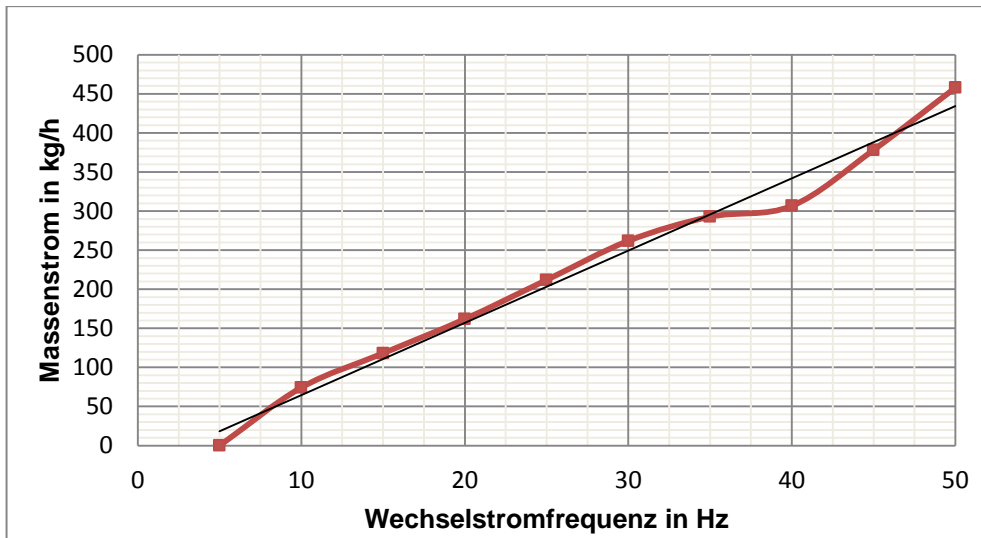


Abbildung 4-19: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (kurze Lanze von Effective Energy Technologies GmbH/ Düsendurchmesser 7,5 mm); Slurry ohne Dispergiermittel mit 55 wt% Wassergehalt

- **lange Lanze von Effective Energy Technologies GmbH**

Es wurde dieselbe Düse mit einem Durchmesser von 7,5 mm und eine Lanze mit einer Länge von 790 mm, die in Abbildung 4-20 dargestellt ist, verwendet. In Abbildung 4-21 sind zwei Messungen des Massenstromes, in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz dargestellt. Eine gute Übereinstimmung der Messungen konnte zwischen 10 und 25 Hz erzielt werden. Bei höherer oder niedriger Frequenz sind Verstopfungen im Bereich der Düse und der Drossel sehr schnell aufgetreten, daher wurde eine kürzere Spraydauer angewandt. Durch die längere Lanze und die Drossel, reduzierten sich der minimale Massenstrom von 75 auf unter 50 kg/h und der maximale Massenstrom von 450 auf 350 kg/h.

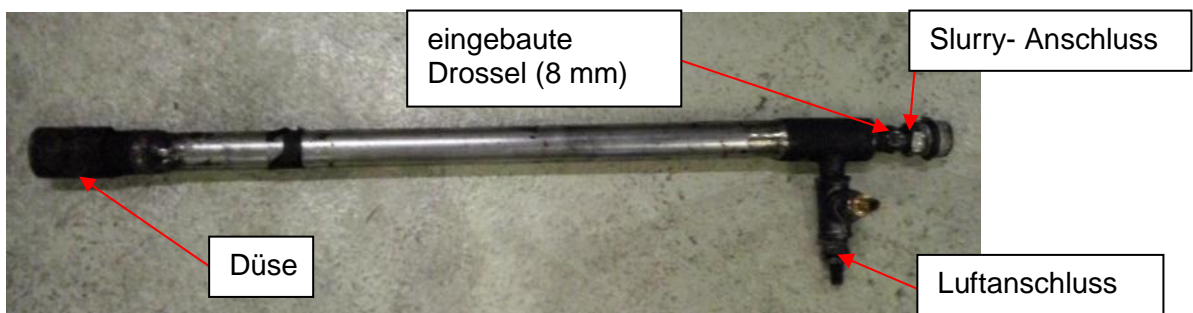


Abbildung 4-20: Slurry- Lanze und Düse von Effective Energy Technologies GmbH

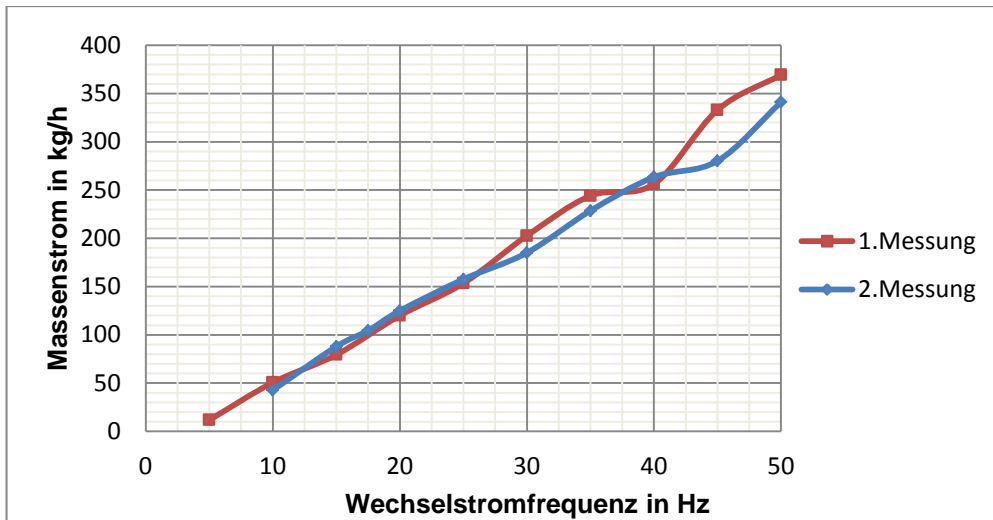


Abbildung 4-21: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (lange Lanze von Effective Energy Technologies GmbH/ Düsendurchmesser 7,5 mm); Slurry ohne Dispergiermittel mit 55 wt% Wassergehalt

- **CTP-DUMAG GmbH**

Bei der DUMAG Düse wird der Slurry- Strahl durch das Hartmannsche Ultraschall Prinzip kurz außerhalb der Düse zerstäubt. Die Primärluft verlässt die Düse bei überkritischem Druckverhältnis ($p/p_0 \approx 0,54$). Das mit 18000 bis 30000 Hz schwingende Schallgas zerreißt den Slurry- Strahl in feinste Tröpfchen. [54]

In Abbildung 4-22 ist die Slurry- Lanze von CTP-DUMAG GmbH, mit und ohne abgeschraubter Düsenkappe, abgebildet. Die Lanze kann mit Luft oder mit Reinsauerstoff als Oxidator betrieben werden. Das Spraybild ist bei einem Massenstrom von ca. 80 kg Slurry/h mit Druckluft ($9 \text{ m}^3/\text{h}$) als Schallgas abgebildet und zeigt eine feine Zerstäubung des Slurry- Strahles. Aufgrund des geringen Düsendurchmessers von 5,5 mm verstopft allerdings die Düse.



Abbildung 4-22: Lanze und Spraybild von CTP-DUMAG GmbH mit 5,5 mm Düsendurchmesser bei ca. 80 kg Slurry/h; Slurry ohne Dispergiermittel mit 55 wt% Wassergehalt

In Abbildung 4-23 ist eine weitere Slurry- Düse mit einem Düsendurchmesser von 6,5 mm abgebildet. Durch den größeren Düsendurchmesser nimmt die Verstopfungsgefahr ab und erhält, den in Abbildung 4-24 dargestellten Massenstrom in Abhängigkeit von der Wechselstromfrequenz der Pumpe. Verstopfungen treten in der Düse und im Bereich des 90° Krümmers beim Slurry- Einlass auf. Darüberhinaus sinkt die Verstopfungsgefahr bei niedrigeren Frequenzen. Bei einer Frequenz von 20 Hz (ca. 57 kg Slurry/h) können Betriebszeiten von bis zu 150 s erreicht werden. Der Grund dafür ist, dass sich die Kohlepartikel bei hohen Geschwindigkeiten in der Lanze leichter vom Wasser entmischen. Daraus folgend entstehen Zonen mit höheren Kohlekonzentrationen, die sich an den Wänden ablagern und zu Verstopfungen anwachsen.

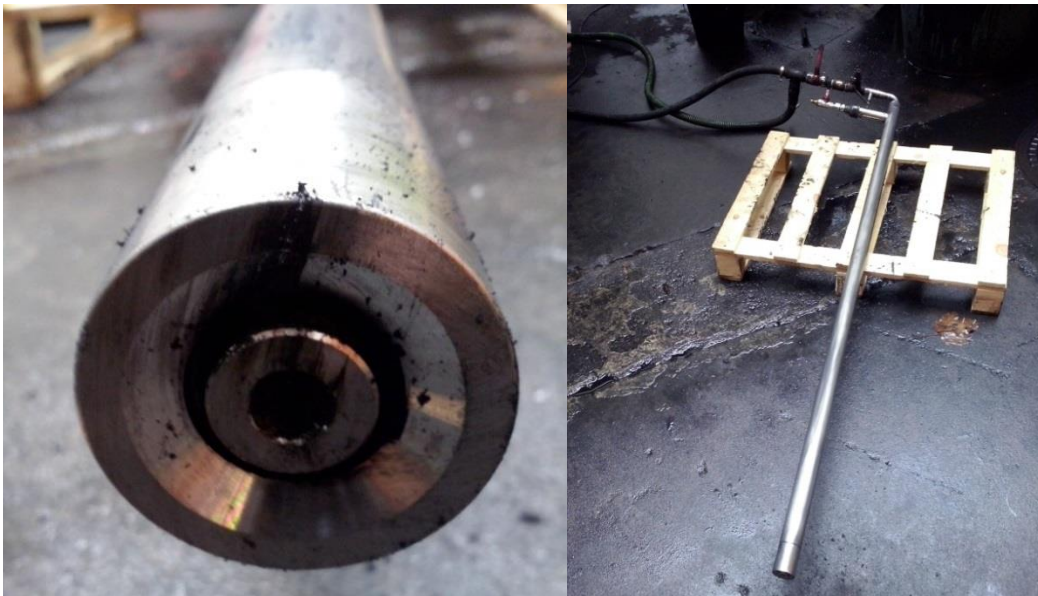


Abbildung 4-23: Lanze von CTP-DUMAG GmbH mit 6,5 mm Düsendurchmesser

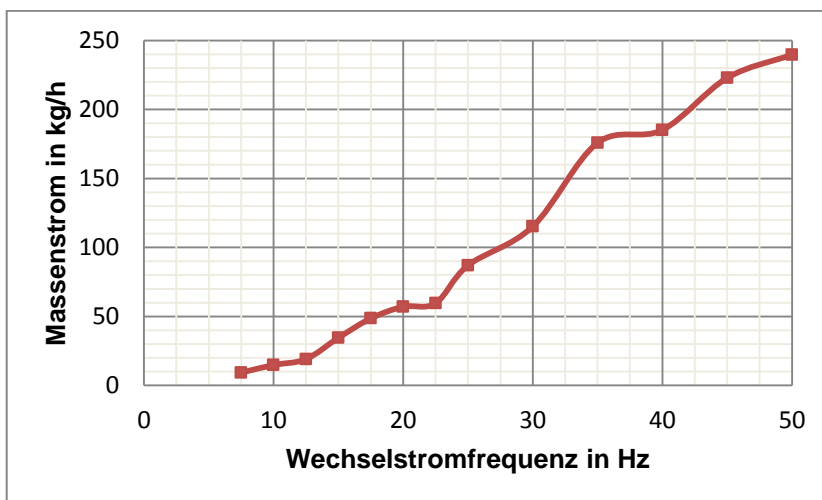


Abbildung 4-24: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (CTP-DUMAG GmbH/ Düsendurchmesser 6,5 mm); Slurry ohne Dispergiermittel mit 55 wt% Wassergehalt

Abbildung 4-25 zeigt das Spraybild einer CTP-DUMAG GmbH Lanze bei einem Massenstrom von ca. 180 kg Slurry/h, der mit Druckluft (9 Nm³/h) zerstäubt wird. Das Spraybild zeigt einen Tröpfchenstrahl mit kleinem Kegelwinkel. Eine optimale Zerstäubung wird laut CTP-DUMAG GmbH bei einem Volumenstrom von ca. 100 Nm³/h erreicht.



Abbildung 4-25: Spraybild bei der CTP-DUMAG GmbH Lanze mit 6,5 mm Düsendurchmesser bei ca. 180 kg Slurry/h; Slurry ohne Dispergiemittel mit 55 wt% Wassergehalt

- **Messer Austria GmbH**

Die Lanze und Düse von Messer Austria GmbH sind in Abbildung 4-26 abgebildet und weisen einen Düsenaustrittsdurchmesser von 4,2 mm auf. Die Lanze kann mit Luft oder mit Reinsauerstoff als Oxidator betrieben werden. Durch den geringen Durchmesser konnte keine Massenstrommessung durchgeführt werden, da es nach wenigen Sekunden zur Verstopfung der Düse kam.



Abbildung 4-26: Lanze und Düse von Messer Austria GmbH

Fazit

Die Untersuchung mehrerer Slurry- Lanzen von unterschiedlichen Herstellern hat gezeigt, dass eine Slurry ohne Dispergiemittel nicht für den Dauerbetrieb geeignet ist, da nach kurzer Zeit Verstopfung auftritt. Auch eine weitere Vergrößerung des Düsendurchmessers auf 8 mm

(Effective Energy Technologies GmbH) und eine Entfernung der Drossel war nur bedingt zielführend, da sich die Lanze dann am Slurry- Eintritt verstopft. Daher wird die Verwendung eines Dispergiermittels empfohlen.

4.6.4 Versuchsdurchführung mit Dispergiermittel

Der Slurry wurde ein Dispergiermittel beigemischt, damit die Viskosität der Slurry gesenkt wird. Als Dispergiermittel wurde Natrium Ligninsulfonat verwendet, das in China häufig eingesetzt wird. Der beigemischte Natrium Ligninsulfonat Anteil in die Slurry betrug 1,23 Vol%. Die Slurry wurde mit einem Mörtel Rührer homogenisiert. Der Wassergehalt der Slurry wurde erneut gemessen und betrug 55,4 wt%. Dies entspricht einem Heizwert von 8348 kJ/kg. Die zwei vielversprechendsten Slurry- Lanzen aus den vorhergehenden Versuchen wurden erneut getestet:

- **Lanze von CTP-DUMAG GmbH**

Der Düsendurchmesser der Lanze betrug 6,5 mm. In Abbildung 4-27 ist der Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz der Pumpe dargestellt. Es zeigt sich ein weitgehend linearer Verlauf, der bei einer Frequenz von 20 Hz einbricht. Die Exzentrerschneckenpumpe kann bei niedrigeren Frequenzen die Druckverluste nicht mehr aufbringen und der Slurry- Transport bricht zusammen. Der maximale Massenstrom der Slurry kann um ca. 50 kg auf 290 kg Slurry/h gesteigert werden.

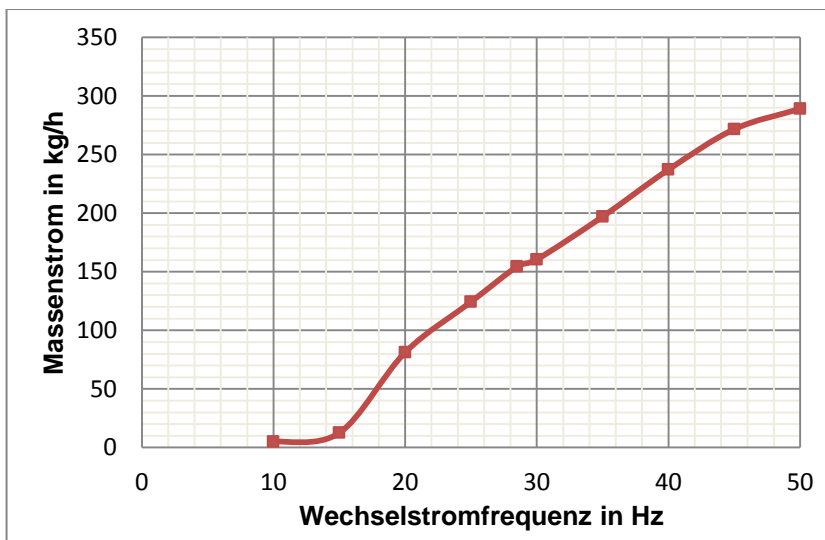


Abbildung 4-27: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (CTP-DUMAG GmbH/ Düsendurchmesser 6,5 mm); Slurry mit Dispergiermittel mit 55 wt% Wassergehalt

- **lange Lanze von Effective Energy Technologies GmbH**

Die 8 mm Drosselstelle im Bereich des Slurry- Eintritts wurde auf 14 mm aufgebohrt. Danach sind keine weiteren Verstopfungen in diesem Bereich aufgetreten. Der Durchmesser der Düse wurde auf 8 mm aufgebohrt. Abbildung 4-28 zeigt einen linearen

Verlauf zwischen dem Massenstrom und der Wechselstromfrequenz der Pumpe. Unter einer Frequenz von 20 Hz kann die Slurry nicht mehr transportiert werden.

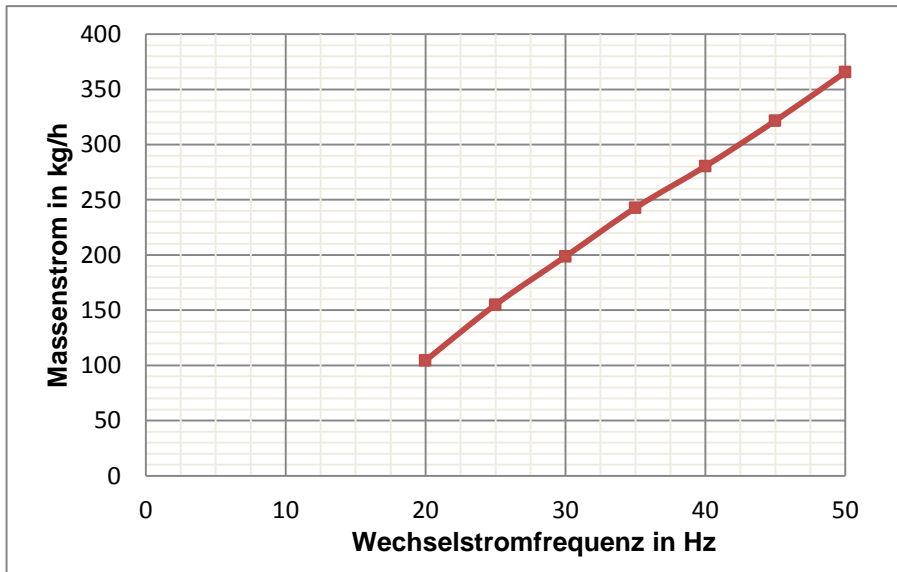


Abbildung 4-28: Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz (lange Lanze von Effective Energy Technologies GmbH/ Düsendurchmesser 8 mm); Slurry mit Dispergiertmittel mit 55 wt% Wassergehalt

4.6.5 Interpretation der Ergebnisse

Die Sprayversuche haben gezeigt, dass der Einsatz von Slurry ohne Dispergiertmittel nicht sinnvoll ist. Natrium Ligninsulfonat hat sich als Dispergiertmittel bewährt und hat das Problem der Verstopfungen gelöst. Es ist mit "freiem Auge" eine deutliche Reduktion der Viskosität ersichtlich. Die Lanzen von Effective Energy Technologies GmbH und CTP-DUMAG GmbH haben sich bei einer Betriebsdauer von jeweils 1,5 Stunden bei unterschiedlichen Frequenzen nicht verstopft. Lediglich bei Wechselstromfrequenzen unter 20 Hz ist ein Transport der Slurry nicht mehr möglich. Die Lanze von CTP-DUMAG GmbH weist die besten Ergebnisse bei der Zerstäubung auf. Durch das Hartmannsche Ultraschall Prinzip ist eine Zerstäubung in feinste Tröpfchen möglich. Weiters kann die Lanze mit Luft und mit Reinsauerstoff als Oxidator verwendet werden.

Ein längerfristiges Ziel der Effective Energy Technologies GmbH ist es, die Leistung zu steigern, um den Einsatz der Kohle- Slurry- Verbrennung für industrielle Anwendungen attraktiver zu gestalten. Mit der Lanze von CTP-DUMAG GmbH ist ein maximaler Massenstrom von 290 kg Slurry/h möglich. Dies entspricht einer Leistung von 672 kW ($H_u=8348$ kJ/kg). Um den adaptierten Ölkessel ($P_{\max}=1,4$ MW) ohne Stützfeuer voll auszulasten, müsste ein Massenstrom von 604 kg Slurry/h erreicht oder der Wassergehalt auf ca. 26,2 wt% ($H_u=17379$ kJ/kg) gesenkt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wird es sinnvoll sein beide Varianten zu kombinieren. Realistisch ist ein Wassergehalt von 40 wt% ($H_u=13104$ kJ/kg). Dann wären ca. 385 kg Slurry/h nötig, um 1,4 MW zu erreichen.

Weiters soll eine Analyse der Partikelgrößenverteilung durchgeführt werden, um festzustellen, welche Durchmesser die größten Partikel in der Slurry aufweisen. Die großen Partikel beeinflussen das Verstopfungsverhalten entscheidend.

4.7 Brennstoffanalyse

Die Brennstoffanalyse wurde von der BIOENERGY 2020+ durchgeführt [55]. Als Probe wurde ca. 3 kg Slurry nach einer Homogenisierung mittels Mörtelrührer über die Slurry- Lanze entnommen. Bestimmt wurden der Wassergehalt nach EN 14774, der Aschegehalt (bei 550 °C) nach EN 14775, der Brennwert und Heizwert nach DIN 51900 bzw. EN 14918 und die Partikelgrößenverteilung (mittels Laserbeugung). Weiters wurde der Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff- und Schwefelgehalt nach EN 15104 gemessen.

Eine Zusammenfassung der Analyseergebnisse ist in Tabelle 4-7 aufgelistet. Auffällig ist ein niedriger Wasserstoffgehalt von 0,812 wt%, da der Analysebericht der Fachabteilung Abfall- und Stoffflusswirtschaft vom Land Steiermark einen Wasserstoffgehalt von 7 wt% bei Altreifen aufweist [56]. Der Wassergehalt von 53,4 wt% stimmt näherungsweise mit den Trockenschrankversuchen (55 wt% Wassergehalt) überein. Der Schwefelgehalt ist durch die zermahlene Reifenteile in der Slurry, mit 3,2 wt% relativ hoch. Der Stickstoffgehalt von 0,335 wt% und der Kohlenstoffgehalt von 74,5 wt% befinden sich im Normalbereich. Der Brennwert der trockenen aschefreien Kohle beträgt 27170 kJ/kg und wurde mittels Bombenkalorimeter bestimmt. Der Heizwert der Slurry beträgt 11270 kJ/kg. Die restlichen Bestandteile des Brennstoffes setzen sich vorwiegend aus Sauerstoff und Eisen zusammen, da bei der Slurry- Herstellung nicht alle Eisenteile aus den alten Reifenteilen entfernt werden konnten.

Tabelle 4-7: Analyseergebnisse der Slurry [55]

Parameter	Einheit	Analysenwert
WG	[% OS]	53.4%
AG	[% TS]	22.9%
H _{ov (wf)}	[kJ/kg] TS	27170
H _{uv (wf)}	[kJ/kg] TS	26990
H _{u (roh)}	[kJ/kg] OS	11270
C	[mg/kg] TS	745000
H	[mg/kg] TS	8120
N	[mg/kg] TS	3360
S	[mg/kg] TS	32000

In Abbildung 4-29 ist die Partikelgrößenverteilung dargestellt. Auf der linken Ordinate ist die Summenverteilung Q_3 in % aufgetragen. ΔQ_3 beschreibt nach Gl. 4-8 das Verhältnis der relativen Masse zwischen zwei Partikelgrößen zur Gesamtmasse. Die Dichteverteilung q_3 berechnet sich, bei einer differenzierbaren Summenverteilung $Q_3(x)$, durch die Ableitung der Summenverteilung (Gl. 4-9).

$$\Delta Q_3(x) = \frac{m(\Delta x)}{m_{ges}(x)} \quad \text{Gl. 4-8 [57]}$$

$$q_3(x) = \frac{dQ_3(x)}{dx} \quad \text{Gl. 4-9 [57]}$$

Die Partikelgröße der Slurry liegt zwischen $0,25 \mu\text{m}$ und $365 \mu\text{m}$. Die großen Partikel in der Slurry sind entscheidend für das Verstopfungsverhalten der Düse und der Lanze. Daher ist es wesentlich, beim Herstellungsprozess die großen Partikel aus der Slurry zu entfernen. Wie in Kapitel 2.1.3 angeführt, sollte die maximale Partikelgröße von $250 \mu\text{m}$ nicht überschritten und 70- 80 % der Partikel sollten eine Partikelgröße unter $74 \mu\text{m}$ aufweisen. Bei der Slurry- Probe sind nur ca. 98 % der Partikel unter $250 \mu\text{m}$. Ca. 64 % der Partikel sind unter $74 \mu\text{m}$. Ca. 80 % der Partikel sind kleiner als der Maximalwert der Dichteverteilung von $110 \mu\text{m}$. Die Dichteverteilung zeigt, dass der wesentliche Anteil der Gesamtmasse im Bereich der großen Partikel liegt.

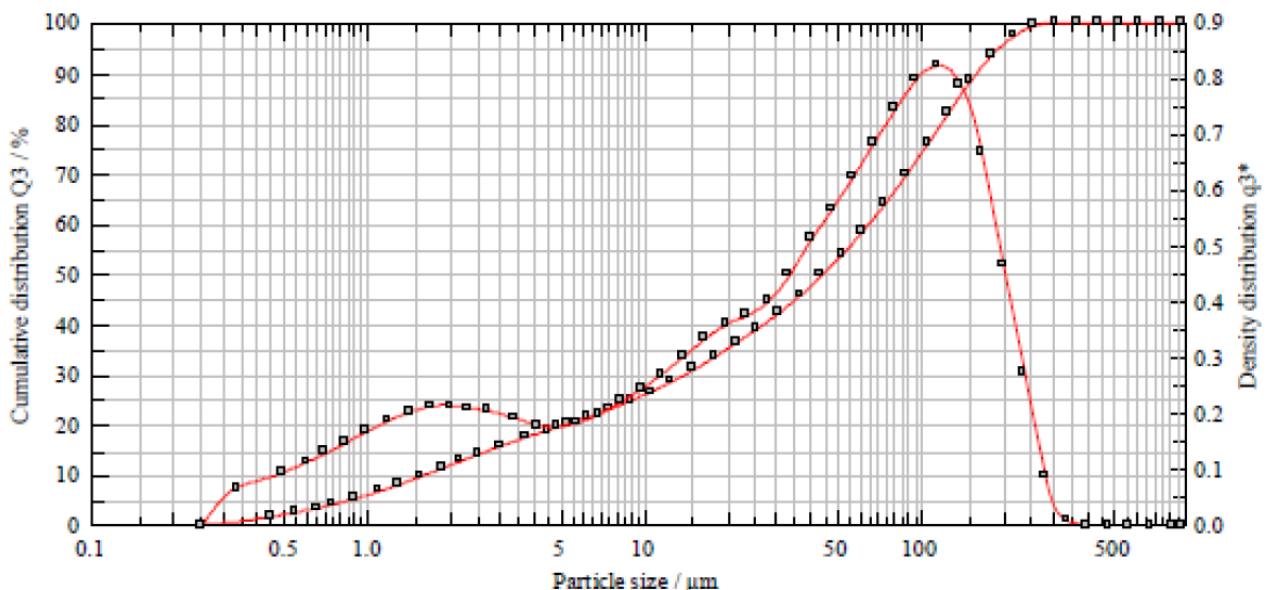


Abbildung 4-29: Partikelgrößenverteilung und Dichteverteilung [55]

4.8 Verbrennungsversuch mit Erdgasbrenner als Stützfeuer

Der Versuch wurde am 11.9 am IWT Institut durchgeführt.

4.8.1 Aufgabenstellung

Ziel des Versuches war, eine stabile Verbrennung der Slurry mit einem Erdgasbrenner als Stützfeuer zu erreichen. Es soll anhand von Rauchgasanalysen und Temperaturmessungen die Energiebilanz geschlossen werden. Weiters soll die Slurry Verbrennung ohne Stützfeuer und die Verbrennung mit Reinsauerstoff getestet werden.

4.8.2 Versuchsdurchführung

Versuche wurden mit dem unter Kapitel 4.1 beschriebenen adaptierten Ölkessel und mit der, unter Kapitel 4.4 beschriebenen, Vorbrennkammer bei ca. 20 °C Umgebungstemperatur durchgeführt. Der Versuchsaufbau des Erdgasbrenners mit Sauerstoff als Oxidator ist in Kapitel 4.5.2 beschrieben. Während der Versuche wurde der Wassermassenstrom des Kühlsystems von ca. 167 kg/h konstant gehalten. Zur Messung des Rauchgases wurde das Rauchgasanalysegerät testo 350 M/XL verwendet. Die Temperatur wurde mit einem Thermoelement (Typ K) gemessen. Es wurden 4 Verbrennungsversuche mit Luft, mit Sauerstoff angereicherter Luft und mit Reinsauerstoff durchgeführt, die nachfolgend beschrieben werden:

- a) Zunächst wurde die Vorbrennkammer mit einem Erdgasbrenner als Stützfeuer aufgeheizt. Der Erdgasbrenner wurde mit Reinsauerstoff als Oxidator betrieben. Um die Leistung des Erdgasbrenners zu steigern, wurde das Erdgasdurchfluss- Messgerät ausgebaut, da es den Durchfluss auf 3 Nm³/h limitiert. Der Erdgasbrenner wurde mit Hilfe des Rauchgasanalysegerätes und der Flammenfarbe auf eine überstöchiometrische Verbrennung (10,87 Vol% Sauerstoff im Rauchgas) mit einem Sauerstoffvolumenstrom von 10,97 Nm³/h eingestellt. Die Vorbrennkammer wurde mit dem Erdgasbrenner ca. 1,5 Stunden auf eine Wandtemperatur von 725 °C aufgeheizt. Die Wasserrücklauftemperatur des Kühlsystems betrug 80,9 °C.
- b) Nach dem Aufheizen der Vorbrennkammer wurde zusätzlich zum Erdgasbrenner, die Slurry unter Verwendung der Lanze von CTP-DUMAG GmbH mit einem Düsendurchmesser von 6,5 mm und mit einem Massenstrom von 125 kg Slurry/h, in die Vorbrennkammer eingespritzt. Die Slurry wurde mit Luft als Oxidator verbrannt. Die Zerstäubung der Slurry erfolgte mittels Druckluft von 9,5 Nm³/h, die Sekundärluft wurde über ein Gebläse mit 350 Nm³/h eingebracht. Zuvor erfolgte die Messung des Volumenstromes des Sekundärluftgebläses in Abhängigkeit der Stellung des Frequenzumformers, mit einem Flügelradanemometer. Die Geschwindigkeit wurde entlang des Radius der Saugleitung bei

20 °C mehrmals gemessen und über den Querschnitt integriert. Der Volumenstrom wurde auf Nm³/h (T=0 °C, p=1,013 bar) umgerechnet. Nach ca. 8 Minuten Brenndauer wurden eine Wandtemperatur von 850 °C und eine Wasserrücklauftemperatur von 86,5 °C gemessen.

- c) Als nächster Versuch wurde untersucht, ob eine Verbrennung auch ohne Stützfeuer möglich ist. Die Erdgaszufuhr wurde gestoppt und es wurde eine reine Slurry Verbrennung mit Sauerstoff angereicherter Luft getestet. Der Oxidator setzte sich aus 9,5 Nm³/h Druckluft zur Zerstäubung der Slurry, 350 Nm³/h Sekundärluft und 10,97 Nm³/h Sauerstoff zusammen, wobei der Oxidator eine Sauerstoffkonzentration von 23,2 Vol% aufwies. Der Massenstrom der Slurry betrug konstant 125 kg Slurry/h. Nach kurzer Zeit kam es zum Erlöschen der Flamme, da die Wandtemperatur bereits wieder unter 800 °C gesunken war.
- d) Da die Flamme beim vorhergehenden Versuch erloschen ist, wurde die Slurry Verbrennung mit Reinsauerstoff getestet. Nach kurzen Umbauten wurde die Slurry- Lanze mit 75 Nm³/h Reinsauerstoff bei einem Slurry- Massenstrom von 125 kg Slurry/h betrieben. Die Slurry entzündete sich beim Einspritzen in die Vorbrennkammer und es konnte eine Betriebsdauer von 2,5 Minuten erzielt werden. Danach kam es zum Erlöschen der Flamme, da sich wie sich später herausstellte die Düse verstopfte. Die Wasserrücklauftemperatur betrug 90,2 °C.

4.8.3 Ergebnisse des Versuches

Die wesentlichen Ergebnisse über die Slurry Verbrennung wurden aus der Slurry Verbrennung mit Stützfeuer und aus der Slurry Verbrennung mit Reinsauerstoff als Oxidator gewonnen. Die chemische Zusammensetzung und der Heizwert der Slurry kann der Brennstoffanalyse aus dem Kapitel 4.7 entnommen werden. Die Kühlwasservorlauftemperatur T_{KW_VL} betrug 19,2 °C.

ad a)

Zur Vereinfachung wird näherungsweise angenommen, dass sich das Erdgas zu 100 % aus Methan zusammensetzt. Unter Verwendung der Reaktionsgleichung Gl. 4-10 für die Verbrennung von Methan mit Sauerstoff, unter Verwendung des Luftverhältnisses und der Gl. 4-7, kann der Erdgasvolumenstrom und das Luftverhältnis berechnet werden. Mittels iterativer Rechnung wird der errechnete Sauerstoffgehalt im Rauchgas dem gemessenen Sauerstoffgehalt durch Variation des Methanvolumenstromes angenähert. Es ergeben sich ein Erdgasvolumenstrom von ca. 4,64 Nm³/h und ein Luftverhältnis von ca. 1,18.



Die Leistung des Erdgasbrenners betrug 46,5 kW bei einem Heizwert von 808,5 MJ/kg. [49]

ad b)

Beim darauffolgenden Versuch wurde die Slurry mit Luft als Oxidator verbrannt und als Stützfeuer wurde ein Erdgasbrenner mit Reinsauerstoff als Oxidator verwendet. Die Rauchgaszusammensetzung ist in Tabelle 4-8 aufgelistet. Diese weist einen Restsauerstoff von über 9 Vol% auf, wobei das Kohlenmonoxid einen Wert von 1772 ppm einnimmt. Der hohe Restsauerstoff- und Kohlenmonoxidgehalt weist auf eine unvollständige Verbrennung hin.

Tabelle 4-8: gemessene Rauchgaszusammensetzung Slurry mit Stützfeuer

V _{O2}	V _{CO}	V _{NO}	V _{NO2}	V _{SO2}
9,39 Vol%	1772 ppm	183 ppm	0,4 ppm	0 ppm

Zur Bestimmung der Leistung der umgesetzten Brennstoffenergie wird eine instationäre Betrachtung des Kühlwassersystems des adaptierten Ölkessels herangezogen. Das Kühlwassersystem ist in Abbildung 4-30 dargestellt und hat ein Fassungsvermögen von 1560 Liter Wasser im adaptierten Ölkessel. Bei diesem System handelt es sich um ein offenes System, bei dem 167 kg Wasser/h dem System zu- und abgeführt werden. Die Berechnung erfolgt instationär, da bei einer Brenndauer t_{BD} von 8 Minuten noch keine konstante Kühlwasserrücklauftemperatur erreicht werden kann. Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme (Gl. 4-11) wird auf das System Kühlwasser angewandt. Dabei werden die äußere Energien E_a vernachlässigt und es wird keine Arbeit A_t über die Systemgrenzen verrichtet. Nach der Vernachlässigung der vorhin angeführten Terme ergibt sich Gl. 4-12. Über die Systemgrenzen werden der Wärmestrom des Erdgasbrenners \dot{Q}_{Erdgas} und der Wärmestrom des Slurry- Brenners \dot{Q}_{Slurry} zugeführt. Die Verlustleistung, die dem System entzogen wird, setzt sich aus den Isolationsverlusten und aus den Wärmeübergangsverlusten vom Rauchgas auf das Kühlwasser zusammen und wird mittels Kesselwirkungsgrad nach Gl. 4-13 berücksichtigt. Die innere Energie U berechnet sich nach Gl. 4-14. Mit der Kühlwassermasse dm_{KW} wird die Enthalpie $\sum dm_i \cdot h_i$ zugeführt und berechnet sich nach Gl. 4-15. Die Kühlwasserrücklauftemperatur $T_{KW,RL}(t)$ ist von der Zeit abhängig. Zur Vereinfachung wird daher näherungsweise der Mittelwert aus Anfangs- und Endtemperatur nach Gl. 4-16 herangezogen. Nach dem Einsetzen von Gl. 4-13 bis Gl. 4-15 in Gl. 4-12 ergibt sich der 1. Hauptsatz für das System Kühlwasser bei der Slurry Verbrennung mit einem Erdgasbrenner als Stützfeuer (Gl. 4-17). Dieser kann integriert

werden und nach der Division durch die Brenndauer erhält man Gl. 4-18. Nach dem Umformen der Gleichung wird die Wärmeleistung der umgesetzten Slurry \dot{Q}_{Slurry} nach Gl. 4-19 berechnet und beträgt 50,2 kW.

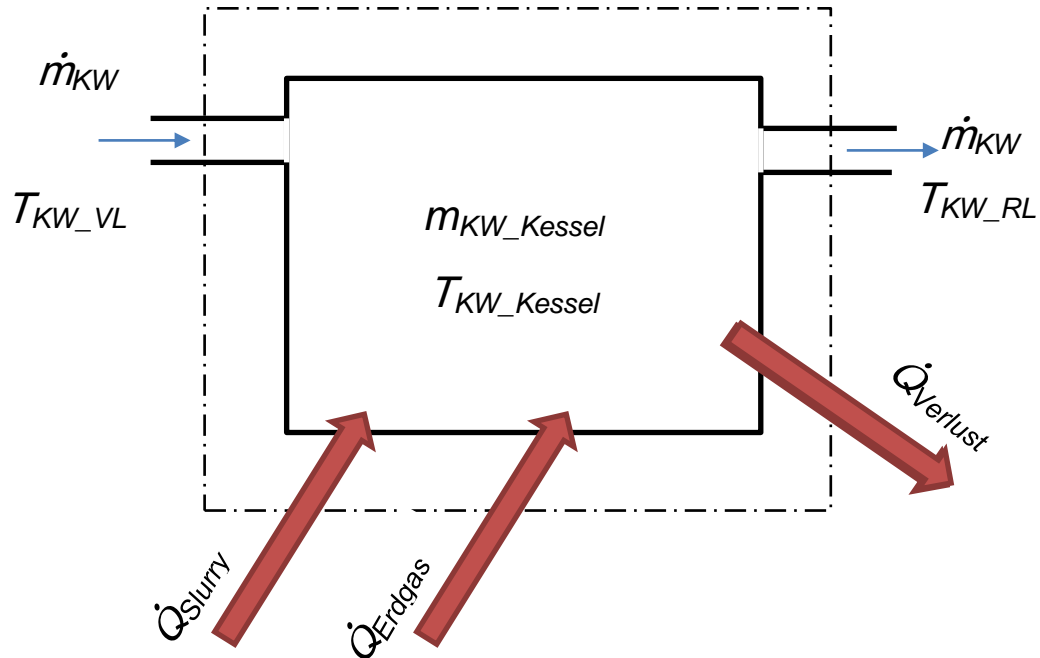


Abbildung 4-30: System Kühlwasser bei der Slurry-Verbrennung mit Erdgasbrenner als Stützfeuer

$$dA_i + dQ_a + \sum dm_i \cdot (h_i + e_{ai}) = dU + dE_a \quad \text{Gl. 4-11}$$

$$dQ_a + \sum dm_i \cdot h_i = dU \quad \text{Gl. 4-12}$$

$$dQ_a = d(Q_{Erdgas} + Q_{Slurry}) \cdot \eta_{Kessel} \quad \text{Gl. 4-13}$$

$$dU = m_{KW_Kessel} \cdot c_W \cdot dT_{KW_Kessel} \quad \text{Gl. 4-14}$$

$$\sum dm_i \cdot h_i = dm_{KW} \cdot c_W \cdot (T_{KW_RL}(t) - T_{KW_VL}) \quad \text{Gl. 4-15}$$

$$T_{KW_RL}(t) = \frac{T_{KW_RL_t0} + T_{KW_RL_t8\min}}{2} \quad \text{Gl. 4-16}$$

$$d(\dot{Q}_{Erdgas} + \dot{Q}_{Slurry}) \cdot \eta_{Kessel} + dm_{KW} \cdot c_W \cdot (T_{KW_RL}(t) - T_{KW_VL}) = m_{KW_Kessel} \cdot c_W \cdot dT_{KW_Kessel} \quad \text{Gl. 4-17}$$

$$(\dot{Q}_{Erdgas} + \dot{Q}_{Slurry}) \cdot \eta_{Kessel} + \dot{m}_{KW} \cdot c_W \cdot (T_{KW_RL}(t) - T_{KW_VL}) = \frac{m_{KW_Kessel}}{t_{BD}} \cdot c_W \cdot (T_{KW_Kessel_t8\text{min}} - T_{KW_Kessel_t0})$$

Gl. 4-18

$$\dot{Q}_{Slurry} = \frac{\dot{m}_{KW} \cdot c_W \cdot (T_{KW_RL}(t) - T_{KW_VL}) + \frac{m_{KW_Kessel} \cdot c_W \cdot (T_{KW_Kessel_t8\text{min}} - T_{KW_Kessel_t0})}{t_{BD}} - \dot{Q}_{Erdgas} \cdot \eta_{Kessel}}{\eta_{Kessel}}$$

Gl. 4-19

Die mögliche Leistung der Slurry beträgt 391 kW mit einem Heizwert von 11270 kJ/kg. Daraus folgt, dass ca. 13 % der potentiellen Brennstoffenergie umgesetzt wurde.

In Abbildung 4-31 ist die Slurry- und Erdgasflamme und das Rauchgas dargestellt. Durch die hohen Kohlenmonoxidwerte von 1772 ppm erhält das Rauchgas eine gräuliche Farbe. Der Hauptbestandteil des sichtbaren Rauchgases besteht aus Wasserdampf.



Abbildung 4-31: links Slurry- und Erdgasflamme; rechts Rauchgas bei Slurry- und Erdgasverbrennung

ad d)

Die Rauchgaszusammensetzung bei der Reinsauerstoffverbrennung ist, nach einer Brenndauer von 2,5 Minuten, in Tabelle 4-9 aufgelistet. Es zeigt sich, dass keine vollständige Verbrennung erreicht werden konnte, da das Rauchgas einen

Kohlenmonoxidwert von über 4000 ppm bei einem vorhandenen Restsauerstoff von ca. 14 Vol% erzielt wurde.

Tabelle 4-9: gemessene Rauchgaszusammensetzung Slurry ohne Stützfeuer

V _{O2}	V _{CO}	V _{NO}	V _{NO2}	V _{SO2}
13,96 Vol%	4146 ppm	59 ppm	0 ppm	19 ppm

In Abbildung 4-32 ist das System Kühlwasser für die Slurry Verbrennung mit Reinsauerstoff dargestellt. Die Wärmeleistung des umgesetzten Slurry Brennstoffes (Gl. 4-20) lässt sich wie in der vorangegangenen Rechnung ermitteln, wobei dem System kein Wärmestrom vom Erdgasbrenner zugeführt wird und beträgt ca. 161 kW. Daraus lässt sich folgern, dass ca. 50 % der potentiellen Slurry- Brennstoffleistung umgesetzt wurde.

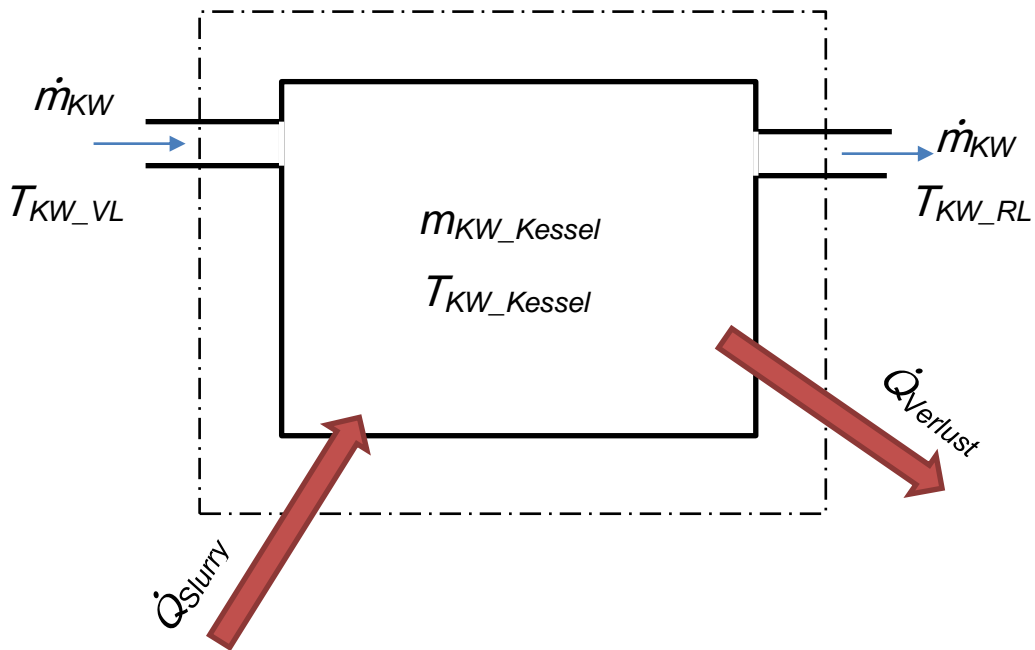


Abbildung 4-32: System Kühlwasser bei der Slurry Verbrennung mit Reinsauerstoff

$$\dot{Q}_{Slurry} = \frac{\dot{m}_{KW} \cdot c_W \cdot (T_{KW_RL}(t) - T_{KW_VL}) + \frac{m_{KW_Kessel}}{t_{BD}} \cdot c_W \cdot (T_{KW_Kessel_t2,5\min} - T_{KW_Kessel_t0})}{\eta_{Kessel}}$$

Gl. 4-20

Das linke Bild der Abbildung 4-33 zeigt eine Slurry- Flamme bei der Reinsauerstoffverbrennung, die eine hellgelbe Flammenfarbe einnimmt. Das Rauchgas weist durch die hohen CO Werte wieder eine gräuliche Farbe auf.



Abbildung 4-33: links Slurry- Flamme bei Reinsauerstoff; rechts Rauchgas bei Slurry Verbrennung

4.8.4 Interpretation der Ergebnisse

Abbildung 4-34 zeigt einen Flammenvergleich. Die charakteristische blaue Flamme der Erdgasverbrennung mit Reinsauerstoff ist im linken Bild ersichtlich. Bei der Verbrennung der Slurry mit Erdgas als Stützfeuer, weist die Flamme ein gelbliches Leuchten auf. Bei der Verbrennung der Slurry mit Sauerstoff angereicherter Luft (23,2 Vol% Sauerstoff im Oxidator) und ohne Stützfeuer, ist die Verbrennung unvollkommen und die Slurry kann nicht richtig gezündet werden. Bei der Verbrennung mit Reinsauerstoff ist ein helles Leuchten der Flamme ersichtlich, die auf eine hohe Temperatur hinweist.



Abbildung 4-34: Flammenvergleich von links nach rechts: Erdgasflamme; Slurry- und Erdgasflamme; Slurry- Flamme mit angereicherter Luft; Slurry- Flamme mit Reinsauerstoff

In Abbildung 4-35 sind die Verbrennungsrückstände nach dem Abkühlen der Vorbrennkammer abgebildet. Durch die Eisenbestandteile im Brennstoff kommt es zur Bildung von Schlacke. Durch die hohen Temperaturen bei der Reinsauerstoffverbrennung sammelt sich besonders viel Schlacke an, da der Schmelzpunkt der Asche überschritten wird. Es handelt sich bei der Schlacke um ein festes Gebilde, welches sich nur schwer von der Brennkammer entfernen lässt. In der Vorbrennkammer sammelt sich in Anbetracht der unvollständigen Verbrennung relativ wenig Asche an.

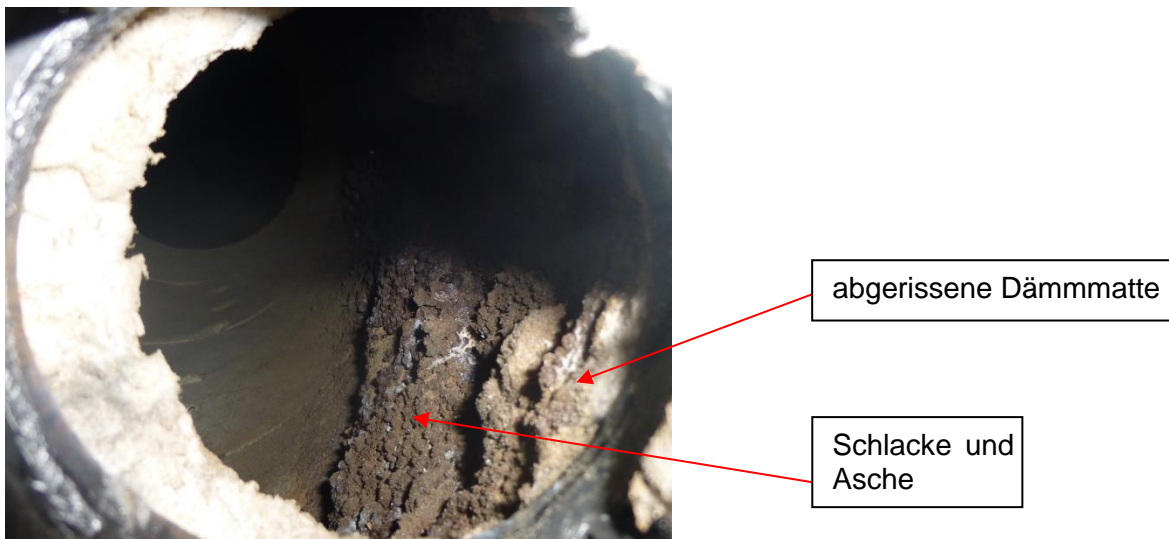


Abbildung 4-35: Verbrennungsrückstände in der Vorbrennkammer

Alle Versuche ergaben eine stark unvollkommene Verbrennung der Slurry. Bei der Verbrennung der Slurry mit Stützfeuer konnten nur 13 % der möglichen Brennstoffenergie umgesetzt werden und bei der Verbrennung mit Reinsauerstoff konnten ca. 50 % der Brennstoffenergie umgesetzt werden. Wobei die umgesetzte Brennstoffenergie bei der Verbrennung mit Reinsauerstoff mit Vorsicht betrachtet werden muss, da die Brenndauer nicht exakt festgestellt werden konnte, weil es zu einer Verstopfung der Lanze kam. Die Verstopfung ist darauf zurückzuführen, dass die Wechselstromfrequenz der Exzentrerschneckenpumpe mit 25 Hz an der unteren Grenze angesetzt war und somit kam es zum Abreißen des Slurry- Stromes.

Weiters weisen die hohen CO Werte im Rauchgas auf eine unvollkommene Verbrennung hin. Die Verweilzeit der Slurry-Tröpfchen ist in der Vorbrennkammer zu gering, um vollständig mit Hilfe des Restsauerstoffes von 9,39 bzw. 13,96 Vol% zu verbrennen. Daher empfiehlt es sich für weitere Versuche die Vorbrennkammer zu adaptieren. Durch die zylindrische Form der Vorbrennkammer, mit einem Durchmesser von 390 mm, ist die Geschwindigkeit der Kohlepartikel hoch, die Partikel haben nur eine geringe Verweilzeit in der Vorbrennkammer und gelangen, bevor sie vollständig verbrennen, in den wassergekühlten Kessel. Dort ist ein Zünden der Kohlepartikel wegen der geringen Wandtemperatur des Kessels nicht mehr möglich. Eine Möglichkeit, um die Verweilzeit der Kohlepartikel zu verlängern, ist die Form der Vorbrennkammer zu verändern. Eine scharfkantige Erweiterung des Durchmessers der Vorbrennkammer führt zu einer Wirbelbildung und zu Rückströmungen der heißen Verbrennungsgase. Weiters wird durch die Erweiterung die Geschwindigkeit der Kohlepartikel reduziert und der Druck steigt. Eine weitere Möglichkeit zur Verlängerung der Verweilzeit stellt eine Verlängerung der Vorbrennkammer dar. Dadurch wird ebenfalls die Verweilzeit verlängert.

4.9 Versuch 18.9.2014

Der Versuch aus Kapitel 4.8.2 a bis c wurde wiederholt. Die Vorbrennkammer wurde mit einem Erdgasbrenner als Stützfeuer, der mit Reinsauerstoff als Oxidator betrieben wurde, aufgeheizt. Danach wurde zusätzlich Slurry in die Vorbrennkammer eingebracht und mit Luft als Oxidator verbrannt. Der Betrieb wurde ca. 30 Minuten aufrecht gehalten. Anschließend erfolgte die Abschaltung des Stützfeuers und ein reiner Slurry- Betrieb, mit Sauerstoff angereicherter Luft (23 Vol% Sauerstoff im Oxidator) konnte für ca. 10 Minuten aufrechterhalten werden. Nach dem Erlöschen der Flamme zeigte sich eine große Kohleansammlung in der Vorbrennkammer. Die Slurry- Zufuhr wurde gestoppt und die unverbrannte Kohle wurde mit Sauerstoff angereicherter Luft ausgebrannt.

In Tabelle 4-10 ist die Rauchgaszusammensetzung bei der Verbrennung von Slurry mit Stützfeuer aufgelistet. Im Rauchgas verblieben über 13 Vol% Sauerstoff. Weiters war der Kohlenmonoxidgehalt im Rauchgas mit 1631 ppm wieder sehr hoch. Daraus kann auf eine unvollständige Verbrennung geschlossen werden. Tabelle 4-11 zeigt die Rauchgaszusammensetzung bei der Slurry- Verbrennung ohne Stützfeuer mit Sauerstoff angereicherter Luft (23 Vol% Sauerstoff im Oxidator). Der Kohlenmonoxidwert stieg, bei einem Sauerstoffgehalt von über 14 Vol%, über 4000 ppm. Folglich kann wieder auf eine unvollständige Verbrennung geschlossen werden. Die erzielten Ergebnisse sind ähnlich wie in Kapitel 4.8.

Tabelle 4-10: gemessene Rauchgaszusammensetzung bei der Slurry- Verbrennung mit Stützfeuer

V _{O2}	V _{CO}	V _{NO}	V _{NO2}	V _{SO2}
13,64 Vol%	1631 ppm	143 ppm	0 ppm	74 ppm

Tabelle 4-11: gemessene Rauchgaszusammensetzung bei der Slurry-Verbrennung mit Sauerstoff angereicherter Luft (23 Vol% Sauerstoff)

V _{O2}	V _{CO}	V _{NO}	V _{NO2}	V _{SO2}
14,27 Vol%	4268 ppm	84 ppm	0 ppm	207 ppm

Abbildung 4-36 zeigt die Flamme und das Rauchgas bei der CWS Verbrennung mit Sauerstoff angereicherter Luft. Die Flammenfarbe weist eine geringere Helligkeit wie bei der Verbrennung der Slurry mit Stützfeuer auf. Demnach kommt es nicht mehr zur Verbrennung der gesamten Slurry und es ist nur mehr ein Glühen einzelner Kohlepartikel zu erkennen. Die restliche unverbrannte Slurry sammelt sich in der Vorbrennkammer an.



Abbildung 4-36: Flamme und Rauchgas bei der CWS Verbrennung mit Sauerstoff angereicherter Luft

Die Ascheproblematik ist in Abbildung 4-37 nach dem Ausbrennen der unverbrannten Kohle dargestellt. Bei einer Betriebszeit von ca. 40 Minuten sammelt sich durch den hohen Aschegehalt von 22,9 wt% eine beachtliche Aschemenge an. Weiters ist im rechten Bild ein Schlackeklumpen dargestellt. Schlacke entsteht, wenn die Schmelztemperatur der Asche überschritten wird. Die Schlacke haftet sich an den Wänden der Vorbrennkammer an und ist nur mehr schwer zu entfernen. Für den Dauerbetrieb ist die Problematik der Ascheabscheidung und der Schlackenbildung unbedingt zu lösen. Ansonsten verstopft die Brennkammer nach kurzer Zeit.



Abbildung 4-37: Verbrennungsrückstände bei der CWS Verbrennung

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bei der Entwicklung eines Kohle- Slurry- Kessels wurden zunächst die Grundlagen der Zerstäubung und Verbrennung der Kohle- Slurry erklärt und dann anhand von Praxisbeispielen näher erläutert. Dabei wurden die verschiedenen Arten von Kohle- Slurries definiert und deren Einsatzmöglichkeiten beschrieben. Weiters wurde auf die Anforderungen und die Präparation der Kohle- Öl- und Kohle- Wasser- Slurries näher eingegangen. Anschließend folgte die Erläuterung der Grundlagen über die Kohle- Slurry Verbrennung, die Zerstäubung der Kohle- Slurries, die Verbrennung mit Reinsauerstoff und Sauerstoffanreicherung in der Verbrennungsluft.

Um die Abhängigkeiten der Betriebsparameter untereinander besser zu verstehen, wurde eine Verbrennungsrechnung von CWS durchgeführt. Insbesondere sollten die Einflüsse des Wassergehaltes der CWS und der Sauerstoffgehalt des Oxidators auf die Verbrennungstemperatur untersucht werden. Die Eingabeparameter der Verbrennungsrechnung waren, die Kohlezusammensetzung, der Wassergehalt der Slurry, das Luftverhältnis sowie die Zusammensetzung des Oxidators. Berechnet wurden die Rauchgaszusammensetzung und die adiabate Verbrennungstemperatur.

In einem adaptierten Ölkessel der Firma Effective Energy Technologies GmbH wurden Versuche zur Verbrennung von CWS durchgeführt. Zunächst wurde der Versuchsaufbau für die CWS Verbrennung beschrieben und danach wurden folgende Versuche durchgeführt:

Zu Beginn fand ein Verbrennungsversuch statt, bei dem Slurry mit Hilfe von Reinsauerstoff als Oxidator verbrannt werden sollte. Ein Ölbrenner mit ca. 435 kW diente als Stützfeuer. Ein reiner Slurry- Betrieb war nicht möglich, da die Flamme im Brennraum nach Abschaltung des Ölbrenners sofort erlosch. Die anschließende Berechnung und Messung des Wassergehaltes der Slurry ergab einen Wert von ca. 81,5 wt%. Dies entspricht einem Heizwert von ca. 287 kJ/kg.

Mittels einer neuen Slurry der Firma Effective Energy Technologies GmbH fand ein weiterer Verbrennungsversuch statt. Erst wurde die Slurry homogenisiert, danach erfolgte eine Messung des Wassergehaltes mittels Trockenschrankversuch. Der Wassergehalt der Slurry betrug 55 wt% bei einem Heizwert von 8472 kJ/kg. Um die aufgetretenen Probleme bei der Homogenisierung zu vermeiden, wurde ein stärkeres Rührgerät mit 1,6 kW eingesetzt.

Zur Erreichung der vollständigen Verbrennung wurde der Ölkessel adaptiert. Mit dem Einbau einer Vorbrennkammer war es möglich, die heißen Rauchgase in der Verbrennungszone von

den mit kaltem Wasser gekühlten Wänden des Ölkessels zu trennen. Mit Hilfe eines Stützfeuers wurden die Schamottsteine in der Vorbrennkammer vorgeheizt, um die Verbrennung der Slurry durch die Strahlungswärme zu unterstützen. Mit dem Stützfeuer und den heißen Schamottsteinen sollte eine stabile Verbrennung erreicht werden. Die vorgefertigte Vorbrennkammer der Firma Effective Energy Technologies GmbH wurde adaptiert und auf der Türe des Ölkessels montiert.

Ein Erdgasbrenner mit Sauerstoff als Oxidator wurde als Stützfeuer zur Slurry- Verbrennung getestet. Der Versuch zeigte, dass nach einer Stunde Brenndauer keine signifikante Steigerung der Oberflächentemperatur (510 °C) der Schamottsteine festgestellt werden konnte. Die relativ niedrige Oberflächentemperatur der Schamottsteine, im Vergleich zu der theoretisch erreichbaren Flammentemperatur von 2780 °C zeigte, dass die Leistung des Brenners von 30 kW zu niedrig war. Die Wärmeverluste durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung sowie Abgaswärmeverluste waren zu groß, um eine weitere Steigerung der Temperatur zu erreichen. Daher wurde der Durchflussregler des Erdgases ausgebaut, um die Leistung auf 50 kW zu steigern.

Im nächsten Versuch wurden Spraytests bei einer neuen Slurry der Firma Effective Energy Technologies GmbH, die aus zermahlenden Reifenteilen mit einem Wassergehalt von 55 wt% bestand, durchgeführt, um einen stabilen Transport und eine Zerstäubung der Slurry über einen längeren Zeitraum ohne Verstopfungen zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, wurden mehrere Slurry- Lanzen von CTP-DUMAG GmbH, Effective Energy Technologies GmbH und Messer Austria GmbH getestet. Darüber hinaus wurde der Massenstrom in Abhängigkeit der Wechselstromfrequenz der Pumpe ermittelt. Es hat sich herausgestellt, dass ohne Dispergiermittel kein Dauerbetrieb möglich ist. Natrium Ligninsulfonat hat sich als Dispergiermittel bewährt und hat das Problem von Verstopfungen gelöst. Es war eine deutliche Reduktion der Viskosität erkennbar. Die Lanze von CTP-DUMAG GmbH wies die besten Ergebnisse bei der Zerstäubung auf und zeigte bei einer Betriebsdauer von 1,5 Stunden keine Verstopfung. Durch das Hartmannsche Ultraschall Prinzip war eine Zerstäubung in feinste Tröpfchen möglich. Weiters hat eine Brennstoffanalyse gezeigt, dass die Partikel der verwendeten Slurry zu groß waren.

Danach wurden Verbrennungsversuche der Slurry mit einem Erdgasbrenner als Stützfeuer durchgeführt. Die Slurry Verbrennung wurde mit Luft, mit Sauerstoff angereicherter Luft und Reinsauerstoff durchgeführt. Alle Versuche ergaben eine stark unvollkommene Verbrennung der Slurry. Bei der Verbrennung der Slurry mit Stützfeuer konnten nur 13 % der möglichen Brennstoffenergie umgesetzt, bei der Verbrennung mit Reinsauerstoff konnten ca. 50 % der

Brennstoffenergie umgesetzt werden. Die Verweilzeit der Slurry-Tröpfchen war in der Vorbrennkammer zu gering, um vollständig mit Hilfe des Restsauerstoffes zu verbrennen.

Mit Abschluss dieser Diplomarbeit konnte noch keine zufriedenstellende Slurry Verbrennung erreicht werden. Nach Ansicht des Autors der vorliegenden Diplomarbeit müssen folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Um eine vollständige Verbrennung der Slurry zu erreichen, ist es notwendig, die Verweilzeit der Kohlepartikel in der Vorbrennkammer zu erhöhen. Dies kann mit einer Adaption der Vorbrennkammer erreicht werden.
- Zur optimalen Betriebsüberwachung ist ein geeignetes Messsystem am Versuchsstand zu installieren. Alle wesentlichen Größen müssten kontinuierlich überwacht werden.
- Um einen energetisch und ökonomisch sinnvollen Betrieb zu bewerkstelligen, ist es erforderlich den Wassergehalt der Slurry auf ein Niveau von 40 wt% zu senken.
- Das Eisen in der Slurry müsste entfernt werden, da ansonsten Schlacke an den Wänden der Vorbrennkammer anhaftet.
- Der Aschegehalt der Slurry betrug 22,9 wt%. Dadurch sammelten sich bei einem Dauerbetrieb große Mengen Asche an. Daher müsste eine Lösung zur kontinuierlichen Ascheabscheidung gefunden werden.
- Die Leistung des Stützfeuers müsste erhöht werden, um die Temperatur in der Vorbrennkammer zu erhöhen.

LITERATUR

- [1] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2013). *Energiewirtschaftliche Entwicklung in Deutschland*. Energie-Info.
- [2] G.Papachristodoulou, O. Trass (1987). Coal Slurry Fuel Technology. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Volume 65. S. 177-201.
- [3] G. Papachristodoulou, O. Trass (1984). Rheological Properties of Coal-Oil Mixture Fuels. *Powder Technology*, 40. S. 353-362.
- [4] F. Boylu, H. Dincer, G. Atesok (2003). Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water slurries. *Fuel Processing Technology* 85. S. 241-250.
- [5] RAG Deutsche Steinkohle (2008). Deutsche Enzyklopädie. Abgerufen am 19.5.2014 von <http://www.enzyklo.de/lokal/40037&page=1>
- [6] R. Yavuz, S. Kücükbayrak, A. Williams (1998). Combustion characteristics of lignite-water slurries. *Fuel Volume 77*, No. 11. S. 1229-1235.
- [7] K. Takeno, K. Tokuda, T. Ischinose (1996). FUNDAMENTAL EXPERIMENT ON THE COMBUSTION OF COAL–WATER MIXTURE AND MODELING OF THE PROCESS. *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*. S. 3223-3230.
- [8] D. G. Nodd, R. J. Walker (1987). SLURRY BURNER FOR MIXTURE OF CARBONACEOUS MATERIAL AND WATER. *Patentnr. 4644878*. US.
- [9] S. Azuhata, K. Higashiyama, K. Narato, H. Kobayashi, N. Arashi, T. Inada, K. Sohma, K. Ohtsuka, Y. Takahashi, F. Koda, T. Masai, M. Tanikawa, K. Kawano (1988). METHOD OF AND APPARATUS FOR COMBUSTING COAL-WATER MIXTURE. *Patentnr. 4741279*. US.
- [10] S. Förster (1981). Verfahren zum Verbrennen einer Kohle/Wasser-Suspension und Brenner zur Durchführung des Verfahrens. *Patentnr. 0038011A1*. EP.
- [11] I. Jianzhong, W. Ruikun, X. Jianfei, Z. Junhu, C. Kefa (2013). Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid. *Applied Energy* 115. S. 309-319.
- [12] J. Cheng, J. Zhou, Y. Li, J. Liu, K. Cen (2008). Effects of pore fractal structures of ultrafine coal water slurries on rheological behaviors and combustion dynamics. *Fuel* 87. S. 2620-2627.
- [13] H. Masudi, S. Samudrala (1996). COMBUSTION ANALYSIS OF COAL-WATER SLURRY FUEL PREPARED FROM PLANT COAL AND RECOVERED COAL FINES. *Grant No. DE-FG22-94PC94122*.
- [14] S. V. Pisupati, V. Zarnescu. NO_x REDUCTION IN PULVERIZED COAL COMBUSTORS USING WASTE COAL AS COAL-WATER SLURRY. *DE-FC22-92PC92162*. S. 409-503.
- [15] L. Zuyun, L. Rongying (2011). Combustion Characteristics and Kinetic Analysis of Biomass Coal Oil Water Slurry. *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*. S. 686-689.

- [16] B. G. Miller, S. V. Pisupati, R. L. Poe, J. L. Morrison, J. Xie, Graduate P. M. Walsh, S. Shamanna, H. H. Schobert, A. W. Scaroni (1992). SUPERCLEAN COAL-WATER SLURRY COMBUSTION TESTING IN AN OIL-FIRED BOILER. *Semiannual Technical Progress Report, DOE/PC/88697-T6*.
- [17] A. KIJOKLECKOWSKA (2011). Analysis of cyclic combustion of the coal-water suspension. *Archives of thermodynamics Vol. 32, No. 1. S. 45-75*.
- [18] K. Aiuchi, R. Moriyama, S. Takeda, S. Kitada, M. Onozaki, Y. Katayama (2004). A pre-heating vaporization technology of coal-water-slurry for the gasification process. *Fuel Processing Technology 88*. S. 325-331.
- [19] H. Wang, X. Jiang, M. Zhang, Y. Ma, H. Liu (2010). A new fluidization–suspension combustion technology for coal water slurry. *Chemical Engineering and Processing 49*. S. 1017-1024.
- [20] H. Wang, X. Jiang, J. Liu, W. Lin (2007). Experiment and Grey Relational Analysis of CWS Spheres Combustion in a Fluidized Bed. *Energy & Fuels*. S. 1924-1930.
- [21] K. Svoboda, M. Pohorely, M. Jeremias, P. Kamenikova, M. Hartman, S. Skoblja, M. Syc (2011). Fluidized bed gasification of coal–oil and coal–water–oil slurries by oxygen–steam and oxygen–CO₂ mixtures. *Fuel Processing Technology 95*. S. 16-26.
- [22] S. Mochalov, I. Rybenko, L. Ermakova (2012). Mechanism and Mathematical Modeling of Coal-Water Slurry Combustion in Swirl Adiabatic Combustion Chamber. *World Applied Sciences Journal 19 (1)*. S. 20-25.
- [23] A. Di Nardo, G. Calchetti, S. Giammartini, G. Mongibello, C. Mongiello (2009). Numerical Analysis of Liquid Fuel and Coal Water Slurry Combustion in an Innovative Reactor. *Report Ricerca Sistema Elettrico*.
- [24] A. Di Nardo, G. Calchetti, C. Mongiello, B. de Caprariis, M. Rufoloni (2009). Coal Water Slurry Oxy-combustion CFD Analysis. *1st International Conference on Sustainable Fossil Fuels for Future Energy*.
- [25] Y. Zhang, Y., et al (2013). Flow behavior of high-temperature flue gas in the heat transfer chamber of a pilot-scale coal-water slurry combustion furnace. *Particuology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2013.07.007>
- [26] P. H. Soedjant, Z. Zhou (2010). Application of Coal Water Slurry in Power Generation. *Penconsulting*. Abgerufen am 13.5.2014 von http://www.penconsulting.com/documents/Coal_Water_Slurry_Power_Generation.pdf
- [27] C. ZHANG, J. LIU, J. ZHOU et al (2006). TECHNOLOGY OF RETROFITTING DESIGNED 220t/h OIL-FIRED BOILER INTO COAL-WATER-SLURRY FIRED ONE AND APPLICATION THEREOF. *Thermal Power Generation*.
- [28] Wang Heng, Wang Shijun, Zhao Lihe (1996). A HIGHLY CONCENTRATED COAL-WATER SLURRY BURNER. *Iron and Steel*.
- [29] LIU Jian-zhong, ZHOU Jun-hu, HUANG Zhen-yu, YANG Wei-juan, CHENG Jun, CEN Kefa (2005). Study on technology of coal-water slurry in a 65 t/h oil-fired boiler. *Journal of China Coal Society*.
- [30] ZHANG Yan-qiang, JIANG De-hua (2001). Application of Dual-Purpose Burner for Coal Water Slurry and Heavy Oil. *Clean Coal Technology*.

- [31] Yu Hai-long, Zhang Chao, Liu Jian-zhong, Cen Ke-fa (2008). Experimental Study of the Atomizing Performance of a New Type of Nozzle for Coal Water Slurry. *Energy and Fuels*. S. 1170-1173.
- [32] D. Kim, O. Desjardins, M. Herrmann, P. Moin (2006). Toward two-phase simulation of the primary breakup of a round liquid jet by a coaxial flow of gas. Center for Turbulence Research. *Annual Research Briefs*. S. 185-195.
- [33] J. Lasheras, E. Hopfinger (2000). LIQUID JET INSTABILITY AND ATOMIZATION IN A COAXIAL GAS STREAM. *Annual Review Fluid Mechanics 2000*. S. 275-308.
- [34] H. Zhao, H. Liu, J. Xu, W. Li, W. Cheng (2012). Breakup and atomization of a round coal water slurry jet by an annular air jet. *Chemical Engineering Science* 78. S. 63-74.
- [35] N. Czerwonatis, R. Eggers: Strahlzerfall und Tropfenwiderstand in verdichteten Gasen. Spray '99, 5. Workshop über Techniken der Fluidzerstäubung und Untersuchungen von Sprühvorgängen, 5. u. 6. Okt. 1999, Universität Bremen, ISBN 3-88722-448-5.
- [36] A. H. Lefebvre (1989). *Atomization and Sprays*. NY. Hemisphere Publishing corporation.
- [37] S. Daviault, O. Ramadan, E. Matida, P. Hughes, R. Hughes (2012). Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel* 98. S. 183-193.
- [38] X. Ma, Y. Duan, M. Liu (2012). Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science* 46. S. 131–138.
- [39] D. Jianxin, D. Zeliang, Y. Dongling (2005). Erosion wear mechanisms of coal–water–slurry (CWS) ceramic nozzles in industry boilers. *Materials Science and Engineering A* 417. S. 1–7.
- [40] Z. Ding, J. Deng, J. L (2006). Wear surface studies on coal water slurry nozzles in industrial boilers. *Materials and Design* 28. S. 1531-1538.
- [41] D. Jianxin, Y. Dongling, Z. Houmin, T. Yuanqiang (2009). Layered structures in ceramic nozzles for improved erosion. *Ceramics International* 36. S. 299-306.
- [42] G. Scheffknecht, L. Al-Makhadmeh, U. Schnell (2011). Oxy-fuel coal combustion- A review of the current state-of-the-art. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 5S, S. 16-35.
- [43] W. Downs, J. Rackley (1985). Combustion of coal-water slurries. *Patentnr. 0145389A3*. EP.
- [44] S. Shoji, M. Hiroyuki, I. Hirosato (1983). Liquid fuel combustion apparatus. *Patentnr. 0074823A2*. EP.
- [45] E. J. Greskovich (1985). Improved combustion of coal/water slurries. *Patentnr. 0153760A2*. EP.
- [46] J. G. Hansel (1990). MEANS FOR PROVIDING OXYGEN ENRICHMENT FOR SLURRY AND LIQUID FUEL BURNERS. *Patentnr. 4899670*. US.
- [47] H. Effenberger (2000). *Dampferzeugung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- [48] H. Eichelseder (2010). *Thermodynamik*. TU Graz. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik.
- [49] H. Eichelseder (2010). *Thermodynamik Studienblätter*. TU Graz. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik.
- [50] YGNIS AG. *Technische Dokumentation*. Abgerufen am 22.10.2014 von <http://www.ygnis.ch/produkte/gasheizkessel/niedertemperaturkessel/pyronox-lrr-1000-9700-kw>
- [51] YGNIS AG. *Prospekt*. Abgerufen am 22.10.2014 von <http://www.ygnis.ch/produkte/gasheizkessel/niedertemperaturkessel/pyronox-lrr-1000-9700-kw>
- [52] B. Mayr (2014). *Messung „Coal-Slurry“ Verbrennung*. Bericht. TU Graz.
- [53] IBEDA Sicherheitsgeräte und Gastechnik GmbH & Co. KG. *Die Brenngaseigenschaften*. Abgerufen am 23. 9. 2014 von <http://www.ibeda.com/de/waermtechnik-brenngaseigenschaften>
- [54] CTP-DUMAG GmbH. *Ultraschall-Zerstäubung*. Abgerufen am 29.9.2014 von <http://www.ctp-dumag.com/technologie/ultraschall-zerstaeubung/>
- [55] A. Arich, N. Kienzl (2014). *Analysenbericht*. Bericht. BIOENERGY 2020+
- [56] V. Reiterer (2004). *Altreifensituation in der Steiermark*. Bericht. Das Land Steiermark. Fachabteilung 19D Abfall- und Stoffflusswirtschaft.
- [57] W. F. Hess, L. Tretbar (2006). *Siebanalyse im Siebsatz*. Bericht. Fachhochschule Flensburg. Institut für Verfahrenstechnik und Biotechnologie.