



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Harald Raupenstrauch

DIPLOMARBEIT

Entwicklung einer Feuerungsanlage für Pellets eines alternativen
Energieträgers

zur
Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur
(Dipl.-Ing)

Vorgelegt von: Peter David Karner
Betreuer: Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Harald Raupenstrauch
Dipl. -Ing. Andreas Hammer
Leoben am, 3. Juni 2009

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Peter Karner

Leoben, am 3. Juni 2009

Danksagung

Diese Arbeit entstand am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik der Montanuniversität Leoben in Zusammenarbeit mit den Firmen Josef Meyer GmbH und Perhofer GmbH.

Herzlich Bedanken möchte ich mich vor allem bei Herrn DI Andreas Hammer, der mir in allen Lagen dieser Diplomarbeit zur Seite stand und mich nicht nur mit seiner fachlichen Kompetenz, sondern auch mit großem Einsatz unterstützt hat. Er ermöglichte es mir, auch eigene Wege zu gehen und unterstützte mich dabei durch sein großes Fachwissen in diesem Bereich.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Raupenstrauch bedanken, der immer wieder hilfreiche Inputs lieferte und so neue Lösungswege aufzeigte.

Ich bedanke mich auch bei Herrn Arnold Kozel, der sowohl beim Umbau der Anlage, als auch bei Schwierigkeiten mit den Messgeräten immer eine Lösung parat hatte und beim gesamten Team vom Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, die mir durch ihr herzliches Wesen ein sehr angenehmes Arbeiten ermöglicht haben.

Herzlicher Dank richtet sich auch noch an meine Freundin Andrea Färbinger für ihre Unterstützung und last but not least danke ich meinen Eltern und meiner Schwester Sonja, die nicht nur in allen Phasen der Diplomarbeit, sondern das gesamte Studium hindurch an mich geglaubt haben.

Kurzfassung

Die Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfallprodukten wird aufgrund der steigenden Energiepreise zunehmend interessanter. Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen, soll die Nutzung von Stroh, in Form von Pellets, für Kleinfeuerungen zugänglich gemacht werden.

Ziel der Arbeit war es, das Verbrennungsverhalten einer Kleinfeuerungsanlage zu verbessern und diese ohne zwischenzeitliches Eingreifen zu betreiben. Weiters wurden Messungen durchgeführt um einen Überblick über den Schadstoffausstoß und den Wirkungsgrad zu erhalten.

Die Schwierigkeiten des Verbrennungsverhaltens wurden an drei verschiedenen Auswirkungen festgemacht. Diese drei Probleme waren:

- die Versottung des Brennraums beim Brennstoffeintrag
- Verkleben der obersten Schicht des Brennstoffbetts
- und Verkrustungen auf beweglichen und unbeweglichen Roststäben.

Um diese Auswirkungen hintanzuhalten wurde eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt und die Primärluftführung einige Male umgebaut. Man ist zur Erkenntnis gekommen, dass durch Zufuhr der Luft ausschließlich von oben auf das Brennstoffbett, die vorher genannten Probleme beseitigt werden können. Dadurch, dass im Bereich des Brennstoffeintrags Primärluft so zugeführt wird, reagieren an dieser Stelle die entstehenden Pyrolysegase bereits bevor sie an den Feuerraumwänden kondensieren können. Ebenso wird dadurch ein Verkleben der obersten Brennstoffschicht vermieden, da auch dieses Problem im Zusammenhang mit der Kondensation der Pyrolysegase gestanden ist. Die Verkrustungen auf den beweglichen und unbeweglichen Roststäben waren ebenfalls nicht mehr erkennbar. Grund dafür war, dass kein lokaler Luftüberschuss mehr im Brennmaterial um die Roststäbe entstehen konnte. So konnten die gesteckten Ziele erreicht werden.

Außerdem wurden Emissionsmessungen durchgeführt, bei denen festzustellen war, dass die Kohlenmonoxid und Stickoxidgrenzwerte eingehalten werden können. Speziell die CO- Grenzwerte wurden sehr weit unterschritten. Die Gesamtstaubmessungen ergaben jedoch überhöhte Werte. Weiters entsprach der Wirkungsgrad der Anlage nicht den gesetzlichen Vorgaben für Kleinfeuerungen und der brennbare Anteil in der Asche war sehr hoch, weswegen hier weiterer Forschungsbedarf gegeben ist.

Abstract

The combustion of agricultural wastematerials is getting more cost-effective, because of the increasing energy prices. That 's why straw pellets should get accessible to small scale combustors.

The aim of the thesis was to improve the combustion behaviour of the furnace and to operate it without any manual intervention while it is in actual operation. Further measurements have been made, to get an overview of the environmental harmful emissions and the degree of efficiency.

The difficulties during the combustion were mainly:

- the condensation of creosote at the fuel insertion
- jamming of the fuel coat at the top of the bed
- and the accretion of the moving and non-moving grates

Many combustion tests were necessary to prevent these problems and the insertion of primary air was reconstructed many times. By inserting the primary air solely from above the fuel bed the problems mentioned above could be solved. The condensation of creosote could be prevented, because the emerging gases can react with the primary air early on. With the air that is fed above the fuel insertion the gas gets incinerated and so it can 't condensate anymore at the walls of the combustion chamber. That is why the jamming of the upper fuel coat could also be prevented. This problem has been related to the condensation of the gas. Further the accretions of the grates could not be recognized anymore. That happened because the local air excess at the fuel cannot emerge around the grates and so the sintered ash cannot paste over the grates. With this primary air feed the set goals could be achieved.

Further emission measurements have been executed. The results showed, that the carbon monoxide and the nitric oxide emissions were below the legal limits. Especially the carbon monoxide emissions were far below the threshold. The TSP emissions showed a higher value than the legal limit would allow. Furthermore the degree of efficiency was too low to meet the legal prescription which was caused by the amount of unburnt fuel which has been discharged with the ash. That is why further resarch is required.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Biogene Energieträger	3
2.1	Makromolekulare Zusammensetzung	3
2.2	Elementare Zusammensetzung	3
2.2.1	Emissionsrelevante Elemente	4
2.3	Brennstoffeigenschaften	5
2.3.1	Wassergehalt	5
2.3.2	Heizwert	7
2.3.3	Brennwert	7
2.3.4	Aschegehalt	7
2.3.5	Ascheerweichungsverhalten	8
2.3.6	Flüchtige Bestandteile	9
2.3.7	Verbrennungswasser	9
3	Verbrennung und Feuerungstechnik biogener Brennstoffe	10
3.1	Definitionen	10
3.1.1	Luftüberschusszahl λ	10
3.1.2	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_f	11
3.1.3	Kesselwirkungsgrad η_k	11
3.2	Feststoffverbrennung	12
3.2.1	Prozesse bei der Verbrennung	12
3.2.2	Zeitliches Abbrandverhalten	13
3.2.3	Einfluss der Verbrennungstemperatur	14
3.2.4	Vollständige und Vollkommene Verbrennung	15
3.3	Feuerungsanlagentechnik	17
3.3.1	Handbesockte Feuerungen und Pelletöfen	18
3.3.1.1	Durchbrand	19
3.3.1.2	Oberer Abbrand	19
3.3.1.3	Unterer Abbrand	19
3.3.1.4	Pelletöfen	20
3.3.2	Automatisch besockte Feuerungen	21

3.3.2.1	Unterschubfeuerungen	21
3.3.2.2	Vorschubrostfeuerungen	22
3.3.2.3	Besonderheiten von Halmgutfeuerungen	23
4	Emissionen aus Biomassefeuerungen	25
4.1	Kohlenmonoxid und org. Kohlenwasserstoffe	25
4.1.1	Entstehung	26
4.1.2	Beeinflussung	26
4.2	Staub	27
4.2.1	Entstehung	27
4.2.2	Beeinflussung	28
4.2.3	Staubemissionsreduktion in Kleinfeuerungsanlagen	29
4.3	Stickstoffoxide (NO _x)	30
4.3.1	Entstehung	30
4.3.2	Beeinflussung	31
4.3.3	NO _x - Emissionsreduktion in Kleinfeuerungsanlagen	31
4.4	Wirkungsgrade von Holzfeuerungen	32
5	Rechtliche Rahmenbedingungen und normative Vorgaben	34
5.1	Ländervorschriften nach Art. 15a B-VG	34
5.1.1	Anforderungen für das Inverkehrbringen von Zentralheizungskesseln für biogene Brennstoffe	34
5.1.2	Anforderungen für den Betrieb von Feuerungsanlagen	36
5.1.3	Prüfbedingungen für die Emissionsgrenzwerte	36
5.2	Normative Vorgaben der EN 303-5	36
5.2.1	Heiztechnische Anforderungen	36
5.2.2	Durchführung der heiztechnischen Prüfung	37
5.2.2.1	Messgrößen	37
5.2.2.2	Versuchsdauer	37
5.2.3	Bestimmung der Wärmeleistung	37
5.2.3.1	Bestimmung der Nennwärmeleistung	37
5.2.3.2	Bestimmung des Kesselwirkungsgrades	38
5.2.4	Bestimmung der Emissionswerte	38
6	Versuchs- und Messaufbau	40
6.1	Unterschiede zum Holzpelletskessel	40
6.1.1	Rost	41
6.1.2	Sekundärluft	41
6.1.3	Ascheaustrag	42
6.2	Kesselprüfstand	42
6.2.1	Funktionsweise des Weizenstrohpelletskessels	43

6.2.2	Kühlwasserstrecke mit Wärmezähler	46
6.2.3	Gasmessstrecke	47
6.3	Brennstoff	50
7	Anpassung des Brennstoffeintrages	51
7.1	Ausgangspunkt	51
7.2	Ziel der Versuche	51
7.3	Versuchsdurchführung	51
7.4	Ergebnisse	52
7.5	Interpretation und Kritik	52
8	Optimierung des bestehenden Feuerraumes	54
8.1	Auswirkungen beim Ändern der Einstellungen	54
8.1.1	Ziel der Versuche	55
8.1.2	Versuchsdurchführung	55
8.1.3	Ergebnisse	55
8.1.4	Interpretation und Kritik	55
8.2	Versuche bei verschiedenen Primärluftmengen	56
8.2.1	Ziel der Versuche	56
8.2.2	Versuchsdurchführung	56
8.2.3	Ergebnisse	57
8.2.4	Interpretation und Kritik	60
9	Änderungen und Anpassung der Luftführung	62
9.1	Versotten des Brennstoffeintrags	63
9.1.1	Ziel der Versuche	63
9.1.2	Versuchsdurchführung	63
9.1.3	Ergebnisse	64
9.1.4	Interpretation und Kritik	67
9.2	Einbringen der Primärluft von oben ins Brennstoffbett	68
9.2.1	Ziel der Versuche	69
9.2.2	Versuchsdurchführung	69
9.2.3	Ergebnisse	71
9.2.4	Interpretation und Kritik	73
10	Auswirkungen der Vorschub- bzw. Primärlufteinstellungen auf Emissionen, Ausbrand und Leistung	75
10.1	Auswirkungen des Rostvorschubs	75
10.1.1	Ziel der Versuche	75
10.1.2	Versuchsdurchführung	75
10.1.2.1	Ablauf der kontinuierlichen Emissionsmessungen	76
10.1.2.2	Ablauf der Gesamtstaubmessungen	77

10.1.2.3	Bestimmung des Ausbrands	77
10.1.2.4	Leistungsmessung	77
10.1.3	Ergebnisse	78
10.1.4	Interpretation und Kritik	79
10.2	Auswirkungen der Primärlufteinstellungen	81
10.2.1	Ziel der Versuche	81
10.2.2	Versuchsdurchführung	81
10.2.3	Ergebnisse	82
10.2.4	Interpretation und Kritik	83
11	Schlussfolgerungen und Ausblick	86
	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	III
	Tabellenverzeichnis	V
	Anhang A - Analysenergebnisse Brennstoff	VI
	Anhang B - Aufteilung Primär- Sekundärluft	VIII
	Anhang C - Berechnung der Absauggeschwindigkeit bei der Staubmessung	X
	Anhang D - Auswertung der Staubmessung	XVII
	Anhang E - Verlauf CO- und NO_x Emissionen über die Versuchsdauer	XXI
	Anhang F - Umrechnung Primärluftgeschwindigkeit auf Volumenstrom	XXX

1 Einleitung

Schon sehr lange beschäftigt sich die Landwirtschaft neben der Herstellung von Nahrungsmitteln mit der Produktion nachwachsender Rohstoffe. Mitte des vorletzten Jahrhunderts, mit der industriellen Revolution, wurden solche Stoffe erstmals hergestellt und genutzt. Nachwachsende Rohstoffe definiert man folgendermaßen:

„Nachwachsende Rohstoffe sind Stoffe, die aus lebender Materie stammen und vom Menschen zielgerichtet für Zwecke außerhalb des Nahrungs- und Futterbereiches verwendet werden.“ [1]

Die Bedeutung solcher Ausgangsprodukte hat sich in den vergangenen Jahren nicht nur aufgrund des großen öffentlichen Interesses an der CO₂-Thematik weitgehend verstärkt. Wegen der stetig gestiegenen Öl-, und damit auch Energiepreise, ist es notwendig geworden, sich mit alternativen Energien wie der Biomasse bzw. NawaRos zu beschäftigen. Nachwachsende Rohstoffe werden hauptsächlich zur Gewinnung von Wärme bzw. Strom verwendet. Sie finden sich jedoch auch in der Industrie in anderen Anwendungsbereichen wieder, wie z.B. als Grundlage für Biodiesel und Biogas, in Baustoffen, als Naturfaserverstärkte Werkstoffe, sowie in Naturarzneimitteln und -kosmetikas. In Europa ist es heute jener regenerative Energieträger, der am weitreichendsten genutzt wird, wobei die derzeitige Situation sich nicht als stagnierend beschreiben lässt, sondern der Einsatz sowohl in der Industrie, als auch in privaten Haushalten in den letzten Jahren massiv zugenommen hat. Dieser Trend wird politisch sowohl vom Europäischen, als auch vom Österreichischen Biomasse Aktionsplan untermauert, ebenso sind staatliche Förderungen in diesem Bereich so stark ausgeprägt wie nie zuvor. Aufgrund der dadurch erhöhten Nachfrage und des Bedarfs der privaten Verwendung nachwachsender Rohstoffe, speziell in Heizungsanlagen, wird nach Möglichkeiten gesucht, fortschrittliche und unkonventionelle Brennstoffe herzustellen und zu nutzen. [2]

1.1 Problemstellung

Die Nutzung biogener Festbrennstoffe wird durch die steigenden Energiepreise immer interessanter. Dies trifft jedoch nicht nur für Betreiber von Anlagen mit großen Leistungen zu, sondern gilt auch für häusliche bzw. kleingewerbliche Anwendungen. Hier sind es meist kleingewerbliche Investoren bzw. Privatpersonen die auf solche Entwicklungen schneller reagieren, da sie eine höhere Entscheidungsbereitschaft und -fähigkeit besitzen.

Dadurch wird nicht nur die Nutzung von Holz wirtschaftlicher, sondern auch andere landwirtschaftliche Brennstoffe wie z.B. Stroh rücken näher an die Rentabilitätsgrenze.

Die Nutzung dieser Brennstoffe ist jedoch mit einer Vielzahl von technischen Problemen verbunden, die bei Holz nicht auftreten oder weniger gravierend sind. Diese Schwierigkeiten ergeben sich hauptsächlich aus den Eigenschaften bzw. der Zusammensetzung des biogenen Brennmaterials.

Das ist auch der Grund dafür, dass die Nutzung von Stroh in der Praxis bis jetzt kaum eine Rolle gespielt hat.

Halmgutartige Festbrennstoffe wie Stroh, Gras oder Ganzpflanzengetreide unterscheiden sich von Holzbrennstoffen durch viele Parameter. Dies gilt weniger für deren Heizwert, der nur um etwa 10 % geringer ist als der von Holz, sondern vielmehr für deren Zusammensetzung. Bei der Verbrennung von Stroh fällt in etwa die 10-fache Menge an Asche an, als es bei Holz der Fall ist. Noch dazu sind beispielsweise die Gehalte an Stickstoff, Kalium und Chlor höher. Dies wirkt sich sowohl auf die Emissionen aus, als auch auf das Erweichungsverhalten der Asche. Ein niedriger Erweichungspunkt, bei Stroh in etwa um die 800 °C, bewirkt bei der Verbrennung Ascheversinterungen und Anhaftungen im Feuerraum bzw. auf den Wärmeübertragerflächen. Deshalb müssen Feuerungen für Halmgut ganz besonders auf die Beherrschung dieser kritischen Eigenschaften ausgelegt sein. [3]

Diese Eigenschaften konnten beim Verbrennen von Weizenstrohpellets in einer Kleinf Feuerungsanlage erkannt werden. Zu Beginn der Verbrennungsversuche war es nicht möglich die Weizenstrohpellets über einen Zeitraum von mehreren Stunden hinweg zu verbrennen, ohne dadurch ein Verstopfen der Anlage zu bewirken. Dies bedeutet, dass der Materialtransport während der Verbrennung nach einer bestimmten Zeit nicht mehr möglich war, ohne manuell einzugreifen. Charakteristisch dafür waren sowohl Anbackungen des teilverbrannten Brennstoffs auf den beweglichen und unbeweglichen Roststäben, als auch ein Verkleben des Materials mit der Brennerwand und dem daraus resultierenden Stillstand des Materialtransports.

1.2 Zielsetzung

Zunächst sollen, die Auswirkungen der Verbrennung von Weizenstrohpellets ohne Umbauten in den Griff bekommen werden. Dies ist anhand der Optimierung der Einstellungen zu erreichen. Falls das Betreiben der Anlage, in ihrer bisherigen Konstruktion, nicht möglich sein sollte, sind in weiterer Folge Umbauten vorzunehmen um einen störungsfreien Betrieb über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten. Wichtig dabei ist es, während der Kessel betrieben wird, nicht in den Verbrennungsablauf eingreifen zu müssen. Ziel ist also, dass die Anlage automatisch betrieben werden kann, ohne dass es zum Verstopfen der Anlage bzw. zur Brückenbildung beim Materialtransport und beim Ascheaustrag kommt.

Nachdem dieses Ziel erreicht wird, sollen abschließend Emissionsmessungen durchgeführt werden, um einen Überblick über den Schadstoffausstoß zu bekommen.

2 Biogene Energieträger

Thermochemische Prozesse ebenso wie die Schadstoffbildung sind weitgehend durch jene Eigenschaften bestimmt, die der feste Brennstoff mit sich bringt. Dies führt dazu, dass bei der energetischen Umwandlung die Besonderheiten des Energieträgers berücksichtigt werden müssen. Physikalisch-mechanische, sowie verbrennungstechnische Charakteristika und vor allem die Elementarzusammensetzungen des Brennmaterials haben wesentlichen Einfluss auf die energetische Nutzung. Diese gelten als qualitätsbestimmende Merkmale, da sie nicht nur das Emissionsverhalten, sondern auch thermochemische Eigenschaften beeinflussen. [4]

2.1 Makromolekulare Zusammensetzung

Feste Biomasse besteht im wesentlichen aus drei Polymeren:

- Zellulose
- Polyose (d.h. Hemizellulose)
- und Lignin.

Gemeinsam machen sie in vielen Fällen ca. 95 % der gesamten Trockenmasse der Pflanze aus.

Zellulose ist die in der Natur am weitesten verbreitete organische Verbindung. Diese bildet sozusagen das Gerüst der unverholzten Zellwand und ist für die Zugfestigkeit des biogenen Brennstoffs verantwortlich.

Hemizellulose (oder Polyose) besteht im Unterschied zur Zellulose aus verzweigten Polysacchariden und hat in der Pflanze stützende Wirkung, ist aber auch Quell- und Klebstoff für die Zellwände.

Eigentlicher Füllstoff ist aber das Lignin. Hohe Ligningehalte sorgen dafür, dass die Pflanze auch dann aufrecht stehen bleibt, wenn der Wasserdruck absinkt. Bei weniger Lignifizierten Pflanzen ist dieser Druck hauptverantwortlich für die Stabilität. Dies führt dazu, dass Biomasse mit hohen Ligningehalten (z.B. Holz) geringe Wassergehalte aufweist. Lignin hat im Vergleich zu Zellulose einen signifikant höheren Anteil an Kohlenstoff. Hieraus kann man erkennen, dass sich auch die makromolekulare Zusammensetzung auf den Heizwert des Gesamtmaterials niederschlägt. [4]

2.2 Elementare Zusammensetzung

Im wesentlichen setzt sich feste, pflanzliche Biomasse aus Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Schwefel (S) zusammen, wobei Kohlenstoff jenes Element darstellt, welches hauptsächlich die freiwerdende Energie bestimmt. Gemeinsam mit dem Wasserstoff legt er

den Heizwert des trockenen Brennstoffs fest. Holz hat rund 50 % C in der Trockenmasse, während die Mehrzahl der Nicht-Holzbrennstoffe einen Anteil von ca. 45 % besitzen. Sauerstoff liegt zwischen ca. 40 % und 45 % i. d. TM und Wasserstoff bei rund 5 bis 7 %. [5]

2.2.1 Emissionsrelevante Elemente

Der Schadstoffausstoß wird maßgeblich bestimmt durch die Inhaltsstoffe des Energieträgers selbst, d.h. dass die Abgabe von Emissionen sowohl qualitativ als auch quantitativ hauptsächlich vom Brennstoff selbst abhängt. Beinhaltet ein Brennmaterial beispielsweise hohe Gehalte an Schwefel, so wird in diesem Fall grundsätzlich auch der Anteil dieser Komponenten im Abgas steigen. Einen Einblick in die elementare Zusammensetzung verschiedener Energieträger gibt die nachfolgende Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Elementarzusammensetzung von Brennstoffen [6]

	Elemente	Holz	Hackschnitzel mit Rinde	Stroh	Weizen	Heizöl EL	Steinkohle	Grenzwerte für Holz-Pellets
Hauptelemente	C	51,9	50,1	43,5	46,2	86	75	
	H	6	6,14	5,03	5,8	13	4,5	
	N	0,12	0,12	0,41	0,59		1,1	0,3
	S	0,009	0,0332	0,077	0,08	0,2	1	0,08
	Cl	0,015	0,0057	0,24	0,15		<0,13	0,03
	O	42	42,6	47,7	43,2		11,1	
Schwermetalle	Cd	0,00002	0,000028	0,000004	0,000002	?	?	0,00005
	Zn	0,0022	0,0059	0,00044	0,011	?	?	0,01
	Cr		0,00076	0,00017		?	?	0,0008
Pflanzen-nährstoffe	Na	0,018	0,007	0,0105	0,042	?	?	
	K	0,04	0,1212	0,71	0,94	?	?	
	Ca	0,065	0,51	0,27	0,4	?	?	
	P	0,0075	0,0236	0,047	0,075	?	?	
	Mg	0,016	0,0608	0,13	0,11	?	?	
	Si	0,0028	0,12	1,3	1,8			
	Asche % der TS	0,5 - 1,0	1 - 2,5	4,0 - 6,0	3,6 - 5,3	0,01	3,6 - 9	1,5

Elemente im Brennstoff, die maßgebliche Auswirkungen auf den Schadstoffausstoß haben sind vor allem Stickstoff, Schwefel und Chlor. Außerdem spielt der Aschegehalt in puncto Feinstaubemissionen eine wichtige Rolle.

Jene Masse an Stickstoff, welche in den verschiedenen Biomassearten enthalten ist, variiert sehr stark, wobei diese Differenzen schon im stofflichen Aufbau der Pflanze sichtbar werden. Hohe Eiweißgehalte bedeuten grundsätzlich auch höhere Brennstoffstickstoffwerte als bei typischen lignocellulosehaltigen Materialien wie Holz (ca. 0.1 % - 0.2 %) oder Stroh (ca. 0.5 %). Durch die Düngung mit Stickstoff können allerdings die N-Gehalte vor allem bei Nicht-Holzbrennstoffen stärker variieren als bei Holz. N geht bei der Verbrennung fast vollständig in die Gasphase über und das ist der Grund dafür, dass die NO_x-Emissionen direkt proportional mit dem Anteil dieses Elements in der Biomasse ansteigt. Dieser Reaktionsweg (Oxidation des Brennstoffstickstoffs) stellt den wichtigsten Bildungsmechanismus für Stickoxide bei der Nutzung von Biomasse dar.

Der Schwefelanteil hängt in festen biogenen Energieträgern stark von der makromolekularen Struktur der Pflanze ab. Viele Aminosäuren und Enzyme enthalten Schwefel bzw. Schwefelverbindungen und tragen deshalb relativ stark zu diesem Gehalt bei. Im Großen und Ganzen jedoch

sind die Anteile hier im Vergleich zu Kohlebrennstoffen relativ gering. Die meisten Holzbrennstoffe weisen Gehalte von ca. 0.02 % bis 0.05 % i. d. TM auf. Schwefel im Energieträger ist hauptverantwortlich für die SO₂-Emissionen.

Chlor kommt in gedüngten Feldkulturen in deutlich höheren Konzentrationen vor, als beispielsweise im Holz, da hier fast keine Düngemittel eingesetzt werden. Holzbrennstoffe haben einen Chlorgehalt von etwa 0,005 bis 0,02 % in der Trockenmasse, was sich teilweise unter der Nachweisgrenze bestimmter Verfahren befindet. In Getreidestroh sind diese Anteile jedoch um ein vielfaches höher (0,2 bis 0,5 % i. d. TM), vereinzelt können Werte bis 1 % auftreten. Sehr hohe Chlorspannen gibt es bei Nicht-Holzbrennstoffen aufgrund der unterschiedlich hohen Düngemittelausbringung auf den Feldern, aber auch durch die Auswaschung infolge von Niederschlägen. Mit solch einer natürlichen Reinigung des Energieträgers durch Wasser kann der Chlorgehalt um ca. 60 - 80 % gesenkt werden. Dies ist der Grund dafür, dass für die Verbrennung eher „graues“ ausgewaschenes Stroh als frisches „gelbes“ Stroh bevorzugt zu verwenden ist. Beide Stroharten kommen allerdings regional und jahreszeitlich gemeinsam vor, sodass eine Aufteilung schwer fällt. Ein nachträgliches Auswaschen ist außerdem meist nicht wirtschaftlich.

Chlor hat deshalb so hohe Bedeutung, da es an der Bildung von Chlorwasserstoff (HCl) und Dioxinen und Furanen (PCDD/F) beteiligt ist. Zwar wird Chlor in einem hohen Anteil (ca. 40 - 95 %) in der Asche eingebunden, trotzdem können Chloremissionen bei bestimmten Brennstoffen, wie z.B. Getreidestroh, problematisch sein und im schlimmsten Fall sogar Sekundärmaßnahmen erforderlich machen. Noch dazu ist Chlor in Verbindung mit Alkali- und Erdkalimetallen und mit SO₂ korrosiv und daher ungünstig für die Wärmeübertrager. [4, 5]

2.3 Brennstoffeigenschaften

Im folgenden sollen die wichtigsten und bedeutendsten Eigenschaften biogener Energieträger erläutert werden. Hierbei handelt es sich um Größen, die verbrennungstechnische Relevanz besitzen und für die thermische Umwandlung eine wichtige Rolle spielen. Es wird neben dem Wassergehalt auch der Heiz- und Brennwert, der Aschegehalt sowie das Ascheerweichungsverhalten erläutert. [4]

2.3.1 Wassergehalt

Diese Kenngröße beeinflusst den Heizwert eines biogenen Brennstoffs wesentlich. Wasserfreie Energieträger kommen in der Natur so gut wie nie vor, was aber gleichzeitig bedeutet, dass das beinhaltenete Wasser bei der thermochemischen Umwandlung verdunsten muss. Die dafür benötigte Energie kommt allerdings aus der Verbrennung dieses Materials und verringert deshalb die Nettoenergieausbeute des Prozesses. Aber nur wenn es keine Rückkondensation des Wasserdampfes in einer Abgaskondensationsanlage gibt, was meistens nicht der Fall ist.

Dieser Einfluss wird in Gleichung 2.1 dargestellt. Hier ist $H_{u(w)}$ der Heizwert des Energieträgers (in MJ/kg) bei einem definierten Wassergehalt w . Die Variable $H_{u(wf)}$ bezeichnet den Heizwert der Trockenmasse im wasserfreien Zustand und die Konstante 2,44 ist die Verdampfungswärme des

2.3. BRENNSTOFFEIGENSCHAFTEN

Wassers, ebenfalls in MJ/kg, bezogen auf 25 °C.

$$H_{u(w)} = \frac{H_{u(wf)} \cdot (100 - w) - 2,44w}{100} \quad (2.1)$$

Wie in Gleichung 2.2 dargestellt setzt sich der Wassergehalt w zusammen aus der Masse an Wasser m_W die im feuchten Energieträger enthalten ist und der trockenen Biomasse m_B . Er wird also auf die Frischmasse bezogen.

$$w = \frac{m_W}{m_B + m_W} = \frac{\ddot{u}}{1 + \ddot{u}} \quad (2.2)$$

Auf die Trockenmasse wird jedoch die Brennstofffeuchte u bezogen und ist definiert als jene Masse Wasser m_W , die im Energieträger gebunden ist, bezogen auf die trockene Biomasse m_B . Aus Gleichung 2.3 ist zu erkennen, dass die Feuchte in den Wassergehalt umgerechnet werden kann.

$$u = \frac{m_W}{m_B} = \frac{w}{1 - w} \quad (2.3)$$

Oft wird irrtümlich angenommen, dass mit der Trocknung des Brennstoffs eine proportional zum Heizwert steigende Netto-Energieausbeute erreicht werden kann. In der Realität ist die gewonnene Brennstoffenergie allerdings nur gering. Das kommt daher, dass mit der Trocknung auch die Gesamtmasse des Brennstoffs sinkt. D.h. wenn auch der Heizwert durch das Trocknen größer wird, so sinkt die Masse des Energieträgers. Das wiederum hat zur Folge, dass der Heizwert, weil er auf die Gesamtmasse des Brennstoffs bezogen ist, langsamer steigt als erwartet. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2.1 in der Kurve „Energieemenge auf Heizwertbasis“ dargestellt.

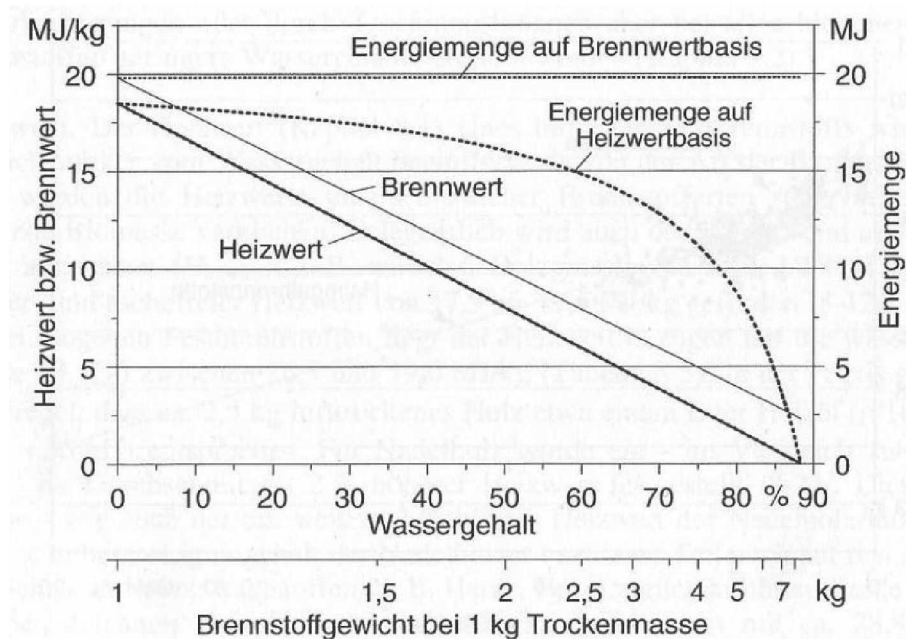


Abbildung 2.1: Heizwert, Brennwert und Energieemenge in Abhängigkeit vom Wassergehalt [7]

Typische Wassergehalte von Brennstoffen sind bei luftgetrocknetem Holz oder Stroh ca. 12 bis 20 %. Unter Bedachtnahme der Gleichung 2.1 erhält man einen Heizwert von rund 13 bis 16 MJ/kg. In manchen Fällen wie z.B. bei waldfischem Holz kann der Wassergehalt jedoch auch bei 50 % oder mehr liegen.

Daraus folgt, dass der Wassergehalt bei Festbrennstoffen zwischen ca. 10 und 65 % liegen kann. Normalerweise hat trockenes Holz allerdings in etwa zwischen 12 und 18 %. [4, 5]

2.3.2 Heizwert

Jene Wärmemenge, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme des Wasserdampfes im Abgas freigesetzt wird, nennt man den Heizwert (H_u). Hier wird also angenommen, dass diejenige Energie, die mit dem Dampf ausgetragen wird (2,441 MJ/kg) nicht genutzt und rückgewonnen wird.

Für den Heizwert ist weniger die Art der Biomasse entscheidend, als der Wassergehalt derselbigen. Das ist der Grund dafür, dass diese Werte biogener Energieträger untereinander immer trocken verglichen werden.

Holzbrennstoffe haben durchschnittlich einen ca. 9 % höheren Heizwert als Halmgüter. Dieser schwankt zwischen 16,5 und 17,5 MJ/kg bezogen auf die Trockenmasse. Ein Unterschied zwischen Getreidestroh und -körnern ist allerdings kaum zu erkennen. [4, 5]

2.3.3 Brennwert

Beim Brennwert wird jetzt, im Gegensatz zum Heizwert, auch die Wärmemenge des Wasserdampfes nutzbar gemacht. Er ist somit definiert, als jene Wärmemenge, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs freigesetzt wird und die verfügbar ist, wenn auch die Kondensationswärme des Wasserdampfes genutzt wird. Das bedeutet, dass der Brennwert immer über dem Heizwert liegt.

Bei niedrigen Wassergehalten unter 30 % ändern geringe Schwankungen im Wassergehalt die Gesamtenergiemenge kaum, wenn die Brennstoffmenge gleich bleibt. [4, 5]

2.3.4 Aschegehalt

Der Aschegehalt eines Energieträgers hat nicht nur Folgen für die technische Auslegung einer Feuerungsanlage, sondern auch für dessen Umweltauswirkungen. Für Energieträger mit höherem Gehalt steigt die entstehende Staubfracht und damit auch der Aufwand für die Entstaubung. Vor allem stark ausgeprägt ist dies für Feuerungen, bei denen das Glutbett mechanisch beansprucht wird bzw. die Gasgeschwindigkeiten hoch sind.

Den geringsten Aschegehalt aller Festbrennstoffe besitzt Holz. Dieser beträgt inklusive Rinde nur ca. 0,5 % der Trockenmasse. Sie besteht hauptsächlich aus anorganischen Oxiden. Die Gehalte an Nährstoffen bei Mischholz betragen in etwa 42 % CaO, 6 % K₂O, 6 % MgO und kleine Anteile an P₂O₅ und Na₂O. Der Rest besteht im wesentlichen aus SiO₂ und geringen Gehalten an anorganischen Oxiden¹ sowie aus Spuren von Schwermetallen. [4, 5]

¹wie z.B. Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO

2.3.5 Ascheerweichungsverhalten

Brennstoffe, die niedrige Ascheerweichungstemperaturen besitzen, neigen zu Ablagerungen und Anbackungen der Asche im Feuerraum, an den Wärmeübertragerflächen und vor allem am Rost. Dies liegt daran, dass bei der thermochemischen Umwandlung physikalische Veränderungen im Glutbett auftreten. Folglich kommt es, abhängig von der Temperatur im Feuerraum, zur Versinterung oder zum vollkommenen Aufschmelzen der Aschepartikel. Durch schlechtes Ascheschmelzverhalten kann es zu Störungen, Betriebsunterbrechungen und Veränderungen bei der Verbrennungsluftzufuhr kommen, außerdem wird die Hochtemperaturkorrosion begünstigt. Anbackungen am Verbrennungsrost können dazu führen, dass der Brennstoff mit diesem verklebt und so der Abtransport in den Ascheaustrag nicht mehr vonstatten geht, was meist ein Verstopfen der Anlage zur Folge hat. Vor allem aber wird die Gestaltung des Verbrennungsprozesses von Brennmaterialien mit niedrigen Ascheerweichungstemperaturen zur Herausforderung.

Diese technischen Merkmale müssen folglich vor allem in der Konstruktion der Feuerungsanlage berücksichtigt werden. Solche konstruktiven Maßnahmen sind unter anderem wassergekühlte Roste, Aschebrecher und Abgasrückführungen oder aber auch Durchwirbelung des Materials sowie Zugabe von Additiven zum Brennstoff. Die technische Realisierung solcher Einrichtungen ist allerdings sehr aufwändig.

Hauptsächlich verantwortlich für die Schmelztemperatur der Asche ist deren Zusammensetzung, wobei diese eng mit den Brennstoffkennwerten zusammenhängt. Zur Beeinflussung dieser Temperatur können sowohl Kalzium- und Magnesium-, als auch der Kaliumgehalt verändert werden. Jedoch hat hiervon nur der erstgenannte Gehalt eine Erhöhung des Schmelzpunktes zur Folge. Die beiden anderen bewirken das genaue Gegenteil.

Mit der DIN-Norm 51730 wird das Ascheschmelzverhalten von Brennstoffen geprüft und festgelegt, wie der Probekörper vorbereitet wird und welcher Temperaturverlauf eingestellt werden muss. Jene Temperaturen, bei denen sich die Probe maßgeblich verändert sind dort definiert. Diese sind Sinterbeginn (T_{SB}), Erweichungstemperatur (T_{EP}), Halbkugeltemperatur und Fließtemperatur (T_{FP}) und können mit den Gleichungen 2.4, 2.5, 2.6 abhängig vom K, Ca und Mg-Gehalt abgeschätzt werden.

$$T_{SB} = 1159 - 58,7K + 237,9Ca - 743,8Mg \quad (2.4)$$

$$T_{EP} = 1172 - 53,9K + 252,7Ca - 788,4Mg \quad (2.5)$$

$$T_{FP} = 1369 - 43,4K + 192,7Ca - 698Mg \quad (2.6)$$

Hieraus lässt sich ableiten, dass durch kalziumhaltige Zuschlagsstoffe sowie alkalien-bildende Hilfsstoffe, wie z.B. Kaolin, der Ascheerweichungspunkt angehoben werden kann. Dieser Effekt wird auch durch eine Auswaschung des Kaliums durch Niederschläge bei der Lagerung von Stroh bzw. Heu erreicht, was eine Erhöhung der Erweichungstemperatur von typischerweise 100 - 150 °C mit sich bringt. [4, 5, 8]

2.3.6 Flüchtige Bestandteile

Man versteht unter flüchtigen Bestandteilen Zersetzungsprodukte von organischen Substanzen, die entstehen wenn feste biogene Brennstoffe erhitzt werden. Je höher der Gehalt an solchen Komponenten im Energieträger, desto höher ist die Zündfähigkeit des Materials, da diese gasförmigen Produkte meist brennbar sind. Bei Holzbrennstoffen liegt der Durchschnitt an flüchtigen Bestandteilen bei etwa 82% der TM, was verhältnismäßig hoch ist. Etwas niedriger gestaltet sich dieser Anteil bei Getreidestroh und Wiesenheu, welcher bei beiden bei ca. 75% liegt. Im Vergleich zu Kohlebrennstoffen sind diese Werte in biogenen Energieträgern jedoch relativ hoch, da beispielsweise Braunkohlen in einem Bereich von 45 bis 63% liegen.

Daraus lässt sich erkennen, dass solche Festbrennstoffe auch für die Vergasung geeignet wären, um den Energieinhalt der entstehenden heizwertreichen Gase zu einem späteren Zeitpunkt nutzen zu können. [5]

2.3.7 Verbrennungswasser

Sobald der Brennstoff Wasserstoff beinhaltet, entsteht durch Oxidation chemisch gebildetes Wasser. Dies wird als Verbrennungswasser bezeichnet. Zusätzlich dazu wird natürlich auch noch Feuchtigkeit, falls im Brennstoff vorhanden, verdampft und mit dem Abgas als Wasserdampf ausgetragen.

Dies sind die beiden Quellen, die für den Wassergehalt im Rauchgas und somit auch für die Höhe des Taupunktes verantwortlich sind. Wichtig ist, dass diese Temperatur nicht unterschritten wird, da ansonsten Kondensat anfällt, welches in den meisten Fällen korrosiv auf die betroffenen Anlagenteile wirkt und außerdem entsorgt werden muss. Das ist wiederum der Grund dafür, dass bestimmte Abgastemperaturen nicht unterschritten werden dürfen, im jeweiligen Fall abhängig von Brennstoff, Wassergehalt und Luftüberschuss bei dem das Material verbrannt wird.

Tatsache ist auch, dass nasser Brennstoff ohne Abgaskondensation die Gesamtenergiebilanz verschlechtert, da ein beträchtlicher Anteil der Energie im Wasser ungenutzt ausgetragen wird. [4]

3 Verbrennung und Feuerungstechnik

biogener Brennstoffe

Die Umwandlung der Energie des biogenen Brennstoffs in Nutzenergie erfolgt hauptsächlich direkt durch Verbrennung. Um die Prozesse, die in den Feuerungsanlagen ablaufen, besser zu verstehen, ist es notwendig vorab die wichtigsten Begriffe zu erläutern. Erst danach wird auf die Vorgänge der direkten thermochemischen Konversion sowie die Besonderheiten von Anlagen für biogene Festbrennstoffe eingegangen.

3.1 Definitionen

Die thermochemische Umwandlung von Stoffen beinhaltet neben der Verbrennung auch noch Pyrolyse und Vergasung. Im Folgenden wird hauptsächlich auf die erstgenannte Möglichkeit eingegangen, da dies Gegenstand der für diese Arbeit erforderlichen experimentellen Versuche ist.

3.1.1 Luftüberschusszahl λ

In der Regel wird bei einem Verbrennungsprozess mehr als der für die vollständige Oxidation der oxidierbaren Verbindungen im Brennstoff notwendige Sauerstoff zugeführt. Dies erfolgt durch eine höhere Zufuhr an Verbrennungsluft, als stöchiometrisch notwendig wäre. Da sich in der Luft nur ca. 21 % Sauerstoff befinden, ist jedoch die Bezeichnung Verbrennungsluft vom Begriff der Sauerstoffzufuhr zu unterscheiden.

Der Grad dieser höheren Luftzufuhr wird durch die Luftüberschusszahl λ beschrieben. Definitionsgemäß ist sie, wie in Gleichung 3.1 dargestellt, das Verhältnis der Gesamtmenge an zugeführter Luft $m_{Luft,ges}$ in einem bestimmten Zeitraum zur minimal für die vollständige Oxidation benötigten, also stöchiometrischen, Luftmenge $m_{Luft,min}$.

$$\lambda = \frac{m_{Luft,ges}}{m_{Luft,min}} \quad (3.1)$$

Folglich muss die Luftüberschusszahl für vollständige Oxidation mindestens eins betragen. Bei Holzfeuerungen liegt dieser Wert in der Praxis bei ca. 1,5 bis 2,5. Für andere thermochemische Prozesse kann dieser Wert aber auch unter 1 liegen. Bei Luftunterschuss, d.h. bei einem Lambda von unter 1 spricht man von Vergasung. Beträgt diese Zahl 0, führt man also keinen Sauerstoff zu, so nennt sich dieser Vorgang Pyrolyse¹ bei dem der Festbrennstoff in gasförmige, flüssige und feste

¹definitionsgemäß, es gibt aber auch Pyrolyse in Anwesenheit von Sauerstoff, weitere Erklärungen siehe Abschnitt 3.2.1

Sekundärenergieträger zersetzt wird. [5]

3.1.2 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_f

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad berücksichtigt die relativen thermischen Verluste (V_{therm}) die durch die Wärme der Abgase abgegeben werden, sowie die relativen chemischen Verluste (V_{chem}) durch unvollständige Verbrennung. V_{therm} sowie V_{chem} sind jeweils auf den Heizwert des Brennstoffs bezogen. Die Abgastemperatur, der Luftüberschuss in Form von O_2 bzw. CO_2 -Gehalt sowie der Gehalt an CO und unverbrannten Abgaskomponenten sind wesentliche Größen die zur Berechnung von η_f bestimmt werden müssen. Nicht eingerechnet in diesen Wirkungsgrad sind Verluste durch Strahlung und Konvektion sowie Verluste die bei Stillstand auftreten. Teilweise werden auch die Verluste an unverbranntem Kohlenstoff² bei der Berechnung dieses Wirkungsgrades berücksichtigt. Dies wurde in der folgenden Berechnung allerdings nicht berücksichtigt, da die verschiedenen Literaturquellen hier keine Einheitlichkeit aufwiesen. In Gleichung 3.2 ist der feuerungstechnische Wirkungsgrad definiert.

$$\eta_f = 1 - V_{therm} - V_{chem} \quad (3.2)$$

Thermische Verluste sind sowohl abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur, aber auch von der Abgasmenge und der spezifischen Abgaswärme. Grundsätzlich ist V_{therm} wie in Gleichung 3.3 folgt definiert, wobei H_u der Heizwert des Brennstoffs und ΔH_A die Enthalpiedifferenz zwischen Abgas und Umgebungsluft darstellt.

$$V_{therm} = \frac{\Delta H_A}{H_u} \quad (3.3)$$

Die chemischen Verluste, die aufgrund unvollständiger Oxidation auftreten können, werden nach Gleichung 3.4 berechnet. Hier ist $H_{u(wf)}$ der Heizwert pro kg absolut trockenem Brennstoff, H_{CO} die Bildungsenthalpie von Kohlenmonoxid und CO bzw. CO_2 die Konzentration dieser Komponenten in Vol.-%.

$$V_{chem} = 0,01 \frac{H_{CO}}{H_{u(wf)}} \cdot \frac{CO}{CO + CO_2} \quad (3.4)$$

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad kann erhöht werden, indem man die Verbrennungsluft oder den Brennstoff vorwärmt und somit höhere Arbeitstemperaturen erzielt. Falls es eine Kondensation des im Abgas befindlichen Verbrennungswassers gibt, so kann dieser Wert auch größer als 1 werden. [4, 9]

3.1.3 Kesselwirkungsgrad η_k

Im Unterschied zum feuerungstechnischen Wirkungsgrad, werden im Kesselwirkungsgrad nicht nur die Abgasverluste, sondern auch noch zusätzliche andere Energieeinbußen berücksichtigt. Diese

²aus Flugkoksverlusten, bzw. aus unvollständiger Verbrennung (Definition Abschnitt 4.4)

entstehen durch die Wärmeabgabe der Feuerung an den Heizraum, die entsprechend anderen resultieren aus dem Austrag unverbrannter Rückstände mit der Asche. Der Kesselwirkungsgrad ist grundsätzlich niedriger als der feuerungstechnische Wirkungsgrad, allerdings kann dieser durch gute Isolation der Feuerung und einem vernünftigen Ascheausbrand fast erreicht werden. [4, 10]

3.2 Feststoffverbrennung

Für die Verfeuerung von biogenen Energieträgern wie z.B. Holz oder Stroh gibt es eine Reihe von Energieumwandlungsprozessen. Die direkte thermische Verbrennung stellt jedoch das bedeutungsvollste unter allen Verfahren dar. Darunter versteht man die Oxidation eines Brennstoffs unter Freisetzung von Energie, welche als Wärme anfällt und als Sekundärenergie (z.B. Dampf zur Stromerzeugung), Endenergie (z.B. Fernwärme) oder Nutzenergie (z.B. Strahlungswärme Kachelofen) verwendet werden kann. Hierbei entstehen Abgase und Asche als Reststoffe des Prozesses. [4]

3.2.1 Prozesse bei der Verbrennung

Wenn Biomasse verbrannt wird, so erfolgt dies über verschiedene chemische bzw. physikalische Teilprozesse, die teilweise gleichzeitig aber auch zeitlich versetzt stattfinden. Hier kann es neben der Trocknung, der Vergasung mit unterstöchiometrischer Luftzufuhr und der anschließenden Oxidation der Verbrennungsgase sowie des festen Kohlenstoffs, lokal auch Pyrolyseprozesse geben.

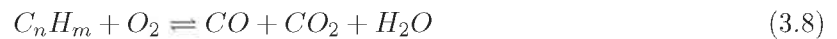
Im Wesentlichen kann der Verbrennungsvorgang in die folgenden Schritte aufgeteilt werden. Diese passieren jedoch nicht zeitlich abgetrennt voneinander sondern überlappen sich gegenseitig.

- Erwärmung des Brennstoffs durch Rückstrahlung (Flamme, Glutbett, Feuerraumwände)
- Brennstofftrocknung durch Verdampfung und Abtransport des Wassers. Dieser Prozess setzt bei ca. 100 °C ein.
- Pyrolytische Zersetzung des wasserfreien Energieträgers (ab 150 °C)
- Vergasung der Biomasse mit Sauerstoff zu brennbaren Gasen (CO , C_nH_m) und festem Kohlenstoff (ab 250 °C)
- Vergasung des festen Kohlenstoffs zu CO mit CO_2 , O_2 und Wasserdampf (ab 500 °C)
- Oxidation der brennbaren Gase zu CO_2 und H_2O mit Sauerstoff (von 700 bis ca 1500 °C)
- Abgabe der Wärme an die Wände des Feuerraums und an den frisch zugeführten Brennstoff

Bei der Trocknung erfolgt nicht nur eine Verdampfung des Wassers, sondern es verändert sich auch die makromolekulare Struktur des Energieträgers, sowie die morphologischen Eigenschaften. Dies bewirkt, dass es bei höheren Temperaturen zu thermischen Abbauprozessen kommt (pyrolytische Zersetzung) und so CO , gasförmige Kohlenwasserstoffe und Pyrolyse Öle (Teer) gebildet werden. Dieser Vorgang wird Entgasung genannt und erfolgt sowohl unter Zufuhr von Luftsauerstoff, als auch ohne. In diesem Abschnitt der Verbrennung bezeichnet man diese als Primärluft und die

gasförmigen Produkte werden bereits partiell oxidiert. Die folgenden Reaktionsgleichungen geben die wichtigsten chemischen Umwandlungen der Verbrennung an: [7]

- Oxidation der brennbaren Gase (homogene Reaktionen)



- Vergasung des festen Kohlenstoffs (heterogene Reaktionen)



3.2.2 Zeitliches Abbrandverhalten

Der zeitliche Abbrandverlauf eines Feststoffteilchens bei der Verbrennung wird in Abbildung 3.1 gezeigt. Das Abbrandverhalten setzt sich wie folgt zusammen:

- Vorerst werden bei der pyrolytischen Zersetzung die brennbaren Gase freigesetzt. Dies passiert mit etwa 85 % der TM, was ferner bedeutet, dass überwiegend nicht der Festbrennstoff, sondern die freigesetzten gasförmigen Stoffe brennen. Der Rest, also die weiteren 15 % der TM, macht der Entgasungsrückstand aus und besteht hauptsächlich aus festem Kohlenstoff.
- Danach wird der vorher genannte Rückstand vergast. Diese beiden Teilschritte folgen zeitlich aufeinander und verhalten sich additiv.
- Die so gewonnene Energie wird zu zwei Drittel aus der Oxidation der brennbaren Gase gewonnen und zu etwa einem Drittel aus der Oxidation des Entgasungsrückstandes. [7]

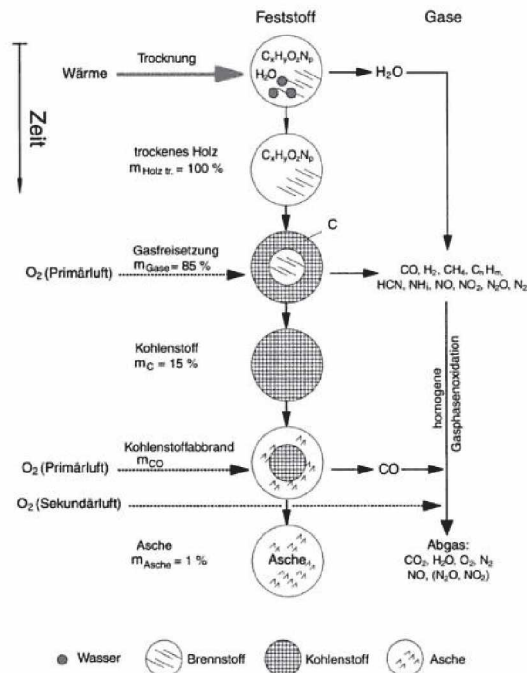


Abbildung 3.1: Zeitliche Phasen der Feststoffumsetzung [7]

3.2.3 Einfluss der Verbrennungstemperatur

Die Verbrennungstemperatur ist ein sehr wichtiger Parameter für den Ablauf von Oxidationsreaktionen, die Materialbeanspruchung bzw. den Wirkungsgrad einer Verbrennung. In einem realen Feuerraum herrschen jedoch nicht an jedem Punkt dieselben Temperaturen. Diese unterscheiden sich, beispielsweise im Glutbett oder in der Flamme, örtlich sehr stark voneinander. Deshalb wird für thermodynamische Berechnungen meist eine theoretische herangezogen. Diese nennt man auch adiabate Verbrennungstemperatur, weil sie jene Temperatur ist, die die Verbrennungsgase theoretisch annehmen würden, wenn die Verbrennung ohne Wärmeabfuhr ablaufen würde. In realen Prozessen wird diese Größe allerdings nie erreicht, da große Wärmemengen durch Strahlung bzw. Leitung verloren gehen. Maßgeblichen Einfluss auf diese Temperatur hat der vorherrschende Luftüberschuss, aber auch der Heizwert oder der Wassergehalt des Brennstoffs. In Abbildung 3.2 sieht man die rechnerisch bestimmten theoretischen Verbrennungstemperaturen von Holz, abhängig von der Luftüberschusszahl und der Brennstofffeuchte. Hieraus lässt sich erkennen, dass bei knapp unterstöchiometrischer Verbrennung bei einem λ -Wert von ca. 0,95 die höchstmögliche Verbrennungstemperatur erreicht wird. Darüber und darunter sinken die Temperaturen ab. Der Grund dafür ist im unterstöchiometrischen Bereich, also bei der Vergasung, dass das Verbrennungsgas noch oxidierbare Bestandteile beinhaltet. Wenn der λ -Wert über eins steigt, also der Verbrennungsbereich erreicht wird, so sinkt die Temperatur mit steigender, nicht verbrauchter Verbrennungsluft, weil hier die freiwerdende chemische Bindungswärme auf eine größere Gasmenge verteilt wird. Dies bedeutet, dass die Verbrennungsgase, durch die „zu viel eingetragene“ Luft, gekühlt werden.

Wenn die Holzfeuchtigkeit ansteigt, so verringert sich natürlich auch die Temperatur bei der

Verbrennung, da die Energie aus dem Brennstoff für die Verdampfung des Wassers aufgebracht wird und somit weniger Wärme zur Temperaturerhöhung der Verbrennungsgase zur Verfügung steht. Außerdem verdünnt der entstehende Wasserdampf auch noch das entstehende Gasgemisch. [7]

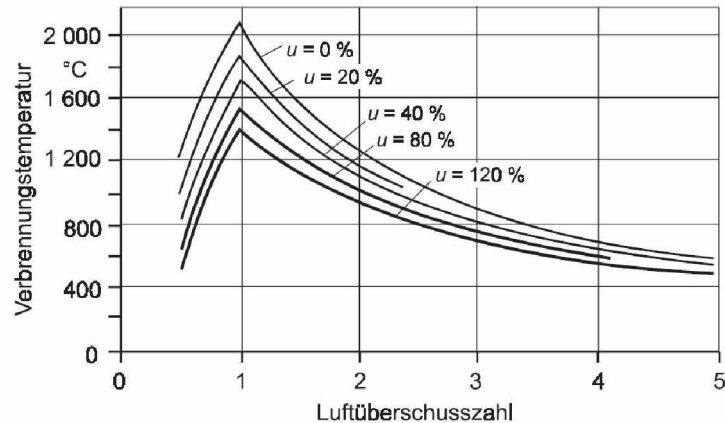


Abbildung 3.2: Adiabate Verbrennungstemperaturen von Holz in Abhängigkeit von Luftüberschuss und Brennstofffeuchte [7]

3.2.4 Vollständige und Vollkommene Verbrennung

Damit die im Brennstoff vorhandene Energie möglichst effizient umgewandelt wird, muss eine vollständige und vollkommene Verbrennung angestrebt werden. Vollkommene Verbrennung bedeutet, dass alle brennbaren Bestandteile des Brennstoffs in die höchste Wertigkeit umgewandelt werden. Das bedeutet, dass Kohlenstoff zu CO_2 , Wasserstoff zu H_2O , Schwefel zu SO_2 umgewandelt wird und dass das im Brennstoff enthaltene Wasser dampfförmig vorliegt. Das entstehende Abgas verfügt also praktisch über keinen Heizwert mehr.

Anders stellt sich die vollständige Verbrennung dar. Vollständig bedeutet, dass sämtliche Brennstoffbestandteile vollständig oxidiert worden sind, und der Verbrennungsrückstand (die Asche) praktisch keinen Heizwert mehr aufweist.

Falls jedoch unvollständig, bzw. unvollkommen verbrannt werden sollte, hat dies zur Folge, dass der nur teilweise oder gar unverbrannte Brennstoff über das Abgas oder die Asche ausgetragen wird, was zu einem geringeren Anlagenwirkungsgrad führt. Das ist der Grund dafür, dass die Verbrennungsführung so zu optimieren ist, dass unverbrannte Stoffe sowohl im Abgas, als auch in der Asche weitgehend minimiert werden.

Bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen ist also darauf zu achten, dass sowohl die bei der Vergasung freigesetzten Gase, als auch der in der Asche enthaltene feste Kohlenstoff vollständig oxidiert wird. Damit diese Bedingungen erreicht werden können, muss die Verbrennungstemperatur sehr hoch sein, jedoch sind im Falle der Verfeuerung von Brennstoffen mit niedrigem Ascheschmelzpunkt, wie es beispielsweise bei Stroh der Fall ist, hohe Temperaturen im Feuerraum aufgrund der Verschlackungsneigung kontraproduktiv. Andererseits begünstigt eine große Hitze auch die Rück-

reaktion von CO_2 zu CO am festen Kohlenstoff, d.h. das Einsetzen der Boudouard-Reaktion, wobei das thermodynamische Gleichgewicht dieser Reaktion bei entsprechend hohen Temperaturen fast vollständig auf der Seite des Kohlenmonoxids liegt. Außer der Boudouard Reaktion ist noch die Wassergasreaktion zu nennen. Hier setzt sich fester Kohlenstoff mit Wasser zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff um, was zu einem weiteren ansteigen des CO -Gehalts im Abgas führt.

In der Vergasungszone der Feuerung, d.h. im Glutbett bzw. im Kohlenstoffbett, sind beide Reaktionen durchaus erwünscht und notwendig zur Umsetzung des Kohlenstoffes. Allerdings sollten diese Reaktionen in der Ausbrandzone vermieden werden, da es sonst zu Emissionen von CO und H_2 kommen würde.

In Abbildung 3.3 sieht man den Zusammenhang zwischen Temperatur und den Anteilen der Reaktionsprodukte der Boudouard- und der Wassergasreaktion.

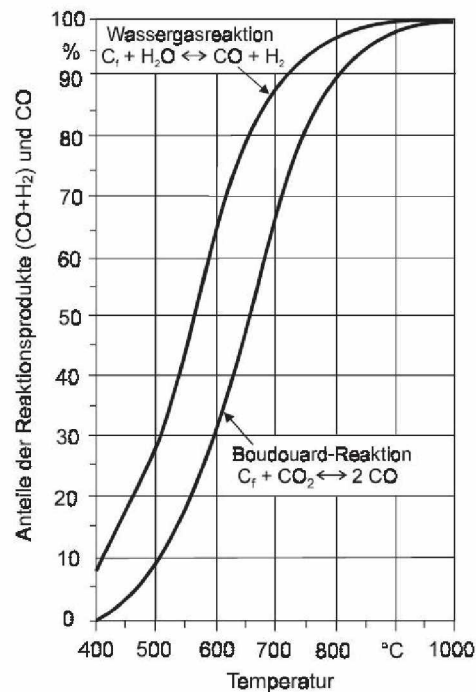


Abbildung 3.3: Temperaturabhängigkeit der Boudouard- und der Wassergasreaktion bei der Verbrennung [7]

Zusammenfassend kann man sagen, dass folgende Voraussetzungen für die vollständige Feststoffvergasung gelten müssen:

- Vermeidung von Boudouard und Wassergasreaktion (d.h. Bildung von CO bzw. H_2) an festem Kohlenstoff. Dies wird erreicht durch eine räumliche Trennung von Vergasungszone und Ausbrandzone.
- Vollständige Vergasung des Brennstoffs, durch bestmögliche Verteilung der Verbrennungsluft in der Reaktionszone (Primärluft) und hohe Verbrennungstemperaturen.

Bezüglich vollkommener Gasphasenreaktion ist zu beachten:

- Überschüssige Zufuhr des Oxidationsmittels Sauerstoff in Form von Verbrennungsluft (Sekundärluft)
- Hohe Turbulenz und somit gute Vermischung der Brenngase mit der Sekundärluft
- Ausreichende Verweilzeit des Gasgemisches in der Reaktionszone
- Ausreichende Höhe der Verbrennungstemperaturen. [4, 7, 8]

3.3 Feuerungsanlagentechnik

Die konstruktive Ausführung von Anlagen zur Verbrennung biogener Festbrennstoffe ist für einen hohen Wirkungsgrad und geringe Schadstoffemissionen von großer Bedeutung. Grundsätzlich ist es wichtig, dass die Phase der Feststoffumsetzung von der Phase in der der Gasausbrand erfolgt räumlich getrennt ist. Dies erfolgt durch eine Primärluftzuführung im Glutbett und einer Nachbrennkammer, in der die Sekundärluft eingebracht wird. Mit der Primärluft steuert man also die Feuerungsleistung, und die Sekundärluftmenge ist für die vollständige Verbrennung der entstehenden Gase verantwortlich.

Der Luftüberschuss sollte so gering wie möglich gehalten werden, indem man für eine gute Vermischung der Brenngase mit Verbrennungsluft und für möglichst hohe Verbrennungstemperaturen sorgt. Der Grund warum ein solcher Überschuss gering gehalten werden soll ist, dass somit der Abgasvolumenstrom geringer wird, das Temperaturniveau im Feuerraum besser aufrecht erhalten werden kann und es nicht zu einem hohen Energieaustrag durch das Abgas kommt. Außerdem ist der Wirkungsgrad bei einer solchen Umgebung am höchsten.

Die feuerungstechnischen Anforderungen für eine Gasphasenoxidation werden oft in der „3-T-Regel“ zusammengefasst, was soviel bedeutet wie „Time-Temperature-Turbulence“. Dies sind jene drei Bestimmungsgrößen, die im wesentlichen optimiert werden müssen.

In der Feuerungstechnik werden grundsätzlich zwei verschiedene Arten von Anlagen unterschieden, automatische und handbeschickte Feuerungseinrichtungen.

Beim Betrieb automatisch beschickter Kessel werden Brennstoffe eingesetzt, die leicht dosierbar sind wie beispielsweise Pellets oder Hackschnitzel. So können sie leicht und kontinuierlich in den Brennraum eingebracht werden und ein gleichbleibender Feuerungsbetrieb bei konstanter Leistung wird eingestellt. Eine angepasste Regelung der zugeführten Luftmenge wird durch die konstante Brennstoffzufuhr ermöglicht. Darüberhinaus kann die Anlage durch eine einstellbare Brennstoffmenge auf wechselnde Wärmebedarfssituationen reagieren. Dies ist der Grund warum automatisch beschickte Feuerungen über weite Bereiche auch teillastfähig sind. Deshalb können Wärmespeicher, die zur Überbrückung von Zeiten mit geringerem Wärmebedarf dienen, sehr klein dimensioniert und teilweise auch ganz weggelassen werden.

Diskontinuierliche Feuerungen haben die Eigenschaft, dass deren zeitlicher Verlauf der Verbrennung sehr ausgeprägt ist, vor allem für Anlagen ohne Gebläse, auch Naturzugfeuerungen genannt. Dies ist meist bei Einzelfeuerstätten der Fall, welche durch die chargenweise Einbringung des Brennstoffs und dadurch, dass der eingebrachte Brennstoff erst noch trocknen muss, vorerst

abkühlen. Gleichzeitig wird auch noch das Füllvolumen im Feuerraum während der Ausbrandphase des Brennstoffs weniger. Dadurch ändert sich auch die Verweilzeit der gebildeten Brenngase in der Feuerungseinrichtung, was zu ständig ändernden Verbrennungsbedingungen führt. Diese wechselnden Zustände können, wie in Abbildung 3.4 ersichtlich, durch Messung der gebildeten Emissionen an Kohlenmonoxid und Kohlendioxid im Abgas abgelesen werden. [4, 5]

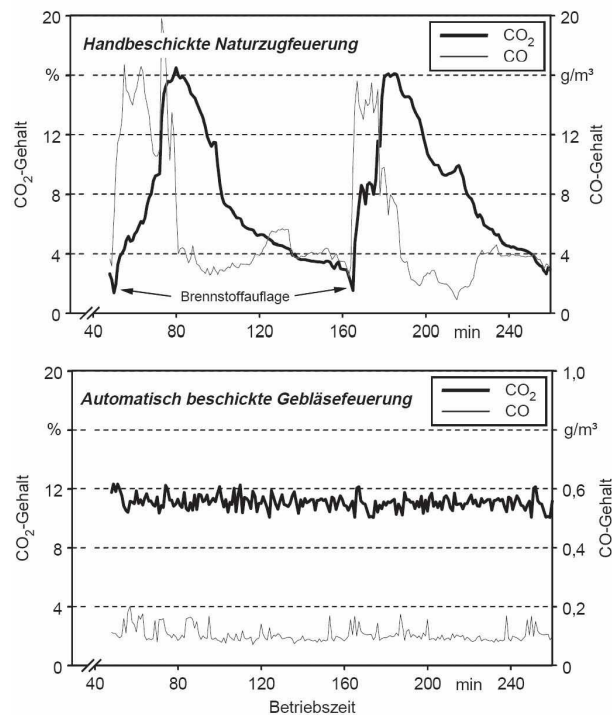


Abbildung 3.4: Typischer Verlauf der CO und CO₂-Emissionen im Abgas bei hand- und automatisch beschickten Feuerungen [5]

3.3.1 Handbeschickte Feuerungen und Pelletöfen

Handbeschickte Anlagen können beispielsweise durch ihr Feuerungsprinzip unterschieden werden. Hiervon gibt es 3 unterschiedliche:

- Durchbrand
- Oberer Abbrand
- und unterer Abbrand

Die beiden erstgenannten lassen sich jedoch in der Praxis nicht immer vollständig voneinander unterscheiden, da viele Anlagen beide Prinzipien in einer Mischform verwenden, weshalb es zu einem fließenden Übergang zwischen den beiden kommt.

In Abbildung 3.5 sind diese drei Prinzipien dargestellt. [5]

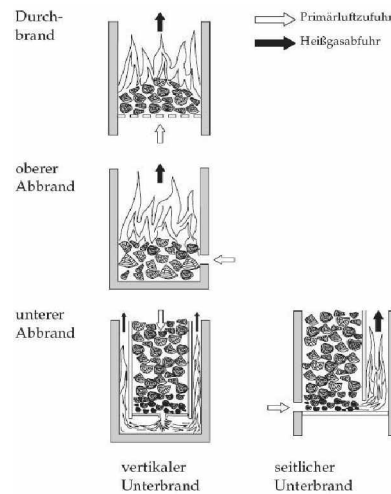


Abbildung 3.5: Feuerungsprinzipien bei handbeschickten Holzfeuerungen [5]

3.3.1.1 Durchbrand

Bei dieser Art von Feuerung führt man die Verbrennungsluft durch den Rost und die gesamte Brennstoffschüttung, wobei sich am Rost das Glutbett ausbildet und darüberliegend befindet sich das restliche Brennmaterial. Der gesamte Brennstoff wird dabei erhitzt und befindet sich gleichzeitig in Reaktion. Dies hat den Nachteil, dass sich die Verbrennungsluftmenge nur schwer an die unterschiedlichen Bedingungen anpassen lässt, vor allem bei großer Brennstoffauflage und wenn es keine Trennung zwischen Verbrennungs- und Entgasungszone gibt. Am besten wird eine solche Feuerung durch häufiges Nachlegen kleinerer Mengen an Brennmaterial betrieben, um so die Verbrennungsbedingungen möglichst stabil zu halten. [5]

3.3.1.2 Oberer Abbrand

Beim oberen Abbrand gelangt die Verbrennungsluft seitlich zur Glutbettzone, weshalb sich der Brennstoff nur langsam von oben nach unten erwärmt. Dies führt wiederum zu einer gedrosselten Freisetzung der Brenngase und die Verbrennung erfolgt gleichmäßiger und kontrollierter. Ein Nachteil dieses Prinzips ist, dass sich mit Fortdauer der Verbrennung die Füllhöhe des Brennstoffs im Feuerraum verringert und somit die Gasverweilzeit kontinuierlich steigt. Das bedeutet auch, dass die Verweilzeit der Gase am Beginn des Abbrands am geringsten ist, wobei für eine optimale Verbrennung ein umgekehrter Ablauf eher wünschenswert wäre. Auch hier sollte das Nachlegen in kleineren Mengen, dafür aber öfter erfolgen. [5]

3.3.1.3 Unterer Abbrand

Bei diesem Prinzip breiten sich die Flammen im Feuerraum nicht nach oben hin, sondern nach unten oder zur Seite aus. Dies ist auch der Grund dafür, dass hier hauptsächlich die untersten Brennstoffschichten an der Verbrennung teilnehmen. Über ein Primärluftgebläse werden die freigesetzten

Brenngase in eine sich seitlich oder unterhalb des Brennstoff-Füllraums befindende Brennkammer gelenkt und dort durch Einbringung von Sekundärluft nachverbrannt. Dies ermöglicht eine relativ kontinuierliche Vergasung des Brennstoffs und so kann die Anpassung der Verbrennungsluftmenge verbessert werden, was zu vernünftigem Ausbrand führt und somit die Qualität der Verbrennung erhöht. Anlagen dieses Prinzips sind allerdings nur für stückiges Holz oder sehr grobes Hackgut geeignet, und das Nachfüllen in der Hauptabbrandphase ist kaum möglich. Deshalb werden Anlagen mit unterem Abbrand hauptsächlich für Stückholz-Zentralheizungskessel verwendet. [5]

3.3.1.4 Pelletöfen

Pelletöfen sind mit einer automatischen Beschickung versehen und arbeiten mit einem Brennstoff, der aufgrund seiner Aufbereitung sehr gleichmäßige Merkmale besitzt und so zu geringen Schwankungen im Feuerungsablauf führt. Solche Pellets haben üblicherweise einen Durchmesser von ca. 6 mm und einen Wassergehalt der mit $< 12\%$ sehr gering ist.

Wie in Abbildung 3.6 ersichtlich befindet sich hier ein Vorratsbehälter meist auf der Rückseite des Ofens, in dem der Brennstoff aufgenommen wird. Aufgrund der hohen Schüttdichte des Materials kann so Brennmaterial für einige Tage eingefüllt werden.

Über eine Förderschnecke in einem Steigrohr und einen anschließenden Fallschacht werden die Pellets in den Brennraum eingetragen. Dort werden sie am Brennrost meist mittels elektrischem Zünder entfacht. Die Primärluftzufuhr erfolgt über am Boden befindliche Luftdüsen, Sekundärluft wird seitlich oberhalb des Brennstoffs zugeführt. Oft wird auch noch ein geringer Zuluftstrom über das Fallrohr eingetragen um die Rückbrandgefahr zu verringern. Der gravierende Vorteil der Pelletöfen gegenüber den anderen am Markt erhältlichen Öfen ist sicherlich jener, dass er im Bezug auf Emissionen und Wirkungsgrad eine Spitzenstellung einnimmt. Nicht zuletzt deshalb, weil die Brennstoffhomogenität hier sehr ausgeprägt ist. Kohlenstoffmonoxidemissionen liegen meist weit unter den Werten anderer Öfen und der Wirkungsgrad erreicht Werte von mehr als 90%. [4]

Für Holz erfolgt die Ascheaustragung hauptsächlich über den Aschekasten. Für Halmgutbrennstoffe ist eine solche Rost bzw. Brennertopfkonstruktion nicht denkbar. Hier gestaltet sich die Austragung der Asche schwieriger.

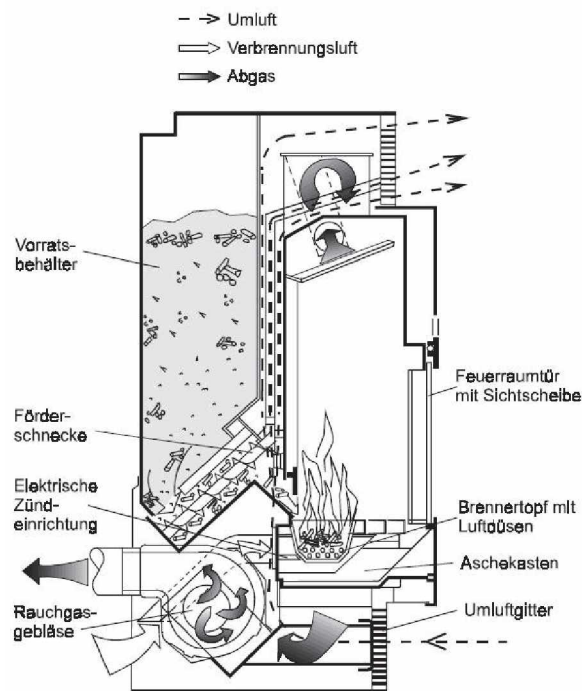


Abbildung 3.6: Grundprinzip eines Holzpelletofens [4]

3.3.2 Automatisch beschickte Feuerungen

Stationäre und zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen kommen eher für größere Leistungen in Frage, während Festbettfeuerungen in einem weiten Leistungsbereich gebräuchlich sind. Bei der Festbettfeuerung gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Grundtypen an Feuerungsarten. Diese sind die Unterschub- und die Rostfeuerung mit starrem oder bewegtem Rost. Starre Roste kommen eher für kleine Leistungen und aschearme Brennstoffe vor, wobei für größere Feuerwärmeleistungen meist bewegte Roste verwendet werden. Dadurch wird der Transport von Asche und Brennstoff verbessert, sowie eine Homogenisierung des Brennstoffs erreicht. Außerdem gibt es noch mehrere Sonderbauformen, welche meist Ähnlichkeiten mit den bereits genannten Feuerungen zeigen. [4]

3.3.2.1 Unterschubfeuerungen

Bei Unterschubfeuerungen wird, wie aus Abbildung 3.7 ersichtlich, der Brennstoff mithilfe einer Förderschnecke von unten in den Brennraum eingetragen. Ein Teil der Luft die zur vollständigen Oxidation notwendig ist wird über ein Primärluftgebläse eingetragen und es erfolgt in diesem Bereich die Vergasung und die Pyrolyse des Brennstoffs. Der restliche Anteil der Luft wird über die Sekundärluft eingebracht und vor dem Eintritt in die Nachbrennkammer mit Verbrennungsgas vermischt. Daraufhin gibt das Gas seine Wärmeenergie an den Wärmeübertrager ab, das staubbeladene Abgas passiert einen Zyklon und gelangt danach in den Kamin. Der Feuerraum und die Nachbrennkammer müssen an den Brennstoff angepasst werden um Störungen der Anlage zu vermeiden. Eine zu hohe Temperatur im Feuerraum kann beispielsweise zur Verschlackung des Brenn-

materials bzw. zu Materialschäden führen weshalb sich eine solche Art des Brennstoffeintrags für Halmgutbrennstoffe nicht besonders gut eignet.

Hauptsächlich sind Unterschubfeuerungen für aschearme Brennstoffe geeignet. Diese müssen, aufgrund der Schneckenförderung in den Brennraum, eine relativ feinkörnige und gleichmäßige Beschaffenheit aufweisen. [4, 5]

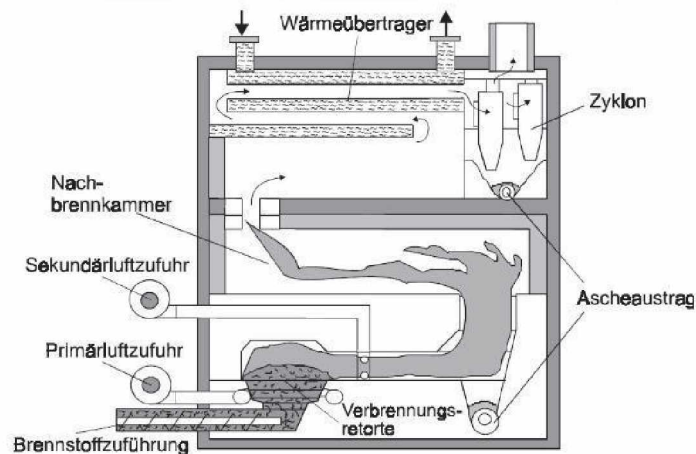


Abbildung 3.7: Grundprinzip der Unterschubfeuerung [4]

3.3.2.2 Vorschubrostfeuerungen

In Vorschubfeuerungen werden Brennstoffe mit kleinen Kantenlängen und relativ gleichbleibenden Korngrößen hauptsächlich mit Hilfe von Schnecken eingebracht, ungleichmäßig und grobkörniges Material gibt man vorwiegend durch Kolbenbeschicker auf.

Der Rost ist meist horizontal bzw. schräg abfallend angeordnet wobei der Brennstoff durch Vor- und Rückwärtsbewegungen der beweglichen Rostelemente nach vorne transportiert wird, wie in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Bewegung des Materials kann beispielsweise auch, abhängig von der Bauart, durch Vibrationen erreicht werden.

Ein Teil der Verbrennungsluft kann durch Luftkanäle in den Roststäben eingebracht werden. Der Vorteil dabei ist, dass der Rost gekühlt und so die Gefahr von Schlackeanbackungen, die bei kritischen Brennstoffen auftreten können, vermindert wird. Dieser Kühlfunktion sind allerdings feuerungskinetische Grenzen gesetzt, da die Luftmengenregelung auf eine optimale Verbrennung abzielt und nicht auf die Rostkühlung. Deshalb verwendet man oft Wasserkühlungen damit die Primärluftzufuhr nur aufgrund feuerungstechnischer Aspekte erfolgen kann.

Die Sekundärluft dient zum Ausbrand des gebildeten heizwertreichen Gases. Diese führt man entweder oberhalb des Betts, oder am Eintritt in die Nachverbrennungskammer zu. Somit ist der erste Teil des Brennstoffbetts die Trocknungszone, der mittlere Bereich die Hauptverbrennungszone in der die pyrolytische Zersetzung und die Vergasung erfolgt und am letzten Teil findet der Ausbrand der gebildeten Holzkohle statt. Die gebildete Asche fällt dann in eine evtl. wassergekühlte Mulde

und wird durch Schnecken bzw. Ketten ausgetragen.

In größeren Anlagen kann bei Rostfeuerungen die Primärluftzuführung auf die verschiedenen Zonen der Verbrennung angepasst werden, womit man das Abbrandverhalten optimal steuern kann.

Der Rost hat nicht nur die Aufgabe das Brennmaterial zu transportieren, sondern soll es auch umwälzen, um einen besseren Luftdurchtritt und eine bessere Homogenisierung des Betts zu erreichen. [4]

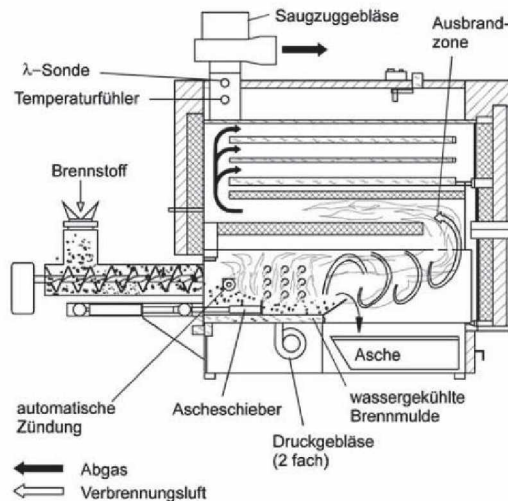


Abbildung 3.8: Beispiel einer Vorschubrostfeuerung mit Schubbodenrost [5]

3.3.2.3 Besonderheiten von Halmgutfeuerungen

Grundsätzlich unterscheiden sich Halmgutbrennstoffe von Holz durch die folgenden Merkmale:

- deutlich höherer Aschegehalt
- niedriger Ascheerweichungspunkt
- höherer Gehalt an Alkalien (K, Na), Chlor und Stickstoff.

Deshalb weisen Halmgutfeuerungen einige Besonderheiten hinsichtlich Asche- und Schlackeabtrennung, Temperaturführung oder Brennstoffvorbehandlung auf. Aufgrunddessen sind auch herkömmliche Feuerungen für ascharme Brennstoffe, wie z.B. die Unterschubfeuerung, für diese schwieriger handzuhabenden Materialien nicht, oder nur teilweise geeignet. Jedenfalls benötigt man eine leistungsstarke Entaschung. Besser geeignet sind zirkulierende und stationäre Wirbelschichtfeuerungen, welche für Kleinfeuerungen (noch) nicht verwendet werden, wie auch bestimmte Rostfeuerungen, die für ein breiteres Brennstoffband einsetzbar sind.

Die hohe Verschlackungsneigung des Brennstoffs kann durch eine Verringerung der Temperatur im Glutbett erreicht werden. Erreichen kann man dies beispielsweise durch wassergekühlte Brennraumoberflächen, gekühlte Rostelemente oder durch Wärmeübertrager im Wirbelbett. Bei

der letztgenannten Möglichkeit können sich aber aufgrund des erhöhten Chlorgehalts von Halmgutbrennstoffen Korrosionsprobleme an den Wärmeübertrageroberflächen ergeben.

Außerdem hat der Schadstoffausstoß noch andere Anlagentechnische Konsequenzen. Um die Staubemissionen auf das Niveau von Holzbrennstoffen zu senken, muss eine Feinstaubtrennung durch einen Filter erfolgen. Zusätzlich müssen die Stickoxidemissionen durch Sekundärmaßnahmen vermindert werden, da ein erhöhter Gehalt an Stickstoff im Brennstoff auftritt. Dies kann durch Luftstufung, bzw. Brennstoffstufung erreicht werden. [4, 5]

4 Emissionen aus Biomassefeuerungen

Bei der Verbrennung von Biomasse entstehen verschiedene Verbrennungsprodukte, die an die Luft abgegeben werden. Diese können unterteilt werden in Emissionen die aus vollständiger oder unvollständiger Oxidation der Brennstoffbestandteile entstehen.

Bei vollständiger Oxidation sind die Hauptbestandteile des Abgases Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O). Aus der Unvollständigen Umsetzung kann un- oder teilverbrannter Brennstoff mit der Asche oder dem Abgas ausgetragen werden. Beides führt zu einer Verminderung des Wirkungsgrades und vor allem zur Bildung unerwünschter Schadstoffe. Diese sind hauptsächlich:

- Kohlenmonoxid (CO)
- Staub
- Stickstoffoxide (NO_x)
- Flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (C_nH_m)

Im folgenden Kapitel soll die Entstehung solcher Emissionen besprochen werden, sowie die Möglichkeiten zu deren Beeinflussung. Zusätzlich wird abschließend noch auf die Wirkungsgrade von Holzfeuerungen näher eingegangen. [4]

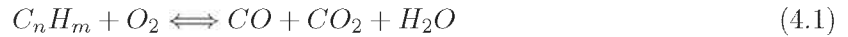
4.1 Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (C_nH_m)

Kohlenmonoxid ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, unter Standardbedingungen nur schwer in Wasser löslich und instabil in sauerstoffreicher Umgebung. Auf den Menschen wirkt es durch eine reversible chemische Reaktion mit dem Blutfarbstoff Hämoglobin. CO hat allerdings eine 370-mal größere Affinität zu Hämoglobin als Sauerstoff, und behindert deshalb den O_2 Transport im Blut. Dies äußert sich akut allerdings nicht als Atemnot sondern über Kopfschmerzen, Benommenheit bis zur Bewusstlosigkeit und zum Tod. Lethal wirkt eine Konzentration von 0,1 Vol.-% in der Atemluft über einen längeren Zeitraum hinweg, abhängig von der Aktivität des Stoffwechsels bzw. der Atemfrequenz.

Bei flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen handelt es sich hauptsächlich um höhermolekulare Verbindungen. Vergleicht man die Umwelt- bzw. Gesundheitsauswirkungen des CO mit jenen der Kohlenwasserstoffe, so erkennt man, dass diese bei den Kohlenwasserstoffen viel höher sind. Zum Teil sind sie sogar als kanzerogen eingestuft und außerdem hauptsächlich verantwortlich für die Geruchsbildung in den Abgasen. So wie Kohlenmonoxid entstehen auch sie als Produkt unvollständiger Verbrennung. [5, 7, 11]

4.1.1 Entstehung

Wie vorher schon erwähnt ist CO ein Stoff der aus der unvollständigen Oxidation des Kohlenstoffs im Brennmaterial entsteht. Wenn sich biogene Festbrennstoffe zersetzen, bilden sich neben CO auch noch gasförmige Kohlenwasserstoffe, und wenn sich diese weiter zersetzen, entsteht wiederum CO als Zwischenprodukt, was in nachfolgender Gleichung 4.1 dargestellt wird.



Die auf diese Reaktion folgende Oxidation des CO zu CO₂ läuft hingegen sehr viel langsamer ab, weshalb die CO- Emissionen üblicherweise sehr viel höher sind, als die Kohlenwasserstoffemissionen.

Bei Holzfeuerungen wird deshalb, obwohl die Kohlenwasserstoffe hinsichtlich der Toxizitätswirkung auf die Umwelt höher einzustufen sind, häufig der einfach und zuverlässig zu bestimmende CO- Gehalt des Abgases als Indikator für die Ausbrandqualität des Brennstoffes herangezogen.

Bereiche in denen die CO- Werte sehr hoch sind, werden bei richtiger Betriebsweise der Feuerungsanlage hauptsächlich in der An- und Abfahrphase durchlaufen. Ansonsten nehmen die Kohlenwasserstoffgehalte mit sinkenden CO- Konzentrationen ab, bis unterhalb eines bestimmten CO- Wertes die Kohlenwasserstoffe annähernd null erreichen. [4, 7]

4.1.2 Beeinflussung

Um optimalen Gasausbrand zu erzielen, muss die Feuerraumgestaltung und der Betrieb der Anlage auf die Abbrandeigenschaften des Brennstoffs ausgelegt werden. Folgende Anforderungen sind deshalb zu erfüllen.

- Trennen von Primär- und Sekundärluft: Dadurch wird eine bessere Regelung der Ausbrandbedingungen möglich. Wie schon erwähnt, beeinflusst ja die Primärluft die Feuerungsleistung und die Sekundärluft den Gasausbrand.
- Zufuhr von Oxidationsmittel im Überschuss: Moderne Biomassefeuerungen werden in der Regel bei einer Luftüberschusszahl von 1,4 bis 1,8 betrieben. Wenn dieser Wert unter die vorgegebenen Werte sinkt, hat dies zur Folge, dass die Schadstoffemissionen drastisch steigen. Bei Werten darüber sinkt die Verbrennungstemperatur und die Flamme wird durch die Sekundärluft gekühlt, weshalb der Wirkungsgrad sinkt.
- Die Gasausbrandqualität ist mischkontrolliert, aber die Kinetik der Oxidationsreaktion läuft bei Temperaturen über 850°C im Millisekundenbereich ab: Der Grund für die Mischungskontrolle ist jener, dass die Viskosität von Gasen (im Gegensatz zu Flüssigkeiten) mit steigender Temperatur ebenfalls steigt: Dies hat zur Folge, dass die Vermengung zwischen Brenngasen und Sekundärluft erschwert wird. Eine Erhöhung der Turbulenz, bzw. der Eintrittsgeschwindigkeit der Sekundärluft und Vermischungseinrichtungen im Brennraum können hier Abhilfe schaffen.

- Ausreichende Verweilzeit und hohe Temperaturen der Gase in der heißen Zone: Dabei ist darauf zu achten, dass es zu keinen Quench-Effekten (schlagartiges Abkühlen) an den Feuerraumwänden kommt oder dass lokal zu hohe Luftmengen zugeführt werden. Dies ist bei Kleinanlagen oft schwieriger zu realisieren als bei automatisierten Anlagen größerer Leistung. Die Gasverweilzeit im allgemeinen hängt von der Größe und der Gestaltung der Brennkammer ab. [4]

4.2 Staub

Staub ist eine disperse Verteilung von schwebenden Stoffen in einem Gas, wie z.B. Luft. Die Teilchen haben üblicherweise eine Größe von bis zu $200\ \mu\text{m}$. Als Aerosol bezeichnet man jenes Gas, in dem die Feststoffe fein verteilt schweben. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen primären und sekundären Aerosolen. Der Unterschied dabei ist, dass die primären direkt aus z.B. Verbrennungsprozessen freigesetzten Kohlenstoffpartikeln bestehen, die indirekten werden erst in der Atmosphäre durch chemische bzw. physikalische Umwandlungen gebildet.

Außerdem unterscheidet man noch zwischen Staub und Feinstaub. Jene Partikel, die mit der Atemluft eingeatmet werden, können je nach Größe unterschiedlich weit in den menschlichen Organismus eintreten. Während Teilchen über $10\ \mu\text{m}$ in der Nase bzw. dem Rachenraum weitgehend zurückgehalten werden, sind jene Partikel die unter $1\ \mu\text{m}$ groß sind lungengängig, d.h. dass sie im Lungengewebe eingelagert werden. Generell gilt Staub als Feinstaub, wenn er eine Korngröße von ca. $10\ \mu\text{m}$ unterschreitet (PM 10). Staub mit einer Korngröße von $2,5\ \mu\text{m}$ (PM 2,5) ist eine Teilmenge der PM 10- Partikel. Diese haben in etwa die Größe von Bakterien und können mit freiem Auge nicht gesehen werden.

Lungengängige Aerosole aus Verbrennungsprozessen gelten als besonders schädlich, da diese an der Oberfläche auch noch unverbrannte Kohlenwasserstoffe adsorbiert haben können und dadurch reizende, toxische bzw. mutagene Eigenschaften besitzen. [4, 7]

4.2.1 Entstehung

Staub kann bei vollständiger bzw. unvollständiger Verbrennung entstehen, aber auch aus der Verdampfung von anorganischen Komponenten des Brennstoffes und anschließender Kondensation zu Salzpartikeln (Kalium, Kalzium, Chlor, Schwefel) stammen. Außerdem unterscheiden sich die chemischen Zusammensetzungen der unterschiedlich gebildeten Stäube. Bei Partikeln die aus unvollständiger Verbrennung anfallen handelt es sich hauptsächlich um unverbrannte Kohlenwasserstoffe, während jene aus der vollständigen Verbrennung stammenden Teilchen vorwiegend anorganischer Natur sind und sich aus Aschebestandteilen, schwerflüchtigen Verunreinigungen im Brennstoff (Sand, Erde) bzw. aus Schwermetallen zusammensetzen. Für modernere automatische Feuerung gilt, dass der Hauptanteil der emittierten Staubemissionen, eine gute Verbrennungsführung vorausgesetzt, anorganische Stoffe beinhaltet, d.h. aus anorganischen Salzen besteht. Der Rußanteil kann bei guten Feuerungsbedingungen auf ca. 1-5 Gew.-% reduziert werden. Bei handbeschickten Kleinanlagen können allerdings erhebliche Anteile an Partikeln, die aus unvollständiger

Verbrennung stammen, emittiert werden. [4, 7, 12]

4.2.2 Beeinflussung

Wesentlich abhängig vom Brennstoff und den Verbrennungsbedingungen ist die Korngrößenverteilung der festen Partikel sowie die Zusammensetzung der Aerosole. Beispielsweise ist der organisch gebundene Kohlenstoff in der Flugasche von der Größe des aufgegebenen Brennstoffs abhängig. Um die Bildung von Aerosolen aus der unvollständigen Verbrennung zu verhindern ist eine hohe Temperatur, gute Vermischung der Verbrennungsluft mit dem Verbrennungsgas sowie ein optimales Brennstoff-Luft Verhältnis ausschlaggebend.

In nachfolgender Abbildung 4.1 wird dargestellt, wie sich die Staubemissionen unter den einzelnen Aggregaten unterscheiden. Daraus ist ersichtlich, dass Kaminöfen verhältnismässig höhere Staubemissionen aufweisen, als Kachel- oder Pelletöfen. Wobei der Vergleich zwischen Einzelfeuerstätten durchgeführt wurde. Also können auch mit der Wahl des Aggregates die Staubemissionen beeinflusst werden.

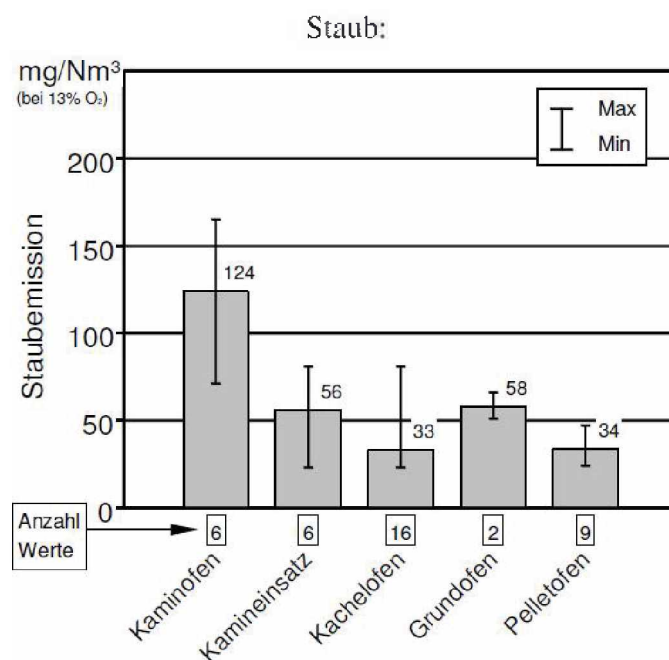


Abbildung 4.1: Vergleich der Staubemissionen verschiedener Holzöfen (Einzelfeuerstätten) [5]

Abbildung 4.2 zeigt die Menge des Feinstaubausstosses zwischen verschiedenen Heizungssystemen in Österreich. Hier wird klar, warum Holzheizungen der Ruf anhaftet einen hohen Anteil an der Feinstaubproblematik zu haben. Es ist ersichtlich, dass sich diese Aussage nur auf Holzheizungen mit alter Technologie beziehen kann. Vor allem moderne Pelletskessel weisen verglichen mit Ölheizungen viel geringere Staubemissionen auf, was diesen Ruf deutlich widerlegt.

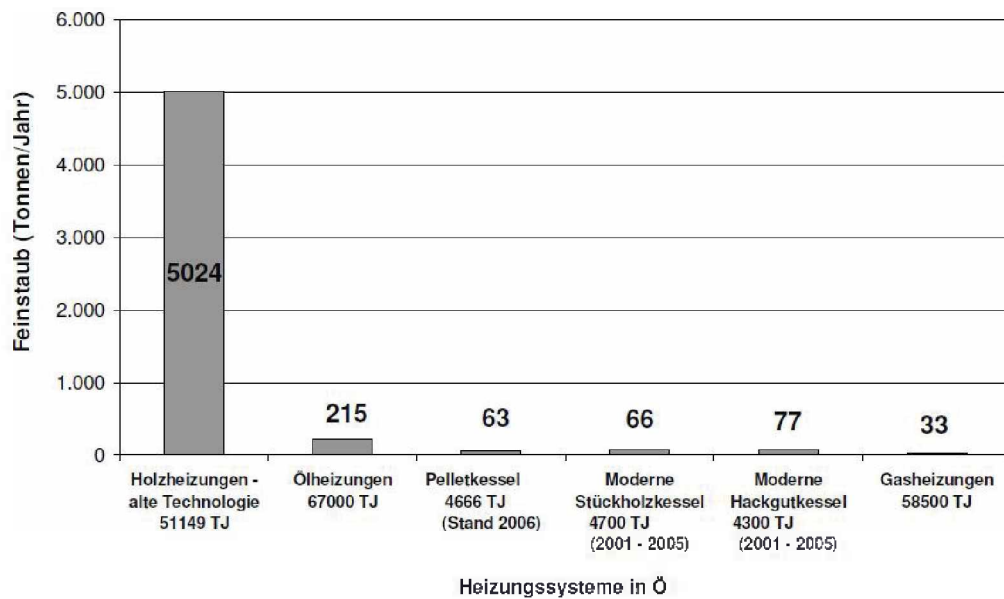


Abbildung 4.2: Vergleich der Staubemissionen zwischen verschiedenen Heizungssystemen in Österreich [13]

Bei größeren Anlagen sind geeignete Abscheideverfahren notwendig (Zyklone, Gewebefilter, E-Filter). Diese sogenannten „Sekundären Maßnahmen“ haben jedoch den Nachteil, dass sie in kleineren Anlagen kaum anwendbar sind. Trotzdem gibt es seit einigen Jahren Forschungstätigkeiten im Bereich der Abscheidung von Staub in Kleinf Feuerungsanlagen. Elektrofilter wurden entwickelt und getestet und versprechen Staubabscheideraten von ca. 60 - 75 %. Hierbei wird der Staub durch eine drahtförmige Elektrode mitten im Abgasrohr an dessen Wand abgeschieden. Die Reinigung erfolgt dann in herkömmlicher Weise durch den Schornsteinfeger. [5, 7, 13, 14]

4.2.3 Beurteilung der Staubemissionsreduktion beim Einsatz von Getreide bzw. Halmgut in Kleinf Feuerungsanlagen

Beim Einsatz von Halmgutbrennstoffen in Kleinf Feuerungsanlagen hat man festgestellt, dass zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte für Staubemissionen, wirtschaftliche Staubabscheidungs-technologien eingesetzt werden müssen. Vor allem betrifft dies Anlagen, die nicht für den Einsatz von Halmgut entwickelt wurden. Hierfür gibt es am Markt allerdings momentan keine preiswerten, verfügbaren Technologien. Die Möglichkeit der Abscheidung über Zyklone mit nachgeschalteten Gewebefiltern ist eine Möglichkeit, jedoch werden hier keine ausreichenden Abscheideraten erzielt, außerdem stehen die Investitionskosten hierfür in keinem Verhältnis zu den Gesamtinvestitionen für die Kleinf Feuerungsanlage.

[15]

4.3 Stickstoffoxide (NO_x)

Unter Stickstoffoxiden (NO_x) werden hauptsächlich folgende drei Stickstoffverbindungen zusammengefasst:

- Stickstoffmonoxid (NO) ist ein giftiges, farbloses, nicht-brennbares Gas und oxidiert bei Temperaturen unter 500 °C sehr langsam zu NO_2 .
- Stickstoffdioxid (NO_2) ist ein braunrotes, giftiges, eigenartig riechendes Gas, ist chemisch aggressiv und ein starkes Oxidationsmittel. Über 150 °C zerfällt NO_2 zu NO und O_2 .
- Distickstoffmonoxid (N_2O) ist ein farbloses, schwach süßlich riechendes Gas und wird nur in besonderen Fällen bei der Verbrennung von Biomasse gebildet und ist nur von untergeordneter Bedeutung.

Diese drei Gase sind hauptsächlich für die Umweltchemie von Bedeutung, da sie zum saueren Regen, sowie zur Bildung von bodennahem Ozon beitragen. [7, 11]

4.3.1 Entstehung

Grundsätzlich gibt es bei Feuerungsprozessen drei verschiedene Arten von Stickstoffoxiden, abhängig von deren Bildungsmechanismus. Diese sind:

- Brennstoffstickstoffoxide
- Thermische Stickstoffoxide
- und prompte Stickstoffoxide.

Brennstoff Stickoxide werden gebildet, wenn stickstoffhaltige Verbindungen aus dem Brennstoff mit Luftsauerstoff oxidieren und machen den Hauptanteil der aus Biomassefeuerungen stammenden NO_x - Emissionen aus. Grundsätzlich verläuft diese Reaktion sehr schnell. Es wird allerdings nicht der gesamte Brennstoffstickstoff zu NO_x umgewandelt. Ein Großteil reagiert zu molekularem Stickstoff (N_2). In einer oxidierenden Atmosphäre, wie es bei Luftüberschuss der Fall ist, wird der Brennstoffstickstoff in höherem Ausmaß zu NO_x zersetzt. Molekularer Stickstoff wird eher bei reduzierenden Bedingungen, d.h. in sauerstoffarmen Zonen umgesetzt. Außerdem kann Stickstoff auch in geringen Mengen in die Asche eingebunden werden.

Thermisches NO_x wird bei relativ hohen Temperaturen in der Nachbrennkammer aus Luftstickstoff und Sauerstoff gebildet. Erst bei örtlichen Temperaturen um die 1300 °C - 1400 °C kommt es zu einem Ansteigen der thermisch gebildeten Stickstoffoxide. In Biomassefeuerungen werden diese Temperaturen allerdings fast nie erreicht, sodass diese Art der Bildung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Prompt gebildete Stickoxide werden aus Luftstickstoff und aktivierten Brennstoffmolekülen (Kohlenwasserstoff- Radikale) gebildet. Dieser Bildungsmechanismus spielt in den gängigen Feuerungsanlagen keine Rolle, da die Temperaturen die dafür notwendig sind nicht erreicht werden. [7, 11]

4.3.2 Beeinflussung

Die Haupteinflussgrößen für die Bildung von NO_x bei Holzfeuerungen ist der Stickstoffgehalt des Brennstoffs, der Sauerstoffgehalt im Feuerraum und in der Ausbrandzone, sowie die Ausbrandqualität der Abgase. Abgesehen von diesen Größen kann beispielsweise die Feuerraumbelastung einen Einfluss auf die Stickstoffumsetzung haben. Dies kann man daran erkennen, dass in den meisten Feuerungsanlagen im Teillastbetrieb eine Abnahme der NO_x -Emissionen um ca. 20 - 50 % beobachtet wird. Außerdem kann eine Homogenisierung des Brenngases im Rostbereich die Stickoxidbildung beeinflussen. Niedrige Werte kann man beispielsweise bei Vorschubrostfeuerungen mit guter Brennstoffverteilung auf dem Rost erzielen. Außerdem kann die Strömungsführung der Brenngase über dem Rost den Abbau des NO_x beeinflussen (Gleich-, Mittel-, Gegenstromführung).

Als primäre Maßnahme der Stickoxid-Minderung muss versucht werden, den Brennstoffstickstoff zu molekularem Stickstoff umzuwandeln. Falls es doch zu einer Bildung von NO_x kommt, sollten die bereits gebildeten Stickoxide an Zwischenprodukten der Verbrennung reduziert werden (Reaktionen mit CO, C). Dies ist Grundlage für die gestufte Verbrennung in Zonen mit Luftmangel (reduzierende Bedingungen), da Brennstoffstickstoff hauptsächlich unter diesen Bedingungen zu N_2 reagiert.

Diese Maßnahmen zur Stickoxid-Minderung sind:

- Die Abgasrezirkulation. Diese Möglichkeit dient hauptsächlich zur Absenkung des Sauerstoffgehalts in der Flamme, was zu einer Kühlung der Flamme führt und deshalb zur Verringerung der thermischen NO_x -Bildung dient, aber auch Einfluss auf die Entstehung von Stickoxiden aus Brennstoffstickstoff hat.
- Die Luftstufung. Hier wird versucht Verbrennungsluft in mindestens 2 Zonen einzubringen. Durch Einhaltung von unterstöchiometrischen Bedingungen in der Vergasungs- und Reduktionszone kann hier eine sehr hohe NO_x -Minderung eintreten.
- Die Brennstoffstufung. Dabei gibt es 2 verschiedene Brennstoffe. Der Hauptbrennstoff wird mit einem $\lambda > 1$ verbrannt und danach mischt man einen weiteren Energieträger ins Abgas. Diesen nennt man Zweit-, Stufen-, oder Reduktionsbrennstoff. So erreicht man in der Verbrennungszone eine Luftüberschusszahl von unter eins, und die gebildeten Stickoxide werden durch den Zweitbrennstoff reduziert. [4]

4.3.3 Beurteilung der NO_x -Emissionsreduktion beim Einsatz von Getreide bzw. Halmgut in Kleinfeuerungsanlagen

Grundsätzlich können zur NO_x -Reduktion Primär- und Sekundärmaßnahmen getroffen werden. Primäre Maßnahmen wie die vorher erwähnte Luftstufung bzw. Abgasrückführung greifen direkt in den Verbrennungsablauf ein. Durch die Begrenzung der zugeführten Luft ist allerdings darauf zu achten, dass dadurch die CO-Werte nicht zu weit ansteigen. Abbildung 4.3 zeigt die Abhängigkeit der CO- und NO_x -Emissionen von der Abgasrezirkulation. Für die Abgasrückführung ist der apparative Aufwand für Kleinkesselanlagen allerdings so hoch, dass ein Einsatz hier unrealistisch

ist. Noch dazu wird in Kleinfeuerungsanlagen kaum thermisches NO_x gebildet, weshalb eine solche Primärmaßnahme nur bedingt zu einer Verringerung der Emissionen führen würde.

Für Sekundärmaßnahmen wie die selektive nicht katalytische Reduktion (SNCR) bzw. die selektive katalytische Reduktion (SCR) konnte noch kein Nachweis der Wirtschaftlichkeit bzw. Anwendbarkeit in Kleinfeuerungsanlagen gebracht werden.

Eine weitere Möglichkeit der NO_x -Reduktion wäre der Einsatz von Porenbrennern, wie z.B. dem FLOX-Brenner. Hierbei wird die Bildung von Stickoxiden dadurch vermindert, dass die Verbrennungsreaktion flammenlos abläuft. Der Einsatz solcher Brenner in der Biomasseverbrennung wird derzeit allerdings noch untersucht. [15]

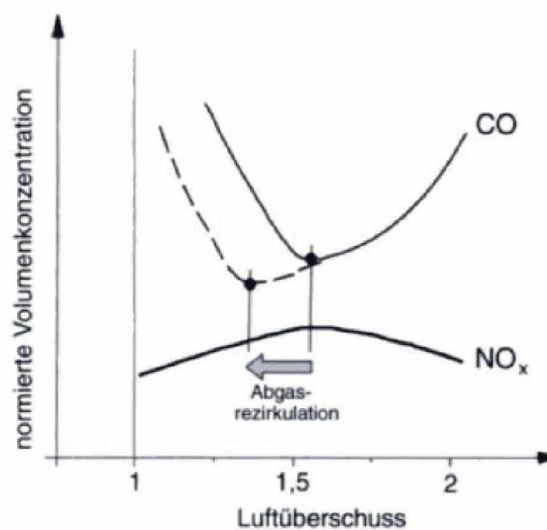


Abbildung 4.3: Einfluss der Abgasrezirkulation auf die CO- und NO_x -Emissionen [4]

4.4 Wirkungsgrade von Holzfeuerungen

Die technisch-ökologischen Qualitätsmerkmale von Holzfeuerungen werden einerseits durch den Schadstoffausstoß, andererseits durch den Wirkungsgrad der Anlage bestimmt. Bei Einzelfeuerstätten kann allerdings nur der feuerungstechnische Wirkungsgrad festgelegt werden, da der Hauptanteil der Wärme direkt an die Umgebung abgegeben wird. Zentralheizungskessel haben allerdings einen feuerungstechnischen und einen Kesselwirkungsgrad, da diese die Nutzwärme an ein Wärmeträgermedium abgeben.

Nachfolgende Abbildung 4.4 zeigt, dass ein Großteil der Wärmeverluste durch das Abgas getragen wird, d.h. eine Absenkung der Abgastemperatur also die Wirkungsgrade deutlich erhöhen müsste. Dies ist zwar richtig, in der Praxis gibt es hier allerdings Grenzen. Die Temperatur des Abgases darf den Taupunkt nicht unterschreiten, da sonst Kondensat anfällt. Dieses durchfeuchtet den Kamin und kann zu bleibenden Schäden am Mauerwerk führen, außerdem steigt dadurch die Brandgefahr im Schornstein stark an. Dies ist der Grund warum bei Kesselprüfungen nach

4.4. WIRKUNGSGRAD VON HOLZFEUERUNGEN

DIN EN 303-5 immer eine gewisse Mindestabgastemperatur eingehalten werden muss.

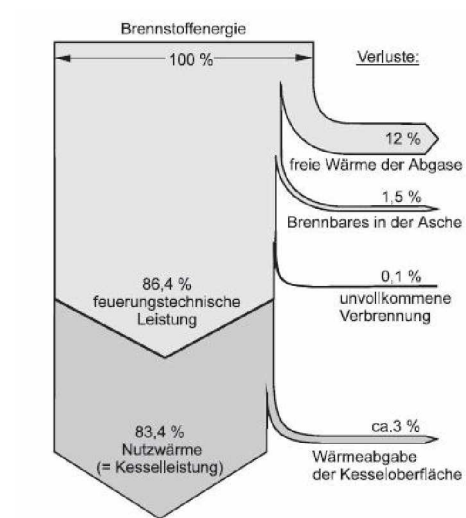


Abbildung 4.4: Verluste eines holzbefeuerten Kessels [5]

Bei Holzzentralheizungen werden üblicherweise nur die Kesselwirkungsgrade angegeben. Diese liegen ca. 2 - 4 Prozentpunkte unter den feuerungstechnischen Wirkungsgraden und bewegen sich bei Holzfeuerungen durchwegs über 85 %. Teilweise wird sogar die 90 % Grenze überschritten. Generell kann das am einfachsten mit Pellets-Kesseln erreicht werden, da diese wiederum 2 - 3 Prozentpunkte über den anderen holzbefeuerten Zentralheizungen liegen. [5]

5 Rechtliche Rahmenbedingungen und normative Vorgaben

In diesem Kapitel wird näher auf die rechtlichen Rahmenbedingungen im Bezug auf das gesetzeskonforme Inverkehrsetzen und Betreiben von Heizkesseln und die Normativen Vorgaben bei einer Kesselprüfung eingegangen. Ziel ist es einen Überblick über die einzuhaltenden Werte für den bei den Versuchen verwendeten Kessel zu erhalten, um später einschätzen zu können, in welchem Bereich noch Optimierungsbedarf besteht und wo die zu erfüllenden Vorgaben bereits erfüllt werden. Hauptsächlich handelt es sich hierbei um die Parameter

- Emissionsgrenzwerte und
- Wirkungsgrade

bei denen es sowohl normative als auch gesetzliche Vorschriften gibt. Da das gesetzeskonforme Inverkehrsetzen von Heizkesseln grundsätzlich Ländersache ist, ist es schwierig österreichweit gültige Aussagen zu treffen. Deshalb gibt es seit einiger Zeit Bestrebungen, im Zuge einer Länderexpertenkonferenz auf Grundlage des Art. 15a B-VG, in Österreich einheitliche Bestimmungen über das Inverkehrbringen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen zu erstellen. Hierzu gibt es einen Entwurf, welcher in naher Zukunft von allen Ländern übernommen werden soll. Aufgrund der besseren allgemeinen Aussagekraft als die der einzelnen Länderbestimmungen, ist dieser Entwurf für die Beurteilung der rechtlichen Rahmenbedingungen herangezogen worden.

5.1 Ländervorschriften nach Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen

Der Gegenstand dieser Vereinbarung ist es, das Inverkehrbringen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken hinsichtlich luftreinhaltrechtlicher Aspekte zu regeln. Sie gilt nur für Anlagen, deren Zweck die Beheizung von Räumen bzw. die Warmwasserbereitung ist. Für gewerblich genutzte Feuerungsanlagen jedoch ist die 331. Feuerungsanlagenverordnung (FAV) des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten gültig. [16, 17]

5.1.1 Anforderungen für das Inverkehrbringen von Zentralheizungskesseln für biogene Brennstoffe

Kleinfeuerungen dürfen nach dieser Vereinbarung nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn der Nachweis der Einhaltung der Wirkungsgrade durch Einzel- oder Typenprüfung erfolgt ist. In Ta-

belle 5.1 sind die zu erfüllenden Wirkungsgrade aufgeschlüsselt. Hieraus ist ersichtlich, dass für Zentralheizungskessel mit einer Wärmeleistung unter 10 kW und über 200 kW ein fixer Wirkungsgrad vorgegeben ist, für den Bereich dazwischen jedoch muss er berechnet werden, wobei Anlagen mit händischer Beschickung weniger strenge Grenzwerte zu erfüllen haben, als automatisch beschickte. Der bei den Versuchen verwendete Kessel wurde automatisch beschickt und hat eine Brennstoffwärmeleistung von ca. 20 kW, weshalb der Wirkungsgrad nach der letztgenannten Formel zu bestimmen ist.

Tabelle 5.1: Einzuhaltende Wirkungsgrade für Zentralheizungskessel, die mit festen Brennstoffen betrieben werden [16]

	Mindestwirkungsgrad in %
a) mit händischer Beschickung	
Bis 10 kW	79
über 10 bis 200 kW	$(71,3 + 7,7 \log P_n)$
über 200 kW	89
b) mit automatischer Beschickung	
Bis 10 kW	80
über 10 bis 200 kW	$(73,9 + 7 \log P_n)$
über 200 kW	90

Außerdem dürfen Kleinf Feuerungen nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn sie die Emissionsgrenzwerte für das Inverkehrbringen erfüllen. Diese beziehen sich auf die Schadstoffe CO, NO_x, OGC (organische Kohlenwasserstoffe) und Staub (Gesamtstaub), die von der Anlage emittiert werden. Sofern nicht anders angegeben, gelten diese Werte sowohl beim Betrieb mit Vollast, als auch bei 30 % Teillast und sind in Tabelle 5.2 nach den verschiedenen Brennstoffen aufgelistet. Für den bei den Versuchen verwendeten Kessel gilt die Spalte der sonstigen standardisierten Brennstoffe. [16]

Tabelle 5.2: Emissionsgrenzwerte für automatisch beschickte Kleinf Feuerungen, die mit festen Brennstoffen betrieben werden [16]

2. Kleinf Feuerungen für feste Brennstoffe mit automatischer Beschickung:

Parameter	Emissionsgrenzwerte (mg/MJ)		
	Holzbrennstoffe	sonstige standardisierte biogene Brennstoffe	Fossile Brennstoffe
CO	500*	500*	1100
NO _x	150/100**	300/150**	100
OGC	30	30	30
Staub	50/20**	60/20*	40/20*

* Bei Teillastbetrieb mit 30 % der Nennwärmeleistung kann der Grenzwert um 50 % überschritten werden.

** zu diskutieren: Werte gelten ab 2015

5.1.2 Anforderungen für den Betrieb von Feuerungsanlagen

Außerdem gibt es im Abschnitt III, Artikel 15, gestaffelt nach Brennstoffarten, Vorgaben für Emissionsgrenzwerte und Abgasverluste beim Betrieb der Anlage, die nicht überschritten werden dürfen. Nachfolgende Tabelle 5.3 zeigt dies für Feuerungsanlagen, die mit festem Brennstoff betrieben werden und eine Brennstoffwärmeleistung unter 50 kW aufweisen. Die Spalte für die automatisch beschickten Anlagen trifft auf den in den Versuchen verwendeten Kessel zu. [16]

Tabelle 5.3: Grenzwerte bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe unter 50 kW Brennstoffwärmeleistung [16]

Parameter	händisch beschickt	automatisch beschickt
Abgasverlust (%)	20	19
Kohlenmonoxid (mg/m ³)	3.500	1.500

Der Grenzwert für Kohlenmonoxid ist für biogene Brennstoffe auf einen Sauerstoffgehalt von 11 %, für fossile Brennstoffe auf einen Sauerstoffgehalt von 6 % bezogen.

5.1.3 Prüfbedingungen für die Emissionsgrenzwerte

Die Prüfung des Emissionsverhaltens und der Wirkungsgrade hat sich, laut dieser Vereinbarung, auf die entsprechenden Ö- Normen oder andere technische Regelwerke zu beziehen und hat nach den Regeln der Technik zu erfolgen. Deshalb wird im folgenden Abschnitt auf die bei Kesselprüfungen verwendeten Normen eingegangen. [16]

5.2 Normative Vorgaben der EN 303-5

Strohpellets fallen unter den Begriff der sonstigen standardisierten Brennstoffe und werden in Anlehnung an die ÖNORM EN 303-5 wie Holzfeuerungen geprüft. Außerdem gibt es für feste Biobrennstoffe eine Vornorm (ÖNORM CEN/TS 14961) die die Brennstoffe und deren Beschaffenheit festlegt. Die wichtigsten einzuhaltenden Größen, die in der erstgenannten Norm festgehalten wurden, sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. [18]

5.2.1 Heiztechnische Anforderungen

Der Prüfbrennstoff muss bestimmte heiztechnische Vorgaben erfüllen, wobei beim Vergleich von Versuchsergebnissen mit den gestellten Anforderungen keine Messunsicherheit mehr berücksichtigt werden darf. Dies ist bereits bei der Vorgabe der zu messenden Werte eingerechnet worden.

Die wichtigsten Werte bei einer Kesselprüfung sind:

- Kesselwirkungsgrad: Dessen Bestimmung wird später genauer erläutert.
- Abgastemperatur: Soll bei Heizkesseln, die mit Nennwärmeleistung betrieben werden, mindestens 160 K über Raumtemperatur betragen. Ist dies nicht der Fall so müssen die Hersteller

bestimmte Angaben zur Ausführung des Schornsteins bezüglich Förderdruck und Kondensation machen.

- Förderdruck: Der Maximalwert kann abhängig von der Nennwärmeleistung über ein Diagramm in der Norm bestimmt werden.
- Brenndauer: Für Kessel mit automatischer Beschickung muss diese mindestens 6 Stunden betragen.
- Kleinste Wärmeleistung: Sie darf höchstens 30 % der Nennwärmeleistung betragen.
- Emissionsgrenzwerte: Grundsätzlich muss die Verbrennung schadstoffarm sein. Dies gilt dann, wenn die Anforderungen dieser Norm erfüllt werden. [19]

5.2.2 Durchführung der heiztechnischen Prüfung

Wichtig hierbei ist, dass der Kessel vorher auf Betriebstemperatur gebracht werden darf. Danach wird die Bestimmung der Messgrößen bei Nenn-Wärmeleistung durchgeführt. Außerdem ist ein Eingriff von Hand in Form von Stochern oder Rütteln nicht gestattet. [19]

5.2.2.1 Messgrößen

Es ist festgelegt, dass die Messungen von Staub und Stickoxiden nur bei Nenn-Wärmeleistung ermittelt werden, bei Teillast hingegen ist dafür keine Bestimmung vorgesehen. Alle zu bestimmenden Messgrößen werden in einem Abstand von höchstens 20 Sekunden gemessen und mindestens 1 mal pro Minute aufgezeichnet. [19]

5.2.2.2 Versuchsdauer

Wie zuvor schon erwähnt muss der Kessel auf Betriebstemperatur gebracht werden, damit eine notwendige Grundglut besteht. Dann kann man den Versuch starten, wobei dieser mindestens 6 Stunden dauert und sowohl bei Nennlast, als auch bei kleinster Wärmeleistung durchgeführt wird. [19]

5.2.3 Bestimmung der Wärmeleistung

Jene Wärmemenge, die an einen Wärmeträger nutzbar abgegeben wird, muss gemessen werden. Die Bestimmung der Wärmeleistung erfolgt unmittelbar am Kessel durch Messung der umgewälzten Wassermenge und seiner Temperaturerhöhung. [19]

5.2.3.1 Bestimmung der Nennwärmeleistung

Bei einer Prüfung muss jene Nennwärmeleistung die vom Hersteller angegeben wird auf $\pm 8\%$ eingehalten werden. Außerdem ist die Mittlere Temperatur des Vorlaufs definiert (zwischen $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $90\text{ }^{\circ}\text{C}$) und die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (von 10 bis 25 K). [19]

5.2.3.2 Bestimmung des Kesselwirkungsgrades

Der Kesselwirkungsgrad ist über die direkte Methode zu ermitteln. Dazu verwendet man die Gleichung 5.1:

$$\eta_K = \frac{Q}{Q_B} \quad (5.1)$$

Hierbei ist Q die über Wassermenge und Temperaturerhöhung bestimmte Wärmemenge und Q_B jene, die mit dem Brennstoff in die Feuerung eingetragen wird. Die indirekte Methode, die durch die Gleichung 5.2 bestimmt ist, wird nur zu Kontrollzwecken angewendet. Hierbei sind die einzusetzenden Variablen die Wärmeverluste über Abgas (q_A), unvollkommene Verbrennung (q_U), Strahlung (q_S) und durch unverbrannten Brennstoff in der Asche (q_B). [19]

$$\eta_K = 1 - q_A - q_U - q_S - q_B \quad (5.2)$$

5.2.4 Bestimmung der Emissionswerte

Die Gehalte an CO_2 bzw. O_2 , CO und OGC und NO_x müssen bei Nenn-Wärmeleistung über die gesamte Versuchsdauer gemittelt werden. Anders gehandhabt wird allerdings die Staubmessung. Da diese nicht kontinuierlich durchgeführt werden kann muss die Versuchsdauer in mindestens 4 Zeitabschnitte geteilt werden. Die Messungen beginnen dabei jeweils am Anfang der Abschnitte und die erste Messung beginnt mit Versuchsbeginn. Je Filter wird maximal 30 Minuten abgesaugt und der Staubgehalt aus mindestens 4 Halbstundenwerten gemittelt.

Die Geschwindigkeit für die Absaugung des Abgases an der Staubmessstelle wird aus der Verbrennungsgasmenge unter Berücksichtigung von Druck und Temperatur errechnet.

Für die Messung der Emissionen müssen die gemittelten Volumenanteile (ppm) in Massenanteile (mg) umgerechnet werden. Außerdem sind die ermittelten Stickoxide (NO_x) als NO_2 auszuweisen. [19]

Abweichungen im Anhang A der DIN EN 303-5 für Österreich Hier wird in der Norm erläutert, dass die DIN EN 303-5 im Widerspruch zum österreichischen Gesetz steht und deshalb andere Grenzwerte bezüglich Kesselwirkungsgrad und Emissionen gelten. Hier wird sich auf den damaligen Stand (November 1994) der „Art. 15 Vereinbarung über Schutzmaßnahmen betreffend Kleinfeuerungen“ und „Art. 15 a Vereinbarung über die Einsparung von Energie“ bezogen. Aufgrund des Alters der Norm, sind noch weniger strenge Kesselwirkungsgrade gefordert, als sie heute, laut „Art. 15 a über das Inverkehrbringen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen“, die zuvor behandelt wurde, einzuhalten sind. Die normativen Vorgaben für Kesselwirkungsgrad und Emissionsgrenzwerte sind in den folgenden Tabellen 5.4 und 5.5 dargestellt. [19]

Tabelle 5.4: Kesselwirkungsgrade für Kleinfeuerungen lt. DIN EN 303-5 [19]

Kleinfeuerungen als Zentralheizungsgeräte für feste Brennstoffe:	
Händisch beschickt	
bis 10 kW	73 %
über 10 bis 200 kW	$(65,3 + 7,7 \log P_n) \%$
über 200 kW	83 %
Automatisch beschickt	
bis 10 kW	76 %
über 10 bis 200 kW	$(68,3 + 7,7 \log P_n) \%$
über 200 kW	86 %

Tabelle 5.5: Emissionsgrenzwerte für feste Brennstoffe lt. DIN EN 303-5 [19]

Feuerungen für feste Brennstoffe		Emissionsgrenzwerte [mg/MJ]			
		CO	NO _x	OGC	Staub
Händisch beschickt	Biogene Brennstoffe	1100	150 ^{*)}	80	60
	Fossile Brennstoffe	1100	100	80	60
Automatisch beschickt	Biogene Brennstoffe	500 ^{**)}	150 ^{*)}	40	60
	Fossile Brennstoffe	500	100	40	40

^{*)} Der NO_x-Grenzwert gilt nur für Holzfeuerungen.

^{**)} Bei Teillastbetrieb mit 30 % der Nennleistung kann der Grenzwert um 50 % überschritten werden.

6 Versuchs- und Messaufbau

Im folgenden Kapitel wird der Versuchs- und Messaufbau des Kesselprüfstandes für Strohpellets beschrieben, der zur Durchführung der Verbrennungsversuche verwendet wurde. Da es im Laufe dieser Arbeit zu konstruktiven Veränderungen gekommen ist, soll vorerst der Ausgangspunkt beschrieben werden um später nach und nach die Änderungen zu dokumentieren.

6.1 Unterschiede des Kessels für Strohpellets zum ursprünglichen Holzpelletskessel

Am Beginn der Überlegungen für den Bau eines Kessels für alternative Brennstoffe wurde von einer Anlage für die Verbrennung von Holzpellets ausgegangen. Daher stammt auch der zugrundeliegende konstruktive Aufbau und die Steuerung des Brenners. Ausgegangen wurde von der Type PK-V 30 der Firma Perhofer, wie in Abbildung 6.1 dargestellt. Von diesem Unternehmen wurden auch die groben Umbaumaßnahmen durchgeführt, die für den Einsatz von Strohpellets notwendig waren.

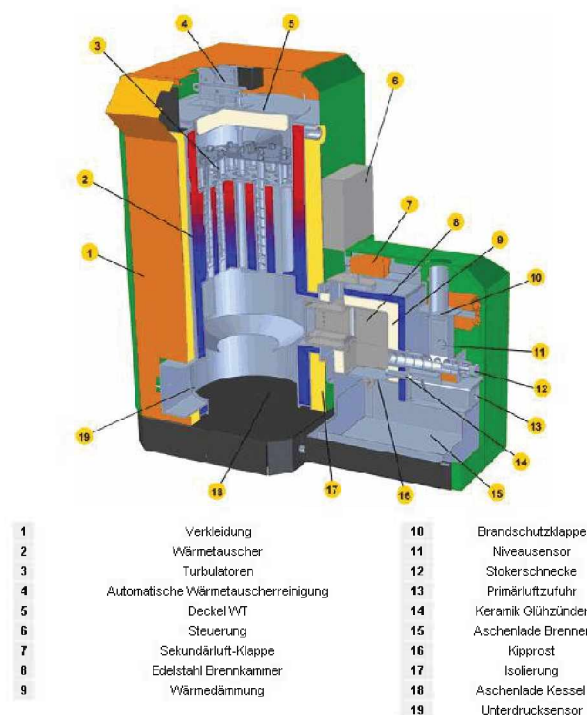


Abbildung 6.1: Perhofer Pelletskessel PK-V 30 [21]

6.1.1 Rost

Die Peripherie (Motoren, Wärmeübertrager, Steuerung usw.) des Perhofer Kessels entspricht weitgehend der des verwendeten. Wesentliche Änderungen hatten im Bereich des Brenners stattgefunden, da sich ein Kipprost, wie im Originalzustand vorhanden, nicht für den Einsatz von Brennmaterial mit niedrigem Ascheschmelzpunkt eignet. Da bei der Verwendung von Holzpellets der Rückstand im Normalfall keine Verschlackungsneigung zeigt, rieselt die Asche mit Fortdauer der Verbrennung durch den Rost hindurch. Die Kippfunktion wird nur beim Abstellen der Anlage verwendet, um die Glut und das restliche Verbrennungsmaterial in die darunterliegende Aschelade auszutragen. Um den Brenner den Erfordernissen anzupassen, war ein Vorschubrost konstruiert worden, der aus 4 beweglichen und aus 5 unbeweglichen Roststäben besteht, wie Abbildung 6.2 zeigt. Die Primärluft wurde aus den hohlen, luftdurchströmten, unbeweglichen Roststäben über kleine Löcher ins Brennstoffbett eingebracht.

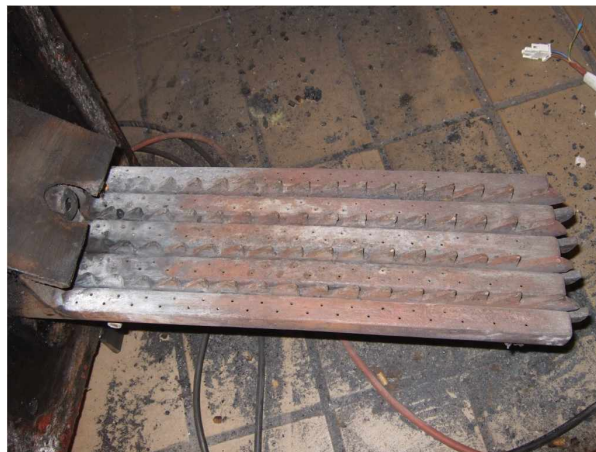


Abbildung 6.2: Verbrennungsrost zu Beginn der Verbrennungsversuche

6.1.2 Sekundärluft

Um die Reaktionszone der heizwertreichen Gase vom Brennstoffbett zu trennen und somit 2 Verbrennungszonen zu schaffen, hatte man, wie in Abbildung 6.3 rot markiert, am Ende des Brennerkanals den Eintritt der Sekundärluft festgelegt. Weiters war die Wasserkühlung des Brennermantels auf eine Luftkühlung umgebaut worden. Dies hat zur Folge, dass man die Brennkammer durch den Lufteintrag kühlt und gleichzeitig die Sekundärluft vorwärmt um vorteilhaftere Reaktionsbedingungen zu erhalten.



Abbildung 6.3: Sekundärluftöffnungen am Ende des Brennerteils

6.1.3 Ascheaustrag

Den Ascheaustrag muss man sehr effizient gestalten um bereits versintertes Material austragen zu können. Eine Aufbewahrung der Asche in einer Lade am Kesselboden, wie es bei Holz der Fall ist, wäre nicht nur deshalb problematisch, weil das Material an den Kesselwänden kleben bleiben würde. Auch die anfallenden Aschemengen sind beträchtlich höher, weshalb eine große Aschelade von Nöten wäre. Aufgrund des bei weitem höheren Ascheanteils von Halmgutbrennstoffen müssen höhere Durchsatzmengen bewältigt werden. Deshalb wurde ein Schneckenausstrag eingebaut. Das Volumen der Aschelade war an die notwendige Größe angepasst worden und so kann der Rückstand getrennt vom Brennraum gelagert und jederzeit geleert werden.

6.2 Kesselprüfstand

In Abbildung 6.4 ist der schematische Aufbau des Kesselprüfstandes samt Mess- und Kühlwasserstrecke abgebildet. Nachfolgend wird die Funktionsweise des Pelletskessels und die Messtechnik der Abgase beschrieben. In dieser Abbildung ist die Gesamtstaubmessung nicht eingezeichnet, da dieser Parameter nicht kontinuierlich gemessen wird.

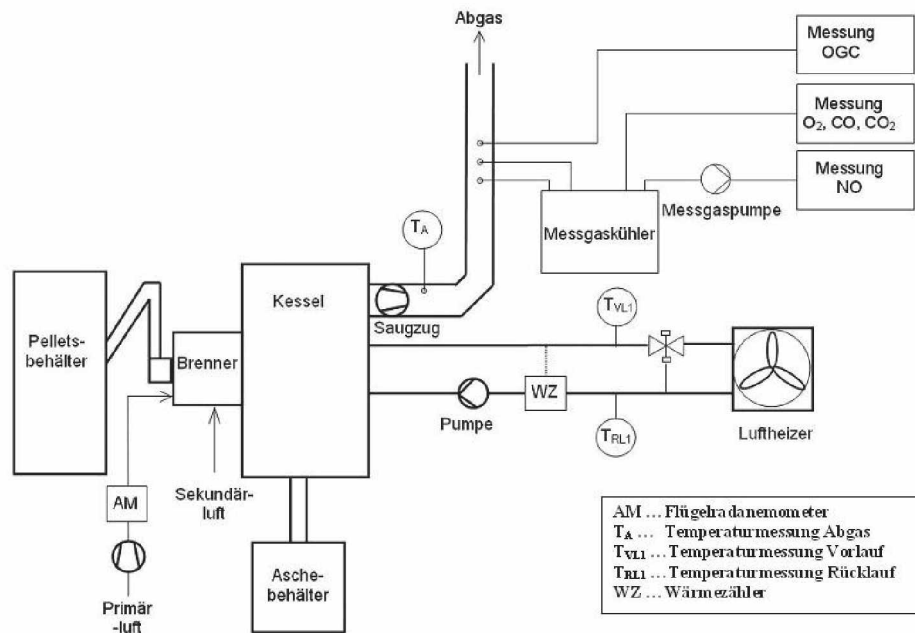


Abbildung 6.4: Schema des Kesselprüfstandes mit Kühlwasser- und Gasmessstrecke [20]

6.2.1 Funktionsweise des Weizenstrohpelletsessels

Im Pelletsbehälter wird der Brennstoff gelagert. Von dort aus wird über eine aufwärtsgerichtete Eintragungsschnecke der Brennstoff in einen kleinen Vorratsbehälter transportiert, aus dem der Brennstoff über die Stokerschnecke in den Brennraum eingebracht wird. Über diesem Vorratsbehälter befindet sich eine Brandschutzklappe die nur dann öffnet, wenn der Füllstandsmelder im kleinen Behälter kein Material mehr detektiert, woraufhin auch die Eintragungsschnecke Brennstoff aus dem Pelletsbehälter zu fördern beginnt.

Das Brennmaterial wird über die Stokerschnecke auf den Verbrennungsrost transportiert. Die Menge des einzubringenden Materials, und dadurch die Brennstoffwärmeleistung des Kessels kann über die Ein- und Ausschaltzeit der Stokerschnecke variiert werden. Bei durchgehendem Betrieb mit Weizenstrohpellets, erhält man eine Brennstoffwärmeleistung von etwa 60,5 kW.

Beim Start der Anlage werden die Pellets durch einen keramischen Glühzünder, der sich unter dem Brennstoffeintrag befindet, angefacht und es entsteht eine Glut. Durch diesen Zünder kann auch Luft von außen in den Brennraum strömen und die glühenden Pellets zum Brennen bringen. Nach dem Zündmodus wird der Glühzünder allerdings wieder ausgeschaltet. Wenn die Anlage in den Hochfahrmodus geht, der dem Teillastmodus entspricht, schließt sich eine Klappe außerhalb des Brennraums, wie in Abbildung 6.5 dargestellt, sodass auch über den Glühzünder keine Falschlufte mehr eingesaugt werden kann.

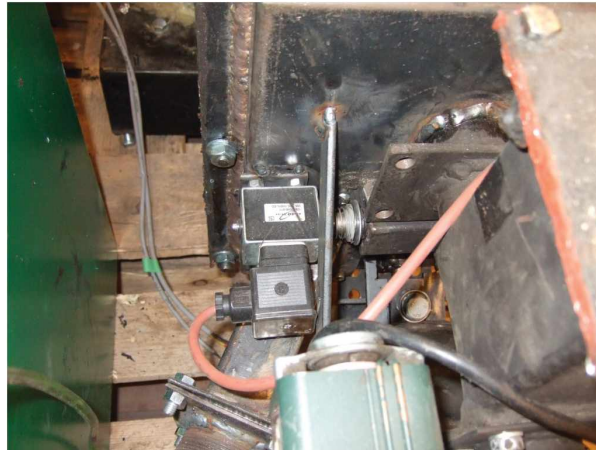


Abbildung 6.5: Klappe zum Verhindern von Falschluf durch den Glühzylinder, geschlossener Zustand

Durch die beweglichen Roststäbe erfolgt der Transport des Materials vom Brennstoffeintrag zum Ascheaustrag. Die Steuerung der beweglichen Roststäbe erfolgt, ebenso wie beim Stoker, über die Ein- und Ausschaltzeit des Rostmotors. Dieser betreibt eine Scheibe, die über 2 Lager und ein Gestänge den Rost nach vor und zurück schiebt, wie in Abbildung 6.6 dargestellt.



Abbildung 6.6: Antrieb des Verbrennungsrostes

Der Ascheaustrag erfolgt am Boden des Kessels ebenfalls über eine Schnecke im 90° Winkel zur Brennstofftransportrichtung. Die Bewegungsintervalle dieser Schnecke sind mit denen des Rostvorschubs gleichgeschaltet.

Die Primärluft wird über einen Ventilator eingebracht und dessen Geschwindigkeit mit einem, sich im Luftstrom befindenden, Flügelrad- Anemometer gemessen. An der Hinterseite des Brennraums befindet sich eine Rechteckige Primärluftverteilkammer. Dadurch wird die Luft über Bohrungen in die unbeweglichen Roststäbe eingeleitet und dort durch viele kleine Löcher ins Brennstoffbett eingetragen.

Die Menge an Sekundärluft wird über eine Klappe, die seitlich an der Aussenwand des Brenners

befestigt ist, eingestellt. Der Öffnungszustand dieser Einrichtung wird über den Sauerstoffgehalt im Kessel gesteuert. Dieser lässt sich mit einer Lambda Sonde messen und war in unserem Fall auf 7% O₂- Gehalt eingestellt.

Das Abgas wird in der Sekundärverbrennungszone im Kessel mit Luft vermischt und oxidiert. Es gelangt danach in den Wärmeübertrager der aus einem Körper besteht, der mit Wasser durchströmt wird. Das Abgas durchtritt die zylinderförmigen, wassergekühlten Rohren, die mit Einbauten wie in Abbildung 6.7 dargestellt, ausgerüstet sind. Durch die spiralförmige Gestalt verlängert sich die Verweilzeit des Abgases an den Wärmeübertragerrohren und es wird mehr Energie an das Wasser abgegeben. In einem Intervall von einer Stunde wird er gereinigt. Dies erfolgt durch Aufheben des Einbaus über einen Motor und anschließendem Fallenlassen. So wird gewährleistet, dass der Wärmeübertrager nicht zusetzen kann.



Abbildung 6.7: Wärmeübertrager

Unmittelbar nach dem Wärmeübertrager tritt das Abgas aus dem Kessel aus. Am Beginn des Abgasrohres sitzt ein Saugzugventilator. Dieser stellt einen leichten Unterdruck im Kessel ein, sodass im Falle von Undichtigkeiten kein Abgas in die Umgebung entweichen kann. Hauptsächlich sichert dieser Saugzug allerdings den kontinuierlichen Abtransport des Abgases durch den Kamin und sorgt somit für stabile Verhältnisse im Kessel. Außerdem ist er dafür verantwortlich, dass Sekundärluft durch die vorher beschriebene Klappe angesaugt wird.

In nachfolgender Abbildung 6.8 wird die Anlage in einer gut einsehbaren Ansicht dargestellt. Der Rostantrieb war zu dieser Zeit noch seitlich und konstruktiv etwas verändert. Zu einem etwas späteren Zeitpunkt wurde dieser jedoch auf die vorher beschriebene Funktionsweise umgebaut.

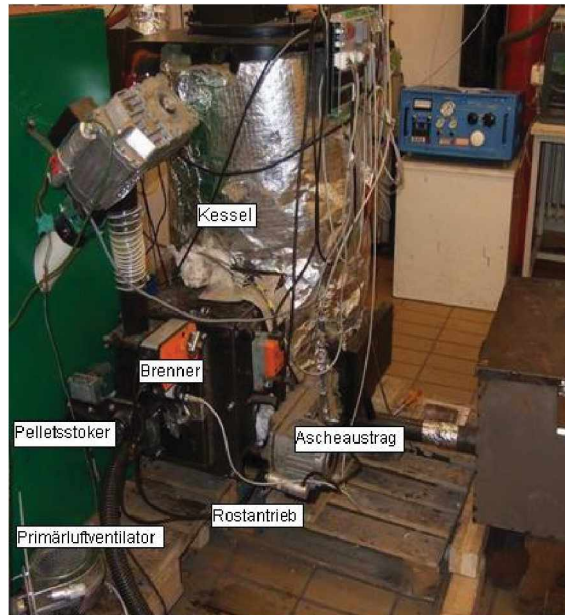


Abbildung 6.8: Kessel Außenansicht [20]

6.2.2 Kühlwasserstrecke mit Wärmezähler

Das im Wärmeübertrager des Kessels erhitzte Wasser wird von einer Kesselkreispumpe umgewälzt und über die Vorlaufleitung zu einem Luftheizer gepumpt. Dieser befindet sich, wie auch Abbildung 6.9 zeigt, außerhalb des Versuchsraums und gibt die Wärme über einen Wasser- Luft Wärmeübertrager an die Umgebung ab. Zwischen Kessel und Luftheizer befindet sich zur Rücklaufanhebung ein Bypass. Hier kann die Menge an erhitztem Wasser, die in die Rücklaufleitung fließt über ein 3-Wege Ventil eingestellt werden und so die Temperatur der gekühlten Flüssigkeit, die in den Kessel zurückfließt, reguliert werden. Diese Anhebung gibt es deshalb, weil eine hohe Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf das Material des Wärmeübertragers zu stark beanspruchen würde. Damit soll Materialversagen bzw. Überbeanspruchung vermieden werden.

Weiter kesselseitig befindet sich jeweils an der Vor- und Rücklaufleitung eine Temperaturmessung sowie ein Durchflusszähler im Vorlauf. Dadurch wird die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Leitungen gemessen und mit dem Volumenstrom aus dem Zähler ergibt sich die Kesselleistung, die auf einem digitalen Leistungsmesser abzulesen ist. Diesen Aufbau zeigt die nachfolgende Abbildung 6.10.



Abbildung 6.9: Luftheizer außerhalb des Versuchsraumes [20]

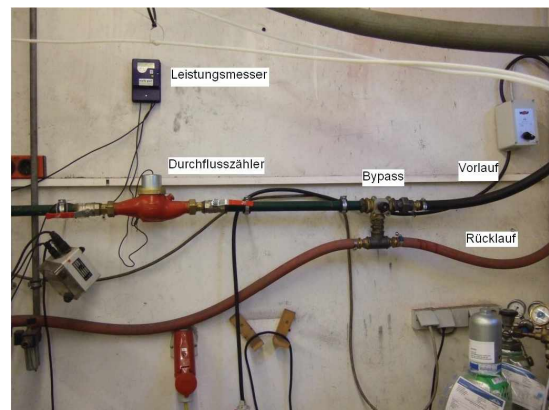


Abbildung 6.10: Kühlwasserstrecke mit Leistungsmesser, Rücklaufanhebung und Durchflusszähler

6.2.3 Gasmessstrecke

Zur Messung des Abgases werden mehrere Teilströme aus dem Kamin abgeführt. Der Messaufbau wird in Abbildung 6.11 gezeigt. Über einen beheizten Schlauch wird zunächst das feuchte Abgas in den FID der Marke Ratfish R55 geleitet. Hier werden die organischen Kohlenwasserstoffe in einer Wasserstoffflamme, die mit synthetischer Luft verbrannt wird, ionisiert und in der Einheit ppm gemessen. Es gibt 4 verschiedene Messbereiche von 1 - 10 ppm, 10 - 100 ppm, 100 - 1000 ppm und 1000 - 10000 ppm. Beheizt wird die Messgasleitung deshalb, damit sich innerhalb kein Kondensat bilden kann. Im FID wird also das feuchte Abgas gemessen.

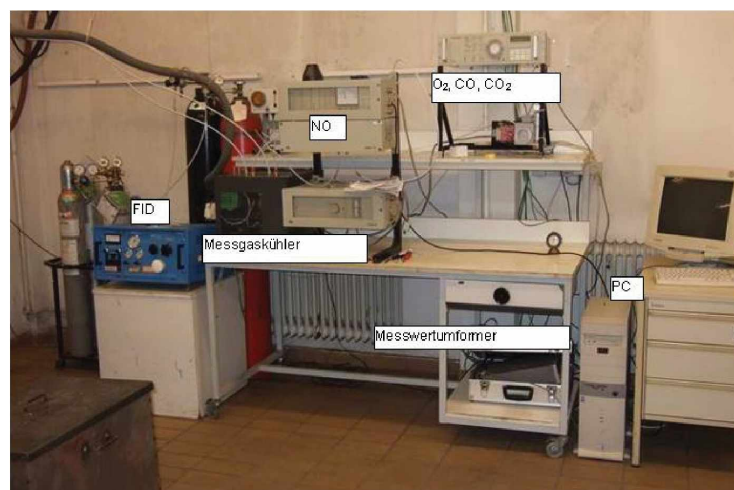


Abbildung 6.11: Gasmessstrecke [20]

Anders ist es bei den restlichen Gasmessgeräten. Über einen separaten, beheizten Abzweig am Kamin gelangt das Gas durch einen unbeheizten Kunststoffschlauch in den Messgaskühler Hart-

mann & Braun, Advance SCC, wie in Abbildung 6.12 dargestellt. Hier wird es auf ca. 4 °C abgekühlt und das dabei anfallende Kondensat über einen Pufferbehälter im Gerät durch eine Schlauchpumpe aus dem Apparat ausgetragen.



Abbildung 6.12: Messgaskühler Hartmann & Braun, Advance SCC

Das so getrocknete Abgas geht danach weiter in das Messgerät Uras 10E für O₂, CO₂ und CO, zu sehen in Abbildung 6.13 und wird dann über einen Kunststoffschlauch ins Freie geleitet. Dieses Analysegerät ist an einen Messwertumformer angeschlossen, der die gemessenen Werte an den Messcomputer weitergibt. Mit dem Programm DASY Lab werden die eingehenden Daten dann am PC auf einer graphischen Oberfläche ausgegeben und in unserem Fall im 10 Sekunden Takt aufgezeichnet.

Ein weiterer Abzweig am Kamin geht über den Messgaskühler in das NO-Messgerät Hartmann & Braun, Radas 1G, dargestellt in Abbildung 6.14. Hier gibt es 2 verschiedene Möglichkeiten die Stickoxide im Abgas zu messen. Entweder man misst das NO ohne den eingebauten Konverter wobei man hier auf das Problem stößt, das ebenfalls in den NO_x-Wert eingehende NO₂ nicht mitzumessen, da das Gerät nur NO detektieren kann. Bei eingeschaltetem Konverter wird der Stickstoffdioxid- Anteil im Abgas allerdings zu Stickstoffmonoxid reduziert, weshalb man dann einen Wert messen kann, der die gesamten Stickoxid- Emissionen repräsentiert. Später muss dann das gesamte (mit Konverter) entstehende NO auf NO₂ umgerechnet werden, um den Messwert mit dem Grenzwert vergleichbar zu machen. Dies ist der Grund, weshalb die zweite Form der Messung mit eingeschaltetem Konverter zu bevorzugen ist und im gegenständlichen Fall auch verwendet wurde. Das NO-Gerät wurde ebenfalls an den Messwertumformer angeschlossen um die Messdaten am PC darstellbar und auswertbar zu machen.



Abbildung 6.13: Messgerät Hartmann & Braun, Uras 10E für O₂, CO₂ und CO



Abbildung 6.14: Messgerät Hartmann & Braun, Radas 1G für NO

Gesamtstaubmessung Die Gesamtstaubmessung erfolgte diskontinuierlich mit einem Messgerät der Gesellschaft für Schadstoffmesstechnik (GSM). Dieses besteht aus einer Staubblanze, wie aus Abbildung 6.16 ersichtlich, mit einer aufschraubbaren Messsonde. Für diese Sonde gibt es mehrere Ansaugdüsen mit verschiedenen großen Durchmessern. Außerdem enthält die Lanze einen Staubhülseinsatz, in dem die mit Glaswolle gestopften Messhülsen eingebracht werden. Hierin sammelt sich beim Absaugen eine gewisse Staubmenge, welche durch Gegenwiegen der Hülse bestimmt wird. Über den Hülsenbehälter wird die Isolierung gestülpt um Kondensatbildung zu vermeiden.

Danach gelangt das vom Staub befreite Abgas in das Messgerät, das in Abbildung 6.15 dargestellt ist. Über einen Kondensationsbehälter in dem der Grobanteil des Kondensats abgeschieden werden soll geht das Abgas weiter in einen Trockenturm. Dieser ist mit Silicagel und Glaswolle gefüllt um eine weitere Trocknung des Abgases zu erreichen. Danach wird in einem Rotameter der benötigte Durchfluss eingestellt. Von dort fließt das Abgas weiter in den Gaszähler, der das abgesaugte, trockene Gasvolumen misst. Davor wird mit einem Thermometer die Temperatur gemessen und nach dem Zähler befindet sich ein Manometer, um den Unterdruck, der im Gerät herrscht, feststellen zu können. Am Ende befindet sich eine Vakuumpumpe, die das Abgas durch die gesamte Apparatur saugt.

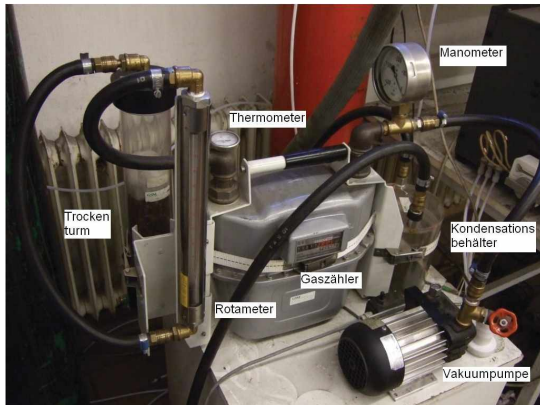


Abbildung 6.15: Gesamtstaubmessgerät, Gesellschaft für Schadstoffmesstechnik (GSM)

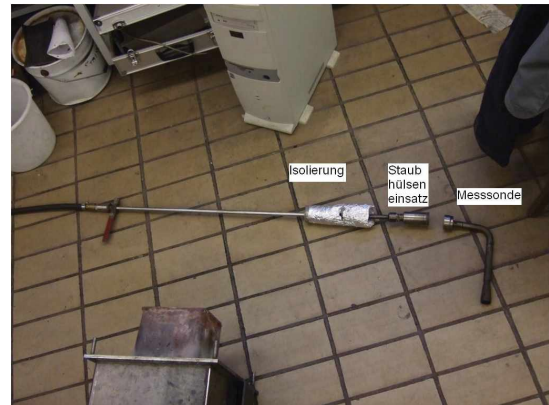


Abbildung 6.16: Staubblanze mit Isolierung, Staubhülseinsatz und Messsonde

6.3 Brennstoff

Bei dieser Arbeit wurden ausschließlich Weizenstrohpellets verwendet. Der Ascheschmelzpunkt dieses Halmgutbrennstoffes ist mit ca. 700-800°C sehr niedrig. Dies ist auch der Grund für das schwierige Verbrennungsverhalten und die Probleme die mit dieser Eigenschaft einhergehen. Eine Brennstoffanalyse dieses Materials wurde im Brennstofftechniklabor am Lehrstuhl für Thermoproszesstechnik durchgeführt und ist im Anhang A beigelegt.

Der Brennstoff wird in Plastiksäcken angeliefert und gelagert. Erst kurz vor der Verbrennung wurde das Material in den dafür vorgesehenen Pelletsvorratsbehälter eingefüllt und danach der Verbrennung zugeführt.

7 Anpassung des Brennstoffeintrages

Im nachfolgenden Kapitel soll vermittelt werden, welche Arbeiten an der Kleinf Feuerungsanlage für Weizenstroh pellets vorgenommen worden sind. Einerseits befasst es sich mit der Veränderung der Einstellungen an der Kesselsteuerung, sowie auch mit baulichen bzw. konstruktiven Änderungen, die im Zuge dieser Arbeit vorgenommen wurden.

7.1 Ausgangspunkt

Die Brennstoffwärmeleistung entspricht bei einer Stokereinstellung von 6-6 (also 6s Ein und 6s Aus) ca. 30 kW. Der Vorschub, d.h. das Rostbewegungsintervall, ist auf 24-24 eingestellt worden und die Primärluft hat man auf 4,3 m/s festgelegt. Die Umrechnung der Primärluftgeschwindigkeit auf den Volumenstrom ist dem Anhang F zu entnehmen. Zuvor hatte es generelle Probleme mit dem Rostantrieb gegeben, da bei den vorigen Versionen des Rostes sehr hohe thermische Belastungen der innenliegenden Antriebseinheit aufgetreten waren und es dadurch immer wieder zu mechanischen Problemen, bzw. Materialversagen gekommen ist. Durch den Umbau auf den Antrieb mit einer rotierenden, geeigneten Platte wurden diese Schwierigkeiten jedoch behoben.

7.2 Ziel der Versuche

Ziel muss es sein, die Höhe des Brennstoffbettes so weit zu verringern, dass eine möglichst geringe Wandreibung auftritt. Wichtig ist das deshalb, um eine zu lange Verweilzeit der Pellets, die sich seitlich am Rost befinden, zu verhindern und somit ein Verkleben mit der Brennerwand bzw. seitlich auftretende Verschlackungen des Brennstoffs hintanzuhalten. Hier gibt es Optimierungsbedarf, da eine gewisse Brennstoffbedeckung des Rostes unabdinglich ist um den Materialtransport durch die beweglichen Roststäbe zu gewährleisten. Eine Verringerung der Betthöhe sollte bewirken, das Material auch an der Oberfläche zum Glühen zu bringen um so eine vollständigere, regelmäßige Verbrennung zu erreichen. Zu diesem Zeitpunkt war das noch nicht der Fall.

7.3 Versuchsdurchführung

Die Höhe der Brennstoffschüttung am Rost ist hauptsächlich abhängig von der eingetragenen Menge an Brennstoff. Um eine geringere Bettbedeckung zu erreichen, muss die Einschaltzeit des Stokers verringert werden.

Nach dem Starten der Anlage und einer Anfahrphase erfolgte die Änderung der Einstellungen. In Tabelle 7.1 sind jene Ein- und Ausschaltzeiten der Stokerschnecke zu sehen, die bei der Durchfüh-

zung der Versuche verwendet wurden. Die Geschwindigkeit der Primärluft lag bei 2,6 - 3 m/s. Die Stokerintervalleinstellungen 3 - 6, 3 - 7 und 3 - 8 wurden getestet, da im Vorfeld bereits klar wurde, dass die Brennstoffwärmeleistung wesentlich reduziert werden muss um die gesetzten Ziele zu erreichen. Die Verbrennung konnte durch ein Schauglas, das dem Verbrennungsrost gegenüber liegt, eingesehen werden und so konnte man die optimale Betthöhe einstellen.

Tabelle 7.1: Einstellungen zur Anpassung des Brennstoffeintrags

	Ein	Aus
Stoker 1	3	6
Stoker 2	3	7
Stoker 3	3	8
Vorschub	2	8
Primärluft	2,6 - 3 m/s	

7.4 Ergebnisse

Bei diesem Versuch ist herausgefunden worden, dass ein Stokerintervall mit 3 s ein und 8 s aus das Optimum ergibt, was einer Brennstoffwärmeleistung von 19,17 kW entspricht. Hier war das Brennstoffbett am Rostende so hoch, dass der Transport aufgrund der Menge des Materials noch gewährleistet werden konnte. Andererseits war das Brennstoffbett, verglichen zu den anderen Einstellungen, so niedrig, dass die Wandreibung den Verhältnissen entsprechend minimiert wurde. Nicht zu beobachten war ein Ausbleiben der Randerscheinungen bzw. der Schollenbildung. Ebenso gab es keine Verbesserung bezüglich der Homogenität des Bettes. Nach kurzer Zeit kam der Brennstofftransport zum Stillstand und die Anlage wurde deshalb abgestellt, da sie sonst verstopft wäre.

7.5 Interpretation und Kritik

Zunächst fällt auf, dass das Brennstoffbett während der Verbrennung im Brennerkanal nach einiger Zeit bis etwa zur Hälfte gefüllt ist. Nachdem die äußersten Roststäbe zur Brennerwand hin nicht beweglich sind und dort auch eine hohe Wandreibung auftritt, führt dies generell zu einem langsameren bzw. schwierigeren Materialtransport an den Seiten und es kommt zu längeren Verweilzeiten der Pellets.

Außerdem ist erkennbar, dass das Material an der Oberseite nach einiger Zeit eine Art zusammenhängende Scholle bildet, während sich unter dieser Scholle feinkörniger, glühender Brennstoff befindet. Wenn dieser Fall eintritt, so kann nach einiger Zeit dieses obenliegende, agglomerierte Material nicht mehr transportiert bzw. ausgetragen werden. Der Grund dafür ist, dass es an der Brennerwand klebt, bzw. sich aufgrund seiner Geometrie und Größe im Brenner verkeilt. Daraus folgt, dass sich die darunter befindlichen Rechen zwar bewegen, an die Scholle jedoch nicht mehr herankommen. Die Verkrustung „schwebt“ dann sozusagen über den Roststäben, was wiederum

nach hinten¹ hin zu einer Verstopfung der Anlage mit frischem Material führt.

Durch ein Schauglas, das gegenüber dem Rost liegt, war zu sehen, dass der Brennstoff an der Oberfläche sehr dunkel bis tiefschwarz ist und nicht glüht, während man im unteren² Bereich eine Orangefärbung des Materials erkennen konnte, was auf eine starke Glut schließen lässt.

Über das Verhältnis „Stoker ein“ zu „Stoker aus“ ergibt sich grundsätzlich ein Verhältnis, dass die Brennstoffwärmeleistung bestimmt. Die Kesselleistung wird mit sinkendem Brennstoffbett geringer und der gesamte Kessel bzw. der Wärmeübertrager ist dadurch etwas überdimensioniert. Diese Überdimensionierung hat zur Folge, dass das entstehende Abgas im Wärmeübertrager soweit abgekühlt wird, dass es im Kamin zur Kondensatbildung kommt, da dort der Taupunkt des Gases unterschritten wird. Durch Verwendung kürzerer spiralförmiger Einsätze, hat das Abgas dort eine geringere Verweilzeit und besitzt deshalb eine höhere Temperatur beim Austritt. Trotz Wechsel der Einbauten des Wärmeübertragers, konnte diese Erscheinung nicht gänzlich verhindert werden.

¹zum Brennstoffeintrag

²unter der obengelegenen schwarzen Schicht

8 Optimierung der Einstellungen für den bestehenden Feuerraum

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit war die Optimierung des Feuerraumes zur Verbesserung des Verbrennungsverhalten der Kleinf Feuerungsanlage für Weizenstrohpellets. Hierbei wurde versucht den Brennstoff so zu verbrennen, dass es zu keinen Anbackungen an der Brennerwand kommt. Außerdem sollte es zu keinem Zeitpunkt notwendig sein manuell in die Verbrennung einzugreifen, sodass garantiert wird, dass die Anlage völlig automatisch und ohne Störungen betrieben werden kann.

8.1 Bestimmung der Auswirkungen beim Ändern der einzelnen Einstellungsfaktoren

Zunächst wurde das Verbrennungsverhalten für den bereits bestehenden Feuerraum optimiert um mit dem bestehenden Feuerraumdesign bzw. den bereits vorhandenen konstruktiven Gegebenheiten den Stand der Entwicklungen festzustellen bzw. zu erheben.

Die einflussreichste Komponente der veränderbaren Einstellungen ist hierbei neben dem Rostvorschub vor allem die zugeführte Primärluftmenge bzw. Primärluftgeschwindigkeit. Diese bestimmt die Bedingungen, nicht nur im Brennraum, sondern auch im Brennstoffbett der Anlage und ist deshalb von entscheidender Bedeutung. Bei deren Optimierung erschien es aufgrund der niedrigen Ascheschmelztemperaturen von Weizenstroh grundsätzlich vorteilhafter, von einem geringeren Wert der Primärluftzufuhr auszugehen, als von einem zu hohen. Außerdem wurde der Zufluteintrag rechnerisch abgeschätzt. Dies erfolgte über eine Aufteilung zwischen Primär- und Sekundärluft, die in der Theorie gefunden wurde. Laut dieser sollte das Verhältnis zwischen den beiden bei etwa 1/3 Sekundär zu 2/3 Primär liegen, sodass es zu einer optimale Aufteilung der beiden Verbrennungszonen kommt. Bei gegebenem Brennstoffeintrag¹ wurde über die theoretische Mindestluftmenge aus der Verbrennungsrechnung und einem λ von 1,5 ein theoretischer Wert von 1,7 m/s angenähert², wobei diese Einstellung einer zugeführten Luftmenge von 2,331/s entspricht ($1 \text{ m/s} \triangleq 1,371/\text{s}$). Die Berechnung der Aufteilung der Primärluft ist im Anhang B beigelegt. Dies war der Grund für die deutliche Senkung der Zuluftgeschwindigkeit von über 2,5 auf 1,7 m/s. Die genaue Einstellung dieser Geschwindigkeit erfolgte über einen Kugelhahn, der zwischen Zuluftgebläse und Anemometer eingebaut ist.

¹Stokerintervall 3 - 8

²der λ -Wert von 1,5 entspricht in etwa unserem eingestellten Restsauerstoffgehalt von 7 % im Abgas

8.1.1 Ziel der Versuche

Das Ziel dieser Versuche ist es, vorerst einen Überblick über das Verhalten des Materials bei der Verbrennung zu bekommen und den Bereich herauszufinden, in dem die Einstellungen sinnvoll verändert werden können. In diesem Bereich soll es möglich sein, sich an die optimalen Einstellungen heranzutasten und die Einflüsse der einzelnen Änderungen festzustellen bzw. kennenzulernen. Ausgehend von den Ergebnissen aus Kapitel 7 und den in Abschnitt 8.1 erklärten Berechnungen, wurde eine Versuchsdurchführung für die Optimierung der Primärluftmenge für den bestehenden Feuerraum geplant. So sollten verschiedene Vorschub- und Primärlufteinstellungen getestet werden, um sich einen Überblick über die Auswirkungen der Veränderungen zu verschaffen.

8.1.2 Versuchsdurchführung

Ausgehend von den Einstellungen in Tabelle 8.1 wurde zunächst der Vorschub auf eine Einstellung von 2-8³ vermindert. Danach erfolgte die stufenweise Rückstellung über 2-7 auf die Ursprungseinstellung 2-6. Nach ca. 3 h Versuchsdauer wurde bis zum Stoppen des Materialtransportes am Rost und dem folgenden Verstopfen der Anlage, die Primärluftmenge immer weiter gesteigert. Am Beginn noch bei 1,7 m/s steigerte man die Primärluftgeschwindigkeit über 2,0 auf 2,35 m/s bis letztendes bei 3,0 m/s der Stillstand des Brennstoffs durch Versintern erreicht war und die Anlage abgestellt wurde.

Tabelle 8.1: Ausgangseinstellungen für die Bestimmung der Auswirkungen der Einstellungen

	Ein	Aus
Stoker	3	8
Vorschub 1	2	6
Primärluft	1,7 m/s	

8.1.3 Ergebnisse

Aus der Bestimmung der Auswirkungen der Einstellungsfaktoren wurde deutlich, dass das Vorschubintervall von 2-6 am besten für die Verbrennung geeignet ist. Außerdem wurde deutlich, dass die Geschwindigkeit der ins Bett eingetragenen Luft nur in einem engen Bereich variabel ist und schon bei relativ geringen Steigerungen die Verschlackungsneigung sehr stark ansteigt. Dies führte dazu, dass in den folgenden Versuchen die Zuluft nur um jeweils 0,2 m/s erhöht bzw. gesenkt wurde.

8.1.4 Interpretation und Kritik

Aus den Versuchen zur Bestimmung der Auswirkungen der Einstellungsfaktoren wurde deutlich, dass das Vorschubintervall mit der Ursprungseinstellung von 2-6 am besten geeignet ist, da hier die Betthöhe am niedrigsten war und so die Zuluft durch die unbeweglichen Roststäbe am besten in der Brennstoffschüttung verteilt werden kann. Hier wurde aber auch klar, dass mit der derzeitigen Luftführung, auch durch massive Steigerung der Primärluft, das Brennstoffbett an dessen Oberseite,

³im Folgenden immer kurz für x Sekunden Einschaltzeit - y Sekunden Ausschaltzeit

nicht durchgängig zum Glühen gebracht werden kann. Zumindest nicht ohne massive Verkrustungen und das Verstopfen der Anlage in Kauf nehmen zu müssen.

8.2 Versuche bei verschiedenen Primärluftmengen

Als nächstes wurden Versuche mit verschiedenen Primärluftmengen durchgeführt. Dies ereignete sich an 3 separaten Tagen, da die Einstellung eines stabilen Zustandes des Bettes und der Bedingungen im Brennraum einige Zeit in Anspruch nehmen und so die Möglichkeit der gegenseitigen Beeinflussung der Zustände ausgeschlossen werden sollte. Die Anlage wurde vor dem ersten Versuchstag ausgebaut und gereinigt. Zwischen den einzelnen Tagen wurde kein Ausbau mehr vollzogen. Vom Schauglas aus wurden allerdings jeden Tag die groben Verunreinigungen beseitigt.

8.2.1 Ziel der Versuche

Hiermit soll die maximal mögliche Primärluftgeschwindigkeit bestimmt werden, mit der die Anlage, ohne Stillstand des Materialtransports und manuellem Eingriff, längere Zeit betrieben werden kann. Noch dazu soll die Frage geklärt werden ob die Einstellung mit weniger Primärluftmenge als im Referenzversuch bei $1,7\text{ m/s}$, einen verbesserten Effekt auf das Verbrennungsverhalten zeigen würde. In den 3 Versuchstagen wurde bei gleichen Stoker und Vorschubeinstellungen, nur die Primärluft in einem Bereich geändert, der sich in Vorversuchen als sinnvoll herausgestellt hatte.

8.2.2 Versuchsdurchführung

Beim ersten Versuch, dem Referenzversuch, wurden jene Bedingungen gefahren, die in Tabelle 8.1 dargestellt sind. Die Einstellung mit weniger Primärluft als bei der Referenz wurde am zweiten Tag gefahren, um herauszufinden, ob sich das Verbrennungsverhalten so verbessern lassen würde. Dabei wurde mit einer Geschwindigkeit von $1,5\text{ m/s}$ gearbeitet.

Bei diesem Versuch kam es zu einer Verminderung der Primärluft, wobei zu beobachten war, dass sich das Verbrennungsverhalten gegenüber dem ersten Tag verschlechtert hatte. Es war eine flächenmäßig größere Schollenbildung an der Oberfläche des Brennstoffs zu erkennen. Außerdem kam es nach etwa 2 h Versuchsdauer zu einer Brückenbildung im Ascheaustrag, die manuell entfernt werden musste.

Am letzten Tag wurde versucht, die Geschwindigkeit der Zuluft auf $1,9\text{ m/s}$ weiter zu erhöhen. Dies endete mit einem gänzlichen Verstopfen der Anlage nach einer Versuchsdauer von etwa 5 h trotz mehrmaligem manuellen Eingriff und Beseitigung sowohl von Brückenbildungen beim Ascheaustrag, als auch von Material, das im vorderen Bereich des Rosts zum Stillstand gekommen war. Auffällig war hierbei, dass bereits nach etwa 2,5 h kein Materialtransport mehr möglich war, da eine Agglomeration auf der linken Wand festgeklebt ist. Deshalb musste manuell eingegriffen und die Verschlackung beseitigt werden. Bereits eineinhalb Stunden später konnte man eine Brückenbildung beim Ascheaustrag feststellen, die entfernt werden musste. Nach weiteren 20 Minuten wurde entdeckt, dass es beim Brennstoffeintrag zu einer massiven Verschlackung gekommen war und die Anlage deshalb danach abgeschaltet werden musste. Der Brennstoffeintrag war über die Dauer

der Versuche hinweg wegen der Rauchentwicklung im Brennerkanal und der Sekundärluftverbrennung am Ende des Kanals nicht einsehbar. Im Betrieb konnte man etwa die letzten 5-10 cm des Rostes einsehen. Für eine gute Sicht auf den Brennstoffeintrag musste die Ofentür beim Ascheausstrag geöffnet werden. So wurde der Brennerkanal mit Frischluft gespült und die Sicht nach hinten freigegeben.

8.2.3 Ergebnisse

Nach dem ersten Tag⁴ war festzustellen, dass sich das generelle Verbrennungsverhalten gegenüber der vorigen Situation verbessert hat. Trotzdem waren oberflächliche Verklumpungen zu erkennen, die jedoch sowohl vom Rost, als auch vom Ascheausstrag abtransportiert werden konnten. Diese entstanden hauptsächlich seitlich an der Brennerwand, hatten eine Breite von etwa 2 cm, bei einer Länge von 10-20 cm.

Am zweiten Tag sollte festgestellt werden, ob mit einer Senkung der Primärluftgeschwindigkeit das Verbrennungsverhalten verbessert werden kann. Dies war jedoch nicht der Fall. Im Gegenteil, es verschlechterte sich die Situation noch weiter. Untermauert wurde dies durch größere, flächigere Verkrustungen an der Oberfläche des Brennstoffs, sowie einem notwendigen manuellen Eingriff zur Entfernung einer Brückenbildung im Ascheausstrag.

Weiters waren starke Versottungen des Brennraums beim Brennstoffeintrag ersichtlich. Besonders auffällig war dies am zweiten Tag der Versuche, an dem mit einer Primärluftgeschwindigkeit von 1,5 m/s gefahren wurde. In der nachfolgenden Abbildung 8.1 ist zu sehen, dass sich im hinteren Bereich der Brennerkammer von oben herab Tropfen gebildet hatten. Weiters ist an der Rückwand des Brennerkanals, rund um den Brennstoffeintrag, eine glänzende teerartige Versottung zu sehen. Etwas unterhalb dieses glänzenden Bereichs kann man erkennen, dass teilverbranntes Material an der schräg angeordneten Platte unter dem Brennstoffeintrag kleben geblieben ist. Ebenso können an der linken und rechten Brennerwand Anbackungen erkannt werden.

⁴Referenzversuch

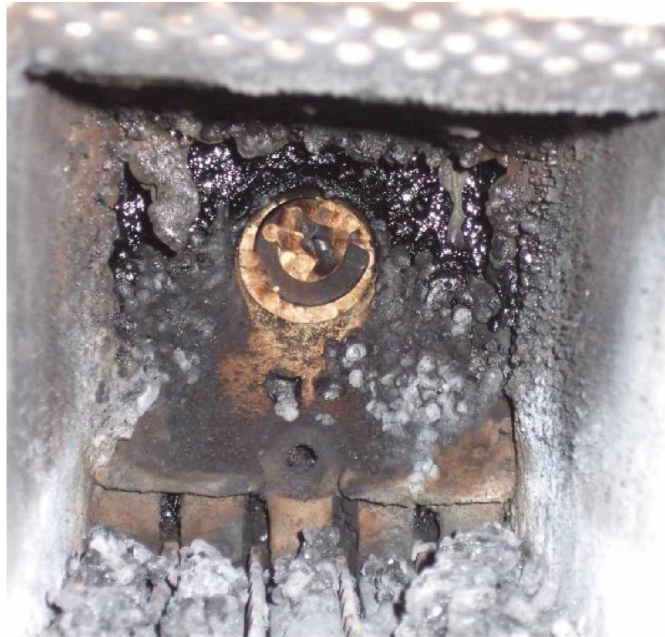


Abbildung 8.1: Brennerkanal mit teerartigen Versottungen und Tropfen im hinteren Bereich

Der dritte Tag sollte darüber Aufschluss geben, ob die eingetragene Primärluftmenge noch gesteigert werden kann, was mit einem sehr schlechten Verbrennungsverhalten, mehrmaligem manuellen Eingreifen und letztlich im Verstopfen der Anlage endete. Abbildung 8.2 zeigt die Situation direkt nach dem Abschalten der Anlage, nebenstehende Abbildung 8.3 den abgekühlten Zustand am nächsten Tag, nach dem Ausbau des Rostes.



Abbildung 8.2: Situation direkt nach dem Abfahren: Primärluftgeschwindigkeit 1,9 m/s

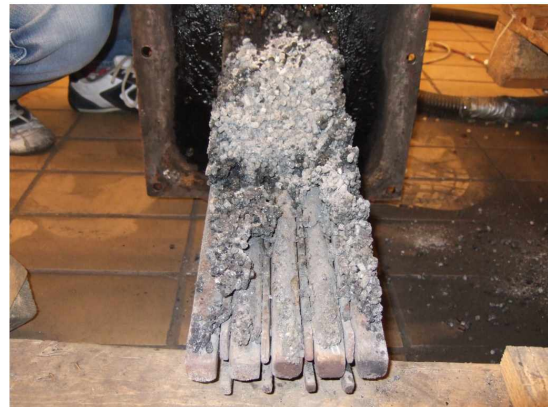


Abbildung 8.3: Situation nach Erkalten und Ausbau des Rostes: Primärluftgeschwindigkeit 1,9 m/s

Gemeinsam hatten alle der bisher vorgenommenen Versuche, egal mit welcher Primärluftleistung gefahren wurde, dass sich auf den unbeweglichen Roststäben, aus denen die Primärluft austritt, an den drei mittleren Roststäben Verkrustungen gebildet hatten, wie sie in nachfolgender Abbildung 8.4 zu erkennen sind. Diese waren auch schon während des Betriebs sichtbar. Außer-

dem konnten sie im heißen Zustand nicht entfernt werden, da sie sehr stark an den unbeweglichen Roststäben kleben. Nach dem Abkühlen allerdings konnte man den länglichen, zu Stäben verkrusteten Brennstoffrückstand ganz einfach von der Oberfläche der Stäbe abheben. Dies ist auf die Längendehnung des Edelstahl bei hohen Temperaturen und die darauffolgende Kontraktion beim Abkühlen zurückzuführen. So werden die Verkrustungen gelöst und liegen danach nur noch auf den Roststäben ohne mit ihnen verhaftet zu sein.



Abbildung 8.4: Verkrustungen auf den mittleren unbeweglichen Roststäben

Außerdem war an allen Tagen zu beobachten, dass sich auf den beweglichen Roststäben partiell Verkrustungen gebildet hatten. In den folgenden Abbildungen 8.5 und 8.6 ist zu erkennen, dass diese Verkrustungen bei höheren Zuluftmengen auch größer werden. Dies ist allerdings unerwünscht, da dadurch der Brennstoff in seinem Transport gehemmt wird und die Verkrustungen nach dem Abstellen der Anlage entfernt werden müssen. An den Rechen ist diese Reinigung jedoch schwierig und geht meist mit einem Ausbau des gesamten Rostes einher, was schließlich für den Endkunden unzumutbar wäre.



Abbildung 8.5: Verkrustungen auf den beweglichen Roststäben bei einer Primärluftgeschwindigkeit von 1,7 m/s



Abbildung 8.6: Verkrustungen auf den beweglichen Roststäben bei einer Primärluftgeschwindigkeit von 1,9 m/s

8.2.4 Interpretation und Kritik

Auffällig war, dass das Material gerade an der Oberseite des Brennstoffs verkrustet, wohingegen die Primärluft von unten zugeführt wurde und somit die Temperaturen unterhalb dieser Schicht höher gewesen sein müssen. Dies war auch an der Glut zu erkennen, die sich darunter befunden hat. Wenn diese Verbackungen also eine Folge zu hoher Temperaturen und der dadurch einsetzenden Ascheschmelze waren, so hätten diese Krusten eher im unteren Bereich des Bettes, als im oberen Bereich entstehen müssen. Dies bedeutet, dass die auf der Oberseite des Brennstoffs entstehenden Schollen keine Folge der Ascheschmelze sein können, sondern auf eine andere Art und Weise entstehen müssen. Dies wurde beim Betreiben der Anlage mit 1,5 m/s bestätigt, als das Verbrennungsverhalten trotz geringerer Primärlufteinstellung noch etwas schlechter wurde. Hier war eine größerer Schollenbildung zu erkennen und nach dem Abstellen der Anlage waren deutlich sichtbare Versottungen im Brennstoffeintragsbereich des Brenners zu erkennen. Dies führt uns zum Schluss, dass die entstehenden Pyrolysegase an der gekühlten Brennerwand und am Brennstoff kondensieren und so ein Verkleben des Materials bewirken. Dies wird untermauert von der Tatsache, dass sich speziell an der Rückwand, hinter der sich die Primärluftverteilungskammer befindet, eine sehr deutlich erkennbare Schicht gebildet hat. Dort wird durch die Zuluft die hintere Brennerwand von außen noch zusätzlich mit Frischluft gekühlt und somit können dort die ebenfalls im hinteren Bereich entstehenden Pyrolysegase kondensieren. Diese können sich auch am dort frisch eingetragenen Brennstoff, der ebenfalls noch eine niedrige Temperatur besitzt anlagern und schon im hintersten Bereich des Rostes ein Verkleben des Materials zur Folge haben.

Speziell beim Referenzversuch, konnte man ein relativ gutes Verbrennungsverhalten feststellen. Mit einer Primärlufteinstellung von 1,7 m/s war es möglich die Anlage ohne manuellen Eingriff und ohne Verstopfen zu betreiben. Jedoch entstanden hierbei trotzdem an der Oberfläche des Brennstoffbettes Verkrustungen wie sie im vorigen Absatz beschrieben wurden. Nicht abzuschätzen ist, ob bei längerem Betrieb größere Verschlackungen entstanden wären bzw. ob es nicht doch noch zur Brückenbildung beim Ascheaustrag gekommen wäre, da diese Form von Verkrustungen immer

eine Verstopfungsgefahr darstellen. Da schon kleinste Änderungen der Bedingungen im Brennraum eine Steigerung dieser Auswirkungen bedeuten können, wurde hier deutlich, dass die Anlage selbst mit diesen Bedingungen nicht risikofrei⁵ betrieben werden kann.

Die deutlich schlechtesten Auswirkungen hatte das Betreiben der Anlage mit 1,9 m/s Primärluftgeschwindigkeit. Hier konnte man massive Verschlackungen der beweglichen Roststäbe erkennen, wie sie in Abbildung 8.6 zu sehen sind, was auch an den anderen Tagen beobachtet werden konnte, wenn auch in einem geringeren Maße. Hierbei wurde die unten im Brennstoffbett angesammelte Asche einer zu hohen Temperatur ausgesetzt. Dies wiederum verursachte das Schmelzen des Rückstandes und so verklebten die beweglichen Rechen. Dieser Effekt verstärkte sich beim Steigern der zugeführten Primärluftmenge.

Außerdem war mit diesen Einstellungen auch eine Vergrößerung der auf den unbeweglichen Roststäben gebildeten Verkrustungen sichtbar. Vermutlich liegt es daran, dass das Material lokal zuerst im Bereich der unbeweglichen Roststäbe umgesetzt wird, da aus diesen die Primärluft strömt. Dort kann sich auch die erste entstehende Asche anlagern. Jedoch wird sie von den beweglichen Rechen nicht mitgenommen, da dieses Material sehr feinkörnig ist. So kommt es am unbeweglichen Rost, ausschließlich vom mittleren Bereich bis zum Ende des Rostes, zu Verschlackungen. Die Frage, warum dieses Phänomen nur an den mittleren Roststäben zu beobachten war, an den äußersten jedoch nicht, bleibt nach wie vor offen.

⁵bzgl. des Materialtransportes

9 Änderungen des bestehenden Feuerraumes und Anpassung der Luftführung

In diesem Kapitel soll darauf eingegangen werden, welche Änderungen der Luftführung und damit einhergehende konstruktive Anpassungen im Zuge der Versuche vorgenommen wurden. Der Grund für diese Anpassungen waren die im vorigen Kapitel genannten Schwierigkeiten, die mit der Verbrennung der Strohpellets einhergehen. Sie können in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Versotten des Brennraums im Bereich des Brennstoffeintrags,
- Verkleben der obersten Brennstoffschicht und dadurch verursachte Brückenbildung,
- Verkrustungen auf den mittleren unbeweglichen Roststäben sowie auf den beweglichen Rechen.

Diese auftretenden Probleme sollten durch eine Anpassung des Feuerraums bzw. der Luftführung behoben werden, wobei die grundsätzlichen Bedingungen des automatisierten Betriebs ohne manuellen Eingriff nach wie vor eingehalten werden müssen. Konstruktive Veränderungen konnten jedoch nur in einem gewissen Maße durchgeführt werden, da für wesentliche Änderungen auch sehr großer Umbauaufwand von Nöten gewesen wäre. Deshalb wurden im Zuge dieser Versuche hauptsächlich fertigungstechnisch einfache Veränderungen vorgenommen um eine experimentelle Grundlage für einen wesentlichen Umbau des Brenners zu schaffen.

Zunächst wurde in einer Versuchsreihe getestet, ob die vorher genannten Schwierigkeiten zu beseitigen sind, indem die Primärluft weiterhin ausschließlich von unten zugeführt wird. Dies erfolgte durch das Setzen zweier Bohrungen in die Primärluftmischkammer unterhalb der Höhe des Rostes. Dadurch konnte bei gleichen Einstellungen Primärluft sowohl von unten durch die Roststäbe, als auch durch die Rostlöcher strömen. Der erhoffte Erfolg blieb jedoch aus. Im Gegenteil wurden hier die vorher genannten Probleme noch schwerwiegender, was die nachfolgenden Abbildungen 9.1 und 9.2 belegen.



Abbildung 9.1: Rost und Brennkammer nach Veränderung der Luftführung von unten (1,7 m/s primär)



Abbildung 9.2: Brennkammerwände beim Brennstoffeintrag nach Änderung der Luftführung von unten (1,7 m/s primär)

Die Tendenz dieser vorangegangenen Experimente ergab die Entscheidungsgrundlage für die im folgenden Kapitel vorgenommenen Versuche.

9.1 Eliminierung der Versottung des Brennraumes im Bereich des Brennstoffeintrags

Dieser Abschnitt behandelt die Veränderungen der Luftführung um eine Beseitigung der Versottungen beim Brennstoffeintrag zu erreichen. Angenommen wurde, dass in diesem Bereich eine Kondensation der Brenngase stattfindet und dadurch die Pellets untereinander verkleben.

9.1.1 Ziel der Versuche

Ziel ist es, die nach dem Abstellen der Anlage zu erkennende Versottung des Brennstoffeintrags zu verhindern. Die Idee hinter den folgenden Versuchen war es, Luft oberhalb des Brennstoffbettes zuzuführen um durch vorzeitige Umsetzung der Brenngase mit Sauerstoff, eine Kondensation zu vermeiden. Vorzeitig bedeutet, dass die Gase teilweise vor Erreichen der Sekundärluftzufuhr umgesetzt werden sollen.

9.1.2 Versuchsdurchführung

Die Primärluftverteilkammer befindet sich an der Hinterseite des Brennersteils. Durch das Setzen von Bohrungen in die Rückwand des Brenners ist es möglich, Primärluft direkt aus dieser Mischkammer in den Brennraum strömen zu lassen.

Zunächst wurden zwei Löcher mit einem Durchmesser von 4,2 mm oberhalb des Rostes gebohrt. Nach einem Versuchstag wurden 2 weitere Bohrungen mit dem selben Durchmesser unter die bereits vorhandenen gesetzt. Deren Positionierung ist in nachfolgender Abbildung 9.3 zu sehen.



Abbildung 9.3: Positionierung der Primärluftlöcher über dem Brennstoffbett (vier Bohrungen mit 4,2 mm Durchmesser)

Die eingestellten Parameter, die zu Durchführung dieser Versuche verwendet wurden, entsprechen dem im vorigen Kapitel herausgefundenem Optimum, d.h. Stoker 3-8, Vorschub 2-6 und Primärluft 1,7 m/s.

9.1.3 Ergebnisse

Bei den zuerst durchgeführten Versuchen mit 2 Bohrungen, war im Flammenbild keine Veränderung zu erkennen. Es gab keine Brückenbildung und ein manuelles Eingreifen, um den Betrieb der Anlage zu gewährleisten, war nicht notwendig. Trotz geringer Veränderungen blieb der hintere Bereich des Brennraums sauberer und die Versottungen viel geringer als bei allen vorhergehenden Versuchen, wie man in Abbildung 9.4 sehen kann.



Abbildung 9.4: Situation in der Brennkammer nach Abstellen der Anlage mit vier 4,2 mm Bohrungen in der Rückwand

Dennoch konnte man kondensationsbedingte Ablagerungen erkennen, weshalb im nächsten Versuch zwei zusätzliche Bohrungen hinzugefügt wurden. Die Anbackungen auf den unbeweglichen Roststäben konnten auch so nicht beseitigt werden. Ebenso wie die Verkrustungen der beweglichen Rechen wieder aufgetreten sind, was in den Abbildungen 9.5 und 9.6 zu sehen ist.



Abbildung 9.5: Verkrustungen auf unbeweglichen Roststäben bei zwei 4,2 mm Bohrungen



Abbildung 9.6: Verkrustungen auf beweglichen Rechen bei zwei 4,2 mm Bohrungen

Am darauffolgenden Tag wurde der Brennerteil der Anlage ausgebaut, gereinigt und danach die beiden zusätzlichen Bohrungen gesetzt. Nach diesen Veränderungen wurde die Anlage wieder in Betrieb genommen und ebenfalls mit den vorher genannten Einstellungen betrieben.

Das Flammenbild änderte sich zunächst wieder nicht, da im hinteren Bereich noch immer zu wenig Sauerstoff vorhanden war, um ein Entfachen der Brenngase zu erreichen. Beim Öffnen der Glühzünderklappe im Betrieb konnte allerdings eine Flamme beobachtet werden. Dieser Betrieb

wurde bis zum Abschalten der Anlage beibehalten, d.h. es ist so eine konstante Flammenbildung im hinteren Bereich erreicht worden.

Man konnte erkennen, dass sich diese Flamme von hinten bis etwa zur Mitte der Brennkammer erstreckte. Sie war jedoch aufwärts gerichtet und ist nicht ins Brennstoffbett eingedrungen.

Das Brennstoffbett war über die gesamte Dauer des Versuchs sehr flach. Beim Brennstoffeintrag war kein Schüttkegel zu erkennen. Allerdings war der Rost im ersten Drittel mit unverbranntem Material bedeckt. Eine Krustenbildung war demnach bei diesem Versuch kaum zu erkennen und das Brennmaterial wurde sehr gut nach vorne gefördert.

Die Situation nach dem Abstellen der Anlage war dementsprechend besser als vorher. Es gab kaum noch Versottungen und auf den beweglichen Roststäben konnten ebenfalls keine Verkrustungen beobachtet werden, wie die Abbildungen 9.7 und 9.8 zeigen.



Abbildung 9.7: Brennkammer nach Betrieb der Anlage mit vier 4,2mm Bohrungen in der Rückwand



Abbildung 9.8: Rost nach Betrieb der Anlage mit vier 4,2mm Bohrungen in der Rückwand

Was durch die Primärluftlöcher an der Brennerrückwand nicht gelöst werden konnte, war die Situation an den unbeweglichen Roststäben. Hier beobachtete man zwar kleinere Verkrustungen, eine gänzliche Vermeidung erreichte man jedoch nicht. Zu beobachten waren lokale blasenförmige Krusten rund um einzelne Rostlöcher, eindeutig zu erkennen in Abbildung 9.9. Diese verschließen mit Dauer des Betriebs die Primärluftdüsen am Rost, sodass kaum Zuluft durch diese ins Bett eingetragen wird.



Abbildung 9.9: Lokale blasenförmige Verkrustungen rund um einzelne Rostlöcher

9.1.4 Interpretation und Kritik

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass durch den Austritt von Primärluft aus den Bohrungen in der Rückwand, die Menge an Primärluft, die durch die Rostlöcher strömt, vermindert wird. Das hat zur Folge, dass der Sauerstoff, der zur Umsetzung des Brennstoffs im Brennstoffbett verwendet wird, ebenfalls weniger wird. Jene Luft, die aus den Bohrungen der Rückwand strömt, trägt bei diesen Versuchen nur zur Lösung des Verrostungsproblems bei und ist sozusagen Spülluft, die nicht ins Brennstoffbett eindringt. Dies führt also nicht nur zu einer Beeinflussung der Situation über dem Brennstoffbett, sondern es entstehen auch direkt am Rost, zu den im vorigen Kapitel beschriebenen Versuchen, unterschiedliche Bedingungen.

Nach dem Bohren der ersten beiden Löcher war zu erkennen, dass die Versottungen im Brennstoffeintragsbereich wesentlich verringert worden sind. Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass jenes Gas, das sich in der Brennkammer befindet, besser abtransportiert wurde. Durch den vorwärtsgerichteten Luftstrom ist das Brenngas schneller in die Sekundärverbrennungszone transportiert worden. Darum war eine weit geringere Versottung zu erkennen.

Weiterhin problematisch waren allerdings die Verkrustungen der unbeweglichen Roststäbe. Diese haben sich auch durch das Bohren der beiden Primärluftlöcher in der Rückwand kaum verringert. Was daran liegt, dass die Luft die durch die Rostlöcher strömt nur zu einem geringen Teil durch die beiden Bohrungen vermindert wird und deshalb hier eine nur kaum verbesserte Situation zu beobachten war.

Eine weitere problematische Erscheinung sind die Verkrustungen auf den beweglichen Rechen. Diese stehen im direkten Zusammenhang mit dem zuvor erwähnten Problem. Das Material kann nur dann an den Roststäben verkleben, wenn im unteren Bereich des Brennstoffbettes, lokal ein Luft- bzw. Sauerstoffüberschuss auftritt. Dies hat zur Folge, dass die entstehende Asche aufschmilzt und dann sowohl an den Roststäben, als auch am „frischen“ Material klebt. Dadurch kommt es zum Stillstand der Förderung bzw. zu groben Verschlackungen im Brennraum. Großflächige Verküstun-

gen waren mit diesen Einstellungen zwar nicht zu beobachten, jedoch die Tendenz zum Verkleben der Roststäbe, was auch die Abbildung 9.6 zeigt.

Am folgenden Tag, nach dem Bohren zweier weiterer Löcher, waren weitere Auswirkungen zu erkennen. Es ergab sich eine Verbesserung der Situation am Rost, da jetzt keine Verkrustungen auf den beweglichen Roststäben zu erkennen waren. Auch konnte man kaum Versottungen des Brennstoffeintrags erkennen, was auf eine Besserung der Situation schließen lässt.

Demgegenüber stehen jedoch zwei wesentliche negative Entwicklungen. Einerseits wurde ersichtlich, dass sich die Rostlöcher lokal rund um die Bohrungen, blasenartig verschlossen. Dies bedeutet, dass bei den verklebten Düsen keine, oder kaum, Luft ausströmen kann, was wiederum bewirkt, dass durch die anderen Löcher mehr Luft als vorher austreten muss. So kommt es zu einer ständigen Umverteilung der Zuluft über den Rost und es ergeben sich lokale Maxima und Minima. Deswegen kann es zu weiteren Überhitzungen des Brennstoffs bzw. der Asche kommen.

Andererseits war zu beobachten, dass sich der Brennstoff während der Verbrennung im ersten Drittel des Rostes noch in der Trocknungsphase befunden hat und auch farblich von der Frischsubstanz nicht zu unterscheiden war¹. Die erwähnte Auswirkung ist auch eine Folge davon, dass die Primärluft, die zur Umsetzung des Brennstoffs verwendet wird², zu gering geworden ist. Diese Situation ist ebenfalls nicht zufriedenstellend, da hierdurch die Verbrennungszone des Brennstoffs am Rost sehr stark verkürzt wird. Das hat zur Folge, dass der Kohlenstoff im Brennstoff zeitlich nur stark begrenzt umgesetzt werden kann und so die Energieausbeute bzw. der Wirkungsgrad sehr schlecht wird.

9.2 Einbringen der Primärluft von oben ins Brennstoffbett

In diesem Kapitel soll erklärt werden, wie die Primärluft von oben erfolgreich in das Brennstoffbett eingebracht wurde. Mit der letzten Version der im folgenden beschriebenen Primärluftkonstruktion führte man danach auch die Emissionsmessungen durch. Zwischen der ersten im folgenden beschriebenen Version des Primärlufteintrags von oben und der Letztversion stand eine lange Entwicklungsphase. Dabei wurden zunächst zwei weitere Bohrungen in die Rückwand gesetzt und jeweils mit und ohne Düsen Versuche gefahren. Danach wurden die gewundenen Edelstahlrohre eingesetzt und darauffolgend versucht in mehreren kleinen Schritten die Primärluftlöcher am Rost zu schließen. Weiters wurden Versuche durchgeführt, Primärluft sowohl durch Bohrungen in der Rückwand unterhalb der Roststäbe, als auch durch Bohrungen zwischen Brennstoffeintrag und Rost in verschiedener Anzahl und Aufteilung zuzuführen, um nur einige der Tätigkeiten zu beschreiben die im Zuge der Entwicklung durchgeführt wurden. Hierbei wurde jeweils Schritt für Schritt vorgegangen. Stets wurde nur ein Parameter verändert, um die Auswirkungen der Änderung auf das Verbrennungsverhalten deutlich erkennen zu können. Schließlich gelangte man zur Letztversion der Primärluftzuführung, die im folgenden beschrieben wird. Der Einfachheit halber wurde jedoch nur der Ausgangspunkt und der erfolgreiche Endpunkt dieser Entwicklung genauer beschrieben.

¹das Material war also in diesen Bereich noch nicht verkohlt (keine schwarze Färbung)

²also jene die aus den Rostlöchern strömt

9.2.1 Ziel der Versuche

Durch das Einbringen der Primärluft von oben sollte vorerst das Brennstoffbett auch auf der Oberseite zum Glühen gebracht werden. Erreichen wollte man hiermit die Vermeidung der oberflächlich gebildeten schollenartigen Verkrustungen. Außerdem sollten dadurch die Anbackungen auf den Roststäben vermieden werden, um so die Situation direkt am Rost zu entlasten. Zuvor war die Vermeidung der Verbackungen an den Roststäben immer mit anderen Schwierigkeiten verbunden, sodass eine endgültige Lösung noch nicht gefunden werden konnte. Im nachfolgenden Abschnitt soll eine Möglichkeit beschrieben werden, wie sich auch diese Schwierigkeiten beheben lassen.

9.2.2 Versuchsdurchführung

Ausgangsposition der durchgeführten Versuche war die Situation, wie sie im vorigen Kapitel beschrieben wurde. Zunächst versuchte man die Primärluft mit kurzen gekrümmten Düsen ins Brennstoffbett einzubringen. Diese sind an der Hinterseite der Brennkammer angebracht worden. Dafür wurden 8 mm Edelstahlrohre verwendet und auf eine bestimmte Größe zugeschnitten. Danach erfolgte deren Krümmung und das Schneiden eines Gewindes in die Bohrungen an der hinteren Platte des Brenners und in die Rohre selbst. So erfolgte die Verbindung der Düsen mit der Rückwand, wobei die bestehenden Löcher die vorher einen Durchmesser von 4,2 mm hatten, auf 8 mm aufgebohrt wurden um deren Durchmesser an die Edelstahlrohre anzupassen. Diese Düsen sind in nachfolgender Abbildung 9.10 zu erkennen. Bei diesem Versuch wurde, im Vergleich zu den vorigen Versuchen, nur die eingetragene Primärluftmenge verändert. Anfangs wurde mit einer Primärlufteinstellung von 1,7 m/s gefahren. Nach etwa einer Stunde steigerte man den Wert langsam aber stetig auf 2,3 m/s.



Abbildung 9.10: Primärluftdüsen kurz und gekrümmt

Daraufhin wurden weitere Umbauten der Primärluftzuführung durchgeführt und letztendlich gewundene Düsen hergestellt und verwendet, wobei diese aus einem 10 mm Edelstahlrohr bestehen,

9.2. EINBRINGEN DER PRIMÄRLUFT VON OBEN INS BRENNSTOFFBETT

dass am Ende mit einer Schraube abgedichtet wurde. Darunter wurden, wie in Abbildung 9.11 zu sehen ist, 4 Bohrungen mit einem Durchmesser von 5 mm gesetzt. Die Düsen im eingebauten Zustand kann man in Abbildung 9.12 sehen. Natürlich war zum Einbau dieser Düsen auch eine Vergrößerung der obersten beiden Bohrungen an der Rückwand erforderlich und somit auch das Schneiden weiterer Gewinde.

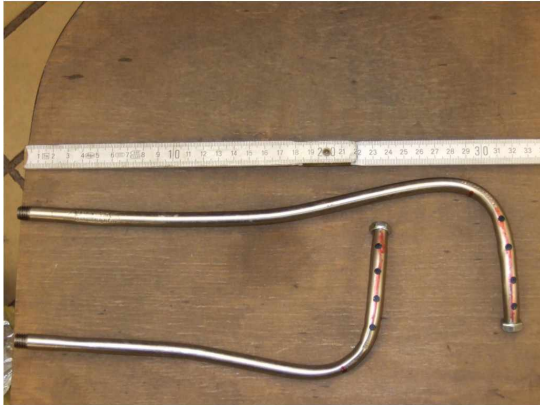


Abbildung 9.11: Primärluftdüsen gewunden



Abbildung 9.12: Eingebaute gewundene Primärluftdüsen und 35 mit Nägeln geschlossene Rostlöcher

In weiteren Schritten des Umbaus wurden alle Primärluftbohrungen auf den unbeweglichen Roststäben geschlossen. Dies erfolgte durch kleine Nägel, mit einem Durchmesser von 1,6 mm. Diese wurden gekürzt, etwas plattgedrückt und in die Rostlöcher mit 2 mm Durchmesser eingebracht. Die Folge daraus war, dass Primärluft ausschließlich von oben zugeführt wurde.

Außerdem wurde noch die Anordnung der Bohrungen an der Rückwand geändert, siehe Abbildung 9.13. Hier bedeuten die durchgestrichenen Kreise, dass diese Löcher geschlossen worden sind. Die neu gebohrten Löcher haben einen Durchmesser von 8 mm. Außerdem wurden 2 weitere 8 mm Düsen in die oberen Bohrungen eingesetzt, wie sie in Abbildung 9.14 zu sehen ist.

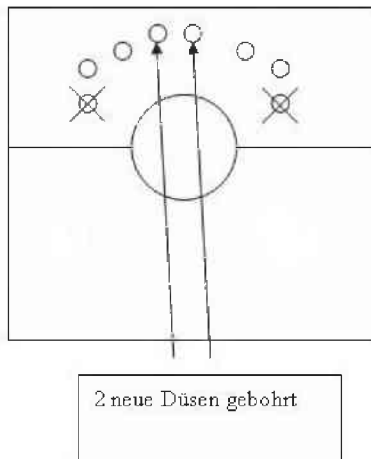


Abbildung 9.13: Schematische Anordnung der Bohrungen in der Rückwand



Abbildung 9.14: Neue Düsen über dem Brennstoffeintrag

Weiters wurde die Geschwindigkeit der zugeführten Luft auf 2,75 m/s erhöht um den für die Umsetzung notwendigen Sauerstoff auch von oben ins Brennstoffbett einbringen zu können.

9.2.3 Ergebnisse

Der Umbau auf die kurzen Düsen zeigte vorerst nur geringe Verbesserungen. Hier war zu erkennen, dass sich die Situation während der Verbrennung noch nicht wesentlich verbessert hatte. Außerdem war zu sehen, wie nachfolgende Abbildung 9.15 zeigt, dass es nach dem Abstellen der Anlage Anbackungen auf den unbeweglichen Roststäben gegeben hat. Vor allem auf der linken Seite ist hier Material verkrustet, dass nichtmehr abtransportiert werden kann. Außerdem hat sich Brennstoff rechts hinten verklebt. Die Rechen waren ebenfalls nicht vollkommen frei von Verkrustungen und die Verbackungen auf den mittleren drei Roststäben weiterhin vorhanden. Deshalb wurde nach einer aufwändigen Entwicklungsphase der Umbau auf die letzte Variante vollzogen.



Abbildung 9.15: Situation nach dem Abstellen der Anlage nach Einbau der kurzen Düsen

Mit der letzten Version der Primärluftführung wurde erreicht, dass alle bisher aufgetretenen Probleme des Verbrennungsverhaltens gelöst worden sind. Es gab keine Krusten mehr auf den beweglichen Rechen, sowie auf den unbeweglichen Roststäben nach dem Abstellen. In nachfolgender Abbildung 9.16 ist zu sehen, dass sich zwar beim Abfahren rechts an der Wand eine größere Verkrustung gebildet hat. Dies war jedoch eine einmalige Erscheinung. Man sieht sehr lockeres Material auf den Roststäben liegen, welches jedoch nicht verklebt war. Die Versottungen beim Brennstoffeintrag wurden hier ebenso gelöst, wie man in der nebenstehenden Abbildung 9.17 sehen kann.

Durch den Umbau der Primärluftzufuhr mit den gewundenen Düsen und durch die kleinen Düsen über dem Brennstoffbett war das Verbrennungsverhalten sehr gut. Ständig ist eine Flammenbildung an allen Primärluftdüsen zu erkennen. Es bilden sich kaum Verkrustungen oberhalb des Brennstoffbettes. Wenn dies doch der Fall ist, dann sind diese so klein, dass sie problemlos mit dem Ascheaustrag weggefördert werden können.



Abbildung 9.16: Situation auf den Roststäben bei der Letztversion der Primärluftführung - keine Versottungen, keine Verkrustungen auf den Roststäben



Abbildung 9.17: Situation im Brennstoffeintragsbereich bei der Letztversion der Primärluftführung - keine Versottungen, keine Verkrustungen auf den Roststäben

9.2.4 Interpretation und Kritik

Beim ersten Umbau mit den kleinen Düsen war keine Verbesserung der Krustenbildung an den unbeweglichen Roststäben sichtbar. Dies lässt den Schluss zu, dass der Grund für diese Verkrustungen die Primärluftzufuhr aus den Roststäben ist. Durch Zuführen der Luft von unten bildet sich direkt an den Roststäben lokal ein Sauerstoffüberschuss und der Brennstoff wird zuerst in diesem Bereich umgesetzt. Dies hat einerseits zur Folge, dass jenes Material, das sich an der Oberseite des Bettes befindet, kaum mit Luft versorgt wird. Andererseits sind die untenliegenden Pellets einem Sauerstoffüberschuss ausgesetzt und so kommt es zum Aufschmelzen der Asche und zum Verkleben sowohl auf den beweglichen als auch auf den unbeweglichen Roststäben.

Die Vermeidung dieser Verkrustungen ist erst mit dem Schließen aller Primärluftbohrungen am Rost gelungen und die dadurch bedingte gänzliche Umstellung der Luftzufuhr von unten nach oben. Der Grund für die Lösung dieses Problems ist jener, dass es durch den ausschließlichen Lufteintrag von oben nicht mehr zu einem Luftüberschuss am Rost selbst kommt. Wenn eine solche lokale Überhitzung zustandekommt, ist dies jetzt am ehesten an der Oberseite des Brennstoffs der Fall. Dies sollte allerdings kein Problem darstellen, da das Bett oben mit keinen anderen Bauteilen in Berührung kommt und so auch kein Verkleben bzw. Verstopfen der Anlage zustande kommen kann. So konnten sowohl die Anbackungen auf den unbeweglichen Roststäben, als auch jene auf den beweglichen Rechen beseitigt werden, was dazu führte, dass die Anlage über längere Zeit störungsfrei betrieben werden kann und somit die im nächsten Kapitel besprochenen Emissionsmessungen durchgeführt werden können.

Weiters ist zum Umbau auf die gewundenen Düsen zu sagen, dass es sich hier nur um eine Versuchskonstruktion handeln kann. Auch wenn die Umstellung der Primärluftzufuhr das Verbrennungsverhalten stark verbessert hat, gibt es bei dieser Konstruktion Nachteile. Einen von diesen kann man in Abbildung 9.16 erkennen. Dadurch, dass die erste gewundene Düse etwas zu weit nach rechts gestellt war und deshalb eine entstehende Flamme hier über lange Zeit die Brenner-

9.2. EINBRINGEN DER PRIMÄRLUFT VON OBEN INS BRENNSTOFFBETT

wand kontaktiert hat, ist es an der Wand zu einer lokalen Überhitzung gekommen. Dadurch konnte man beim Abfahren der Anlage genau an dieser Stelle verklebtes Material erkennen.

Außerdem wären diese Düsen für den Einsatz im Echtbetrieb nicht geeignet, weshalb noch an einer verkaufsfähigen Version einer ähnlichen Primärluftzufuhr gearbeitet werden muss.

10 Auswirkungen der Vorschub- bzw. Primärlufteinstellungen auf Emissionen, Ausbrand und Leistung

Nachdem die Gestaltung des Feuerraums, die in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde, abgeschlossen war, sollten die Emissionen gemessen werden. Genauer gesagt wollte man die umgebaute Anlage darauf prüfen, ob sie in dieser Ausführung einer Kesselprüfung nach DIN EN 303-5 gerecht wird. Deshalb wurde in allen nachfolgenden Versuchen darauf geachtet, die Prüfbedingungen dieser Norm so gut wie möglich einzuhalten.

10.1 Auswirkungen des Rostvorschubs auf Emissionen, Ausbrand und Leistung

Im folgenden Abschnitt wurde der Rostvorschub der Anlage verändert und die Emissionswerte von CO, O₂, NO_x und Gesamtstaub gemessen. Außerdem wurden Ascheproben aus der Aschelade genommen und dann im Labor deren Asche- und Wassergehalt bestimmt. Die Leistungsmessung erfolgte über einen Wärmezähler, der in der Kühlwasserstrecke der Anlage eingebaut war.

10.1.1 Ziel der Versuche

Mit diesen Messungen soll festgestellt werden, welche Auswirkungen eine Änderung des Rostvorschubs auf die Emissionen, den Ausbrand und die abgegebene Leistung des Kessels haben. Zu bestimmen ist, ob ein Rostvorschub, bei dem das Material öfter aber weniger weit bewegt wird, zu besseren Ergebnissen führt, oder ob eine umgekehrte Tendenz zu beobachten ist. Einfluss auf die Emissionswerte, den Ausbrand und die Leistung hat also nur die Häufigkeit der Rostbewegung innerhalb einer bestimmten Zeit.

10.1.2 Versuchsdurchführung

Hier ist jener Aufbau der Gasmessstrecke verwendet worden, der in Abschnitt 6.2.3 beschrieben wird. Während der Messungen wurde der Flammenionisationsdetektor zur Bestimmung der organischen Kohlenwasserstoffe defekt. Da schon in Vorversuchen Emissionen gemessen, aber nicht aufgezeichnet wurden, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Werte nach einer Anfahrphase von etwa einer Stunde in einem Bereich einpendeln, der weit unter dem Grenzwert liegt und

so diese Emissionen kein Problem darstellen dürften. Deshalb wird auf die Messung dieses Wertes verzichtet.

Bei keiner der Messungen wurde ein konstruktiver Umbau vorgenommen. Das bedeutet, dass genau jene Primärluftführung verwendet wurde, wie sie als Letztversion des vorigen Kapitels beschrieben wird. Der Brenner wurde vor jedem Versuch ausgebaut und gereinigt um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

In nachfolgender Tabelle 10.1 sind die Einstellungen dargestellt, die über die Dauer der Versuche geändert worden sind. Es wurde vorerst mit einem Vorschub von 1 - 7 begonnen, am nächsten Tag auf 2 - 14 und dann auf 4 - 28 gesteigert. Die anderen Einstellungen blieben über alle Versuchstage gleich.

Tabelle 10.1: Einstellungen bei den Emissionsmessungen mit verändertem Vorschub

Datum	Einstellungen
02.03.2009	Primär: 2,75 [m/s]
	Stoker: 3 - 8 [t_{ein} - t_{aus}]
	Vorschub: 1 - 7 [t_{ein} - t_{aus}]
03.03.2009	Primär: 2,75 [m/s]
	Stoker: 3 - 8 [t_{ein} - t_{aus}]
	Vorschub: 2 - 14 [t_{ein} - t_{aus}]
09.03.2009	Primär: 2,75 [m/s]
	Stoker: 3 - 8 [t_{ein} - t_{aus}]
	Vorschub: 4 - 28 [t_{ein} - t_{aus}]

10.1.2.1 Ablauf der kontinuierlichen Emissionsmessungen

Während des Betriebs wurden ständig die CO, O₂ und NO_x-Werte im Abgas gemessen. Diese sind mit dem Programm DASY-Lab auf einer graphischen Oberfläche auf dem Bildschirm des Messcomputers dargestellt und alle 10 Sekunden aufgezeichnet worden. Die Aufzeichnungsdauer war jedoch nicht identisch mit der Versuchsdauer, da eine Anfahrzeit lt. DIN EN 303-5 gestattet wird. Dies ist jene Zeit, die die Anlage braucht, um einen stabilen Betrieb zu erreichen. Bei unseren Versuchen wurde von einer Stunde Anfahrzeit ausgegangen, d.h. es sind nur die Aufzeichnungen der Emissionen nach der ersten Stunde Betriebszeit für die Berechnung der Emissionswerte herangezogen worden.

Ausgewertet hat man nur die CO- sowie die NO_x-Werte, da sie die am schwierigsten einzuhaltenden Grenzwerte bei Halmgutfeuerungen darstellen.

Die CO- Werte werden in [ppm] gemessen und aufgezeichnet. Bei Angabe des Messwerts in dieser Einheit spielt der Sauerstoffgehalt eine große Rolle. Je mehr Sauerstoff im Abgas enthalten ist, desto geringer wird der [ppm]-Wert. Deshalb sind auch die zugehörigen O₂-Gehalte mitgemessen worden und jeder Messwert auf den zugehörigen Sauerstoffwert bezogen. Die Angabe der Grenzwerte

te allerdings erfolgt in [mg/MJ], weshalb auch die gemessenen Daten in diese Einheit umgerechnet wurden. Die so angegebenen, einzuhaltenden Werte sind unabhängig vom Sauerstoffgehalt, da sie sich nur auf den Heizwert des trockenen Brennstoffs beziehen.

10.1.2.2 Ablauf der Gesamtstaubmessungen

Die Gesamtstaubmessung erfolgte mit dem Gerät, das in Abschnitt 6.2.3 beschrieben worden ist.

Als vorbereitende Maßnahme waren die metallischen Staubhülsen, mit in destilliertem Wasser getränkter Glaswolle, gestopft und bei 300 °C geglüht worden. Nachdem sie im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt waren, wurden sie unmittelbar vor deren Einsatz eingewogen. Vor dem Auswiegen der Staubhülsen, nach deren Gebrauch, hat man sie bei 110 °C getrocknet und wieder im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Danach sind die Hülsen ausgewogen worden.

Die Messung des Gesamtstaubes erfolgte nicht kontinuierlich über die gesamte Messzeit. Die erste Messung wurde nach etwa 2 h Aufzeichnungsdauer gestartet, die zweite nach 3 h und so weiter. Insgesamt hat man an jedem Versuchstag 4 Staubbmessungen durchgeführt und dabei jeweils 30 Minuten Abgas abgesaugt. Danach hat man die beladenen Staubhülsen in einem Glasgefäß verwahrt, bevor sie im Ofen geglüht wurden.

Das Absaugen des Abgases muss isokinetisch erfolgen, d.h. die Geschwindigkeit im Kamin muss gleich groß sein, wie jene in der Absaugsonde. Die Kamingeschwindigkeit muss entweder gemessen oder berechnet werden. In diesem Fall wurde sie einmal vorher gemessen und für alle Versuche als konstant angenommen. Danach muss die Absauggeschwindigkeit bzw. die Absaugmenge berechnet werden, um herauszufinden, welchen Absaugwert man am Rotameter des Messgeräts tatsächlich einstellen muss, um isokinetische Bedingungen zu erreichen. Diese Berechnung ist im Anhang C beigelegt.

Als Beispiel für die Berechnung eines solchen Wertes ist im Anhang D der Rechenweg angeführt. Diese Berechnung muss für jede der vier Staubbmessungen pro Tag angestellt werden.

10.1.2.3 Bestimmung des Ausbrands

Hierzu wurden, in regelmäßigen Abständen von einer Stunde, Proben aus der Aschelade genommen. Wenn das Material dort angekommen war, war es weitgehend abgekühlt, weswegen sich eine solche Probennahme als vorteilhaft herausgestellt hat. Die Asche wurde direkt bei der Austragschnecke entnommen, sodass der Verbrennungsrückstand in der Lade nicht eine unbestimmte Zeit lang nachreagieren konnte. So wurde gewährleistet, dass die Ergebnisse vergleichbar sind.

Danach wurde der Asche-, sowie der Wassergehalt des Rückstands im Brennstofftechniklabor bestimmt. So kann man auf den Ausbrand des Materials schließen.

10.1.2.4 Leistungsmessung

Die Messung der Leistung erfolgte über einen Wärmehähler, der in der Kühlwasserstrecke eingebaut war. Dieser zeigt ganze kWh an, die Anzeige hat also keine Kommastellen. Deshalb wurde beim Ablesen der Leistung immer gewartet, bis die Anzeige auf den neuen Wert umspringt, um dann die

exakte Zeit und die Leistung zu notieren. Deshalb erfolgte auch nicht immer die gleiche Anzahl an Messungen zur gleichen Zeit.

10.1.3 Ergebnisse

Das Verbrennungsverhalten hat sich während der verschiedenen Vorschubeinstellungen ein wenig verändert. Deutlich zu sehen war, dass das Brennstoffbett bei der Einstellung 4 - 28, nach Erreichen des stabilen Betriebs, höher war, als bei 1 - 7. Auch die Schwankungen der Betthöhe waren bei 4 - 28 größer als bei den anderen Versuchen. Ansonsten gab es kaum optische erkennbare Unterschiede im Verbrennungsverhalten.

In der nachfolgenden Abbildung 10.1 ist die Auswertung der NO_x - Emissionsmessung bei einer Vorschubeinstellung von 1-7 exemplarisch zu sehen. Hier befinden sich der zeitliche Nullpunkt bei einer Stunde der Betriebszeit. Die Messperiode beginnt erst nach einer Stunde Anfahren, weshalb die Ausgabe des ersten Messwerts bei 0 angesetzt wurde.

Die restlichen graphisch aufgearbeiteten NO_x - Messungen der folgenden Tage sind im Anhang E beigelegt. Die Mehrheit der Messwerte befindet sich zwischen 200 und 300 mg/MJ, weshalb die Mittelwerte jeweils unter dem Grenzwert von 300 mg/MJ liegen. Der Verlauf der NO_x -Konzentration ist außerdem sehr gleichmäßig und weist nur geringe Spitzenwerte über dem Grenzwert auf.

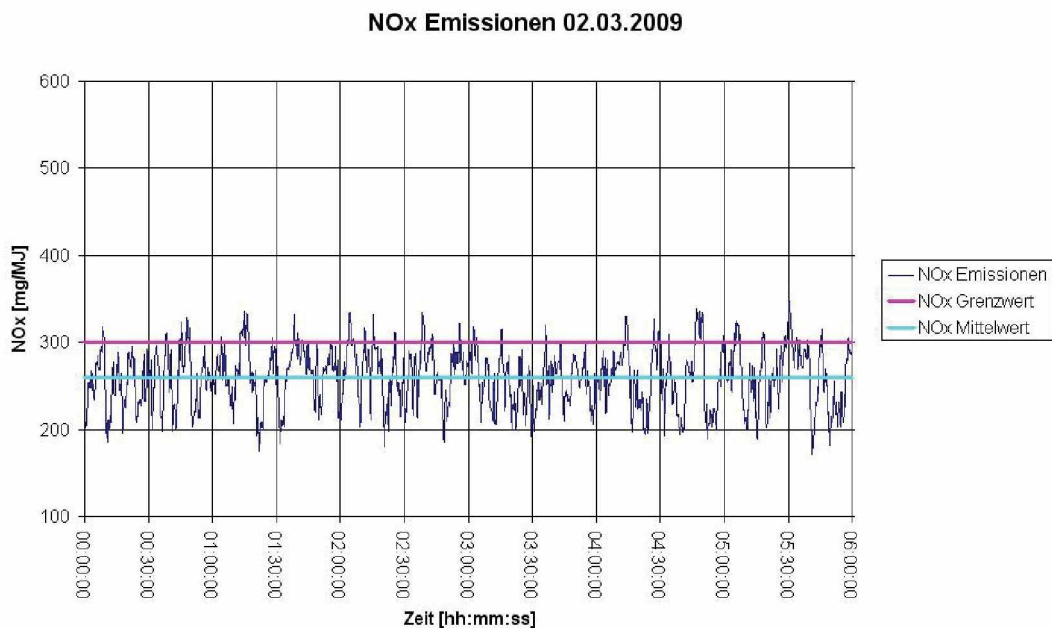


Abbildung 10.1: NO_x Emissionen bei Vorschub 1 - 7

Die Abbildung 10.2 zeigt die Auswertung der CO - Emissionen bei einem Vorschub von 1 - 7. Auch hier ist das Diagramm exemplarisch und die Diagramme der restlichen Tage im Anhang E zu finden. Der Kohlenmonoxid Ausstoß ist bei diesem Versuch sehr gering, mit äußerst wenigen und kleinen Peakwerten. Zu sehen ist auch, dass der Durchschnittswert sehr weit vom Grenzwert entfernt liegt.

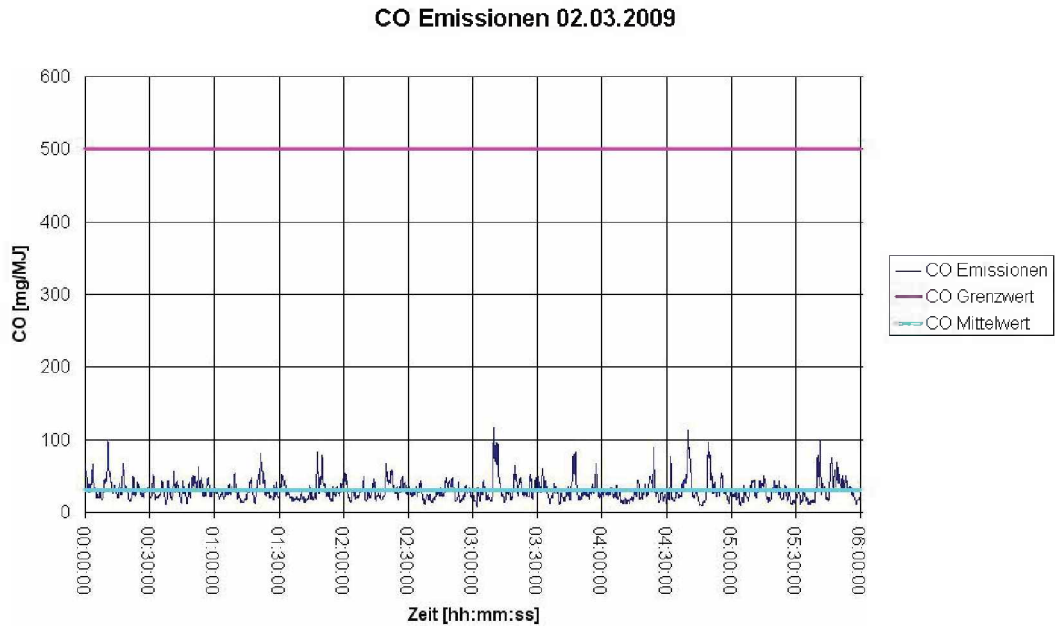


Abbildung 10.2: CO Emissionen bei Vorschub 1-7

In der folgenden Tabelle 10.2 ist die Sammlung aller Messergebnisse zu sehen. Diese sind bereits über die gesamte Messdauer von 6 Stunden gemittelt. Hier ist bei den kontinuierlich gemessenen Emissionswerten der Mittelwert sowohl in der Einheit der Messwerte, als auch in der des Grenzwertes angegeben. Letztere werden in mg/MJ vorgeschrieben und betragen für NO_x bei unserer Anlage 300 mg/MJ und für CO 500 mg/MJ. Der zu erreichende Wirkungsgrad errechnet sich durch eine Formel, die in Tabelle 5.4 zu finden ist. Dieser beträgt bei einer Brennstoffwärmeleistung von 19,15 kWh mindestens 75,18 % und der Gesamtstaubgrenzwert für Kleinf Feuerungen liegt bei 60 mg/MJ.

Tabelle 10.2: Ergebnisse aller gemessenen Größen bei Änderung des Vorschubs

Datum	CO	CO	NO_x		Gesamtstaub	mittlere Leistung	Wirkungsgrad	Brennbares im Rückstand	Stoker Einstellung	Primärluft	Vorschub Einstellung
	[ppm]	[mg/MJ]	[mg NO/m^3 Abgas]	[mg NO_2/MJ]							
02.03.2009	44	30	308	259	96	11,32	59,03	73,60	3-8	2,75	1-7
03.03.2009	114	77	296	248	97	10,94	57,07	71,49	3-8	2,75	2-14
09.03.2009	61	41	314	259	91	11,29	58,89	70,7	3-8	2,75	4-28

10.1.4 Interpretation und Kritik

Bei Änderung des Vorschubs war zu erkennen, dass ausschließlich bei der Messung des Aschegehalts bzw. des brennbaren Materials im Rückstand eine Tendenz zu sehen ist. Hier wurde der Ausbrand mit steigendem Rostvorschub besser, d.h. es waren bei 4-28 weniger brennbare Bestandteile in der Asche enthalten als bei 1-7. Während des Betriebs konnte man mit steigender Vorschubeinstellung eine Vergrößerung der Betthöhe beobachten. Das Brennstoffbett hat bei häufigerer Bewegung auch

öfter die Möglichkeit sich nach seiner höchsten Packungsdichte auszurichten und so ist die Bett-
höhe bei einer Einstellung von 1-7 etwas geringer als bei 4-28. Der bessere Ausbrand bei 4-28
kann dadurch erklärt werden, dass die entstehende Glut durch die weniger häufige Bewegung auch
weniger gestört wird und sich daraus eine bessere Umsetzung des Brennstoffs ergibt.

Die CO- Werte sind sehr unterschiedlich. Wenn man die Diagramme der Messwerte im Anhang
E betrachtet, so erkennt man, dass am ersten Versuchstag über die gesamte Versuchsdauer keine
größeren Emissionspeaks vorhanden sind. Wenn man die Ergebnisse der folgenden Versuche be-
trachtet, so lassen sich jedoch einige, zum Teil auch sehr hohe, Spitzenwerte erkennen. Dies könnte
an starken Schwankungen des Unterdrucks im Kessel liegen, die am Display der Kesselsteuerung
abzulesen waren, allerdings nicht aufgezeichnet werden konnten. Grundsätzlich sollte der Unter-
druckwert etwa 70 Pa betragen. Dieser wurde vornehmlich durch den Saugzugventilator eingestellt,
der sich am Übergang zwischen Kessel und Kamin befindet. Man konnte allerdings Schwankun-
gen zwischen 85 und 55 Pa ablesen. Da die zugeführte Sekundärluftmenge über den Unterdruck
gesteuert wird, ergeben sich bei hier ebenfalls große Unterschiede. Bei einem plötzlich hohen Un-
terdruckwert wird mehr Sekundärluft zugeführt. Dadurch sinken die CO- Werte, weil im Kessel ein
höherer Sauerstoffgehalt herrscht und mehr Kohlenmonoxid zu CO₂ umgewandelt werden kann. Je-
doch gelangt bei plötzlichem Sinken des Unterdrucks nur sehr wenig O₂ in den Kessel und so wird
zu wenig Sauerstoff zur CO- Umsetzung bereitgestellt. Dies resultiert in kurzfristig hohen Kohlen-
monoxidwerten, da die Steuerung der Anlage eine gewisse Zeit benötigt, sich auf die veränderten
Sauerstoffverhältnisse im Kessel einzustellen.

Das ist der Grund dafür, dass die CO- Emissionswerte differenziert betrachtet werden müssen. Ei-
nerseits sind die Unterschiede auf die veränderlichen Druckbedingungen im Kessel zurückzuführen,
andererseits kann aber auch das Verbrennungsverhalten Einfluss haben. Wenn sich beispielsweise
beim Brennstoffeintrag frisches Material akkumuliert und dann schubweise nachrutscht, kann auch
das zu Kohlenmonoxid Emissionsspitzen führen. Die Ursachen für höhere CO- Werte können ma-
nigfaltig sein und lassen sich deshalb nicht auf einen einzigen Einflussfaktor reduzieren. Fakt ist
allerdings, dass die Kohlenmonoxid Emissionswerte trotz der teilweise hohen Peaks weit unter dem
Grenzwert liegen.

Die NO_x- Werte bewegen sich in einem relativ definierten Bereich. Hierzu ist zu sagen, dass
sie zwar aufgrund des, verglichen mit Holz, höheren Brennstoffstickstoffgehalts auch näher am
Grenzwert liegen, dieser jedoch im Durchschnitt in keinem der Versuche überschritten worden ist.
Somit können die Stickoxid Werte als zufriedenstellend angesehen werden. Wie zu erwarten war,
hatte die Änderung des Vorschubs keinen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf dieser Emissionen.

Der einzige Schadstoff, der den vorgesehenen einzuhaltenden Wert übersteigt, ist der Gesamt-
staub. Hier wird in etwa das eineinhalbfache des Grenzwerts gemessen. Die Gesamtstaubemissionen
sind meist von der Häufigkeit und Intensität der Bewegung des Brennstoffs am Rost abhängig. Da
wenig Bewegung des Materials aber auch oberflächliche Versinterungen der Strohpellets auslöst,
kann den Staubemissionen feuerungstechnisch kaum entgegengewirkt werden. Die Eindämmung
dieser Emissionen sollte allerdings kein größeres Problem darstellen. Schon jetzt gibt es Abscheider
für Kleinfeuerungen, um Staub wirkungsvoll aus dem Abgas zu entfernen.

Der Ausbrand des Brennstoffs liegt in einem Bereich, der noch großes Verbesserungspotential besitzt. Selbst bei einer etwas längeren Verweilzeit des Brennstoffs am Rost, wie man es bei der Einstellung 4-28 erkennen konnte, betragen die Werte über 70 %. Das bedeutet, dass 70 % des Rückstandes, der in die Aschlade ausgetragen wird, aus brennbarem Material besteht.

So lassen sich auch die niedrigen Wirkungsgrade von knapp unter 60 % erklären. Da sehr viel brennbare Substanz ausgetragen wird, kann dessen Energie auch nicht im Kessel umgesetzt werden. Auf diesem Weg gehen etwa 25 % des Brennstoffs verloren, was eine Wirkungsgradverringern um den selben Prozentsatz bedeutet. Dies stellt zu diesem Zeitpunkt die größte noch zu bewältigende Herausforderung dar.

Abschließend kann man sagen, dass die Häufigkeit der Bewegungen des Rosts keinen wesentlichen Einfluss auf die Emissionen bzw. die Leistung hat. Nur beim Ausbrand ist eine Verbesserung bei geringerer Bewegungshäufigkeit zu erkennen. Das ist dadurch zu erklären, dass die Glut hierbei weniger gestört wird und so der Brennstoff besser ausbrennen kann.

10.2 Auswirkungen der Primärlufteinstellungen auf Emissionen, Ausbrand und Leistung

Dieser Abschnitt behandelt die Änderungen der Primärlufteinstellungen und deren Einfluss auf die zu ermittelnden Messwerte. Dies war ebenfalls Teil der Untersuchungen des Emissionsverhaltens der Kleinf Feuerungsanlage für Stroh pellets. Auch hier gelten die Bedingungen, die bereits im vorigen Abschnitt besprochen wurden. Der Brenner wurde vor jedem Versuch ausgebaut und gereinigt. Bei diesen Versuchen diente der erste Versuchstag vom 02.03.2009 als Basis. Die weiteren Versuche wurden ebenfalls mit einem Vorschub von 1-7 durchgeführt, da diese Einstellung aufgrund des optischen Verbrennungsverhaltens und der Emissionswerte am stabilsten erscheint.

10.2.1 Ziel der Versuche

Mit diesen Versuchen sollte festgestellt werden, welche Auswirkungen eine Änderung der zugeführten Primärluftmenge auf Emissionen, Ausbrand und Leistung hat. Generell gilt es die Frage zu klären, ob eine höhere Primärluftzufuhr den Ausbrand verbessern kann. Außerdem soll ermittelt werden, ob der Betrieb der Anlage mit weniger Primärluft sowohl das Verbrennungsverhalten als auch die Emissionswerte generell verbessert, oder ob es hier eine gegenläufige Tendenz gibt.

10.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung unterscheidet sich von jener, die in Abschnitt 10.1.2 bereits erklärt wurde, nur dadurch, dass die Vorschubeinstellung von 1-7 beibehalten und die Primärluftgeschwindigkeit sowohl auf 2,85 m/s erhöht, als auch auf 2,65 m/s erniedrigt wurde. Den Wert dazwischen hat man schon am ersten Versuchstag (02.03.2009) der vorigen Messreihe gemessen, weshalb diese Messung nicht wiederholt wird, sondern die Daten von vorher verwendet werden. In Tabelle 10.3 sieht man die wesentlichen Einstellungen der Versuche auf einen Blick.

Tabelle 10.3: Einstellungen bei den Emissionsmessungen mit verschiedenen Primärluftmengen

Datum	Einstellungen
12.03.2009	Primär: 2,65 [m/s]
	Stoker: 3 - 8 [t _{ein} - t _{aus}]
	Vorschub: 1 - 7 [t _{ein} - t _{aus}]
02.03.2009	Primär: 2,75 [m/s]
	Stoker: 3 - 8 [t _{ein} - t _{aus}]
	Vorschub: 1 - 7 [t _{ein} - t _{aus}]
10.03.2009	Primär: 2,85 [m/s]
	Stoker: 3 - 8 [t _{ein} - t _{aus}]
	Vorschub: 1 - 7 [t _{ein} - t _{aus}]

10.2.3 Ergebnisse

Hier muss man ebenfalls festhalten, dass die Betthöhe bei größerer Primärluftzufuhr mit Fortdauer des Betriebs immer höher wurde. Zwar gab es keine Verkrustungen, allerdings reichte das Brennstoffbett auf den ersten ca. 10 cm beim Brennstoffeintrag, bis zur Decke des Brenners.

Nachfolgende Abbildung 10.3 zeigt exemplarisch den NO_x-Ausstoß bei einer Primärluftgeschwindigkeit von 2,75 m/s. Der Mittelwert überschreitet hier wiederum nicht den Grenzwert von 300 mg/MJ.

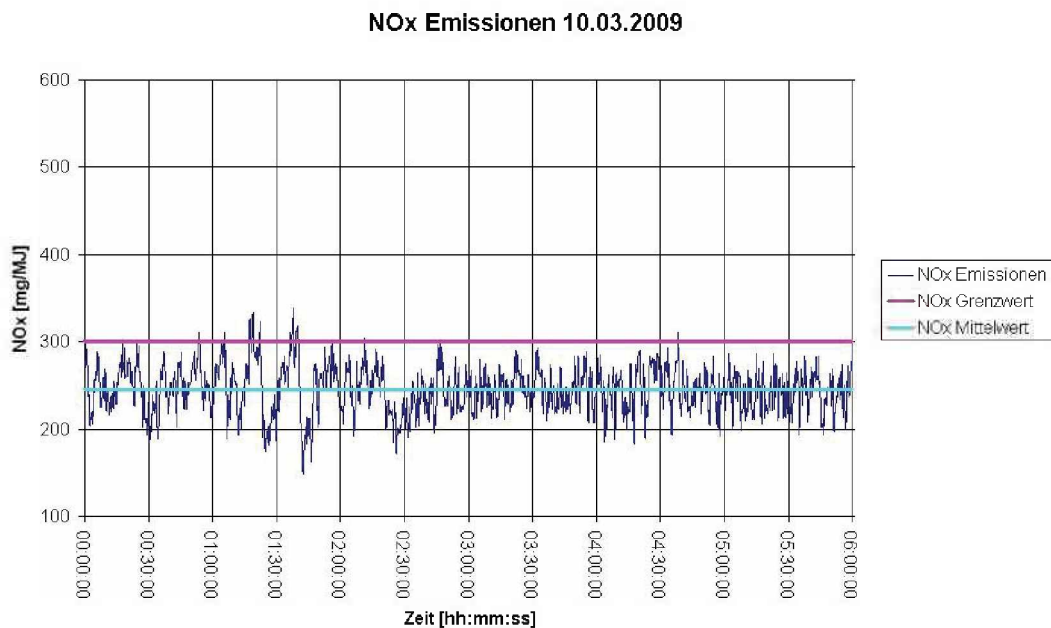


Abbildung 10.3: NO_x-Emissionen bei Primärluft 2,85 m/s

Bei Betrachtung des in Abbildung 10.4 dargestellten Diagramms ist zu erkennen, dass sich beim Betrieb mit einer Zuluftmenge von 2,85 m/s vor allem in den letzten 2 h der Messdauer die Kohlenmonoxidemissionen erhöht haben. Es sind hier sowohl höhere Peakwerte zu sehen als beim Betrieb

mit 2,75 m/s Primärluft. Noch dazu ist zu dieser Zeit auch das Emissionsniveau gestiegen.

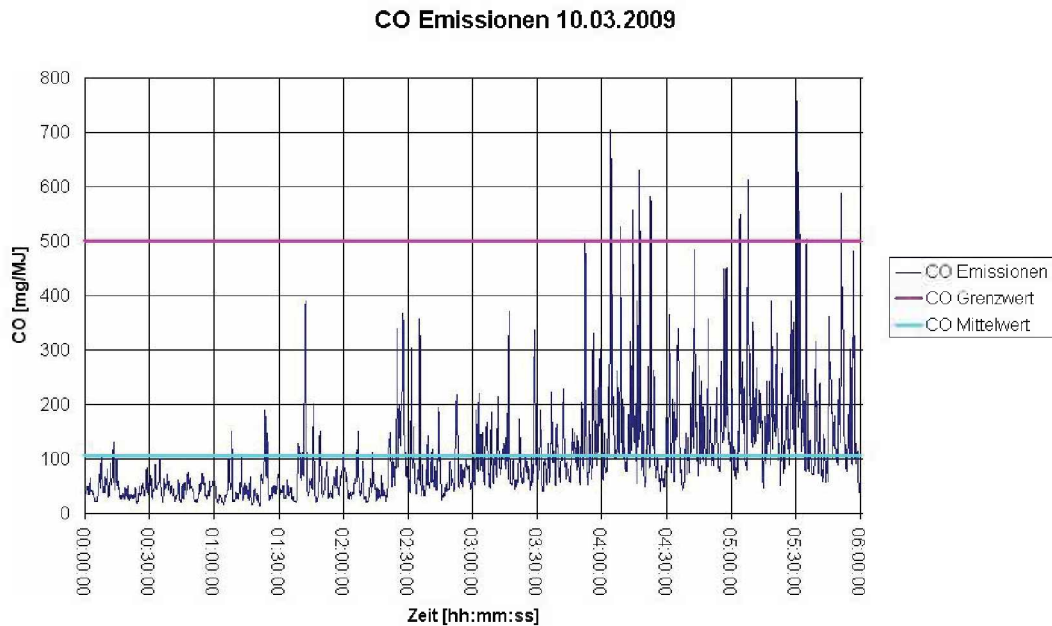


Abbildung 10.4: CO- Emissionen bei Primärluft 2,85 m/s

Wie schon im vorigen Kapitel werden die beiden vorhergehenden Diagramme exemplarisch für die Messungen dargestellt. Im Anhang E sind die der jeweils anderen Messungen zu finden.

Tabelle 10.4 zeigt eine Sammlung aller Messergebnisse, die genauso ermittelt wurden, wie die Ergebnisse im Abschnitt 10.1.3. Es gelten hier die gleichen Grenzwerte für Emissionen bzw. Wirkungsgrad.

Tabelle 10.4: Ergebnisse aller gemessenen Größen bei Änderung der Primärluft

Datum	CO	CO	NO _x	NO _x	Gesamtstaub	mittlere Leistung	Wirkungsgrad	Brennbares im Rückstand	Stoker Einstellung	Vorschub Einstellung	Primärluft
	[ppm]	[mg/MJ]	[mg NO/m ³ Abgas]	[mg NO ₂ /MJ]	[mg/MJ]	[kW]	[%]	[%]	[s]	[s]	[m/s]
12.03.2009	189	133	280	242	108	10,47	54,64	75,00	3-8	1-7	2,65
02.03.2009	44	30	308	259	96	11,32	59,03	73,60	3-8	1-7	2,75
10.03.2009	154	106	290	245	105	11,19	58,38	73,16	3-8	1-7	2,85

10.2.4 Interpretation und Kritik

Bei Betrachtung der gesammelten Ergebnisse ist wieder nur bei der Bestimmung des brennbaren Materials im Rückstand eine Verbesserung zu erkennen. Diese ist allerdings sehr gering. Der Grund dafür liegt darin, dass bei Erhöhung des Primärluftanteils auch mehr Sauerstoff am Bett vorhanden ist und somit ein besserer Ausbrand erreicht werden konnte. Man sieht auch, dass ein optimaler Ausbrand, bei dieser konstruktiven Lösung, nicht alleine über die Steigerung der Primärluft erreicht werden kann. Der Schlüssel zu einer wesentlichen Verbesserung liegt in einer besseren Verteilung. Die Zuluft muss also feiner über das gesamte Brennstoffbett aufgeteilt und nicht nur in bestimmten

Zonen zugeführt werden, wie es hier der Fall war. Dafür sind allerdings auch größere Umbauarbeiten notwendig.

Die NO_x -Emissionen der Kleinf Feuerungsanlage für Weizenstrohpellets sind, wie schon in den vorigen Versuchen, unter dem Grenzwert geblieben. Sie sind zwar nahe am einzuhaltenden Wert, weisen jedoch kaum Peaks auf, die über die zulässige Grenze hinweggehen. Generell war das Emissionsniveau dieses Schadstoffs sehr gleichmäßig und wäre so bei einer Kesselprüfung zu akzeptieren. Das Ausstoßverhalten ist bei allen Versuchen ähnlich, egal ob mit mehr oder weniger Primärluftzufuhr gefahren wurde.

Die CO-Emissionen weisen allerdings sehr große Unterschiede auf. Generell ist zu erkennen, dass sich eine geringere Primärluftzufuhr von 2,65 m/s offenbar ebenfalls schlecht auf den Kohlenmonoxidausstoß auswirkt. Man erkennt auf den Diagrammen ein sehr unruhiges Emissionsverhalten mit sehr großen Schwankungen über die gesamte Messdauer hinweg. Hier könnte jedoch auch noch Falschlufteintrag eine Rolle spielen. Da vor jedem Versuch der Rost ausgebaut und gereinigt wurde, kann es sein, dass die Dichtung zwischen Brennrost und Brennkammer aufgrund der hohen Beanspruchung eine Leckage aufweist. Zwar wurde versucht die Muttern so fest wie möglich anzuziehen, jedoch kann ein Falschlufteintrag hier nicht ausgeschlossen werden. Dies würde ebenfalls ein ungleichmäßigeres Emissionsniveau mit höheren Kohlenmonoxidwerten erklären. Die eingetragene Falschlufteinträge kann nicht mit dem Brennstoff reagieren, da sie an der falschen Stelle eingetragen wird. Dadurch kommt es zu keiner Reaktion mit dem Brennstoff und den heizwertreichen Gasen, da keine ausreichende Vermischung erreicht wird. Deshalb erhöht die so eingetragene Luft nur den Sauerstoffgehalt des Abgases, was sich wiederum auf die Stellung der Sekundärluftklappe niederschlägt. Die Lambdasonde detektiert einen zu hohen Sauerstoffwert und die Klappe schließt etwas mehr. Dadurch strömt weniger Sekundärluft in den Kessel ein. Das gebildete Kohlenmonoxid würde jedoch einen höheren O_2 -Gehalt zur optimalen Umsetzung zu CO_2 benötigen und deshalb wird das CO-Emissionsniveau höher. Die Druckschwankungen im Kessel verstärken diesen Ablauf zusätzlich.

Ein anderer Effekt war bei der Erhöhung der Zuluft auf 2,85 m/s zu bemerken. Hier wird das Ausstoßniveau von Kohlenmonoxid in den letzten 2 h der Messzeit höher und es war auch ein erhöhtes Brennstoffbett zu erkennen. Auf den ersten 10 cm des Rosts, beim Brennstoffeintragsbereich, war der Brennkanal bis oben mit Material gefüllt. Grund für den Anstau war, dass die Pellets bei fortgeschrittenem Ausbrand an Stabilität bzw. Festigkeit verlieren und so feinkörniger werden. Das feinere, besser ausgebrannte Material wird aufgrund des Rostdesigns langsamer transportiert als die grobkörnigeren, unverbrannten Pellets. Deshalb kommt es über die Rostlänge zu einer langsameren Transportgeschwindigkeit und so entsteht ein höheres Brennstoffbett beim Brennstoffeintrag, weil sich das Material nach hinten anstaut.

Die ersten beiden Primärluftdüsen¹ tauchten ins Bett ein. Durch das Aufstauen des Brennmaterials wird es im hinteren Bereich der Anlage kühler. So wird der Sauerstoff, der über diese Düsen eingetragen wird, aufgrund der niedrigen Temperatur, nicht zur Umsetzung des Brennstoffs verwendet. Außerdem rutscht dadurch viel frisches Material unregelmäßig in die Verbrennungszonen

¹die beiden über dem Brennstoffeintrag

nach, weshalb plötzlich sehr viel CO frei wird und die Sekundärluftklappe regelt erst zeitversetzt nach. So entstehen große Emissionsspitzen, was auch zu einem höheren Emissionsniveau führen kann.

Zu Erwarten wäre dadurch auch eine Verringerung des Ausbrands, da durch das Anstauen des Frischmaterials die effektive Rostlänge kürzer ist. Wenn man das Ergebnis des brennbaren Anteils im Rückstand bei 2,85 m/s betrachtet, ist es aber besser als mit 2,75 m/s. Außerdem kann man sehen, dass der Ausbrand zwischen 2,75 m/s und 2,65 m/s um mehr als 2 % abfällt. Bei Erhöhung der Zuluft um 0,1 m/s auf 2,85 m/s verbesserte sich der Ausbrand nur um geringe 0,44 %. Dies kann man dadurch erklären, dass die Proben für die Bestimmung des Ausbrands einmal pro Stunde genommen wurden und so über den gesamten Messzeitraum verteilt waren. Dadurch dass der Effekt, wie er im vorigen Absatz beschrieben wurde aber erst gegen Ende des Messzeitraums aufgetreten ist, war der Ausbrand insgesamt trotzdem etwas besser, allerdings um einen geringeren Prozentsatz als bei der Primärlufteinstellung von 2,65 m/s.

Beim Abstellen der Anlage waren allerdings keine Verkrustungen zu erkennen, die die Anlage nicht wegfördern konnte.

11 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Verbrennung von Weizenstrohpellets in einer Kleinf Feuerungsanlage gestaltet sich nicht immer ganz einfach. Hauptsächlich dafür verantwortlich ist der niedrige Ascheschmelzpunkt des Brennstoffs. Dies ist auch der Hauptgrund dafür, dass dessen Verwertung in Kleinf Feuerungen aus technischen Gesichtspunkten kritischer zu betrachten ist, als Holz.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verbrennungsverhalten von Weizenstrohpellets in einer automatisch beschickten Kleinf Feuerungsanlage untersucht. Hauptsächlich Augenmerk wurde hierbei auf dessen Verbesserung in einer bereits für Weizenstrohpellets umgebauten Anlage gelegt. Um dies zu erreichen gab es einige Parameter, die verändert werden konnten. Eine wesentliche Rolle spielten hier die eingetragene Brennstoffmenge, der Rostvorschub sowie die Menge der zugeführten Primärluft. Auch die Richtung der Zufuhr sollte eine gewichtige Rolle bei der Optimierung des Verbrennungsverhaltens spielen. Um die Auswirkungen der jeweils getätigten Veränderungen nachvollziehbar zu machen, wurde es vermieden Parameter während des Betriebs zu ändern. Weiters wurden sowohl Emissions-, als auch Leistungsmessungen durchgeführt um die Abweichungen von den bestehenden normativen Vorgaben feststellen zu können. Kontinuierlich wurden dabei CO, NO_x und O₂- Emissionen gemessen. Die Gesamtstaubmessung erfolgte diskontinuierlich. Außerdem wurde die Leistung über einen Wärmezähler im Kühlwasser gemessen.

Vorwiegend gab es folgende drei Probleme zu lösen:

- die Versottung des Brennraums beim Brennstoffeintrag
- Verkleben der obersten Schicht des Brennstoffbetts
- und Verkrustungen auf beweglichen und unbeweglichen Roststäben.

Allein durch die Veränderung der Parameter Brennstoffeintrag, Vorschubgeschwindigkeit und zugeführte Primärluftmenge waren diese Probleme nicht zu lösen. Die vorher genannten Schwierigkeiten traten in kleineren und größeren Erscheinungsformen immer wieder auf. So konnte kein Betrieb über längere Zeit gewährleistet werden, ohne dass manuell in die Verbrennung eingegriffen werden musste. Vor allem das Verkleben der obersten Brennstoffschicht führte zur Brückenbildung beim Ascheaustrag, weshalb hier wesentliche Maßnahmen notwendig wurden.

Diese Maßnahmen bezogen sich auf den Umbau der Primärluftführung. Zahlreiche Versuche mit unterschiedlichen Zuführungsrichtungen (ausschließlich von unten, oben und unten kombiniert, ausschließlich von oben), unterschiedlichen Primärluftmengen (ca. 2 - 4 l/s) und unterschiedlichen Verteilungen der Luftzufuhr am Brennstoffbett wurden durchgeführt. Schließlich kristallisierte sich die Zufuhr der Primärluft ausschließlich von oben als jene, mit der die vorher beschriebenen Probleme

gelöst werden konnten. Durch die Luftzufuhr von oben ergeben sich im Bezug auf das Verbrennungsverhalten sehr viele Vorteile. Einerseits wird das entstehende Pyrolyseöl schon unmittelbar nach seinem Entstehen umgesetzt und die Temperatur im Brennstoffeintragsbereich erhöht. Dadurch können die Pyrolyseprodukte nicht an den Feuerraumwänden und am kalten eingebrachten Brennstoff kondensieren. Außerdem ergibt sich durch die veränderte Primärluftzufuhr eine günstigere Situation für eine eventuell eintretende Ascheschmelze. Dadurch, dass diese nun tendenziell eher an der obengelegenen Brennstoffschicht einsetzt, konnten so Verschlackungen der beweglichen und unbeweglichen Roststäbe vermieden werden.

Um die Abweichungen von den normativen Vorgaben zu überprüfen wurden Emissions- und Leistungsmessungen mit der umgebauten Anlage durchgeführt. Hierbei wurde deutlich, dass die Kohlenmonoxidgrenzwerte sehr deutlich unterschritten werden konnten.

Die gemessenen NO_x -Werte lagen näher am Grenzwert. Dies ist jedoch nicht ungewöhnlich, da der Stickstoffgehalt im Brennstoff bei Weizenstroh wesentlich höher liegt, als bei Holzbrennstoffen und sich diese normativen Vorgaben hauptsächlich an der Holzverbrennung orientieren.

Übereinstimmend mit den Literaturquellen ergaben sich für die Verbrennung von Weizenstrohpellets überhöhte Gesamtstaubmesswerte. Diese lagen ca. 50 % über den für eine erfolgreiche Kesselprüfung nach DIN EN 303-5 erforderlichen Grenzwerten.

Als zu niedrig wird auch die erbrachte Kesselleistung festgestellt. Diese konnte 60 % in keiner der getätigten Messungen übersteigen, wobei ein Wert von 75,18 % gefordert wird. Die Hauptursache dafür lässt sich im mangelhaften Ausbrand festmachen. Durch Aschegehaltsbestimmungen des ausgetragenen Rückstands wurde festgestellt, dass dieser noch zu etwa 75 % aus brennbaren Bestandteilen besteht. Damit lässt sich der noch zu niedrige Wirkungsgrad erklären.

Hieraus wird deutlich, dass trotz sehr guter Erfolge bei der Verbesserung des Verbrennungsverhaltens, noch weiterer Forschungsbedarf gegeben ist. Zur Senkung der Gesamtstaubemissionen können Sekundärmaßnahmen getroffen werden. Schon heute werden am Markt verschiedene Lösungen zu Minderung von Staubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen angeboten. Hier gilt es noch die am besten geeignete Möglichkeit herauszufinden. Vor allem muß aber der Wirkungsgrad in weiterer Folge noch angehoben werden. Eine Möglichkeit der Erhöhung des Wirkungsgrades ist die bessere Verteilung der Primärluft über das Brennstoffbett. Durch die derzeitig linienförmige Zufuhr der Primärluft gibt es hier verhältnismäßig wenige Zonen, in denen Luft zugeführt wird. Eine größere Fläche, auf der dieser Lufteintrag passiert, sollte ergeben, dass das Brennmaterial längere Zeit mit Sauerstoff kontaktiert wird und so ein höherer Ausbrand erzielt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Mann, S.: Nachwachsende Rohstoffe. Stuttgart: Ulmer Eugen, 1998. -ISBN: 3-800-14126-4
- [2] Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe: Daten und Fakten zu nachwachsenden Rohstoffen. Online im Internet: <http://www.nachwachsende-rohstoffe.de> (letzter Zugriff am 3. Juni 2009)
- [3] Hartmann, H.: Die Nutzung von Stroh und strohähnlichen Brennstoffen in Kleinanlagen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. Gülzow: FNR, 2001. Online im Internet: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_33gfg17stroh.pdf (letzter Zugriff am 3. Juni 2009)
- [4] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin: Springer, 2001. -ISBN: 3-540-64853-4
- [5] Hartmann, H. (Hrsg.); Thuncke, K.; Höldrich, A.: Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. 2. vollständig überarbeitete Aufl.; Bentwisch: tangram documents, 2007. -ISBN 3-00-011041-0
- [6] Bayrisches Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE Bayern): Elementarzusammensetzung von Brennstoffen. Online im Internet: www.zae-bayern.de (letzter Zugriff am 3. Juni 2009)
- [7] Launhardt, T.: Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen - Schadstoffemissionen, Aschequalität und Wirkungsgrad. Dissertation; München: Landtechnik Weihenstephan, 2002. -ISSN 0931-6264
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 51730 Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens. Berlin: Beuth, 2007.
- [9] Cerbe, G.; Wilhelms, G.: Technische Thermodynamik - Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. 15. aktualisierte Aufl.; München: Carl Hanser, 2008. -ISBN 978-3-446-41561-4
- [10] Baehr, H. D.: Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen. 12. neu bearbeitete und erweiterte Aufl.; Berlin: Springer, 2005. -ISBN 3-540-23870-0
- [11] Bliefert, C.: Umweltchemie. 3. aktualisierte Aufl.; Weinheim: Wiley-VCH, 2002. -ISBN 3-527-30374-X

- [12] Klippel, N.; Nussbaumer, T.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselmotoren. In: Nussbaumer, T. (Hrsg.): 9. Holzenergiesymposium- Feinstaubminderung und Stromerzeugung im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung. Zürich: Verenum, 2006. -ISBN 3-908705-14-2
- [13] Schwarz, M.: Fakten zu Feinstaub aus Pelletsheizungen. Graz: Austrian Bioenergy Centre, 2007. Online im Internet: www.depi.de/download/Fakten_Fei.pdf (letzter Zugriff am 3. Juni 2009)
- [14] Rüegg, P.: Klein-Elektroabscheider für Holzfeuerungen: Stand der Entwicklungen und Praxiserfahrung. In: Nussbaumer, T. (Hrsg.): 9. Holzenergiesymposium- Feinstaubminderung und Stromerzeugung im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung. Zürich: Verenum, 2006. - ISBN 3-908705-14-2
- [15] Vetter, A.; Hering, T.; Peisker, D.: Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2006. Online im Internet: http://www.oeko.de/service/naturschutz/Dateien/TLL_Halmgutpellets_0506.pdf (letzter Zugriff am 3. Juni 2009)
- [16] Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen. Überarbeiteter Entwurf, Stand: 01.02.2007.
- [17] Lasselsberger, L.: Überprüfung von Kleinfeuerungen für feste biogene Brennstoffe - Landes- und Bundesgesetzgebung. Wieselburg: Bundesanstalt für Landtechnik, 2003. Online im Internet: <http://www.blm.bmlf.gv.at/vero/artikel/artik017/kflubg.pdf> (letzter Zugriff am 3. Juni 2009)
- [18] Lasselsberger, L.: Energie aus fester pflanzlicher Biomasse. Wieselburg: Bundesanstalt für Landtechnik, 2006. Online im Internet: http://www.wtg.or.at/energie_pflanzlicher_biomasse.pdf (letzter Zugriff am today)
- [19] Deutsches Institut für Normung: Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn Wärmeleistung bis 300 kW. Deutsche Fassung. Berlin: Beuth, 1999. DIN EN 303-5:1999
- [20] Hammer, A.: Entwicklung eines alternativen Energieträgers in Form von Pellets aus Biomasse und Entwicklung einer für deren Verbrennung geeigneten Feuerungsanlage - Abschlussbericht protec-TRANS. Leoben: Montanuniversität Leoben - Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, 2008.
- [21] Perhofer Alternative Heizsysteme: PK-V 30 Schnittbild. Online im Internet: <http://www.perhofer.at/de/produkte/pk-v30-schnittbild.html> (letzter Zugriff am 3. Juni 2009)

Abbildungsverzeichnis

2.1	Heizwert, Brennwert und Energiemenge in Abhängigkeit vom Wassergehalt [7] . . .	6
3.1	Zeitliche Phasen der Feststoffumsetzung [7]	14
3.2	Adiabate Verbrennungstemperaturen von Holz in Abhängigkeit von Luftüberschuss und Brennstofffeuchte [7]	15
3.3	Temperaturabhängigkeit der Boudouard- und der Wassergasreaktion bei der Verbrennung [7]	16
3.4	Typischer Verlauf der CO und CO ₂ -Emissionen im Abgas bei hand- und automatisch beschickten Feuerungen [5]	18
3.5	Feuerungsprinzipien bei handbeschickten Holzfeuerungen [5]	19
3.6	Grundprinzip eines Holzpelletofens [4]	21
3.7	Grundprinzip der Unterschubfeuerung [4]	22
3.8	Beispiel einer Vorschubrostfeuerung mit Schubbodenrost [5]	23
4.1	Vergleich der Staubemissionen verschiedener Holzöfen (Einzelfeuerstätten) [5] . . .	28
4.2	Vergleich der Staubemissionen zwischen verschiedenen Heizungssystemen in Österreich [13]	29
4.3	Einfluss der Abgasrezirkulation auf die CO- und NO _x - Emissionen [4]	32
4.4	Verluste eines holzbefeuerten Kessels [5]	33
6.1	Perhofer Pelletskessel PK-V 30 [21]	40
6.2	Verbrennungsrost zu Beginn der Verbrennungsversuche	41
6.3	Sekundärluftöffnungen am Ende des Brennerteils	42
6.4	Schema des Kesselprüfstandes mit Kühlwasser- und Gasmessstrecke [20]	43
6.5	Klappe zum Verhindern von Falschluf durch den Glühzünder, geschlossener Zustand	44
6.6	Antrieb des Verbrennungsrostes	44
6.7	Wärmeübertrager	45
6.8	Kessel Außenansicht [20]	46
6.9	Luftheizer außerhalb des Versuchsraumes [20]	47
6.10	Kühlwasserstrecke mit Leistungsmesser, Rücklaufanhebung und Durchflusszähler .	47
6.11	Gasmessstrecke [20]	47
6.12	Messgaskühler Hartmann & Braun, Advance SCC	48
6.13	Messgerät Hartmann & Braun, Uras 10E für O ₂ , CO ₂ und CO	49
6.14	Messgerät Hartmann & Braun, Radas 1G für NO	49

6.15	Gesamtstaubmessgerät, Gesellschaft für Schadstoffmesstechnik (GSM)	50
6.16	Staubblanze mit Isolierung, Staubhülseinsatz und Messsonde	50
8.1	Brennerkanal mit teerartigen Versottungen und Tropfen im hinteren Bereich	58
8.2	Situation direkt nach dem Abfahren: Primärluftgeschwindigkeit 1,9 m/s	58
8.3	Situation nach Erkalten und Aufbau des Rostes: Primärluftgeschwindigkeit 1,9 m/s	58
8.4	Verkrustungen auf den mittleren unbeweglichen Roststäben	59
8.5	Verkrustungen auf den beweglichen Roststäben bei einer Primärluftgeschwindigkeit von 1,7 m/s	60
8.6	Verkrustungen auf den beweglichen Roststäben bei einer Primärluftgeschwindigkeit von 1,9 m/s	60
9.1	Rost und Brennkammer nach Veränderung der Luftführung von unten (1,7 m/s pri- mär)	63
9.2	Brennkammerwände beim Brennstoffeintrag nach Änderung der Luftführung von unten (1,7 m/s primär)	63
9.3	Positionierung der Primärluftlöcher über dem Brennstoffbett (vier Bohrungen mit 4,2 mm Durchmesser)	64
9.4	Situation in der Brennkammer nach Abstellen der Anlage mit vier 4,2 mm Bohrungen in der Rückwand	65
9.5	Verkrustungen auf unbeweglichen Roststäben bei zwei 4,2 mm Bohrungen	65
9.6	Verkrustungen auf beweglichen Rechen bei zwei 4,2 mm Bohrungen	65
9.7	Brennkammer nach Betrieb der Anlage mit vier 4,2 mm Bohrungen in der Rückwand	66
9.8	Rost nach Betrieb der Anlage mit vier 4,2 mm Bohrungen in der Rückwand	66
9.9	Lokale blasenförmige Verkrustungen rund um einzelne Rostlöcher	67
9.10	Primärluftdüsen kurz und gekrümmt	69
9.11	Primärluftdüsen gewunden	70
9.12	Eingebaute gewundene Primärluftdüsen und 35 mit Nägeln geschlossene Rostlöcher	70
9.13	Schematische Anordnung der Bohrungen in der Rückwand	71
9.14	Neue Düsen über dem Brennstoffeintrag	71
9.15	Situation nach dem Abstellen der Anlage nach Einbau der kurzen Düsen	72
9.16	Situation auf den Roststäben bei der Letztversion der Primärluftführung - keine Versottungen, keine Verkrustungen auf den Roststäben	73
9.17	Situation im Brennstoffeintragsbereich bei der Letztversion der Primärluftführung - keine Versottungen, keine Verkrustungen auf den Roststäben	73
10.1	NO _x Emissionen bei Vorschub 1-7	78
10.2	CO Emissionen bei Vorschub 1-7	79
10.3	NO _x - Emissionen bei Primärluft 2,85 m/s	82
10.4	CO- Emissionen bei Primärluft 2,85 m/s	83

Tabellenverzeichnis

2.1	Elementarzusammensetzung von Brennstoffen [6]	4
5.1	Einzuhaltende Wirkungsgrade für Zentralheizungskessel, die mit festen Brennstoffen betrieben werden [16]	35
5.2	Emissionsgrenzwerte für automatisch beschickte Kleinfeuerungen, die mit festen Brennstoffen betrieben werden [16]	35
5.3	Grenzwerte bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe unter 50 kW Brennstoffwärmeleistung [16]	36
5.4	Kesselwirkungsgrade für Kleinfeuerungen lt. DIN EN 303-5 [19]	39
5.5	Emissionsgrenzwerte für feste Brennstoffe lt. DIN EN 303-5 [19]	39
7.1	Einstellungen zur Anpassung des Brennstoffeintrags	52
8.1	Ausgangseinstellungen für die Bestimmung der Auswirkungen der Einstellungen	55
10.1	Einstellungen bei den Emissionsmessungen mit verändertem Vorschub	76
10.2	Ergebnisse aller gemessenen Größen bei Änderung des Vorschubs	79
10.3	Einstellungen bei den Emissionsmessungen mit verschiedenen Primärluftmengen	82
10.4	Ergebnisse aller gemessenen Größen bei Änderung der Primärluft	83

Anhang A - Analyseergebnisse Brennstoff



LEHRSTUHL FÜR THERMOPROZESSTECHNIK
MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN
 Zertifiziert nach ISO 9001:2000



Lehrstuhlinhaber Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Franz-Josef-Straße 18, A-8100 Leoben
 Tel.: +43 (0)3842/402-5801
 Fax: +43 (0)3842/402-8802
 E-Mail: pe@mu-leoben.at

Analysenergebnisschein

Auftraggeber: Fa. Josef MEYER Ges.m.b.H.
Eingang der Probe: 26.03.2007
Überbringer: Dr. Raupenstrauch
Gebinde: Probensäckchen luftdicht verschweißt
Gewicht der Probe: 1,016 kg
Bezeichnung: Weizenstroh Pellets
Analysennummer: 114-07

<i>Aschegehalt A der OS [%]</i>		<i>9,785</i>
Trockensubstanz TS	[%]	32,3
Wassergehalt W	[%]	7,7
Gichtverlust GV der TS	[%]	39,6
Aschegehalt A des GV der TS (550 °C)	[%]	10,4
Aschegehalt A der TS (815 °C)	[%]	10,0
Brennwert H _a der TS	[kJ/kg]	17788
Heizwert H _s der TS	[kJ/kg]	13484
Heizwert H _s der OS	[kJ/kg]	15025
Kohlenstoff C der TS	[%]	44,79
Wasserstoff H der TS	[%]	5,88
Stickstoff N der TS	[%]	1,03
Ges. Schwefelgehalt S _{ges} der TS	[%]	0,15
Chlorgehalt Cl der TS	[%]	0,20
Flüchtige Bestandteile der TS	[%]	73,60

0 = 69,85%
0 = 34,15%

Leoben am: 10.05.2007

Laborleiter

Mugrauer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Franz Mugrauer
 Tel.: 03842-402-5800
 mail: franz.mugrauer@mu-leoben.at

Lehrstuhlinhaber

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Anhang B - Aufteilung Primär- Sekundärluft

Aufteilung Primär- und Sekundärluft

für $\lambda = 1$:

Brennstoffförderleistung $m_{Br} := 3.337 \frac{\text{g}_{FS}}{\text{s}}$

Stokerintervall $StI = 0.273$

Brennstoffmassenleistung := $m_{Br} \cdot StI$

Brennstoffmassenleistung = $0.91 \frac{\text{g}_{FS}}{\text{s}}$

spez. mind. Luftmenge feucht
{aus Verbrennungsrechnung} $l_{minf} := 4.016 \frac{l_f}{\text{g}_{FS}}$

mind. Luftmenge feucht $L_{minf} := \text{Brennstoffmassenleistung} \cdot l_{minf}$ $L_{minf} = 3.655 \frac{l_f}{\text{s}}$

Querschnittsfläche primäre Zuluft $A_{pri} := 1.372 \text{ dm}^2$

Geschwindigkeit primäre Zuluft $v_{pri} := 1.7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Primärluftmenge $L_{pri} := A_{pri} \cdot v_{pri}$ $L_{pri} = 2.332 \frac{l_f}{\text{s}}$

$L_{pri\%} := \frac{L_{pri} \cdot 100}{L_{minf}}$ $L_{pri\%} = 63.815 \%$

Sekundärluftmenge $L_{sek} := L_{minf} - L_{pri}$ $L_{sek} = 1.323 \frac{l_f}{\text{s}}$

$L_{sek\%} := \frac{L_{sek} \cdot 100}{L_{minf}}$ $L_{sek\%} = 36.185 \%$

für $\lambda = 1,5$ entspricht 7,06 % Restsauerstoff

Luftzahl $\lambda := 1.5$

spez. Luftmenge feucht bei λ $l_{\lambda f} := \lambda \cdot l_{minf}$ $l_{\lambda f} = 6.024 \frac{l_f}{\text{g}_{FS}}$

mind. Luftmenge feucht bei λ $L_{\lambda f} := \text{Brennstoffmassenleistung} \cdot l_{\lambda f}$ $L_{\lambda f} = 5.482 \frac{l_f}{\text{s}}$

Primärluftmenge bei λ $L_{\lambda pri} := L_{pri}$ $L_{\lambda pri} = 2.332 \frac{l_f}{\text{s}}$

$L_{\lambda pri\%} := \frac{L_{\lambda pri} \cdot 100}{L_{\lambda f}}$ $L_{\lambda pri\%} = 42.544 \%$

Sekundärluftmenge bei λ $L_{\lambda sek} := L_{\lambda f} - L_{\lambda pri}$ $L_{\lambda sek} = 3.15 \frac{l_f}{\text{s}}$

$L_{\lambda sek\%} := \frac{L_{\lambda sek} \cdot 100}{L_{\lambda f}}$ $L_{\lambda sek\%} = 57.456 \%$

Anhang C - Berechnung der Absauggeschwindigkeit bei der Staubmessung

Berechnung der Absauggeschwindigkeit bei der Gesamtstaubmessung mit Anemometermessung im Kamin

Kamindurchmesser: $D_{\text{Kamin}} := 0.125$ [m]

Sondendurchmesser: $D_{\text{Sonde}} := 0.025$ [m]

Abgastemperatur: $T_{\text{Rauchrohr}} := 85 + 273.15$ [K]

Verbrennungsgasmenge (Abluftmenge) feucht bei Normbedingungen und ca. 11% O_2 aus der Verbrennungsrechnung bezogen auf die Frischsubstanz (FS nicht TS):

$V_{fNm3} := 9.0469$ [Nm^3/kg FS]

Abgasmenge "ideal"

Gesamtbrennstoffeintrag bei Stoker 3/8 (gemessen):

$m_{1ein} := 382.8$ [g/5 min]

$$m_{ein} := m_{1ein} \cdot \frac{10^{-3}}{300}$$

$$m_{ein} = 1.276 \times 10^{-3} \quad [kgFS/s]$$

Berechnung der tatsächlichen Absaugmenge

Die Absaugmenge misst man über einen Gaszähler. Es muss an der Sonde isokinetisch abgesaugt werden. Das Abgas wird beim Staubmessen in einem Trockenturm vorher getrocknet und deshalb muss der Volumenstrom des feuchten Abgases bei $T_{\text{Rauchrohr}}$ auf trockenes Abgas bei ca. 30°C umgerechnet werden muß.

Zunächst wurde die Geschwindigkeit des Abgases im Kamin mit einem Anemometer gemessen:

Geschwindigkeit des Abgases im Kamin

$$v_{\text{Kamin}} := 1.20 \quad [\text{Bm/s}]$$

$$A_{\text{Kamin}} := D_{\text{Kamin}}^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

A_{Kamin} ... Querschnittsfläche des Kamins

$$A_{\text{Kamin}} = 0.012 \quad [\text{m}^2]$$

$$V_{\text{pBm3}} := v_{\text{Kamin}} \cdot A_{\text{Kamin}}$$

$$V_{\text{pBm3}} = 0.015 \quad [\text{Bm}^3/\text{s}]$$

Bedingung für isokinetisches Absaugen:

$$v_{\text{Kamin}} = v_{\text{Sonde}}$$

Daraus folgt:

$$A_{\text{Sonde}} := D_{\text{Sonde}}^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

A_{Sonde} ... Querschnittsfläche der Sonde

$$A_{\text{Sonde}} = 4.909 \times 10^{-4} \quad [\text{m}^2]$$

$$V_{\text{pSonde}} := v_{\text{Kamin}} \cdot A_{\text{Sonde}}$$

$$V_{\text{pSonde}} = 5.89 \times 10^{-4} \quad [\text{Bm}^3/\text{s}] \text{ feucht, bei } T_{\text{Rauchrohr}} \text{ und 1 bar Druck}$$

Berechnung des trockenen Abgases bei Bedingungen im Kamin

Aus der Verbrennungsrechnung wurde der Wassergehalt im Abgas (bei ca. 11% Sauerstoffgehalt) berechnet.

$$V_{\text{atrocknen}} := 16.54 \quad [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

$$V_{\text{afeucht}} := 18.22 \quad [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

... beide Werte aus Verbrennungsrechnung
(Summe Abluftmenge feucht/trocken)

$$w_{\text{abgas}} := \left[1 - \left(\frac{V_{\text{atrocknen}}}{V_{\text{afeucht}}} \right) \right] \cdot 100$$

$$w_{\text{abgas}} = 9.221 \quad [\text{Vol.-%}]$$

Daraus folgt:

$$V_{p\text{Staubmessung}} := V_{p\text{Sonde}} \cdot \left[1 - \left(\frac{w_{\text{abgas}}}{100} \right) \right]$$

$$V_{p\text{Staubmessung}} = 5.347 \times 10^{-4}$$

[Bm³/s] trocken, bei T_{Rauchrohr} und 1 bar Druck

Umrechnung von den Bedingungen im Kamin auf die Bedingungen im Staubmessgerät

$$p_{\text{atm}} := 1 \quad [\text{bar}]$$

p_{atm}... Atmosphärendruck

$$p_{\text{UD}} := 135 \cdot 10^{-3} \quad [\text{bar}]$$

p_{UD}... Unterdruck der auf dem Staubmessgerät abgelesen werden kann

$$p_{\text{Messgerät}} := p_{\text{atm}} - p_{\text{UD}}$$

$$p_{\text{Messgerät}} = 0.865 \quad [\text{bar}]$$

Daraus folgt:

$$\frac{p_{\text{atm}} \cdot V_{p\text{Staubmessung}}}{T_{\text{Rauchrohr}}} = \frac{p_{\text{Messgerät}} \cdot V_{p\text{Messgerät}}}{T_{\text{Messgerät}}}$$

$$T_{\text{Messgerät}} := 273.15 + 32 \quad [\text{K}]$$

$$V_{p\text{Messgerät}} := \left(\frac{p_{\text{atm}} \cdot V_{p\text{Staubmessung}}}{T_{\text{Rauchrohr}}} \right) \cdot \frac{T_{\text{Messgerät}}}{p_{\text{Messgerät}}}$$

$$V_{p\text{Messgerät}} = 5.267 \times 10^{-4}$$

[Bm³/s] trocken bei Bedingungen im Messgerät

Umrechnung auf die Rotameteranzeige

Das Rotameter wurde auf Luft bei 1 atm bei 20°C kalibriert. Da in diesem Fall jedoch nicht Luft bei den Kalibrierbedingungen durchgesaugt wird, sondern Abgas bei "Betriebsbedingungen" muß die Rotameteranzeige noch korrigiert werden.

Grundsätzlich gilt für das Rotameter:

$$Q = Q_0 \cdot \sqrt{\frac{r_1 \cdot T_1 \cdot p_2}{r_2 \cdot T_2 \cdot p_1}}$$

mit:

Q... Durchflußrate (in unserem Fall) in [NI/h]

Q₀... Wert der auf dem Rotameter abgelesen wird

r₁... spezifisches Gewicht der Luft (bei Standardbedingungen)

r₂... spezifisches Gewicht des gemessenen Gases (bei Standardbedingungen)

p₁... Atmosphärischer Druck (bei Standardbedingungen) 1,0134 [bar (abs)]

p₂... Anliegender, absoluter Druck im Rotameter (der Messröhre) [bar(abs)]

T₁... Kalibriertemperatur [K] (in unserem Fall 293,15 [K])

T₂... Tatsächlich vorherrschende Temperatur am Rotameter [K]

Daraus folgt:

Durchflußrate in [BI/h]

$$Q := V_{p\text{Messgerät}} \cdot (1000 \cdot 3600)$$

$$Q = 1.896 \times 10^3 \quad [\text{BI/h}]$$

spezifisches Gewicht bzw. Dichte der Luft bei Standardbedingungen

Das spezifische Gewicht berechnet sich aus:

$$r = \rho \cdot g \quad \text{mit } g \dots \text{ Erdbeschleunigung}$$

Da in diesem Fall jedoch die spezifischen Gewichte dividiert werden, können für r auch die Dichten bei Normbedingungen verwendet werden. (da sich g herauskürzt)

$$\rho_L := 1.29 \quad [\text{kg/m}^3]$$

Dichte des Abgases bei Standardbedingungen

Da man Abgas mit einer bestimmten Zusammensetzung misst (die sich kaum verändert), kann hier eine Mischdichte des Gases berechnet werden.

Abgaszusammensetzung:

$$\text{CO}_2 := 0.12$$

$$\text{O}_2 := 0.11$$

$$\text{N}_2 := 0.77$$

Dichten bei Standardbedingungen:

$$\rho_{\text{CO}_2} := 1.97 \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\rho_{\text{O}_2} := 1.43 \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\rho_{\text{N}_2} := 1.25 \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\rho_{\text{misch}} := \text{CO}_2 \cdot \rho_{\text{CO}_2} + \text{O}_2 \cdot \rho_{\text{O}_2} + \text{N}_2 \cdot \rho_{\text{N}_2}$$

$$\rho_{\text{misch}} = 1.356 \quad [\text{kg/m}^3]$$

Drücke

$$p_1 := 1.013 \quad [\text{bar}]$$

$$p_2 = p_{\text{Messgerät}}$$

$$p_{\text{Messgerät}} = 0.865 \quad [\text{bar}]$$

Temperaturen

$$T_1 := 293.15 \quad [\text{K}]$$

$$T_2 = T_{\text{Messgerät}}$$

$$T_{\text{Messgerät}} = 305.15 \quad [\text{K}]$$

Umrechnen von Bedingungen im Messgerät auf Rotameter Ablesewert:

$$Q = Q_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_L \cdot T_1 \cdot P_{\text{Messgerät}}}{\rho_{\text{misch}} \cdot T_{\text{Messgerät}} \cdot P_1}}$$

$$Q_0 := \frac{Q}{\sqrt{\frac{\rho_L \cdot T_1 \cdot P_{\text{Messgerät}}}{\rho_{\text{misch}} \cdot T_{\text{Messgerät}} \cdot P_1}}}$$

$$Q_0 = 2.147 \times 10^3 \quad [\text{Bl/h}]$$

Über die maximale Absaugmenge der Pumpe lässt sich die Einstellung auf der %- Skala am Messgerät berechnen.

$$V_{p\text{Pumpe}} := 4100 \quad [\text{NI/h}]$$

$V_{p\text{Pumpe}}$... maximale Absauggeschwindigkeit der Pumpe
(entspricht 100% auf der Skala)

Daraus folgt der an der Skala des Messgeräts abzulesende Wert:

$$\text{Skala}_{\%} := \left(\frac{Q_0}{V_{p\text{Pumpe}}} \right) \cdot 100$$

$$\text{Skala}_{\%} = 52.356 \quad [\%]$$

... Beim vorliegenden Messwert von 1,20 m/s Abgasgeschwindigkeit im Kamin mit dem Anemometer ist der Skalawert auf ca. 50 % angestiegen (entspricht also genau den Einstellungen mit denen abgesaugt wurde!!)

Erklärungen:

Farbmarkierungen:

Rot... zu überprüfende Werte, können sich je nach Bedingungen ändern

Gelb... Ergebnisse/Zwischenergebnisse (zu beachtende)

Grün... Kesseleinstellungen/angenommene, fixe bzw. gemessene Werte

Blau... Werte übernommen aus der Verbrennungsrechnung

V_p steht für \dot{V} da diese Schreibweise im Mathcad nicht existiert

Anhang D - Auswertung der Staubmessung

Staubmessung Auswertung

Messung Nr.: 1
Staubhülse Nr.: 1
Datum der Messung: 02.03.2009
Brennstoff: Weizenstroh-Pellets
Messbeginn: 03:04:00
gemessen von: Peter Karner

Staubhülse Einwaage: $m_{\text{ein}} := 21.4751$ [g]

Staubhülse Auswaage: $m_{\text{aus}} := 21.5989$ [g]

Staubmenge gesamt: $m_{\text{ges}} := (m_{\text{aus}} - m_{\text{ein}}) \cdot 1000$

$m_{\text{ges}} = 123.8$ [mg]

Gaszählerstand Start: $Z_{\text{ein}} := 123.020$ [m³]

Gaszählerstand Ende: $Z_{\text{aus}} := 124.321$ [m³]

Gasmenge gesamt: $V_{\text{ges}} := Z_{\text{aus}} - Z_{\text{ein}}$

$V_{\text{ges}} = 1.301$ [m³]

Druckunterschied: $\Delta p := -0.125$ [bar]

Messtemperatur: $T_{\text{mess}} := 31$ [°C]

Rauchrohrtemperatur: $T_{\text{Rauchrohr}} := 0$ [°C]

mittlerer Sauerstoffgehalt während der Messung: $O_{2\text{mess}} := 11.589$ [%]

Bezugssauerstoff - Gehalt: $O_{2\text{bezug}} := 13$ [%]

Umrechnung des Volumens von Betriebs auf Normdruck und -temperatur:

$$\frac{p_{\text{mess}} \cdot V_{\text{ges}}}{T_{\text{mess}}} = \frac{p_{\text{N}} \cdot V_{\text{N}}}{T_{\text{N}}}$$

$$V_{\text{N}} = \frac{p_{\text{mess}} \cdot V_{\text{ges}} \cdot T_{\text{N}}}{p_{\text{N}} \cdot T_{\text{mess}}}$$

Normbedingungen:

$$T_N := 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_N := 1 \quad [\text{bar}]$$

Messdruck im Staubmessgerät:

$$p_{\text{mess}} := 1 + \Delta p$$

$$p_{\text{mess}} = 0.875 \quad [\text{bar}]$$

Abgesaugtes Gasvolumen bei Normdruck und -temperatur:

$$V_N := \frac{p_{\text{mess}} \cdot V_{\text{ges}} \cdot T_N}{p_N \cdot (273.15 + T_{\text{mess}})}$$

$$V_N = 1.022 \quad [\text{m}^3]$$

Staubkonzentration im Abgas bei Normbedingungen und $O_{2\text{mess}}$ Sauerstoffgehalt:

$$c_{\text{Staub}} := \frac{m_{\text{ges}}}{V_N}$$

$$c_{\text{Staub}} = 121.094 \quad [\text{mg}/\text{Nm}^3] \text{ bei einem Sauerstoffgehalt von } O_{2\text{mess}}$$

Umrechnungsfaktor Sauerstoffgehalt Messung - Bezugssauerstoff:

$$f_u := \frac{21 - O_{2\text{bezug}}}{21 - O_{2\text{mess}}}$$

$$f_u = 0.85$$

Staubkonzentration im Abgas bei Normbedingungen und 13% Sauerstoffgehalt:

$$c_{\text{Staub}13\%} := c_{\text{Staub}} \cdot 0.85$$

$$c_{\text{Staub}13\%} = 102.93 \quad [\text{mg}/\text{Nm}^3] \text{ bei einem Sauerstoffgehalt von 13\%}$$

Umrechnung von [mg/Nm³] auf [mg/MJ]

$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = \left(\frac{\text{mg}}{\text{MJ}} \right) \cdot H_u \cdot \frac{1}{V}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{MJ}} = \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) \cdot V \cdot \frac{1}{H_u}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{MJ}} = c_{\text{StaubMJ}}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = c_{\text{staub13\%}}$$

$$\underline{\underline{V}} := 11.0483 \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

... aus Verbrennungsrechnung: Theoretisches entstehendes Abgasvolumen pro kg Brennstoff, bei 13% Sauerstoffgehalt und 0°C

$$H_u := 16.484 \quad [\text{MJ}/\text{kg}]$$

... des Brennstoffs Weizenstroh-Pellets

$$c_{\text{StaubMJ}} := c_{\text{Staub13\%}} \cdot V \cdot \left(\frac{1}{H_u} \right)$$

$$\underline{\underline{c_{\text{StaubMJ}} = 68.988}} \quad [\text{mg}/\text{MJ}]$$

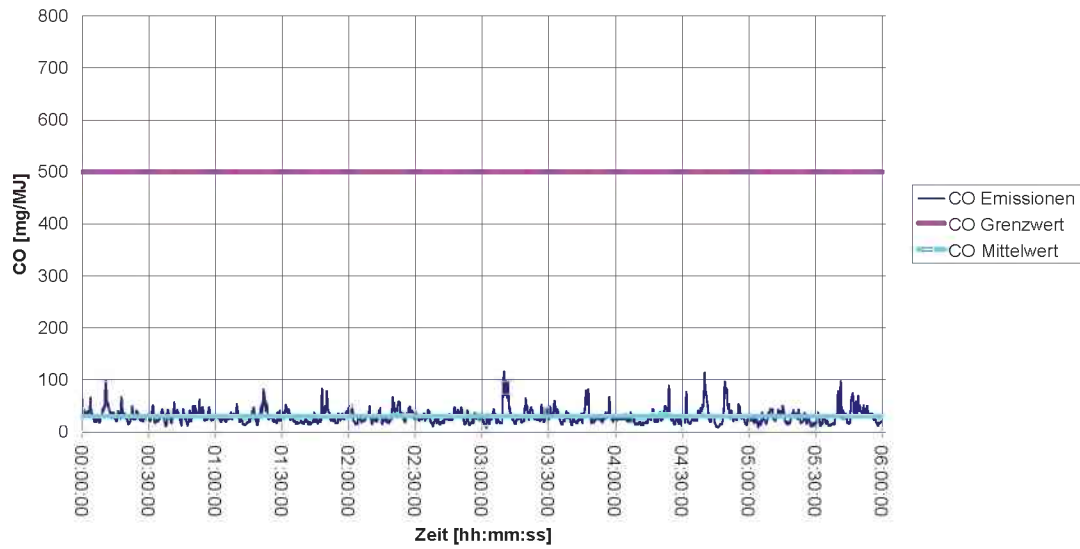
$$\text{Grenzwert} := 60 \quad [\text{mg}/\text{MJ}]$$

... lt. Ländervorschrift nach Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen Stand: 01.02.2007

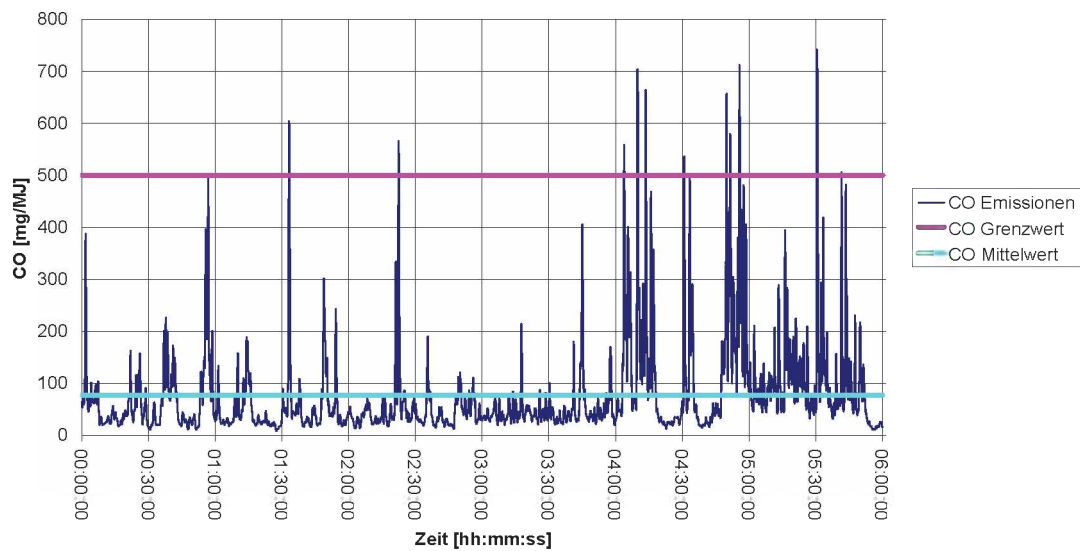
Anhang E - Verlauf CO- und NO_x Emissionen über die Versuchsdauer

Kohlenmonoxid Emissionen bei veränderlichem Vorschub

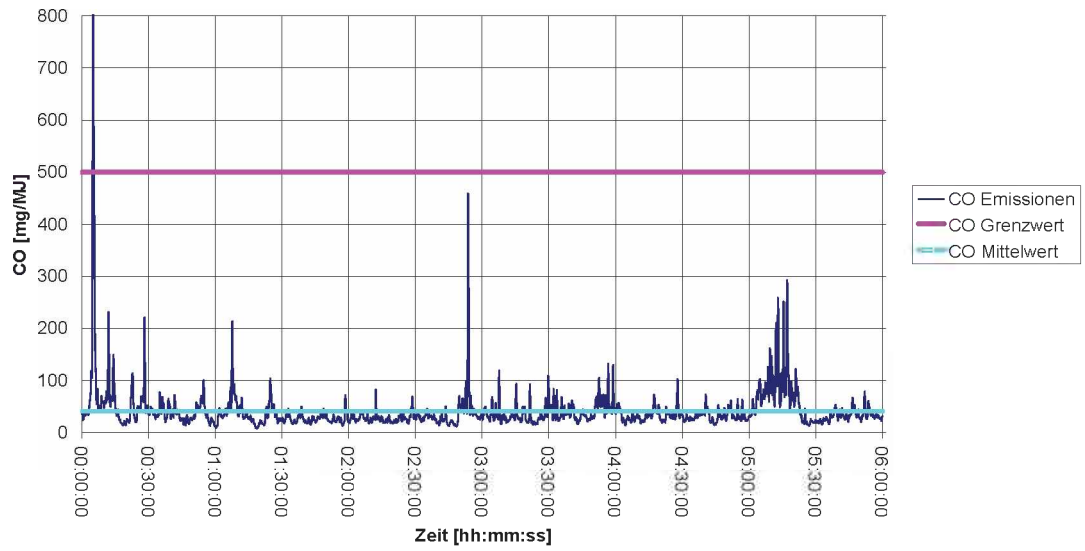
CO Emissionen 02.03.2009
Vorschub 1-7



CO Emissionen 03.03.2009
Vorschub 2-14

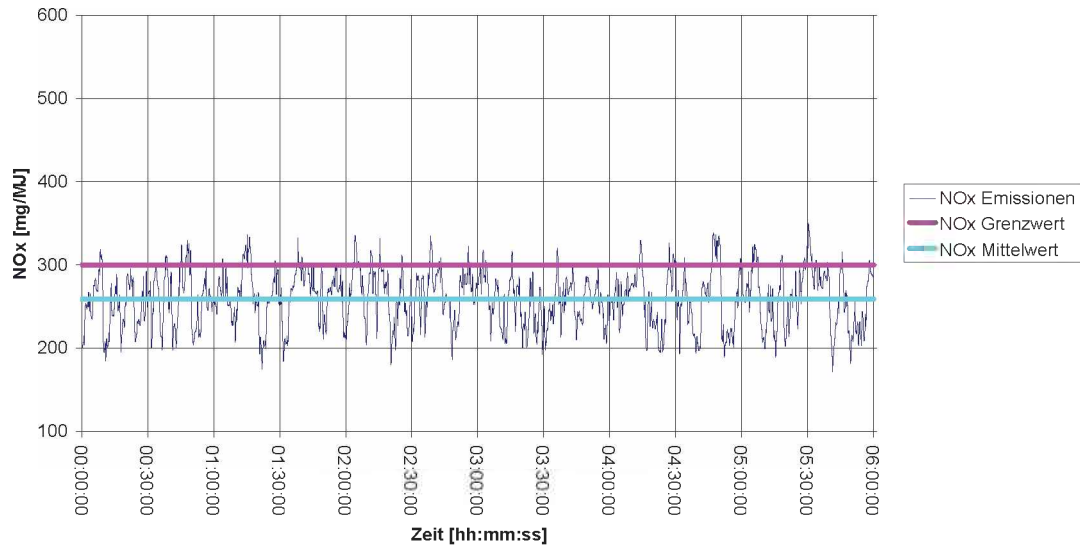


CO Emissionen 09.03.2009 Vorschub 4-28

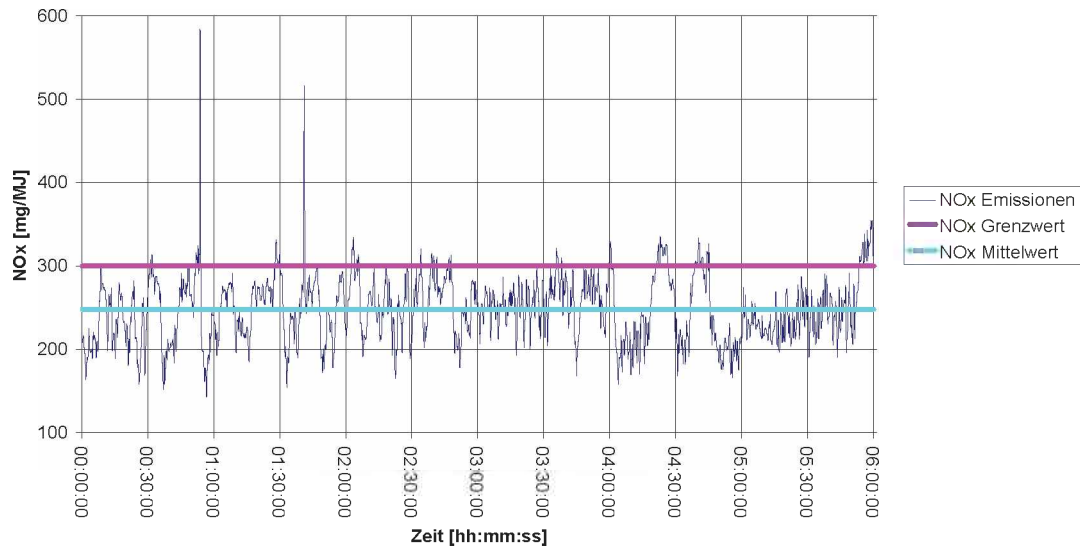


Stickoxid Emissionen bei veränderlichem Vorschub

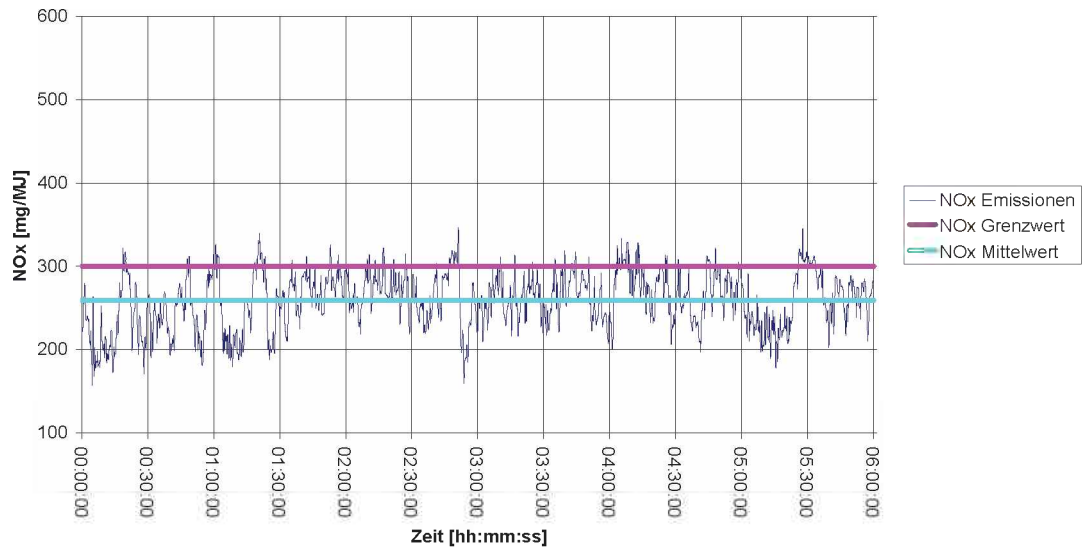
NOx Emissionen 02.03.2009
Vorschub 1-7



NOx Emissionen 03.03.2009
Vorschub 2-14

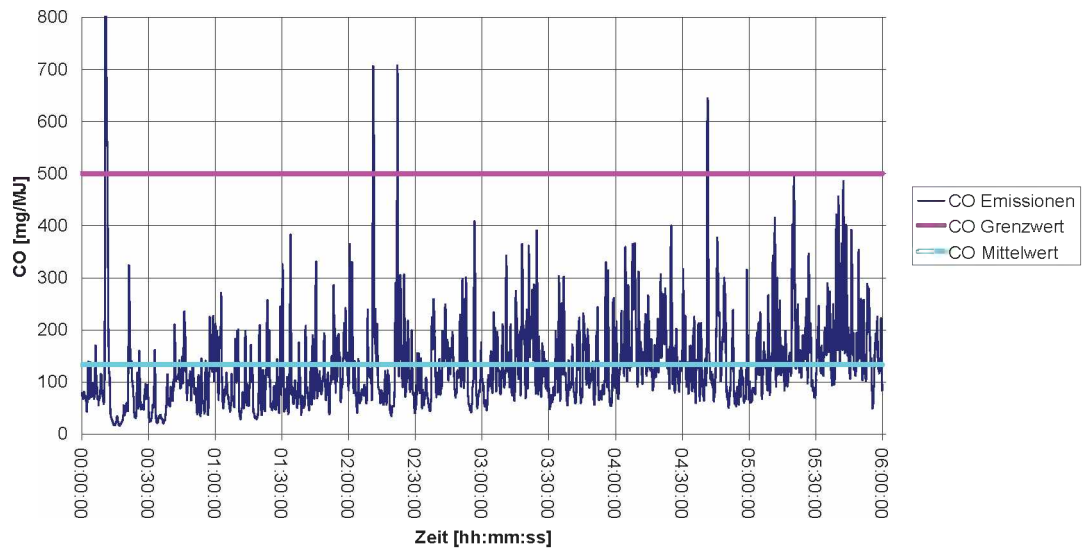


NOx Emissionen 09.03.2009 Vorschub 4-28

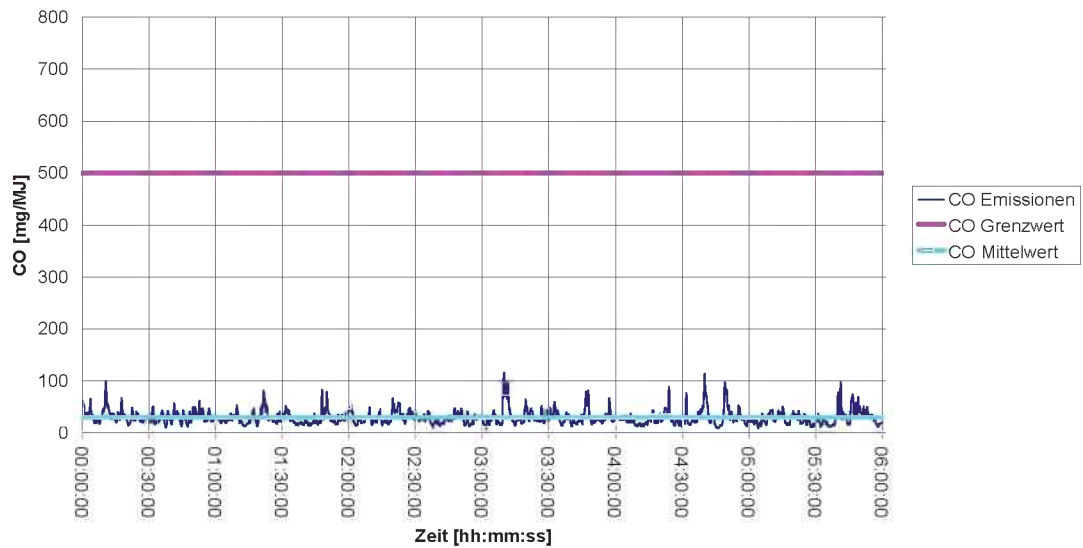


Kohlenmonoxid Emissionen bei veränderlichen Primärlufteinstellungen

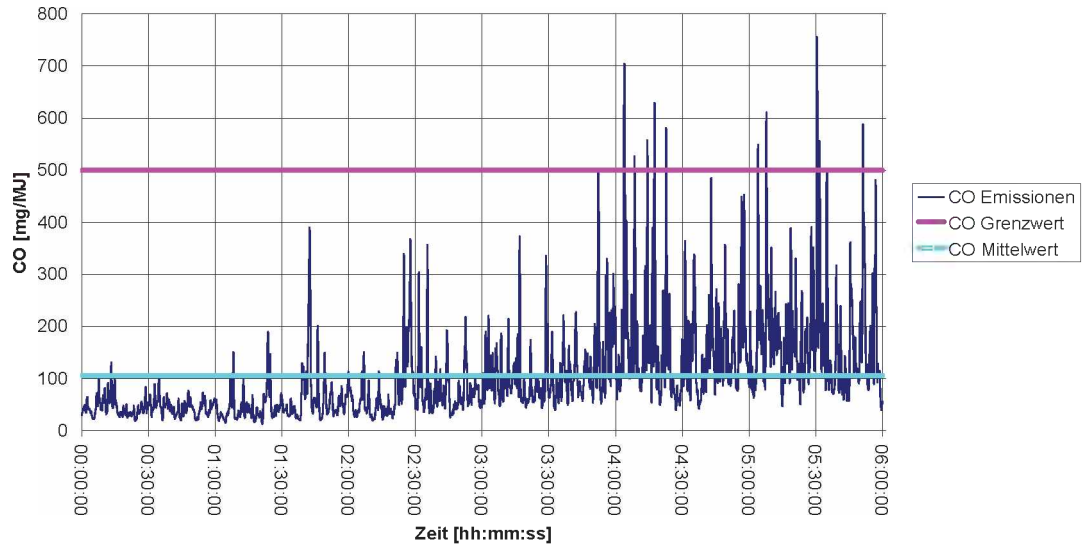
CO Emissionen 12.03.2009
Primärluft 2,65 m/s



CO Emissionen 02.03.2009
Primärluft 2,75 m/s

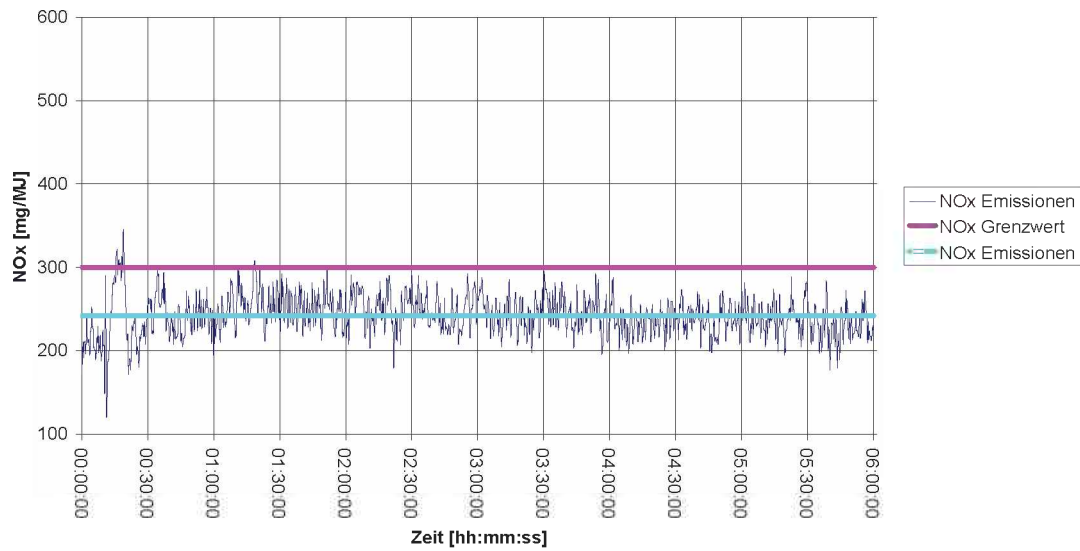


CO Emissionen 10.03.2009
Primärluft 2,85 m/s

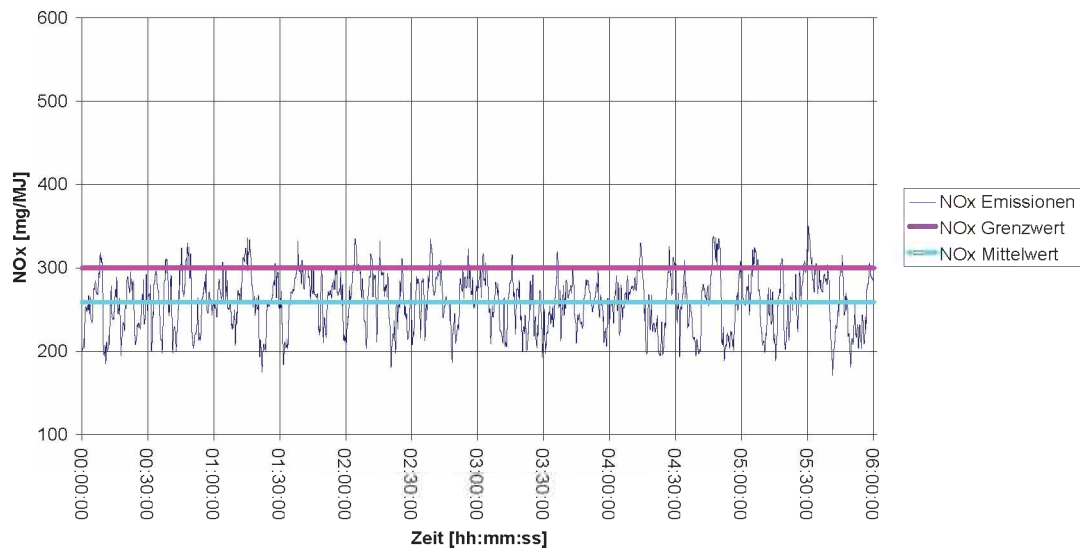


Stickoxid Emissionen bei veränderlichen Primärlufteinstellungen

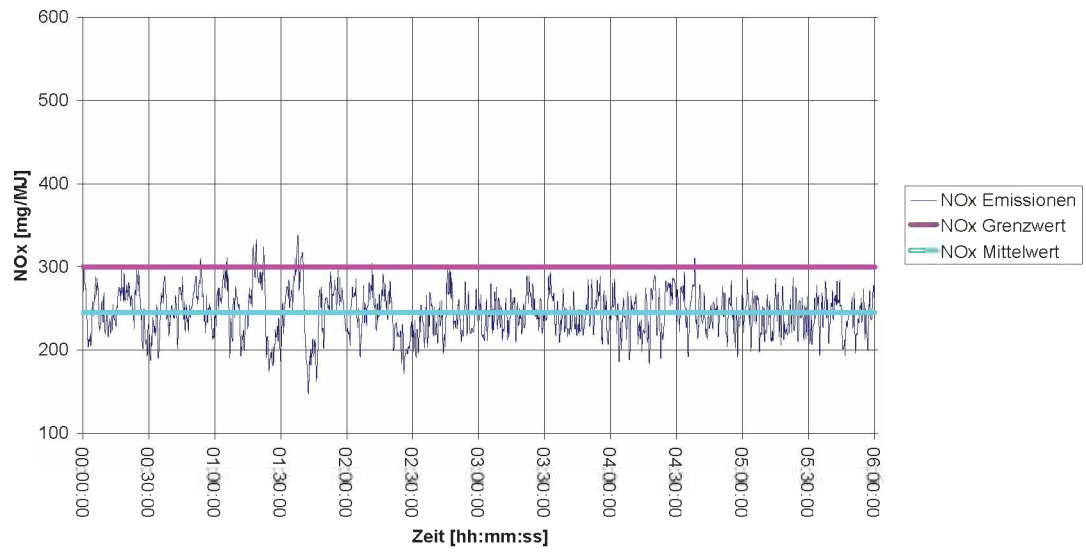
NOx Emissionen 12.03.2009
Primärluft 2,65 m/s



NOx Emissionen 02.03.2009
Primärluft 2,75 m/s



NOx Emissionen 10.03.2009
Primärluft 2,85 m/s



Anhang F - Umrechnung Primärluftgeschwindigkeit auf Volumenstrom

Umrechnung Primärluftgeschwindigkeit - Volumenstrom

Primärluftgeschwindigkeit [m/s]	Volumenstrom [l/s]
0,10	0,14
0,20	0,27
1,50	2,06
1,70	2,33
1,90	2,60
2,00	2,74
2,30	3,15
2,35	3,22
2,50	3,43
2,60	3,56
2,65	3,63
2,70	3,70
2,75	3,77
2,80	3,84
2,85	3,91
2,90	3,98
2,95	4,04
3,00	4,11
4,30	5,90