



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

**VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY**

Masterarbeit

NO_x – Reduktion bei Biomasseanlagen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Master of Science unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann HOFBAUER

und

Dipl.-Ing. Wolfgang FELSBERGER

Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften
Forschungsbereiche Verbrennungstechnik, Energietechnik und Allgemeine
Verfahrenstechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Ing. Daniel Bleiberschnig, B.Sc.

0626390 (066 473)

Vellach 45

9132 Gallizien

Wien, im Feber 2014

Vorname, Nachname

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig 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 gekennzeichnet habe.

Daniel Bleiberschnig

Wien, 24.02.2014

„Daß die Menschheit in diesem höchst instabilen und gefährlichen Zustand lebt und abhängig ist von einer Technik, die sie kaum noch durchschaut, ist keine zwangsläufige Folge der technischen und wissenschaftlichen Entwicklung - es ist eine Folge des moralischen und politischen Entwicklungsstandes der Gesellschaft“

Joseph Weizenbaum (1923), österr.-amerik. Mathematiker u. Informatiker am MIT (Massachusetts Institute of Technology)

VORWORT

Vorweg möchte ich mich bei allen Personen, die mich bei der Erarbeitung und Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt und auf meinem bisherigen Lebensweg begleitet haben, bedanken.

Ich möchte mich auch bei meinen Eltern für die mentale Unterstützung und bei meiner Lebensgefährtin, Frau Linda Zehetmair BEd, für die Toleranz der unzähligen Stunden an dieser anspruchsvollen Arbeit bedanken.

Weiters möchte ich mich recht herzlich bei Frau Projektass. Dipl.-Ing. Verena Trinkel BSc für die tatkräftige Unterstützung beim Korrekturlesen bedanken.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer an der Technischen Universität Wien, Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Hofbauer, für die wissenschaftliche Unterstützung sowie Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Felsberger von der Firma URBAS Maschinenfabrik Ges.m.b.H. für die Idee und Möglichkeit der Durchführung dieser Masterarbeit.

KURZFASSUNG

Mit der vorliegenden Arbeit werden die Emissionen eines Biomasseheizwerkes der Firma URBAS messtechnisch erfasst. Mit diesen Istwerten wird ein Vergleich mit der vorhandenen Literatur gezogen, um eine Reduktion der NO_x-Abgaswerte erreichen zu können.

Dazu wird in der einschlägigen Literatur der theoretische Hintergrund recherchiert, analysiert und es werden mögliche Lösungswege dargestellt. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt im Feststellen von Primärmaßnahmen zur Vermeidung von Emissionen. Im Ausblick auf zukünftige Entwicklungen wird theoretisch auf die Sekundärmaßnahmen eingegangen.

Der Praxisteil dieser Arbeit beinhaltet die Erfassung, Aufbereitung und den Vergleich von messtechnischen Daten einer Anlage der Firma URBAS. Diese sind die Grundlage für die Festlegung von möglichen Primärmaßnahmen.

ABSTRACT

With the paper in hand the emissions of a biomass heating plant manufactured by the company URBAS are technical measured. These actual values will be compared with values from literature to be able to reach a significant reduction of NO_x-emissions.

In addition the theoretical background is investigated at corresponding literature, by analysing and showing possible solutions. The main focus of the paper is to lock primary tasks in prevention of emissions. About secondary tasks is only talked theoretically due to prospective developments.

The praxis part of the paper includes the coverage, the preparation and the comparison from technical measured data of a plant by company URBAS. These are the basis for the settling of possible primary tasks.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Problemstellung / Aufgabenstellung | 1 |
| 1.2 | Zielsetzung | 2 |
| 2 | Theoretische Grundlagen | 3 |
| 2.1 | Allgemeines | 3 |
| 2.2 | Chemische und physikalische Vorgänge | 3 |
| 2.2.1 | Bildung von Stickstoffoxiden | 4 |
| 2.3 | Verbrennungsrechnung | 7 |
| 2.3.1 | Einführung | 7 |
| 2.3.2 | Brenn- und Heizwert | 8 |
| 2.3.3 | Sauerstoffbedarf | 9 |
| 2.3.4 | Luftbedarf | 10 |
| 2.3.5 | Abgas | 11 |
| 3 | Biomasseverbrennungsanlagen | 18 |
| 3.1 | Arten | 18 |
| 3.1.1 | Festbettfeuerungen | 20 |
| 3.2 | Verfahren zur NO _x -Reduktion | 26 |
| 3.2.1 | Luftstufung | 27 |
| 3.2.2 | Brennstoffstufung | 29 |
| 3.2.3 | Abgasrezirkulation | 30 |
| 3.2.4 | SNCR-Entstickung | 31 |
| 3.2.5 | SCR-Entstickung | 33 |
| 3.3 | URBAS – Allgemeine Anlagenbeschreibung | 35 |
| 3.3.1 | Kraft-Wärme-Kopplungen | 35 |
| 3.3.2 | Heißwasserkessel | 42 |
| 4 | Messtechnik | 49 |
| 4.1 | Allgemeines | 49 |
| 4.2 | Rauchgasanalysegerät Testo 350XL | 49 |
| 4.2.1 | Messprinzip | 51 |
| 4.2.2 | Abgas-Entnahmesonde | 54 |
| 4.3 | Hackschnitzelfeuchtemesser Schaller FS_3 Biomasse | 56 |
| 4.3.1 | Kapazitives Prinzip | 58 |
| 4.4 | Messprogramm | 61 |
| 5 | Messergebnisse | 64 |
| 5.1 | HKW Klagenfurt | 64 |
| 5.1.1 | Anlage 1 | 66 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.1.2 | Anlage 2 | 70 |
| 5.2 | SCA Timber Bollstabruk | 74 |
| 5.2.1 | Anlage 1 | 77 |
| 5.2.2 | Anlage 2 | 89 |
| 5.2.3 | Vergleich Anlage 1 – Anlage 2 | 90 |
| 5.2.4 | Vergleich EnviLoop Emissionsrechner – Testo Rauchgasanalysegerät | 96 |
| 6 | Berechnungen | 98 |
| 6.1 | Zusammensetzung Brennstoff | 98 |
| 6.1.1 | HKW Klagenfurt (Österreich)..... | 99 |
| 6.1.2 | SCA Timber Bollstabruk (Schweden)..... | 100 |
| 6.2 | Heizwert | 102 |
| 6.2.1 | HKW Klagenfurt..... | 102 |
| 6.2.2 | SCA Timber Bollstabruk | 103 |
| 6.3 | Sauerstoffbedarf | 105 |
| 6.4 | Luftbedarf | 106 |
| 6.5 | Abgas | 106 |
| 6.6 | Emissionen..... | 107 |
| 7 | Zusammenfassung..... | 108 |
| 8 | Ausblick..... | 111 |
| 9 | Verzeichnisse | 112 |
| 9.1 | Literaturverzeichnis | 112 |
| 9.1.1 | Im Anhang verwendete Literatur | 113 |
| 9.1.2 | Weiterführende Literatur..... | 113 |
| 9.2 | Abkürzungsverzeichnis..... | 115 |
| 9.2.1 | Allgemein..... | 115 |
| 9.2.2 | Chemisch..... | 117 |
| 9.2.3 | Variablen | 119 |
| 9.2.4 | Einheiten..... | 123 |
| 9.3 | Tabellen..... | 124 |
| 9.4 | Abbildungen | 127 |
| 10 | Anhang..... | I |
| 10.1 | Verbrennungsreaktionen | I |
| 10.1.1 | H ₂ -O ₂ Reaktionen..... | I |
| 10.1.2 | CO-Reaktionen | II |
| 10.1.3 | Verbrennung von N | III |
| 10.1.4 | Verbrennung von NO | V |
| 10.1.5 | Verbrennung von NO ₂ | VI |
| 10.1.6 | Verbrennung von N ₂ | VI |

| | | |
|--------|---------------------------|------|
| 10.1.7 | Verbrennung von HNO | VIII |
| 10.1.8 | Verbrennung von C | IX |

1 Einleitung

Unsere Gesellschaft benötigt Energie, um ihren Durst nach Wohlstand und Bequemlichkeit zu stillen. Dieser Durst wird von der Gesellschaft durch Energieträger abgedeckt, welche allesamt Emissionen hervorrufen. Es gibt verschiedenartige Energieträger, dazu zählen Kohle, Erdgas, Erdöl (fossil) und alternative Energieträger.

Im letzten Jahrhundert kam der große Aufstieg des Erdöls zu dem Energieträger schlechthin. Dieses Zeitalter, in dem wir nachwievor leben, wird auch das Erdölzeitalter genannt. Heute hat sich in den Industrieländern ein lückenloses Versorgungssystem mit Erdöl und seinen Folgeprodukten aufgebaut. Nahezu in allem, was wir benutzen, ist Erdöl oder eines seiner Folgeprodukte enthalten.

Dieser Umstand macht uns abhängig von diesem Produkt. Daher sollte das langfristige Ziel der Umstieg auf erneuerbare Energieträger sein. Der Gesellschaft wird mittlerweile schrittweise klar, dass sie sich in einer Zeit des Umbruchs befindet. Sie wird einen Weg finden müssen, um sich aus dieser globalen Abhängigkeit von einigen Wenigen zu lösen. Die Forschung und der Innovationsgeist sollte genützt werden, um den Fortschritt bei alternativen und unabhängigeren Energieträgern voranzutreiben.

Alle Energieträger erzeugen bei ihrer Umwandlung Emissionen. Diese Emissionen haben nachweislich einen umweltschädigenden Einfluss auf unser Klima. Aus diesem Grund gibt der Gesetzgeber Grenzwerte vor. In Österreich werden obere Grenzwerte zu den einzelnen Schadstoffen vorgegeben und müssen, je nachdem, um welche Umsetzung von Energieträger es sich handelt, eingehalten werden.

Wenn man die Rechtslage in Europa betrachtet, ist diese in den einzelnen Mitgliedsstaaten sehr unterschiedlich. In Schweden gibt es zum Beispiel ein Bonus-/Malus-System, um den Stand der Technik bei Emissionsreduktion Rechnung zu tragen. Als Grundlage für dieses Bonus-/Malus-System dient der Jahresmittelwert eines bestimmten Schadstoffes aller Anlagen. Der Jahresmittelwert fungiert als gesetzlicher Grenzwert. Emittiert eine Anlage mehr Schadstoffe als es der Jahresmittelwert vorschreibt, so sind Strafzahlungen zu leisten. Im umgekehrten Fall wird der im Gegensatz zum Jahresmittelwert niedrigere Emissionswert honoriert und mittels weiterer Boni vergütet.

1.1 Problemstellung / Aufgabenstellung

Im Biomasseanlagenbau ist der Bereich des Typs der Rostfeuerung Stand der Technik. Jedoch gibt es im Hinblick auf die Emissionen, die eine solche Anlage erzeugt bzw. emittiert, noch Entwicklungs- und Forschungsbedarf. Die meisten Forschungs- und

Entwicklungsanstrengungen erfolgten bisher in den Bereichen der Verbrennungstechnik, der konstruktiven Umsetzungsmöglichkeit und der Primär- bzw. Sekundärmaßnahmen gegen Emissionen.

Es wurde daher als sinnvoll erachtet, alle diese Bereiche zusammenzuführen, um die bestmögliche Reduktion von Emissionen zu erzielen.

Konkret stellt sich die Frage, ob und wie weit eine Reduktion der Emissionen bei Biomasseanlagen möglich ist. Des Weiteren ist von Interesse, in welcher Größenordnung die Emissionen durch die Anwendung der verschiedenen Maßnahmen reduziert werden können.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, den optimalen Betriebspunkt einer Biomasseanlage mit Rostfeuerung in Hinblick auf niedrige Emissionen zu finden. Im speziellen wird auf die Abgaskomponente NO_x besonderer Wert gelegt, weil davon auszugehen ist, dass diese in Zukunft eine größere Rolle (strenger werdende Emissionsauflagen) spielen wird.

Dazu werden die relevanten Betriebsparameter aus der Literatur recherchiert, deren Einfluss auf die Emissionen messtechnisch erfasst und anschließend deren Zusammenhänge ausgewertet. Ein Augenmerk wird auch auf das optische Verbrennungsbild gelegt.

Die Möglichkeiten zur Reduktion der Emissionen sollen aufgezeigt werden, wobei das Hauptaugenmerk auf den primären Maßnahmen zur NO_x -Reduktion liegen soll. Auf die sekundären Maßnahmen wird nur theoretisch eingegangen.

In wirtschaftlicher Hinsicht soll ein Überblick über die Verfahren und der zu erwartenden Kosten gegeben werden. Jedoch wird auch hier der Realisierbarkeit eine übergeordnete Rolle zugeordnet.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die in der Literatur anerkannte und in der Praxis bewährte Theorie zu den Vorgängen der Verbrennung von Biomasse in Rostfeuerungen eingegangen. Als Biomasse wird hier eine Mischung aus Hackschnitzel, Rinde und Sägespänen bezeichnet, deren genaue Zusammensetzung zu einem späteren Zeitpunkt erörtert wird.

2.1 Allgemeines

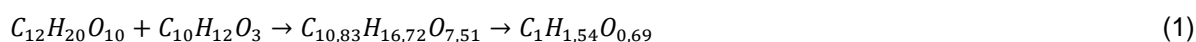
Seit der Entdeckung des Feuers durch den Menschen, ist er davon fasziniert. Gleichzeitig entstand auch der Drang nach dem Wissen der Vorgänge bei der Verbrennung. Feuer spendet, vereinfacht dargestellt, Licht und Wärme. Diese beiden offensichtlichen Energieformen konnte der Mensch in frühen Zeiten am eigenen Leib feststellen. Um aber die Vorgänge verstehen und nachweisen zu können, sollte noch einige Zeit vergehen. Heute haben wir ein genaueres Bild einer Verbrennung, aber bei weitem noch nicht alle Facetten herausgefunden, geschweige denn die ganze Komplexität erfassen können. Deshalb gibt es Abstriche in der Genauigkeit, welche in der Praxis aber trotzdem taugliche Ergebnisse liefern.

Einen Überblick und näheren Aufschluss über die chemischen und physikalischen Vorgänge der Verbrennung soll der nächste Punkt geben.

2.2 Chemische und physikalische Vorgänge

Die drei Hauptbestandteile von Holz sind Zellulose oder Hemizellulosen, Lignin und Pektin. Als gute Näherung kann davon ausgegangen werden, dass nur die ersten zwei Hauptbestandteile den größten Einfluss auf die Zusammensetzung haben. Im Mittel ergibt sich ein prozentuales Verhältnis von 66,5 (Hemizellulose) zu 28,5 (Lignin). Den Rest von 5% bildet das Pektin.

Wenn man Holz betrachtet, ergibt sich folgende chemische Zusammensetzung aus den zwei Hauptbestandteilen Zellulose und Lignin [1]:



Ein Überblick über die Reaktionen der wichtigsten Spezies bei der Verbrennung von Biomasse ist im Anhang zu finden. Zu diesen zählen Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N_2), Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2).

2.2.1 Bildung von Stickstoffoxiden

Nach vorheriger Erläuterung der möglichen Bildung von Stickoxiden stellt sich nun die Frage der Bildungsmöglichkeiten von Stickstoffoxiden. Dieser Abschnitt soll Aufschluss über die drei Hauptbildungsarten von Stickoxiden geben. Die Hauptbildungsarten sind Brennstoff- NO_x , thermisches NO_x und promptes NO_x . Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, dass bei der Biomasseverbrennung hauptsächlich die Bildung aus Brennstoffstickstoff verantwortlich für die NO_x -Emissionen ist. Als gute Näherung können die beiden anderen Bildungsarten (thermisch und prompt) vernachlässigt werden.

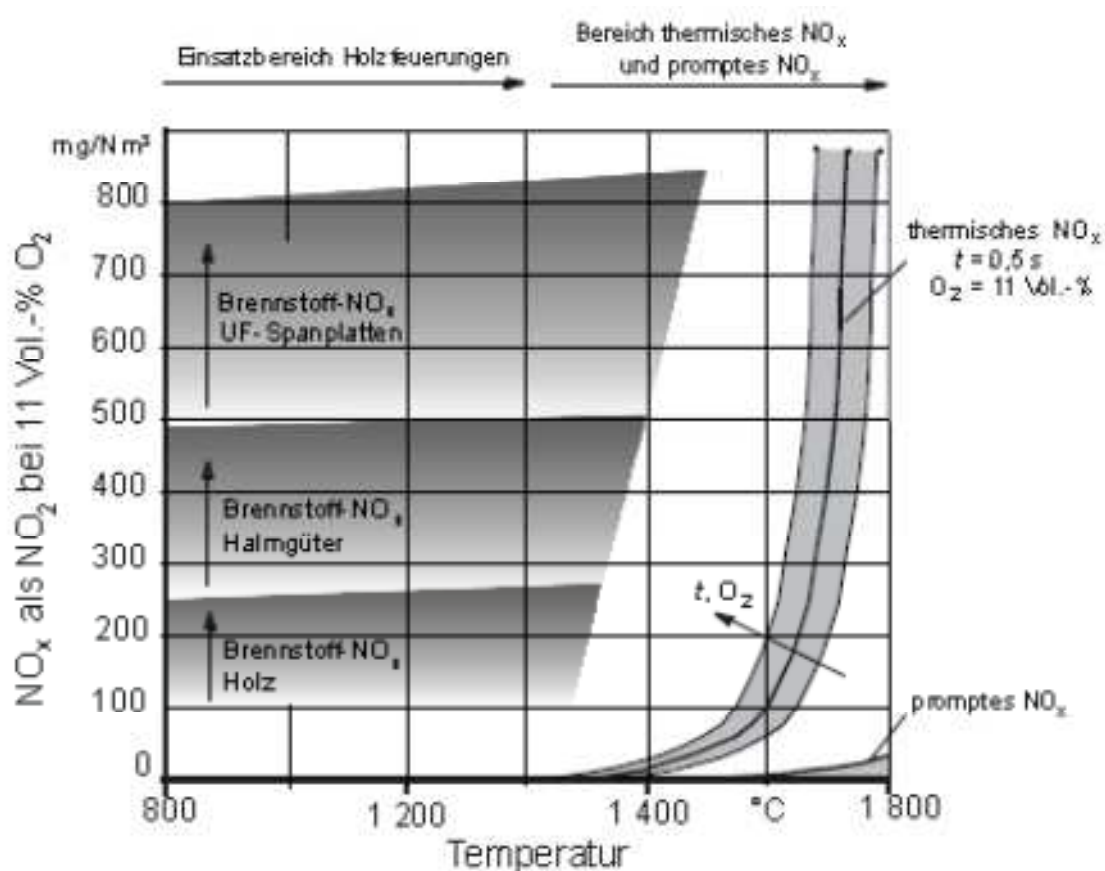


Abbildung 1: Bildung von Brennstoff- NO_x , thermischem NO_x und promptem NO_x in Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur mit typischen Bereichen für Holz, Halmgüter und UF-Spanplatten (Richtwerte)

[5]

Das thermische NO_x wird auch nach seinem Entdecker Zeldovich, Zeldovich NO_x , sowie das prompte NO_x nach Fenimore, Fenimore NO_x , genannt.

Im Gegensatz zum Brennstoff Kohle (ca. 1% Stickstoff in der Trockenmasse) ist beim Brennstoff Holz der Anteil in der Mischrinde mit ca. 0,6% in der Trockenmasse ungefähr halb so groß. Daher sind zwangsläufig auch die Emissionen aus der Mischrinde nur ca. halb so

groß wie bei der Verbrennung von Kohle [16]. Der Mechanismus an sich sollte aber derselbe sein wie bei der Kohle und sieht wie folgt aus (Abbildung 2):

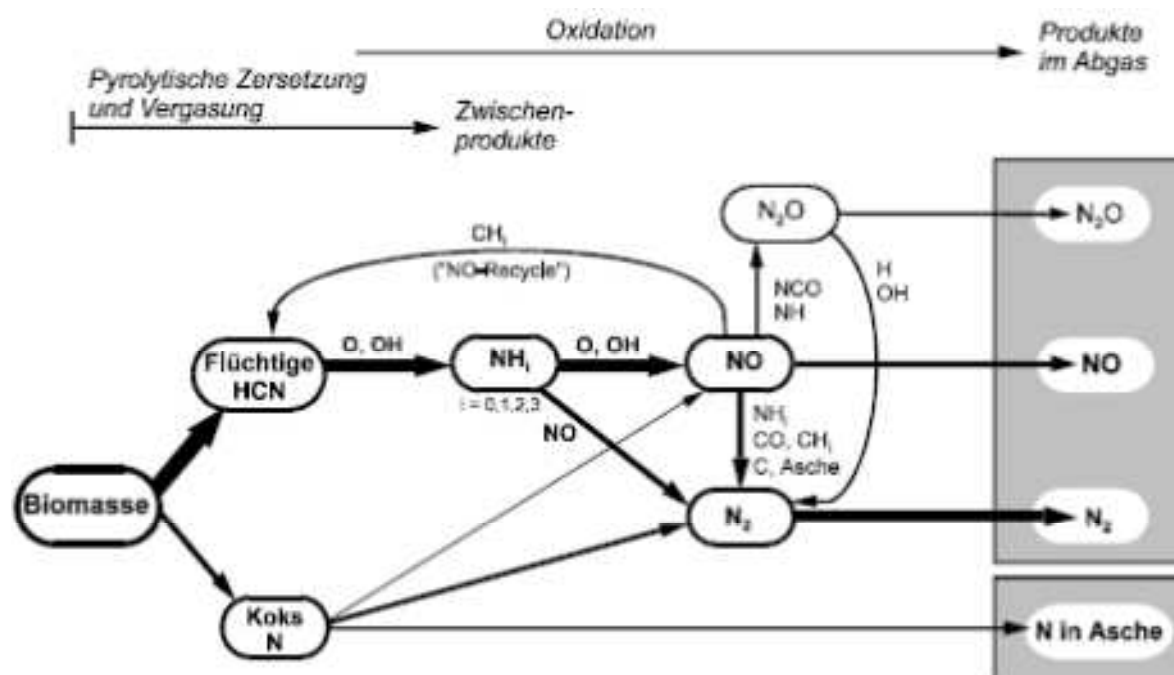


Abbildung 2: Reaktionsschema für die NO_x -Bildung aus dem Brennstoffstickstoff [5]

Für die Stickstoffbildung aus dem Brennstoff sind, wie im Anhang unter Punkt 10 dargelegt, viele verschiedene Radikale verantwortlich. Zu diesen zählen NH_2 , HN , CN und N , welche in der unmittelbaren Flammenzone im Zeitbereich von einer Millisekunde entstehen (Formel 2). Diese Reaktionen sind geschwindigkeitsbestimmend und dürfen nur in qualitativer Weise betrachtet werden.



Die Verstärkung der Bildung von NO_x erfolgt unter oxidierenden Bedingungen (Luftüberschuss $\lambda > 1,0$) und wird zusätzlich durch Wasser, welches OH -Radikale bildet, erhöht.

Im Gegensatz dazu erfolgt die Umsetzung zu molekularem Stickstoff (N_2) unter reduzierenden Bedingungen ($\lambda < 1,0$).

Es gibt zwei Arten von NO-reduzierenden Reaktionen, welche stattfinden können. Dies sind die homogenen und heterogenen Reaktionen [5].



Ausgehend vom Brennstoff Holz erfolgt die Zersetzung des Brennstoffes durch pyrolytische Zersetzung und Vergasung zu Zwischenprodukten mit anschließender Oxidation zu den Produkten N_2O , NO und N_2 im Abgas sowie N in der Asche. Bei der pyrolytischen Zersetzung und Vergasung des Brennstoffes erfolgt eine Auftrennung in flüchtige Bestandteile und HCN sowie Koks und N. Die Stärke der Pfeile in Abbildung 2 zeigt die Wichtigkeit der Umwandlung an.

Aus den flüchtigen Bestandteilen und HCN entsteht aus O oder OH HN_i ($i = 0, 1, 2, 3$) sowie in einem weiteren Schritt mit O oder OH NO. NH_i kann mit bereits entstandenem NO zu N_2 reduziert werden.

Bereits entstandenes NO kann mit NH_i , CO, CH_i , C oder Aschebestandteilen (Koks, N) ebenfalls zu N_2 reduziert werden.

Gelangt man also zu N_2 , so ist keine weitere Umwandlung mehr möglich. Aus Koks und N wird mit hoher Wahrscheinlichkeit auch N_2 gebildet und somit keine zusätzlich Belastung durch NO_x im Abgas hervorgerufen.

Um eine theoretisch mögliche Reduktion von NO_x um die Hälfte bewerkstelligen zu können, gibt es in der Literatur mehrere Ansätze, die in Kapitel 3.2 näher behandelt werden.

2.3 Verbrennungsrechnung

2.3.1 Einführung

Grundlage jeder Verbrennung ist eine chemische Reaktion (Oxidation) brennbarer Bestandteile eines Brennstoffes mit Sauerstoff unter Freisetzung von Wärme.

Bei festen Brennstoffen wird die Verbrennung durch eine Einbringung von Wärme in den Brennstoff gestartet.

Für eine vollständige Verbrennung benötigt man neben einer hohen Temperatur, eine nahezu homogene Mischung des Brennstoffes mit der Verbrennungsluft und ausreichende Verweilzeit sowie ausreichend Sauerstoff im Brennraum. In der Literatur werden diese Punkte als 3T-Kriterium bezeichnet. (3T kommt aus dem Englischen und bedeutet temperature, turbulence und time).

Bei einer unvollständigen Verbrennung ist meist entweder zu wenig Sauerstoff oder zu viel Sauerstoff für die Verbrennung vorhanden. Im ersten Fall werden die noch brennbaren Gase aus dem festen Brennstoff nicht vollständig umgesetzt. Im zweiten Fall (zu wenig O₂), wird die Verbrennungstemperatur gesenkt und somit der Heizeffekt beeinträchtigt.

Die Güte einer Verbrennung wird dadurch gekennzeichnet, dass eine möglichst vollkommene und vollständige Verbrennung bei möglichst geringem Luftüberschuß stattfindet.

Bei festen sowie flüssigen Brennstoffen wird die Zusammensetzung des Brennstoffes mittels Elementaranalyse ermittelt und als Massenanteile angegeben. Zur Kennzeichnung der Massenanteile werden Kleinbuchstaben aus dem Periodensystem der Elemente verwendet. Bei Wasser und Asche werden die Kleinbuchstaben w bzw. a hergenommen.

$$c + h + s + o + n + a + w = 1 \quad (9)$$

2.3.1.1 Wassergehalt

Per Definition wird der Wassergehalt w als der Gehalt an Wasser, der sich unter definierten Bedingungen (105°C im Trockenschrank, aus DIN 51718) aus dem Brennstoff entfernen lässt, bezeichnet. Der Brennstoff wird bis zur Massenkonstanz (keine weitere Gewichtsabnahme feststellbar) getrocknet. Der Wassergehalt wird auf die Frischmasse bezogen d.h. auf die Trockenmasse (trockene Biomasse) m_B plus die Wassermasse m_W.

$$w = \frac{m_W}{m_B + m_W} \quad (10)$$

Im Gegensatz dazu wird die sogenannte Brennstofffeuchte u auf die Trockenmasse bezogen. Sie ist in der Forstwirtschaft gebräuchlicher und wird auch als Holzfeuchte bezeichnet.

Die Wassermasse m_W wird hier im Verhältnis zur trockenen Biomasse m_B gesetzt. Weiters kann die Brennstofffeuchte in den Wassergehalt umgerechnet oder auch aus ihm berechnet werden. Siehe dazu Formel 11.

$$u = \frac{m_W}{m_B} = \frac{w}{1-w} \quad (11)$$

Ein Wassergehalt von 50% entspricht somit einer Brennstofffeuchte von 100%. Daraus kann man ableiten, dass die Brennstofffeuchte Werte über 100% annehmen kann.

2.3.2 Brenn- und Heizwert

Die gebundene Energie im Brennstoff wird als Heizwert bzw. Brennwert angegeben. Die freiwerdende Wärmemenge hängt von der Art, Masse und dem Zustand des Brennstoffes bzw. der Verbrennungsprodukte ab.

Der Brennwert H_o ist um den Betrag der Verdampfungswärme des in den Abgasen enthaltenen Wassers größer als der Heizwert H_u . Bei den meisten technischen Feuerungen enthalten die Abgase das Wasser in dampfförmigem Zustand, so dass bei Verbrennungsrechnungen der Heizwert zu verwenden ist. Der Zusammenhang zwischen Brennwert und Heizwert ergibt sich aus:

$$H_o = H_u + r * (9h + w) \quad (12)$$

Die Variable r wird als Verdampfungsenthalpie des Wassers bezeichnet und hat je nach Bezugstemperatur unterschiedliche Werte (2,5 MJ/kg bei 0°C; 2,44 MJ/kg bei 25°C).

Aufgrund der vielen möglichen Bindungsarten bei festen und flüssigen Brennstoffen kann der genaue Wert des Heizwertes nur in einem Kalorimeter ermittelt werden. Angenähert kann bei bekannter Elementaranalyse eines Brennstoffes der Heizwert nach Boie (13) wie folgt berechnet werden:

$$H_u = 34,8 * c + 93,9 * h + 6,3 * n + 10,5 * s - 10,8 * o - 2,5 * w \quad (13)$$

Diese Berechnungsmethode eignet sich für eine Abschätzung mit einer Ungenauigkeit von maximal 4%.

2.3.3 Sauerstoffbedarf

Im Brennstoff befinden sich Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel und Stickstoff, welche das Potenzial zur Oxidation mit Sauerstoff besitzen. Diese werden bei vollständiger Verbrennung zu CO_2 , H_2O , SO_2 und NO bzw. NO_2 oxidiert. Kommen nach der Verbrennung noch brennbare Gase wie z.B. CO , H_2 , CH_4 und weitere höherwertige Kohlenwasserstoffe oder brennbare feste Stoffe vor, so wird die Verbrennung als unvollständig bezeichnet.

Tabelle 1 zeigt die chemischen Reaktionen von C, H_2 und S.

N wird bei der Verbrennungsrechnung nicht berücksichtigt, weil man nicht vorhersehen kann, wie N mit Sauerstoff bei der Verbrennung reagiert.

$$O_{2,min} = 2,67 * c + 8 * h + s - o \quad (14)$$

oder

$$O_{2,min} = 1,87 * c + 5,6 * h + 0,7 * s - 0,7 * o \quad (15)$$

| C | + | O ₂ | = | CO ₂ |
|--------|---|----------------------|---|----------------------|
| 1 kmol | | 1 kmol | | 1 kmol |
| 12 kg | | 32 kg | | 44 kg |
| 1 kg | | 2,67 kg | | 3,67 kg |
| 12 kg | | 22,41 m ³ | | 22,41 m ³ |
| 1 kg | | 1,87 m ³ | | 1,87 m ³ |

| 2 · H ₂ | + | O ₂ | = | 2 · H ₂ O |
|--------------------|---|----------------------|---|----------------------|
| 2 kmol | | 1 kmol | | 2 kmol |
| 4 kg | | 32 kg | | 36 kg |
| 1 kg | | 8 kg | | 9 kg |
| 4 kg | | 22,41 m ³ | | 44,82 m ³ |
| 1 kg | | 5,6 m ³ | | 11,2 m ³ |

| S | + | O ₂ | = | SO ₂ |
|--------|---|----------------------|---|----------------------|
| 1 kmol | | 1 kmol | | 1 kmol |
| 32 kg | | 32 kg | | 64 kg |
| 1 kg | | 1 kg | | 2 kg |
| 32 kg | | 22,41 m ³ | | 22,41 m ³ |
| 1 kg | | 0,7 m ³ | | 0,7 m ³ |

Tabelle 1: Relevante chemische Reaktionen bei der Verbrennung [4]

2.3.4 Luftbedarf

Für die vollständige Verbrennung wird der Mindestluftbedarf L_{min} eingeführt. Dieser Wert geht aus der theoretisch erforderlichen Luftmenge für eine vollständige Verbrennung hervor.

1 kg Luft beinhaltet rund 0,232 kg Sauerstoff und 0,768 kg Stickstoff

1 Nm³ Luft setzt sich aus 0,21 Nm³ Sauerstoff und 0,79 Nm³ Stickstoff zusammen

Die Mindestluftmenge ist daher:

$$L_{min} = \frac{O_{2,min}}{0,21} \quad (16)$$

oder

$$L_{min} \approx 0,25 Nm^3 \text{ je } 1000kJ \text{ Heizwert} \quad (17)$$

Erfolgt eine genaue Rechnung, muss der Dampfgehalt der Luft in die Rechnung mit einfließen.

$$L_{min,f} = L_{min} * f \quad (18)$$

$$f = 1 + \varphi * \frac{p_s}{p - \varphi * p_s} \quad (19)$$

Die Variablen φ (relative Feuchte), p (Luftdruck) und p_s (Wasserdampfdruck der gesättigten Luft) sind die Grundlage für den Korrekturfaktor.

2.3.4.1 Tatsächlicher Luftbedarf (Luftüberschuß)

Um jedem brennbaren Molekül Sauerstoff (vollständige Durchmischung) zuführen zu können, ist mehr Luft erforderlich als theoretisch berechnet wurde. Nur so kann eine vollständige Verbrennung gewährleistet werden. Das Verhältnis von tatsächlich zugeführter zu theoretisch erforderlicher Luftmenge wird als Luftverhältniszahl λ bezeichnet.

$$\lambda = \frac{L}{L_{min}} \quad (20)$$

$$L = L_{min} * \lambda \quad (21)$$

Die Erfahrungswerte für einen möglichst geringen Luftüberschuß betragen:

| Feuerung | λ | Feuerung | λ |
|----------------------------|-----------|-----------------------------|------------|
| Planrost, handbeschickt | 1,7 – 2,0 | Kohlenstaub, Trockenkammern | 1,3 – 1,4 |
| Planrost, wurfbeschickt | 1,5 – 1,7 | Kohlenstaub, Schmelzkammern | 1,15 – 1,2 |
| Wanderrost, ohne Unterwind | 1,5 – 1,8 | Zyklonfeuerung | 1,1 – 1,2 |
| Wanderrost, mit Zonenwind | 1,3 – 1,6 | Ölfeuerung | 1,05 – 1,1 |
| Treppenrost, Schürrost | 1,3 – 1,5 | Gasfeuerung | 1,05 – 1,1 |

Tabelle 2: Erfahrungswertevergleich der Luftverhältniszahl anhand der verschiedenen Feuerungsprinzipien [4]

2.3.5 Abgas

Von Abgasen spricht man wenn die Verbrennungsgase bereits von Staub, Flugasche oder sonstigen Feststoffen (Ruß) gereinigt wurden. Ist dies noch nicht der Fall gewesen, so bezeichnet man die Verbrennungsgase als Rauchgas. Das Abgas enthält grundsätzlich CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 (NO und NO_2) sowie Schadstoffe und O_2 . Die gesamte feuchte Abgasmenge ergibt sich aus:

$$V_{A,f} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad (22)$$

Bei der chemischen Reaktion des Brennstoffes entsteht ein Teil dieser Bestandteile. Für die Ermittlung der Abgasbestandteile müssen folgende Zusammenhänge verwendet werden:

Die Wassermenge im Brennstoff ergibt sich aus $\frac{w}{18}$ in kmol $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$ Brennstoff

Die Stickstoffmenge der Luft mit $0,79 * \lambda * L_{\min}$

Der Sauerstoffüberschuß ist $0,21 * (L - L_{\min}) = 0,21 * (\lambda - 1) * L_{\min}$

Tabelle 3 erläutert die Ermittlung der Abgasbestandteile.

| | |
|--|--|
| $V_{CO_2} = 22,41 \cdot \frac{c}{12} = 1,87 \cdot c$ | $\left[\frac{Nm^3 CO_2}{kgBst} \right]$ |
| $V_{SO_2} = 22,41 \cdot \frac{s}{32} = 0,7 \cdot s$ | $\left[\frac{Nm^3 SO_2}{kgBst} \right]$ |
| $V_{H_2O} = 22,41 \cdot \left[\frac{h}{2} + \frac{w}{18} \right]$ | $\left[\frac{Nm^3 H_2O}{kgBst} \right]$ |
| $V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{min}$ | $\left[\frac{Nm^3 O_2}{kgBst} \right]$ |
| $V_{N_2} = 0,79 \cdot \lambda \cdot L_{min}$ | $\left[\frac{Nm^3 N_2}{kgBst} \right]$ |

Tabelle 3: Ermittlung der Abgasbestandteile [4]

Aus Tabelle 3 können in weiterer Folge die Mindestabgasmenge, die trockene Abgasmenge und die feuchte Abgasmenge berechnet werden.

$$V_{min,tr} = 1,87 \cdot c + 0,7 \cdot s + 0,79 \cdot L_{min} \quad (23)$$

$$V_{tr} = \lambda \cdot 0,79 \cdot L_{min} + 1,87 \cdot c + 0,7 \cdot s + 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{min} \quad (24)$$

$$V_{tr} = 1,87 \cdot c + 0,7 \cdot s + (\lambda - 0,21) \cdot L_{min} \quad (25)$$

$$V_f = V_{tr} + V_{H_2O} \quad (26)$$

$$V_f = V_{tr} + 11,2 \cdot h + 1,24 \cdot w \quad (27)$$

2.3.5.1 Zusammensetzung

Unter Voraussetzung vollständiger Verbrennung kann die Abgaszusammensetzung mit in Tabelle 4 angegebenen Formeln ermittelt werden.

| Abgaskomponente | Formel | Einheit |
|------------------|--|---------|
| CO ₂ | $\frac{1,87 \cdot c}{V_f} \cdot 100$ | % |
| O ₂ | $\frac{(\lambda - 1) \cdot 0,21 \cdot L_{min}}{V_f} \cdot 100$ | % |
| N ₂ | $\frac{\lambda \cdot 0,79 \cdot L_{min}}{V_f} \cdot 100$ | % |
| H ₂ O | $\frac{11,2 \cdot h + 1,24 \cdot w}{V_f} \cdot 100$ | % |
| SO ₂ | $\frac{0,7 \cdot s}{V_f} \cdot 100$ | % |

Tabelle 4: Ermittlung der feuchten Abgaszusammensetzung [4]

Analog wird die trockene Abgaszusammensetzung berechnet (siehe Tabelle 5). Der Bezug erfolgt auf die trockene Abgasmenge.

| Abgaskomponente | Formel | Einheit |
|------------------|---|---------|
| CO ₂ | $\frac{1,87 \cdot c}{V_{tr}} \cdot 100$ | % |
| O ₂ | $\frac{(\lambda - 1) \cdot 0,21 \cdot L_{min}}{V_{tr}} \cdot 100$ | % |
| N ₂ | $\frac{\lambda \cdot 0,79 \cdot L_{min}}{V_{tr}} \cdot 100$ | % |
| H ₂ O | $\frac{11,2 \cdot h + 1,24 \cdot w}{V_{tr}}$ | % |
| SO ₂ | $\frac{0,7 \cdot s}{V_{tr}} \cdot 100$ | % |

Tabelle 5: Ermittlung der trockenen Abgaszusammensetzung [4]

2.3.5.2 CO₂ Maximum

Ist das Abgas trocken und das Luftverhältnis $\lambda = 1$, so hat jeder Brennstoff bei vollständiger Verbrennung einen Höchstwert an Kohlendioxid, welcher sich aus folgender Formel ergibt:

$$CO_{2,max} = \frac{1,87 \cdot c}{V_{A,tr,min}} * 100 \quad (28)$$

Der Sauerstoffgehalt kann bei bekanntem CO_{2,max} und dem CO₂-Gehalt im Abgas bestimmt werden.

$$O_2 = 21 * \frac{CO_{2,max} - CO_{2,gem}}{CO_{2,max}} \quad (29)$$

Will man aus CO_{2,max} und CO_{2,gem} das Luftverhältnis eruiieren, so gilt die Beziehung 30:

$$\lambda = \frac{CO_{2,max}}{CO_{2,gem}} \quad (30)$$

2.3.5.3 Taupunkt der Abgase

Jedes Abgas enthält Wasserdampf, welcher bei Unterschreiten des Taupunktes zu kondensieren beginnt. Diese Feuchtigkeit kann bei entsprechendem Gehalt an z.B. Schwefeldioxid zu Korrosion an den Heizflächen bzw. Wärmetauscherflächen führen. Abhilfe schafft eine Erhöhung der Abgastemperatur und/oder der Temperatur an den Heizflächen über die Taupunkttemperatur der kondensierbaren Bestandteile des Abgases. Es ergeben sich Abhängigkeiten von der Art des Brennstoffes und dem Luftüberschuß. Mit steigendem Schwefelgehalt im Brennstoff steigt auch der Taupunkt an.

Wassertaupunkt

Zur Ermittlung des Taupunktes wird zuerst die Wassermenge im Abgas ermittelt.

$$V_{H_2O} = 11,2 * h + 1,24 * w \quad (31)$$

Weiters erhält man aus

$$p_0 = p_A * \frac{V_{H_2O}}{V_f} = p_A * \frac{V_f - V_{tr}}{V_f} \quad (32)$$

den dem Volumenanteil proportionalen Wasserdampfdruck.

Zu guter Letzt liest man die Sättigungstemperatur, welche dem Taupunkt entspricht, aus der Wasserdampf tafel (Tabelle 6) ab.

Alternativ kann der Wassergehalt des Abgases auch folgendermaßen berechnet werden.

$$X_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{V_f} \quad (33)$$

Die Sättigungstemperatur kann entweder aus Tabelle 6 oder aus den Abbildungen 3 und 4 unter Berücksichtigung der Einheiten abgelesen werden.

| t °C | p'' mbar | x'' g/kg | t °C | p'' mbar | x'' g/kg |
|---------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|
| 0 | 6,11 | 3,82 | 35 | 56,22 | 37,05 |
| 1 | 6,56 | 4,11 | 36 | 59,40 | 39,28 |
| 2 | 7,05 | 4,42 | 37 | 62,74 | 41,64 |
| 3 | 7,57 | 4,75 | 38 | 66,24 | 44,12 |
| 4 | 8,13 | 5,10 | 39 | 69,91 | 46,75 |
| 5 | 8,72 | 5,47 | 40 | 73,75 | 49,52 |
| 6 | 9,35 | 5,87 | 41 | 77,77 | 52,45 |
| 7 | 10,01 | 6,29 | 42 | 81,98 | 55,64 |
| 8 | 10,72 | 6,74 | 43 | 86,39 | 58,82 |
| 9 | 11,47 | 7,22 | 44 | 91,00 | 62,26 |
| 10 | 12,27 | 7,73 | 45 | 95,82 | 65,92 |
| 11 | 13,12 | 8,27 | 46 | 100,85 | 69,76 |
| 12 | 14,01 | 8,84 | 47 | 106,12 | 73,84 |
| 13 | 15,00 | 9,45 | 48 | 111,62 | 78,15 |
| 14 | 15,97 | 10,10 | 49 | 117,36 | 82,70 |
| 15 | 17,04 | 10,78 | 50 | 123,35 | 87,52 |
| 16 | 18,17 | 11,51 | 51 | 128,60 | 92,62 |
| 17 | 19,36 | 12,28 | 52 | 136,13 | 98,01 |
| 18 | 20,62 | 13,10 | 53 | 142,93 | 103,73 |
| 19 | 21,96 | 13,97 | 54 | 150,02 | 109,80 |
| 20 | 23,37 | 14,88 | 55 | 157,41 | 116,19 |
| 21 | 24,85 | 15,85 | 56 | 165,09 | 123,00 |
| 22 | 26,42 | 16,88 | 57 | 173,12 | 130,23 |
| 23 | 28,08 | 17,97 | 58 | 181,46 | 137,89 |
| 24 | 29,82 | 19,12 | 59 | 190,15 | 146,04 |
| 25 | 31,67 | 20,34 | 60 | 199,17 | 154,72 |
| 26 | 33,60 | 21,63 | 65 | 250,10 | 207,44 |
| 27 | 35,64 | 22,99 | 70 | 311,60 | 281,54 |
| 28 | 37,78 | 24,42 | 75 | 385,50 | 390,20 |
| 29 | 40,04 | 25,94 | 80 | 473,60 | 559,61 |
| 30 | 42,41 | 27,52 | 85 | 578,00 | 851,90 |
| 31 | 44,91 | 29,25 | 90 | 701,10 | 1459,00 |
| 32 | 47,53 | 31,07 | 95 | 845,20 | 3396,00 |
| 33 | 50,29 | 32,94 | 100 | 1013,00 | |
| 34 | 53,18 | 34,94 | | | |

Tabelle 6: Auszug aus der Wasserdampf-tafel gesättigter Luft bei 1000mbar [4]

Je höher Wasser- und Wasserstoffgehalt eines Brennstoffes sind, desto höher ist auch der Taupunkt der Abgase. Die Unterschiede bewegen sich in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftüberschuß zwischen 30 und 70°C (siehe Abbildung 4).

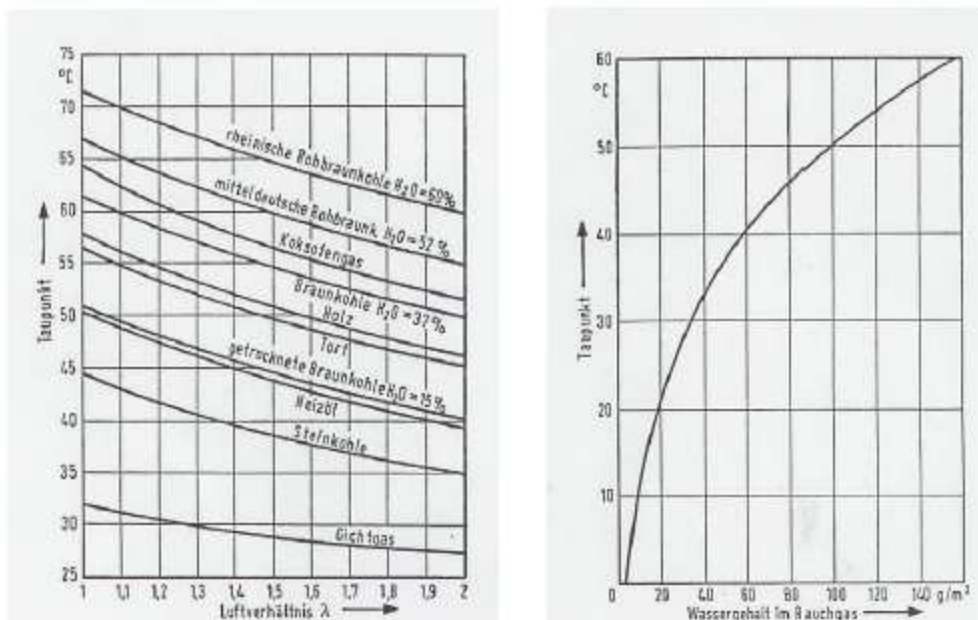


Abbildung 3: Abhängigkeit des Brennstoffes und des Luftüberschuß auf den Taupunkt (links) [4]

Abbildung 4: Sättigungstemperatur in Korrelation zum Wassergehalt im Abgas (rechts) [4]

Säuretaupunkt

Der Säuretaupunkt hängt vom Partialdruck des SO_3 im Rauchgas ab. Je mehr SO_3 im Rauchgas vorhanden ist, desto höher liegt der Taupunkt. Die Abgastemperatur sollte möglichst nicht unter 150°C (maximal 120°C) liegen.

Der Säuretaupunkt ist schwieriger zu bestimmen als der Wassertaupunkt. Deshalb nimmt man zur Bestimmung Diagramme zu Hilfe (siehe Abbildung 5). Die Bildung von Schwefelsäure geschieht in Abhängigkeit vom Brennstoff und dem daraus resultierenden SO_2 -Gehalt im Rauchgas. Typische Umwandlungsraten von SO_2 zu SO_3 betragen 0,5 bis 1%.

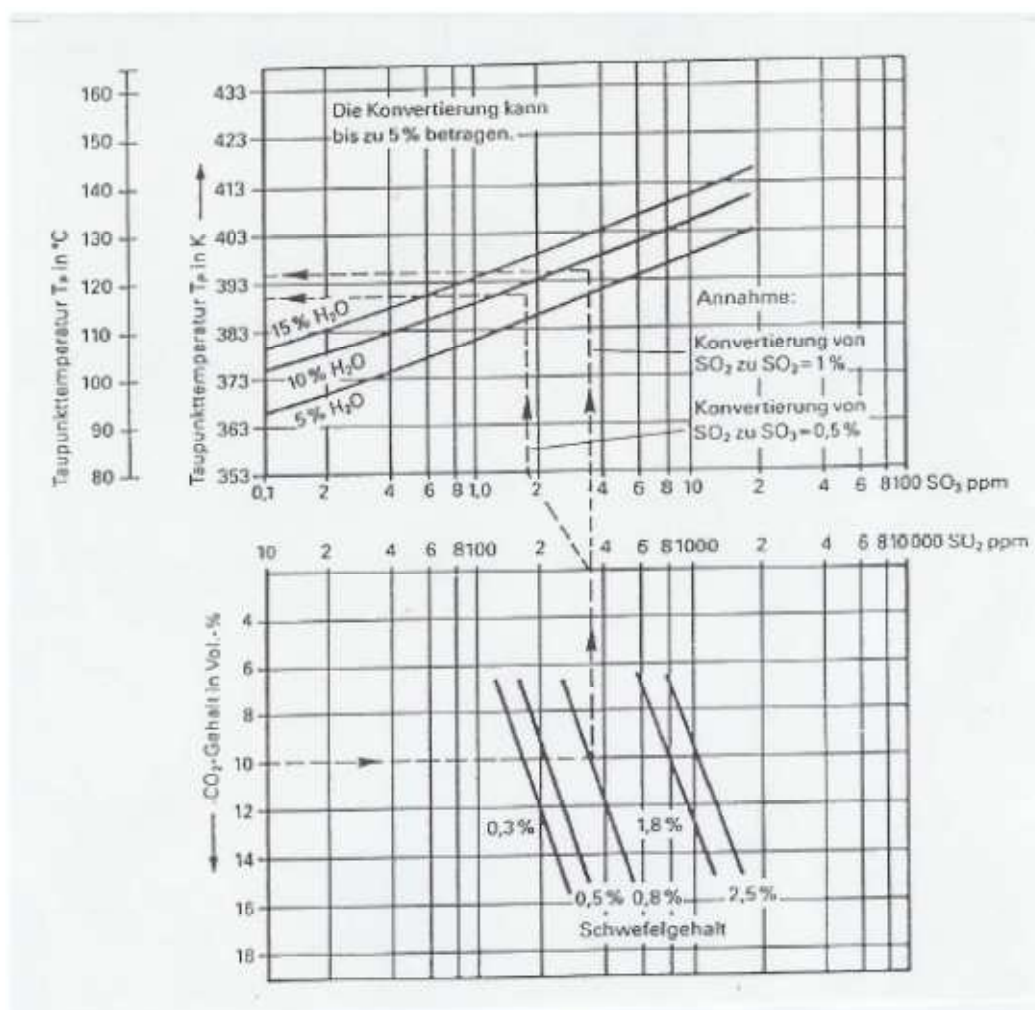


Abbildung 5: Diagramme zur einfachen Ermittlung des Säuretaupunktes [4]

Wird der Säuretaupunkt unterschritten, so kommt es an den Heizflächen zur Kondensation von Schwefelsäure und somit zu Korrosion. Praktisch lässt sich die Korrosion nicht vollständig vermeiden, jedoch halten sich die Auswirkungen in Grenzen. Kommt es allerdings zum Unterschreiten des Wassertaupunktes, so wird die Schwefelsäure verdünnt und die Neigung zu Korrosion an den Heizflächen nimmt stark zu [4].

3 Biomasseverbrennungsanlagen

3.1 Arten

Es werden drei Grundtypen von Biomasseanlagen unterschieden. Diese Grundtypen werden Rost-, Wirbelschicht- bzw. Flugstromfeuerungen genannt. Anschließend wird ein Überblick über diese Grundtypen gemacht, um ein besseres Verständnis für die Unterschiede der konkurrierenden Grundtypen zu bekommen.

Dabei liegt der wesentliche Unterschied in der Gasgeschwindigkeit der zur Verbrennung benötigten Luft. Der Einfachheit halber zeigt Abbildung 6 den Druckverlust in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit.

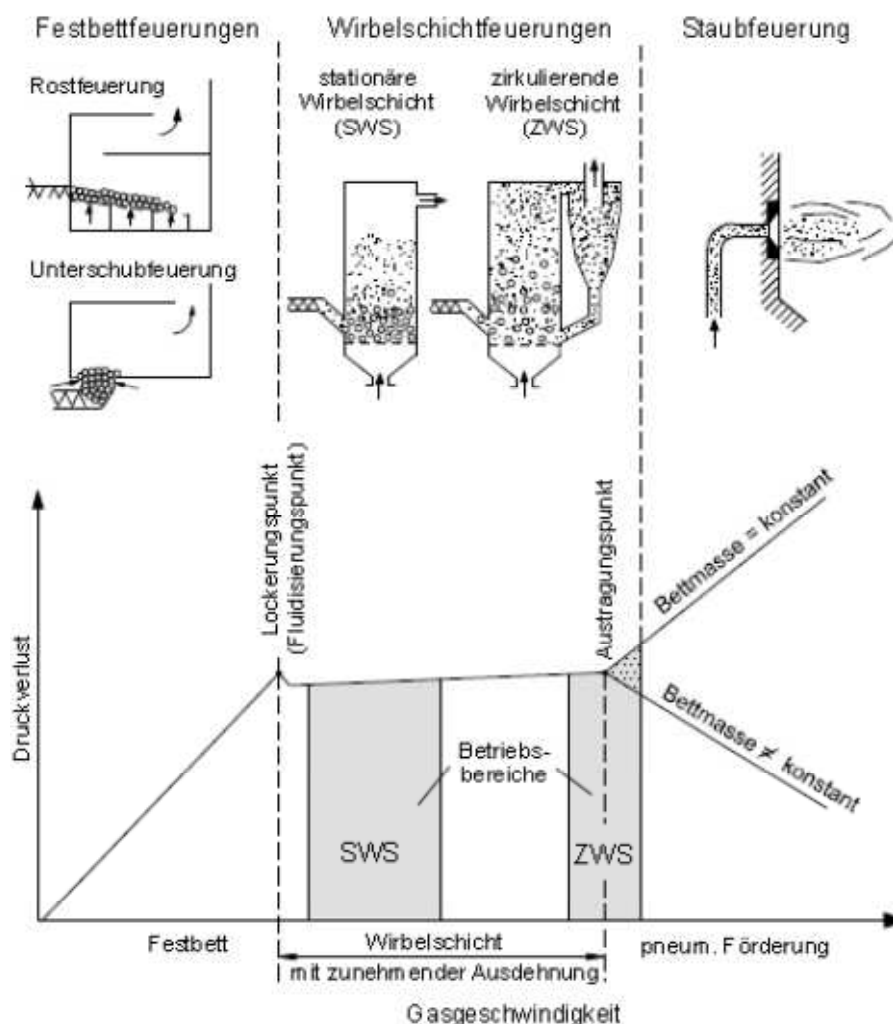


Abbildung 6: Einteilung von Feuerungen nach zunehmender Gasgeschwindigkeit [5]

Bei niedriger Anströmgeschwindigkeit durch die Verbrennungsluft wird das Brennstoffbett nur durchströmt, ohne dass es sich auflockert oder angehoben wird. Diesen Zustand

bezeichnet man als Festbett. Der Druckabfall ist beim Durchströmen des Brennstoffbettes mittels Luft zunächst gering, steigt aber mit zunehmender Gasgeschwindigkeit stetig an. Typen solcher Feuerungen sind beispielsweise die Unterschub- oder Rostfeuerung.

Wird die Gasgeschwindigkeit weiter erhöht, erreicht man den sogenannten Lockerungspunkt. In diesem Punkt werden die Brennstoffpartikel und das Bettmaterial (z.B. Quarzsand) aufgelockert und angehoben. Im Bereich der stationären Wirbelschicht (SWS) werden beide (Brennstoffpartikel und Bettmaterial) in der Schwebelage gehalten.

Erhöht man die Gasgeschwindigkeit noch weiter, so kommt es zu einer teilweisen Partikelaustragung aus dem Brennraum. Daher wird eine Rückführung der Brennstoffpartikel und des Bettmaterials notwendig. Charakteristisch für dieses System ist der nahezu konstante Druckabfall über einen weiten Bereich der Gasgeschwindigkeit. In der Wirbelschicht werden meist Zuschlagstoffe dem Brennstoff beigemischt. In einem Fall ergibt die Beimischung von Kalk eine Reduktion von Schwefel-Emissionen im Rauchgas, zum anderen stabilisiert Quarzsand die Temperatur im Brennraum.

Werden alle Partikel mit dem Gasstrom transportiert, so wird der Austragungspunkt überschritten und es erfolgt eine Umsetzung des Brennstoffes im Flugstrom. Diese Art wird als Staubfeuerung bezeichnet.

Die erwähnten Feuerungsprinzipien arbeiten mit verschiedenen Brennstoffeigenschaften und in verschiedenen Leistungsbereichen. In der Praxis sind Rostfeuerungen in einem weiten Leistungsbereich (siehe Tabelle 7) und in den unterschiedlichsten Ausführungsformen anzutreffen.

Bei Wirbelschichtfeuerungen ist man lediglich vom Ascheschmelzverhalten des Brennstoffes in der Flexibilität eingeschränkt. Sie werden bei großen Leistungen vermehrt eingesetzt.

Staubfeuerungen werden entweder nur bei trockenem und feinkörnigem Brennstoff oder zur Zufeuerung bei Kraftwerken genutzt.

Die Ausführung von Rostfeuerungen hängt sehr stark vom eingesetzten Brennstoff ab, da die unterschiedlichen Brennstoffe der Biomasse (z.B. Sägespäne, Rinde, Hackschnitzel) spezielle konstruktive Lösungen erfordern, um den verwendeten Brennstoff optimal umsetzen zu können.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Feuerungsprinzipien mit ihren üblichen Leistungsgrößen inklusive Asche- und Wassergehalt.

| Typ | Leistungsbereich | Brennstoffe | Wassergehalt in % FM |
|---|--|---|----------------------|
| <i>Festbettfeuerungen</i> | | | |
| Unterschubfeuerung | 10 kW – 2,5 MW | Hackschnitzel mit Aschegehalt bis 1 % und Pellets | 5 – 50 |
| Feuerungen mit seitlichem Einschub | 50 kW – 60 MW | alle Holzbrennstoffe, Aschegehalt bis 50 % | 5 – 60 |
| Abwurfteuerung | 6 kW – 60 kW | Pellets | bis 20 |
| <i>Wirbelschichtfeuerungen</i> | | | |
| Stationäre Wirbelschichtfeuerung (SWS) | 5 MW – 50 MW | alle Brennstoffe mit Ascherweichung > 1 000 °C, Partikeldurchmesser unter 100 mm | 5 – 60 |
| Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (ZWS) | 30 MW – 100 MW | alle Brennstoffe mit Ascherweichung > 1 000 °C, Partikeldurchmesser unter 60 mm | 5 – 60 |
| <i>Staubfeuerungen</i> | | | |
| Einblasfeuerungen | 0,5 – 10 MW | Partikeldurchmesser 1 – 4 mm | < 20 |
| Staubbrenner zur Zufeuerung in mit fossilen Brennstoffen gefeuerten Kraftwerken | gesamt: 0,1 – 1 GW, max. ca. 10 % Biomasseanteil | Holz: Partikeldurchmesser < 2 – 4 mm; Stroh: Partikeldurchmesser unter 6 mm; Miscanthus: Partikeldurchmesser unter 4 mm | meist < 20 |

Tabelle 7: Gegenüberstellung der wichtigsten Bauarten von Biomassefeuerungen (Aschegehalt bezogen auf Trockenmasse (TM); Frischmasse (FM)) [5]

Folgend wird nur mehr auf die Festbettfeuerungen näher eingegangen, da sich die Arbeit speziell mit diesem Prinzip auseinandersetzen wird [5].

3.1.1 Festbettfeuerungen

Die Festbettfeuerungen können in drei Grundtypen eingeordnet werden: die Unterschubfeuerung, die Feuerung mit seitlichem Einschub und die Abwurfteuerung.

Prinzipiell wird bei der Unterschubfeuerung der Brennstoff über eine Schnecke von unten in die Feuermulde (Retorte) eingeschoben. Zusätzlich wird ein Teil der Primärluft, welche auch ein Teil der Verbrennungsluft ist, in die Retorte eingeblasen, um den Brennstoff zu trocknen, um in weiterer Folge die Vergasung des Brennstoffes zu ermöglichen. Die dabei entstandenen Gase werden mit Hilfe der Sekundärluft vollständig verbrannt. Danach geben die Heizgase Wärme an den Wärmetauscher ab und gelangen abschließend über Rauchgaskanäle und den Kamin in die Atmosphäre. Dieser Typ kann aschearme, feinkörnige Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 5 bis 50% verbrennen. Auch die Verbrennung von Holzpellets greift vorwiegend auf dieses System zurück.

Es ist nicht möglich, Halmgutbrennstoffe oder Rinde mittels Unterschubfeuerung zu verbrennen. Also werden diese Arten durch Feuerungen mit seitlichem Einschub umgesetzt. Hierbei wird der Brennstoff von der Seite in den Feuerraum eingebracht, welcher entweder

mit oder ohne Rost ausgeführt sein kann. Besteht der Brennstoff aus kleinen Kantenlängen mit relativ gleichbleibender Korngröße, so transportiert eine Schnecke den Brennstoff in die Feuerung. Grobkörnige und ungleichmäßig geformte Brennstoffe lassen sich wesentlich leichter mit einem Kolben einschieben. Bei Feuerungen mit Leistungen unter 100kW reicht im Feuerraum ein starrer Rost völlig aus, wohingegen bei Leistungen über 100kW ein bewegter Rost (Vorschubrost, Walzenrost, usw.) von Vorteil ist.

| Prinzip | Variante | Typ | Schema | Nennwärmeleistung | Brennstoffe |
|---|------------------------------------|--|--------|-----------------------|---|
| Feuerungen mit seitlichem Einschub (Schnecke/ Kolben) | Unterschubfeuerung | | | ab 10 kW (bis 2,5 MW) | Holzhackschnittzel, Holzpellets |
| | als Rostfeuerung | starrer Rost, z.T. mit Ascheräumer oder Kipprost | | ab 35 kW | Holzhackschnittzel, Holzpellets |
| | | bewegter Rost (Vorschubrost) | | ab 15 kW bis 60 MW | Holzhackschnittzel, Holzpellets, Späne, Rinde |
| | | Walzenrostfeuerung | | ab 40 kW bis 450 kW | Holzhackschnittzel, Holzpellets |
| | als Schubbodenfeuerung (ohne Rost) | | | ab 25 kW bis 800 kW | Holzhackschnittzel, Holzpellets (> 15 kW) Halmgut, Körner (bei Wasserkühlung) |
| Abwurf- feuerung | mit Rost | Kipprostfeuerung | | ab 15 kW bis 30 kW | Holzpellets, evtl. Präzisionshackgut |
| | | Schalenbrenner | | ab 6 kW bis 30 kW | Holzpellets |
| | ohne Rost | Tunnelbrenner | | ab 10 kW | Holzpellets |
| | | Sturzbrandbrenner | | ab 14 kW bis 60 kW | Holzpellets, Scheitholz, Holzhackschnittzel (ab 20 kW) |

Abbildung 7: Festbettfeuerungen nach ihrer systematischen Einteilung [5]

Die rostlose Schubbodenfeuerung funktioniert ähnlich wie die Unterschubfeuerung. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Brennmulde wassergekühlt auszuführen, was speziell

für aschereiche und zur Verschlackung neigende Brennstoffe von Vorteil ist (Halmgut, Körner, etc.).

Bei Feuerungen mit Rost und seitlichem Einschub wird zur Kühlung des Rostes auch ein Teil der Primärluft verwendet. Mit steigenden Leistungen muss aber die Kühlung mit Wasser erfolgen, da die thermische Belastungsfähigkeit des Rostmaterials sonst an seine Grenzen stoßen würde.

Die Sekundärluft wird entweder oberhalb des Rostes bzw. des Glutbettes oder vor Eintritt in die Nachbrennkammer zugeführt [5].

Nach dieser groben Einführung in die Grundtypen der Festbettfeuerungen handeln die folgenden Punkte von den speziellen Formen der Hackgut- und Rindenfeuerungen. Weiters wird die Vorschubfeuerung ausführlich behandelt.

3.1.1.1 Hackgut- und Rindenfeuerungen

Im Bereich von kleinen und mittleren Leistungen (< 15 MW) kommen durchwegs Unterschubfeuerungen oder Rostfeuerungen von unterschiedlicher Bauart zum Einsatz. Ab Leistungen von 15MW werden auch vermehrt Wirbelschichtfeuerungen realisiert.

Es gibt sehr viele Möglichkeiten, Unterschub- oder Rostfeuerungen zu bauen. Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die Bauarten, den Leistungsbereich, die Brennstoffe und den Wassergehalt in der Frischmasse.

| Typ | Leistungsbereich | Brennstoffe | Wassergehalt in % FM |
|---|------------------|--|----------------------|
| Unterschubfeuerung | 10 kW – 2,5 MW | Holzhackschützel mit Aschegehalt bis 1 % | 5 – 50 |
| Vorschubrostfeuerung | 150 kW – 60 MW | alle Holzbrennstoffe, Aschegehalt bis 50 % | 5 – 60 |
| Unterschubfeuerung mit rotierendem Rost | 2 MW – 5 MW | Hackschützel mit hohem Wassergehalt, Aschegehalt bis 5 % | 40 – 65 |
| Vorofenfeuerung mit Rost | 20 kW – 1,5 MW | trockere Holzhackschützel, Aschegehalt bis 5 % | 5 – 35 |
| Feuerung mit Wurfbeschickung | 500 kW – 50 MW | feines Hackgut | bis 40 |
| Feuerung mit Rotationsgebläse | 80 – 540 kW | Pellets, Sägemehl, Hackschützel | bis 40 |

Tabelle 8: Beispiele für wichtige Bauarten automatisch beschickter Hackgut- und Rindenfeuerungen im kleinen und mittleren Leistungsbereich (Aschegehalt bezogen auf Trockenmasse (TM); FM Frischmasse) [5]

Vorschubrostfeuerungen

Bei diesem Typ von Rostfeuerung wird der Brennstoff auf einen horizontalen oder leicht schräg stehenden Rost aufgetragen. Weitere Bauarten sind Planroste, Treppenroste, Wanderroste und Walzenroste. Wie schon zuvor erwähnt, kann der Brennstoff bei kleinen Kantenlängen und gleich bleibenden Korngrößen mittels Schnecke in den Brennraum eingebracht werden. Bei großen Kantenlängen und grobkörnigen, ungleichmäßigen Korngrößen ist es besser, die Variante des Kolbenbeschickers zu wählen.

Die Rostelemente werden vorwärts und rückwärts bewegt, um den Brennstoff weiter zu transportieren und um die Schürung und Umwälzung des Brennstoffes zu ermöglichen. So werden annähernd gleichmäßige Bedingungen erreicht.

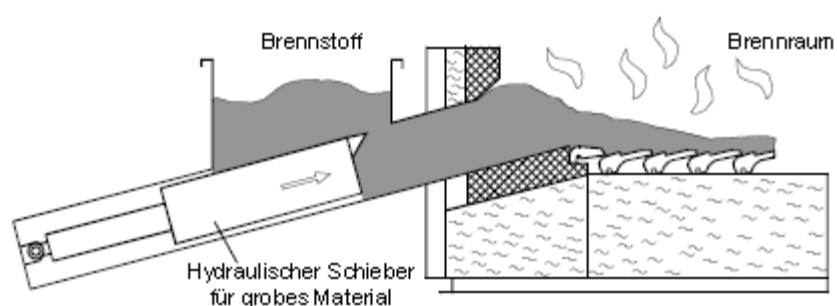


Abbildung 8: Funktionsweise einer Kolbenbeschickung [5]

Die Kühlung des Rostes wird bei größeren Anlagen und aus feuerungstechnischer Sicht nicht, wie bereits beschrieben, nur mit einem Teil der Primärluft durchgeführt, sondern durch

einen eigenen Wasserkreislauf bewerkstelligt. Dadurch wird verhindert, dass es zu Schlackenbildung oder einer Überhitzung des Rostes kommen kann.

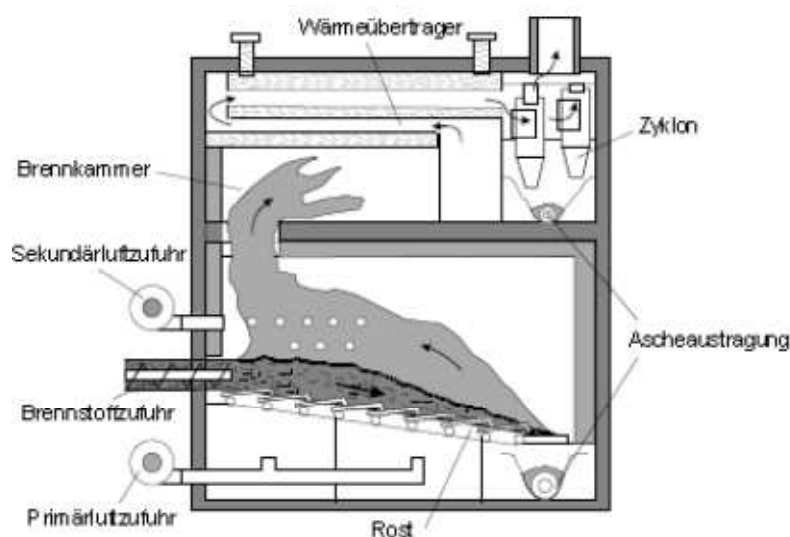


Abbildung 9: Vorschubrostfeuerung nach dem Gegenstromprinzip (für nasse Brennstoffe geeignet) [5]

Je nach Bewegungsrichtung des Brennstoffes und der Brenngase kann man drei Typen unterscheiden. Zu ihnen zählen das Gegenstromprinzip mit Umkehrflamme (Abbildung 9), das Gleichstromprinzip (Abbildung 10 links) und das Mittelstromprinzip (Abbildung 10 rechts). Alle Arten haben ihre Vor- und Nachteile, welche natürlich auch sehr stark vom verwendeten Brennstoff abhängen.

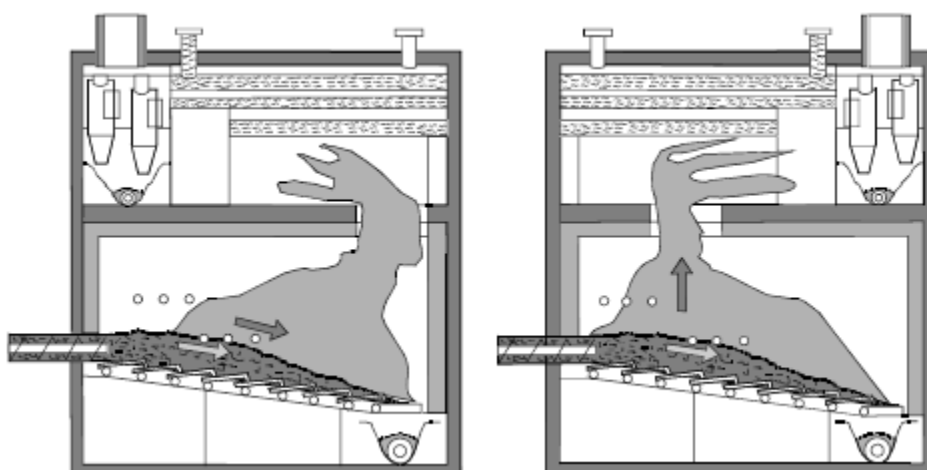


Abbildung 10: Vorschubrostfeuerungen nach dem Gleichstromprinzip (links) und nach dem Mittelstromprinzip (rechts) [5]

Für sehr feuchte Brennstoffe (bis zu 60% Wassergehalt) eignen sich am besten Feuerungen nach dem Gegenstromprinzip, da der Brennstoff einer intensiven Vortrocknung in der oberen Rostzone unterzogen und somit das Wasser im Brennstoff verdampft wird.

Ist der Brennstoff trocken, so eignet sich eine Feuerung nach dem Gleichstromprinzip. Hier können außerdem auch noch Brennstoffe mit einem niedrigen Ascheerweichungspunkt umgesetzt werden.

Das Mittelstromprinzip ist eine Mischung aus den beiden vorhergehenden Prinzipien. Man schließt daraus, dass sowohl feuchte als auch trockene Brennstoffe gleichermaßen verbrannt werden können. Praktisch werden im oberen Leistungsbereich (10 bis 60 MW) von namhaften Herstellern nur mehr solche Feuerungstypen gebaut, da sie auch abgastechnisch Vorteile aufweisen [5].

3.2 Verfahren zur NO_x-Reduktion

Die Maßnahmen zur NO_x-Reduktion werden in zwei Hauptarten unterteilt, welche primäre und sekundäre Maßnahmen genannt werden. Die primären Maßnahmen finden ihren Ansatz bei der Verbrennung von Brennstoffen. Im Gegensatz dazu befassen sich die sekundären Maßnahmen mit den Möglichkeiten der Reduktion im Abgas.

In Holzfeuerungen ist großteils mit NO_x-Emissionen aus dem Brennstoffstickstoff zu rechnen, da die Bildung von NO_x-Emissionen aus dem Stickstoff der Luft (thermisches NO_x < 10 mg/m³) und dem promptem NO_x (keine hohen Temperaturen) einen sehr geringen Einfluss auf die NO_x-Werte haben.

Aus experimentellen Versuchen konnten drei Haupteinflussgrößen für die Bildung von NO_x bestätigt werden:

- Mit steigendem Stickstoffgehalt steigt der Gehalt an NO_x-Emissionen im Abgas bei einer konventionellen Verbrennung. Die große Schwankungsbreite der Emissionen aus Abbildung 11 ist auf nicht bekannte Faktoren wie z.B. die Nennleistung zurückzuführen.
- Der Sauerstoffgehalt im Feuerraum und der Ausbrandzone hat großen Einfluss auf die Bildung von Stickstoffemissionen. Ist der Sauerstoffgehalt höher, so wird auch die Bildung von Stickstoffoxidemissionen begünstigt.
- Die Ausbrandqualität oder der CO-Gehalt, welche(r) wiederum unter anderem durch die Temperatur und den O₂-Gehalt im Abgas beeinflusst wird, hat nur eine untergeordnete Rolle bei der Bildung von Stickstoffemissionen.

Zusätzlich zu den Haupteinflussgrößen gibt es noch weitere Größen, die die Bildung von NO_x begünstigen oder vermindern bzw. rückwandeln. Es wurde beobachtet, dass im Teillastbetrieb (niedrigere Feuerraumbelastung) eine Verminderung von Stickstoffemissionen in der Größenordnung von rund 20 bis 50 % stattfindet.

Eine Homogenisierung des Brennstoffbettes auf dem Rost beeinflusst ebenfalls die Bildung von Stickoxiden. Die Werte werden tendenziell niedriger bei Feuerungen mit einem weitgehend homogenen Brennstoffbett. Die Art der Strömungsführung (Gleich-, Mittel- und Gegenstrom) hilft beim Abbau der Stickstoffverbindungen.

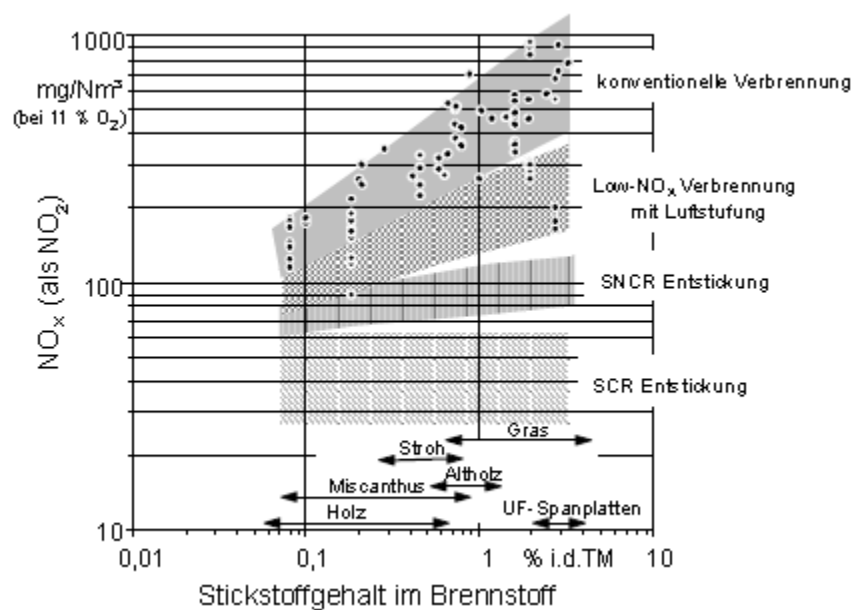


Abbildung 11: Stickstoffemissionen als Funktion des Brennstoffstickstoffgehalts für konventionelle Verbrennung, Low-NO_x-Verbrennung mit Luftstufung sowie Entstickung mit SNCR und SCR für die Brennstoffe Holz, UF-Spanplatten, Altholz, Gras, Stroh und Miscanthus (TM Trockenmasse, SCR Selektive katalytische NO_x-Reduktion, SNCR Selektive nicht katalytische NO_x-Reduktion) [5]

Die Primärmaßnahmen haben das Ziel, den Brennstoffstickstoff in molekularen Stickstoff (N₂) und eventuell bereits gebildetes NO_x ebenfalls in N₂ umzuwandeln. Dies geschieht am besten in einer reduzierenden Atmosphäre (unter Luftmangel), in der vor allem Reaktionen mit den Radikalen NH und CH sowie mit CO (Kohlenmonoxid) und festem C (Kohlenstoff) möglich sind. Lösungsvarianten wären einerseits die Luftstufung (siehe Kapitel 3.2.1) oder andererseits die Brennstoffstufung (Kapitel 3.2.2) [5].

Diese beiden zählen zu den wichtigsten Verfahren der Primärmaßnahmen und werden zusammen mit der Abgasrezirkulation folgend näher erörtert.

3.2.1 Luftstufung

Die Zufuhr von Verbrennungsluft in mindestens zwei Zonen wird als Luftstufung bezeichnet. Die Umwandlung zu molekularem Stickstoff (N₂) läuft nach den Formeln 4 und 5 unter unterstöchiometrischen Bedingungen ($\lambda < 1$) ab.

Unter idealen Bedingungen ist eine Minderung der NO_x-Emissionen bei naturbelassenem Holz von ca. 50% möglich. Bei UF-Spanplatten (erhöhter Stickstoffgehalt) ist sogar eine Reduktion von 75% machbar. Ideale Bedingungen setzen eine Reduktionskammer, in der möglichst hohe Temperaturen (1100 bis 1200°C) herrschen, voraus. Zusätzlich ist auch noch eine Verweilzeit um 0,5 Sekunden mit turbulenter Vermischung der Gase erforderlich.

Ohne Reduktionskammer ist immerhin noch eine Reduktion um rund die Hälfte der angegebenen Werte realistisch.

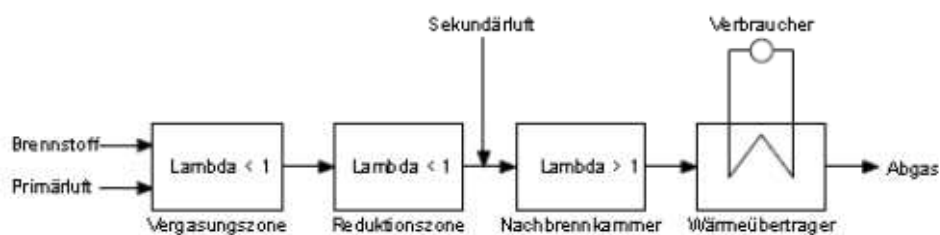


Abbildung 12: Prinzip der Luftstufung [5]

Die Primärluftzahl beeinflusst die NO_x -Reduktion wesentlich und sollte zwischen 0,7 und 0,8 liegen. Ist sie über 1,0, so werden bereits in der Vergasungszone die Zwischenprodukte zu NO oxidiert. Das bedeutet, dass in der Reduktionszone keine NH -Verbindungen mehr zur Reduktion von NO in N_2 zur Verfügung stehen. Ist die Primärluftzahl unter 0,7, so ist kaum NO in der Reduktionszone vorhanden. Es kann daher kein NO mittels NH -Verbindungen zu N_2 reduziert werden, sondern es werden NH -Verbindungen in der Nachbrennkammer zu NO oxidiert.

Diese engen Grenzen der Prozessregelung erfordern somit eine konsequente Regelung, die diese wichtigen Rahmenbedingungen zur NO_x -Reduktion sicherstellt. Um die Verbrennung mit minimalem Gesamtluftüberschuß bei gleichzeitiger Minderung des CO -Anstieges zu gewährleisten, kommt eine CO -Lambda-Regelung mit Sollwertoptimierung in Frage. Dies ist in der Praxis mehrfach von namhaften Wissenschaftlern beobachtet worden. Abbildung 13 zeigt eine Low- NO_x -Vorschubrostfeuerung mit horizontal angeordneter Reduktionskammer zur Luftstufung und Sekundärluftzugabe nach der Reduktionskammer.

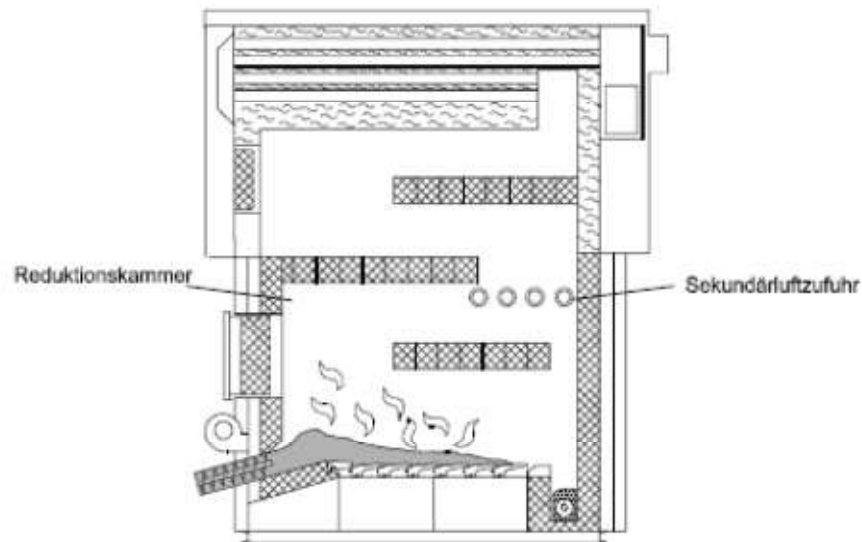


Abbildung 13: Low-NO_x-Vorschubrostfeuerung mit horizontal angeordneter Reduktionskammer zur Luftstufung und Sekundärluftzugabe nach der Reduktionskammer [5]

Auf Grund der geringfügig unter 1,0 liegenden Primärluftzahl kommt es in der Reduktionskammer zu sehr hohen Temperaturen (meistens über 1400°C). Die thermische Belastbarkeit der Bauteile stößt bei diesen Temperaturen an ihre Grenzen. Es kann zu Anbackungen und Schlackenbildung in der Reduktionszone kommen. Eine Temperaturabsenkung erfolgt mit Hilfe einer Abgasrezirkulation in die Primärzone. Weiters kann eine Verminderung der Feuerraumbelastung sowie eine partielle Wärmeabfuhr vor Eintritt der Gase in die Reduktionszone Abhilfe schaffen.

Für stark verschlackende Brennstoffe (bestimmte Restholzsortimente, Stroh, Gras, Miscanthus, usw.) kann die Luftstufung nur bedingt eingesetzt werden. Die erforderlichen hohen Temperaturen machen einen Betrieb ohne Nebeneffekt kaum möglich [5].

3.2.2 Brennstoffstufung

Bei der Brennstoffstufung wird der Hauptbrennstoff bei Luftüberschuß verbrannt. Anschließend wird der Zweitbrennstoff (z.B.: Erdgas, Eröl, Kohle, Holz) dem Abgas beigemischt und die Luftüberschußzahl wird kleiner 1,0. In dieser Reduktionszone werden die zuvor gebildeten Stickoxide mittels NH- und CH-Verbindungen aus dem Zweitbrennstoff idealerweise zu N₂ reduziert.

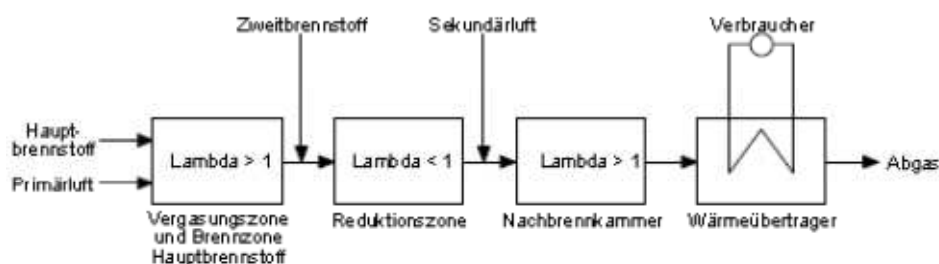


Abbildung 14: Prinzip der Brennstoffstufung [5]

Der Prozess der Brennstoffstufung ist im Gegensatz zur Luftstufung in einem weiteren Betriebsbereich durchführbar und somit einfacher zu beherrschen. Ein weiterer Vorteil der Brennstoffstufung liegt darin, dass die gebildeten Stickoxide bereits bei Temperaturen von 700 bis 800°C zu N_2 umgewandelt werden. Dabei liegt das Minderungspotential in derselben Größenordnung wie bei der Luftstufung, jedoch kommt es hier zu keinem Temperaturproblem. Abbildung 15 zeigt den schematischen Aufbau einer Brennstoffstufung.

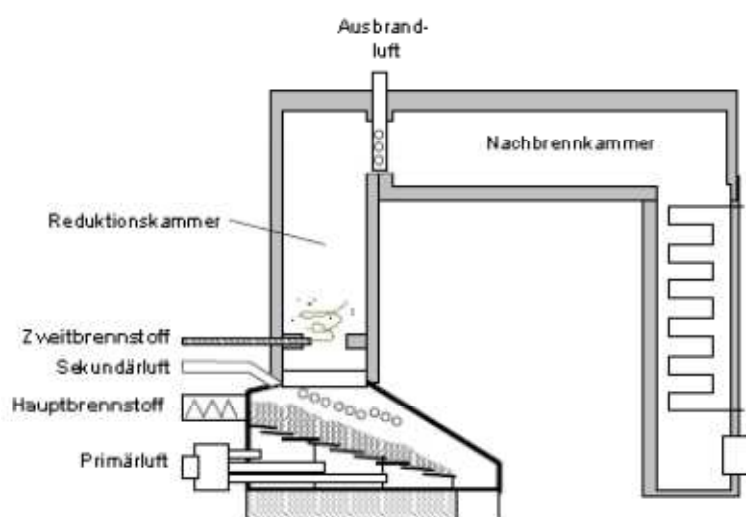


Abbildung 15: Anlagenkonzept der Brennstoffstufung für die Verbrennung von staubförmigen und stückigen Brennstoffen [5]

3.2.3 Abgasrezirkulation

Bei Öl- und Gasfeuerungen wird dieses Verfahren zur Reduzierung des thermischen NO_x verwendet. Dabei wird ein Teilstrom dem Abgas entnommen und der Primärluft beigemischt. Es wird die Flammtemperatur gekühlt und gleichzeitig der Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft vermindert. Als Folge ergibt sich eine Reduktion der Bildung von NO_x .

Bei Biomassefeuerungen gibt es diesen Effekt auch, er fällt aber nicht so drastisch aus wie bei Öl- und Gasfeuerungen. Durch die Rückführung der Abgase in den Feuerraum werden die Gase besser vermischt. Abbildung 16 zeigt die mögliche Verbesserung der CO - und NO_x -Emissionen bei Anwendung der Abgasrezirkulation.

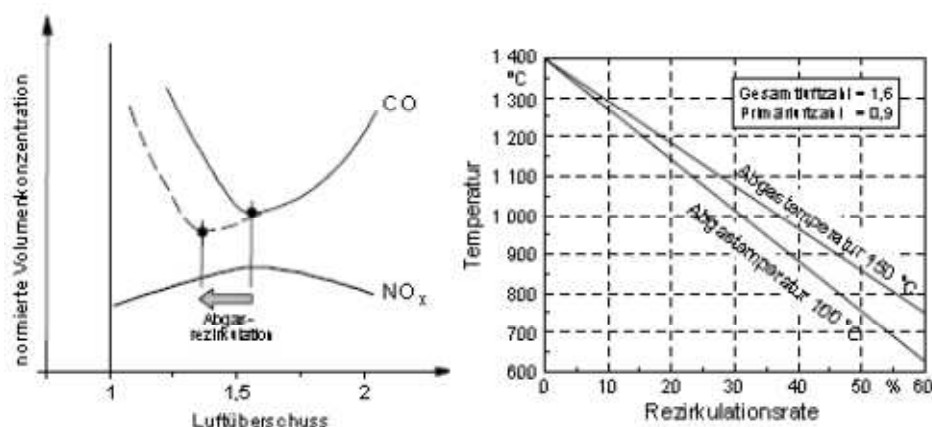


Abbildung 16: [Links] Einfluss der Abgasrezirkulation auf die CO- und NO_x-Emissionen bei Holzfeuerungen (durch die verbesserte Gasmischung im Brennraum ist ein Betrieb bei niedrigerem Luftüberschuß möglich, so dass die NO_x-Emissionen geringfügig vermindert werden können).

[Rechts] maximal erreichbarer Einfluss der Abgasrezirkulation auf die Verbrennungstemperatur (berechnete Werte unter idealen Bedingungen; der effektiv im praktischen Betrieb erzielbare Effekt ist geringer; die Rezirkulationsrate ist definiert als das Verhältnis des rezirkulierenden Abgases zu dem gesamten der Verbrennung zugeführten Verbrennungsvolumenstrom (d.h. der Summe aus rezirkuliertem Abgas und zugeführter frischer Verbrennungsluft) [5]

Das Brennstoff-NO_x wird durch diese Maßnahme geringfügig vermindert. Weiters kann damit auch die Temperatur bei der Luftstufung (Reduktionszone) besser kontrolliert werden [5].

Die beiden folgenden Verfahren zählen zu den sekundären Maßnahmen der NO_x-Reduktion. Sie werden in Funktion und Wirkungsweise näher beschrieben.

3.2.4 SNCR-Entstickung

Die Hauptreaktionen bei der SNCR-Entstickung (Selektive Nicht-Katalytische Reduktion) können bei Temperaturen von 850 bis 950°C ablaufen. Somit muss Ammoniak (NH₃) oder Harnstoff (CO(NH₂)₂) direkt in die Nachbrennkammer eingebracht werden (siehe Abbildung 17). Um eine befriedigende Entstickungswirkung erzielen zu können, muss überstöchiometrisch gearbeitet werden. In einer SNCR-Kammer mit statischem Mischer liegt das Molverhältnis bei 1,8 bis 2,2 für eine Harnstofflösung und für gasförmiges Ammoniak bei 1,5 bis 1,6.

Theoretisch sind bei einer Verweilzeit von 0,5 s für Ammoniak und 1,5 s für Harnstoff Entstickungsraten von 80 % möglich. Gleichzeitig liegt auch der Schlupf unter 10 mg/Nm³.

Der Schlupf ist dabei der Anteil des eingedüsten Reduktionsmittels, welcher ohne zu reagieren ins Abgas gelangt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 17 dargestellt.

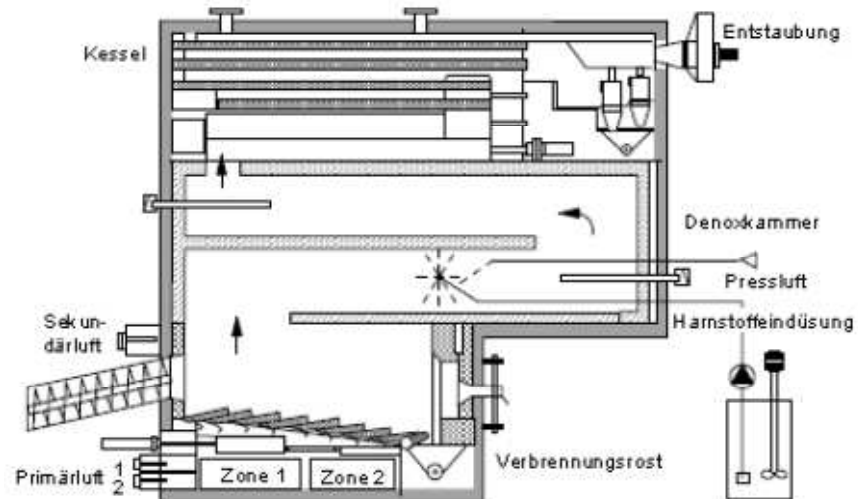


Abbildung 17: Vorschubrostfeuerung mit SNCR-Verfahren im Bereich von 250kW bis 4MW thermischer Leistung [5]

Die Hauptreaktionen beinhalten [6]:



In der Praxis wurde das optimale Temperaturfenster bei 840 bis 920 °C gefunden. Hier können die NO_x -Emissionen um 73 bis zu 92 % reduziert werden. Auch der Schlupf kann unter 30 mg/Nm³ gehalten werden. Nachteil des ganzen Verfahrens ist aber die Tatsache, dass der optimale Temperaturbereich sehr eng ist und dieser Bereich durch Lastwechsel der Feuerraumbelastung nur schwer einzuhalten ist [5].

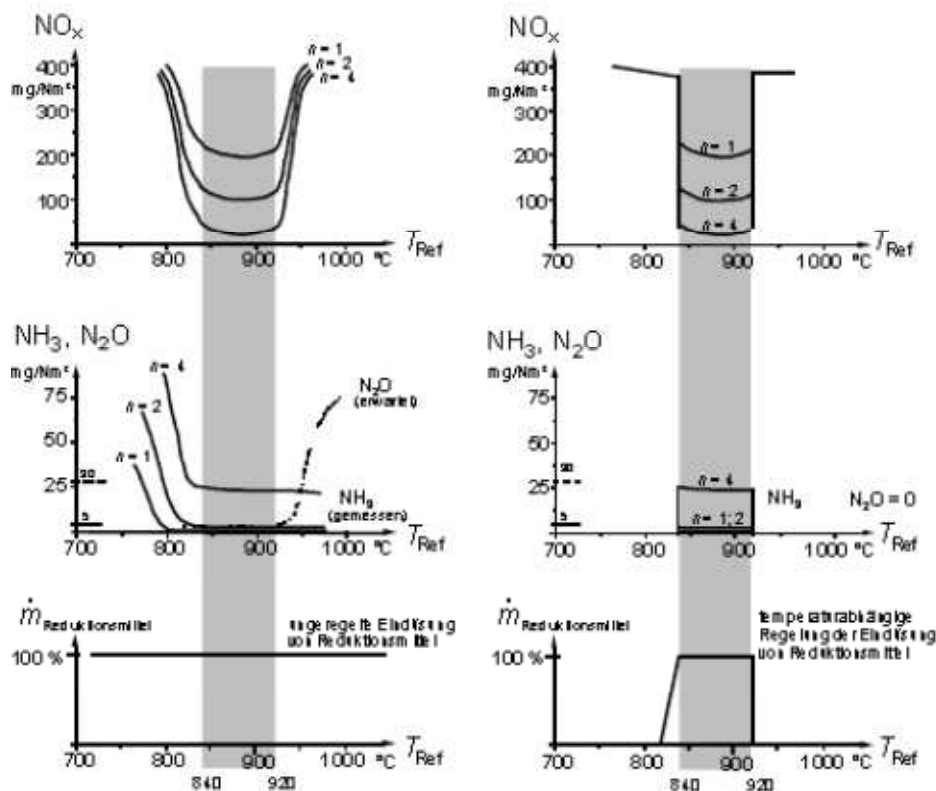


Abbildung 18: Emissionen an NO_x , NH_3 und N_2O sowie der Massenstrom des Reduktionsmittels in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Molverhältnisse (n) von 1, 2 und 4 (Brennstoff = Altholz; Luftüberschußzahl $\lambda = 2$; Verweilzeit = 1 s; Angaben bei 11 Vol.-% O_2) [Links] unregulierte Emissionen von Reduktionsmittel führt außerhalb des optimalen Temperaturfensters zu Ammoniak- und Lachgasemissionen [Rechts] durch temperaturgeregelte Emissionen von Reduktionsmittel können Ammoniak- und Lachgasemissionen vermieden werden (das optimale Temperaturfenster wurde hier zwischen 840 und 920 °C gefunden; da die Messung mittels Thermoelement erfolgte, ist die effektive Gastemperatur etwas höher) [5]

3.2.5 SCR-Entstickung

Grundsätzlich laufen bei der SCR-Entstickung (Selektive Katalytische Reduktion) dieselben Reaktionen wie bei der SNCR-Entstickung ab. Einziger Unterschied ist der Temperaturbereich (260 bis 400 °C), in dem die Reduktion abläuft. Ermöglicht wird dies durch die Verwendung von Katalysatoren, welche den Umsatz erhöhen und den Temperaturbereich erniedrigen. Es tritt hier jedoch das Problem auf, dass sich bei Biomassefeuerungen Katalysatorgifte entwickeln. Zu diesen zählen: Staubpartikel, welche den Katalysator verstopfen, Alkaliverbindungen und Schwermetalle.

Diese können zur Deaktivierung des Katalysators führen. Heutzutage kommen deshalb Plattenkatalysatoren anstatt der Wabenkatalysatoren zum Einsatz.

Bei knapp understöchiometrischer Zugabe von Ammoniak und bei Temperaturen von 260 °C kann ein Umsatz von 80 bis 95 % des im Abgas vorhandenen NO_x geschafft werden. Positiv zu erwähnen ist auch der niedrige Ammoniakverlust von 1 bis 5 mg/Nm³.

Ist der Brennstoff schwefelhaltig so muss die Reduktionstemperatur auf 310 bis 330 °C erhöht werden, um Ammoniumhydrogensulfat-Ablagerung ($(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$) gänzlich zu vermeiden.

Probleme treten vor allem bei Teillast auf, da in dieser Situation die Abgastemperatur nicht gehalten werden kann, und der optimale Temperaturbereich schnell über- bzw. unterschritten wird [5].

Das Prinzip einer katalytischen Rauchgasentstickungsanlage findet sich in Abbildung 19 wieder.

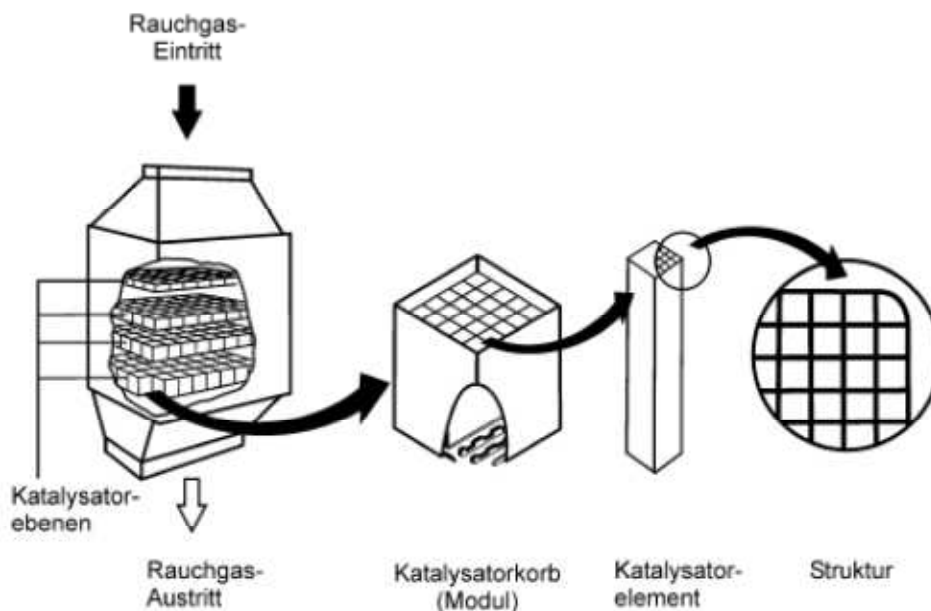


Abbildung 19: Prinzip einer katalytischen Rauchgasentstickungsanlage [6]

3.3 URBAS – Allgemeine Anlagenbeschreibung

Die Anlagen der Firma URBAS Maschinenfabrik Ges.m.b.H. werden als Vorschubrostfeuerungen im Gesamtleistungsbereich von 500 kW bis 25 MW ausgeführt.

Im Folgenden werden die betrachteten Anlagen, an denen der Iststand der NO_x-Emissionen messtechnisch erfasst wurde, genauer beschrieben. Diese nähere Beschreibung enthält Informationen über folgende Punkte:

- Brennstoff
- Brennstoffspezifikation
- Beschickungseinrichtung
- Brennraum und Kessel
- Wärmeübertragungsmedium
- Funktion der Kesselsteuerung
- Restsauerstoffregelung
- Rauchgasreinigung
- Entaschung
- Betriebszeiten
- Technische Daten der Feuerungen
- Technische Daten der Dampferzeuger
- Emissionswerte

Die Firma URBAS baut KWKen (Kraft-Wärme-Kopplungen), Prozessdampfkessel und Heißwasserkessel. Es werden folgend die Funktion und Wirkungsweise von KWKen und Heißwasserkessel beschrieben.

3.3.1 Kraft-Wärme-Kopplungen

Bei KWKen werden nahezu unabhängig voneinander Strom und Wärme erzeugt. Vom verfahrenstechnischen Standpunkt aus, wird der Brennstoff vom Freilager über eine ausgeklügelte Fördertechnik in den Feuerraum transportiert. Dort erfolgt der weitere Transport über den sogenannten Vorschubrost bei gleichzeitigem Einwirken von

Verbrennungsluft auf den Brennstoff zur Aschengosse. Der Ascheschieber übernimmt den Transport der Asche unter dem Rost zur Entaschung und trennt gleichzeitig den Feuerraum von der Entaschung. Die Entaschung fördert die Asche in einen Container, welcher nach einiger Zeit entleert werden muss.

Das im Feuerraum entstandene Abgas erfährt die Zugabe von Sekundärluft, manchmal sogar von Tertiärluft, um einen vollständigen Ausbrand der Rauchgase gewährleisten zu können. An die Feuerung anschließend befinden sich der Wärmetauscher oder Überhitzer (1,2 oder 3 Züge), der Luftvorwärmer, Economizer, Multizyklon, Elektrofilter und der Kamin. Die Wärmetauscher Luftvorwärmer und Economizer haben die Aufgabe, dem Abgas Wärme zu entziehen, um diese für den Prozess nutzen zu können.

Multizyklon und Elektrofilter dienen der Entstaubung des Abgases. Danach wird das Abgas auch Reingas (vorher Rohgas) genannt.

Die Wärme aus dem Prozess wird für eine Dampfturbine benötigt, die ihrerseits für die Stromproduktion verantwortlich ist. Aus der Dampfturbine kann auch ein Teilstrom entnommen werden, welcher für die Fernwärme genutzt werden kann.

3.3.1.1 HKW Klagenfurt (Österreich)

Die Anlage befindet sich im Süden von Klagenfurt im Industriegebiet der Sattnitz (Anm.: Fluss bei Klagenfurt). Sie ist zwar eine etwas ältere Anlage aus dem Jahr 2006, eignete sich aber für Testzwecke des Messprogramms und des Rauchgasanalysegerätes vor allem wegen der Nähe zu Völkermarkt. Die Eckdaten bzw. Spezifikationen beinhalten [12]:

Anlagenbild

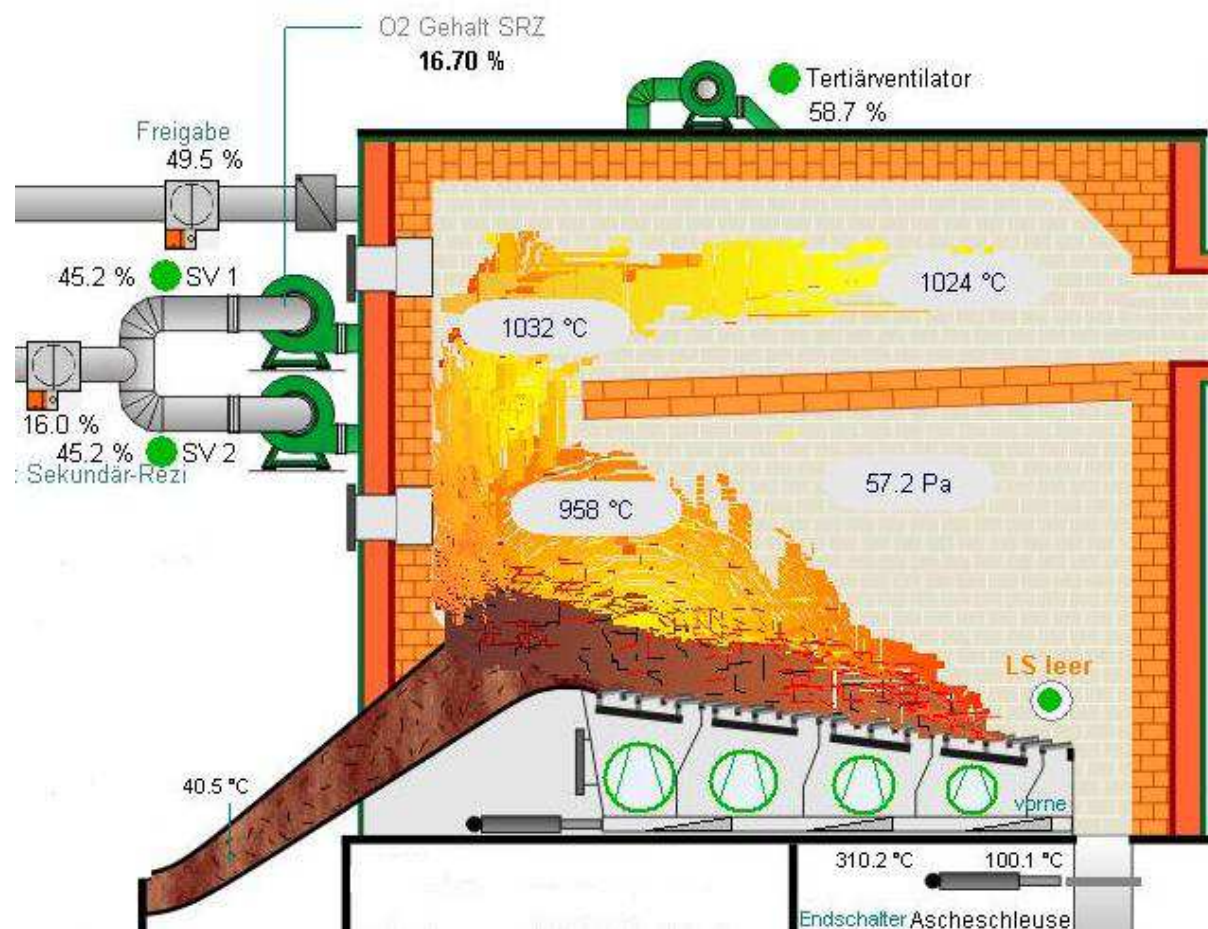


Abbildung 20: Anlagenbild HKW Klagenfurt (Österreich) [12]

Abbildung 20 zeigt die Feuerung einer der beiden Anlagen im HKW Klagenfurt. Auf dem Bild sind die Primärventilatoren 1 bis 4 (von links nach rechts), die Sekundärventilatoren 1 & 2 (SV 1 & SV 2) und der Tertiärventilator abgebildet. LS leer bedeutet, dass die Lichtschranke vor dem Abwurf zur Ascheschleuse nicht belegt ist. Sollte sie belegt sein, erfolgt die Anhebung der Drehzahl des Primärventilators 4, um einen eventuellen Abwurf glühender Asche auf die Ascheschleuse zu verhindern. Weiters wird der Einschub des Brennstoffes für die Dauer der Belegung der Lichtschranke unterbrochen.

Die drei Temperatursensoren sind an unterschiedlichen Stellen in der Feuerung montiert. Bei zu hoher Temperatur (ca. ab 1050°C) werden Maßnahmen zur Kühlung des Feuerraums getroffen.

Der Unterdruck in der Feuerung ist ebenfalls in Abbildung 20 angegeben und dient zur Kontrolle einer ausreichenden Zugfähigkeit.

Die Angabe O₂-Gehalt SRZ gibt den Restsauerstoffgehalt der Ansaugluft der Sekundärventilatoren an. Diese beziehen Luft aus der Rezirkulationsleitung der Anlage.

Die Rezirkulation des Reingases wird an nicht näher erläuterten Stellen im Feuerraum zugeführt.

Brennstoff

Als Brennstoff können Waldrestholz und dessen Koppelprodukte und Sägewerksrestholz mit einem Feinanteil (Späne – Wassergehalt < 35 m.-%) bis zu 5 m.-% verwendet werden. Weiters darf Holzwolle mit bis zu 5 m.-% der Gesamtbrennstoffmenge beigemischt werden.

Brennstoffspezifikation

| | | |
|------------------------|---|-----------------------|
| Standard Partikelgröße | = | G100 nach ÖNORM M7133 |
| Maximale Partikelgröße | = | 250mm x 50mm x 25mm |
| Wassergehalt | = | 30 bis 60 m.-% |
| Aschegehalt | = | < 5 m.-% |

Beschickungseinrichtung

Die Materialaustragung aus dem Silo erfolgt mit 10 schweren, hydraulisch betätigten Schubstangen, welche die stirnseitig montierten Trogkettenförderer bedienen.

Durch intervallweise Betätigung fördern die Trogkettenförderer (Anlage 1 und Anlage 2) mit Verteilförderbändern den Brennstoff über einen Fallschacht in den Schubsenderraum. Der hydraulisch betätigte Schubsender befördert den Brennstoff über den Einschubkonus in den Brennraum der Feuerung.

Brennraum und Kessel

Die Feuerbox ist als ungekühlter, schamottierter Hochtemperaturbrennraum mit gusseisernem, beweglichem Stufenrost ausgeführt.

Durch die spezielle Flammenführung und die Strahlungswärme im ungekühlten Schamott-Brennraum trocknet und entgast der Brennstoff (pyrolytische Zersetzung und Vergasung). Anschließend wird der Brennstoff auf dem Stufenrost in weiterer Folge verbrannt, während er langsam bis zur Rostaschengosse transportiert wird.

Die Primär-, Sekundär- und Tertiärluftzufuhr erfolgt durch stufenlos einstellbare Ventilatoren.

Für ein optimales Brennverhalten werden sowohl die Intervalle für Brennstoffeinbringung als auch die Primär-, Sekundär- und Tertiärluftmenge abhängig von der erforderlichen Leistung mit der Kesselregelung eingestellt.

Der Feuerbox ist ein liegender Dampfkessel aufgesetzt.

Wärmeübertragungsmedium

Als Wärmeträgermedium wird Wasser verwendet, welches gemäß ÖNORM H 5195, Teil 1 aufbereitet wird.

Funktion der Kesselsteuerung

Die SPS (Speicher Programmierbare Steuerung) übernimmt die gesamte Regelung des Brennstofftransportes, der Primär-, Sekundär- und Tertiärluft sowie des Saugzuggebläses und der Aschenaustragung.

Die Kesselregelung erfolgt in einem Leistungsbereich von 25% - 100% der Nennleistung vollautomatisch in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur, dem Restsauerstoffgehalt im Rauchgas, der Feuerraumtemperatur und des Feuerraumunterdruckes.

Der Brennstoffmassenstrom richtet sich nach dem Restauerstoffgehalt im Rauchgas, die Primär-, Sekundär- und Tertiärluftvolumina nach der erforderlichen Leistung sowie die Drehzahl des Rauchgasgebläses nach dem Feuerraumunterdruck.

Die Steuerung hat eine Anheiz-, Betriebs- und Anlagenabschaltung.

Die zuletzt gespeicherten Daten bleiben bei Spannungsausfall erhalten und die gesamte Anlage nimmt, sofern keine Konfigurationswerte unter- oder überschritten werden nach Wiederaufnahme der Spannung den Automatikbetrieb selbstständig wieder auf.

Restsauerstoffregelung

Die Restsauerstoffkonzentration im Rauchgas wird kontinuierlich erfasst und angezeigt. Die Messung und Anzeige berücksichtigt den ganzen theoretischen Messbereich von 0 bis 20,95 Vol.-% O₂.

Durch eine restsauerstoffabhängige Brennstoffdosierung wird der Brennstoff in die Primärverbrennungszone des Brennraumes transportiert.

Rauchgasreinigung

Die Rauchgasreinigung erfolgt mittels Multizyklon und Elektrofilter, die dem Dampferzeuger, dem Überhitzer, dem Speisewasservorwärmer und dem Luftvorwärmer nachgeschaltet sind.

Nach den Abscheidvorgängen wird das Reingas über das Saugzuggebläse, die Rauchrohrleitung und den Kamin an die Atmosphäre abgegeben.

Die Asche des Multizyklons wird über eine Zellenradschleuse der Entaschung der Gesamtanlage übergeben.

Die abgeschiedene Flugasche des Elektrofilters wird über eine Sammelschnecke und eine Zellenradschleuse in einen Container befördert, der sich vor dem Elektrofilter befindet, und je nach Füllungsgrad entleert werden muss.

Entaschung

Die Rostasche wird mittels eines hydraulischen Vorschubrosts und eines hydraulischen Aschenschiebers über die Rostaschengosse in die darunter liegende Aschenschleuse transportiert. In Ruhestellung ist der Aschenschieber immer geschlossen (vordere Endstellung), damit keine Falschluf den Verbrennungsprozess stört. Die Ruheposition wird durch einen Endschalter überwacht und im Störfall als Fehler am Regelungs-PC visualisiert.

Über die Aschenschleuse wird die Rostasche auf den sich darunter befindlichen Ascheschubboden befördert. Die Asche von Überhitzer, Wasservorwärmer, Luftvorwärmer und Multizyklon wird über Zellenradschleusen bzw. Sammel- und Ascheschnecken ebenfalls zum Ascheschubboden transportiert, der über den Aschehochförderer und über einen Fallschacht die gesamte Asche einem weiteren Aschecontainer übergibt, der je nach Füllungsgrad entleert werden muss.

Betriebszeiten

Die gesamte Anlage ist für einen 24-Stunden Betrieb konzipiert und regelt die Verbrennung in Abhängigkeit der Abnahme vollautomatisch.

Somit wird nur ein täglicher Kontrollgang eines Kesselwärters unbedingt vorgeschrieben.

Tabelle 9 und Tabelle 10 fassen die technischen Daten der Feuerung und des Dampferzeugers zusammen:

Technische Daten einer Feuerung

| BIO THERM-Automatik-Feuerung | | |
|-------------------------------------|-------------|--------------------|
| Daten | Wert | Einheit |
| Typ | UR-TR-10500 | |
| Nennleistung | 10.500 | kW |
| Brennstoffwärmeleistung | 12.050 | kW |
| Brennstoffmenge bei Nennleistung | 5.680 | kg/h |
| Abgasvolumenstrom bei Nennleistung | 36.100 | Nm ³ /h |
| Abgastemperatur | 160 | °C |
| Rostfläche | 13,2 | m ² |
| elektrische Anschlussleistung | 252 | kW |
| Länge | 10.180 | mm |
| Breite | 3.020 | mm |
| Höhe | 6.950 | mm |

Tabelle 9: Technische Daten BIO THERM-Feuerung HKW Klagenfurt [12]

Technische Daten eines Dampferzeugers

| Dampferzeuger | | |
|--------------------------|-------------|----------------|
| Daten | Wert | Einheit |
| Volumen | 41.277 | l |
| Volumen bei NW | 35.477 | l |
| Heizfläche | 1.084 | m ² |
| Betriebsdruck | 77 | bar |
| Betriebstemperatur | 294 | °C |
| Zulässige Dampferzeugung | 13.000 | kg/h |
| Prüfdruck | 170 | bar |

Tabelle 10: Technische Daten Dampferzeuger HKW Klagenfurt [12]

Emissionswerte

Folgende Emissionswerte, bezogen auf 13% O₂-Gehalt, trockenes Abgas und 1013 mbar, können garantiert werden.

| <i>Emission</i> | <i>Wert</i> | <i>Einheit</i> |
|---------------------------|-------------|--------------------|
| Staubgehalt | 20 | mg/Nm ³ |
| CO-Gehalt | 100 | mg/Nm ³ |
| NO _x | 200 | mg/Nm ³ |
| Organischer Kohlenstoff C | 20 | mg/Nm ³ |

Tabelle 11: Garantierte Emissionswerte HKW Klagenfurt [12]

3.3.2 Heißwasserkessel

Im Gegensatz zum Anlagentyp KWK wird beim Heißwasserkessel nur Wärme für Fernwärmenetze produziert. Es fallen die für die Dampfturbine notwendigen Bauteile (Dampftrommel, Überhitzer, Speisewasservorwärmer, Speisewasserpumpe, usw.) weg. Abbildung 21 zeigt den schematischen Aufbau einer Anlage in Schweden.

3.3.2.1 SCA Timber Bollstabruk (Schweden)

Diese Anlagen (insgesamt 2 Anlagen) befinden sich im schwedischen Bollstabruk (ca. 10 km nordöstlich von Kramfors) und zeichnet sich durch folgende Spezifikationen aus [15]:

Anlagenbild

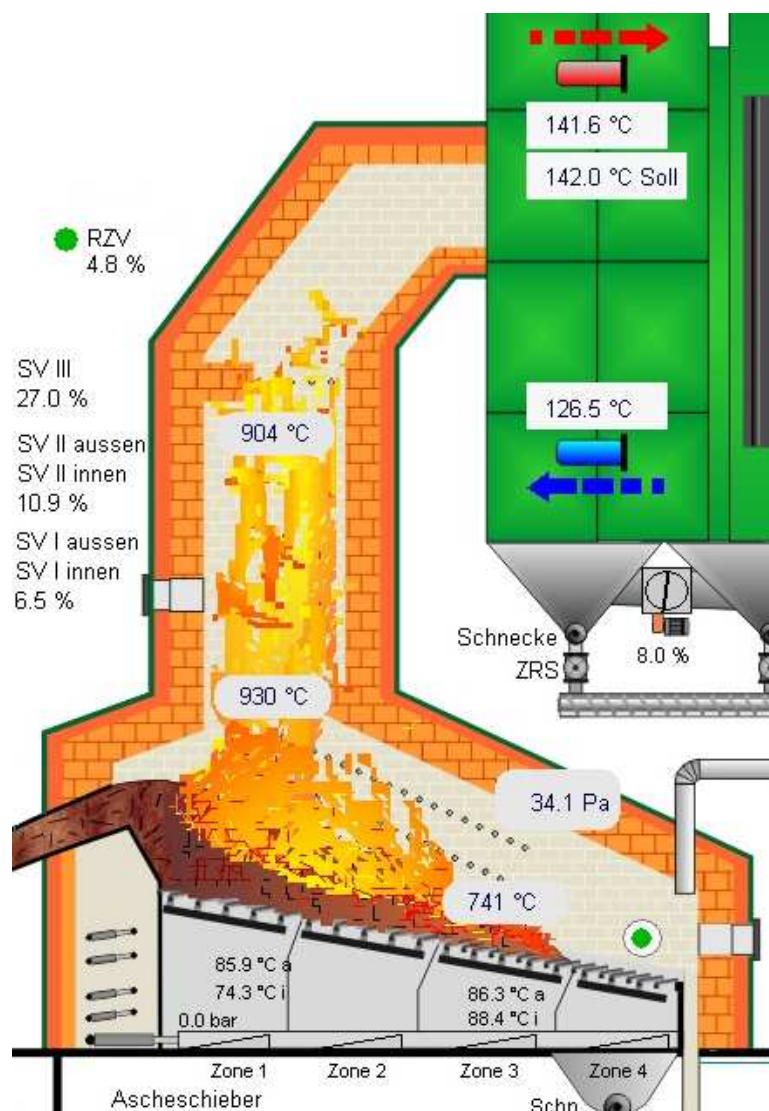


Abbildung 21: Anlagenbild SCA Timber in Bollstabruk (Schweden); stehende Feuerung (Typ: Mittelstrom) [15]

Wie schon bei den Anlagen beim HKW Klagenfurt sind auch hier vier Primärventilatoren zur Ausführung gekommen. Die Besonderheit dieser Anlage ist aber der Umstand, dass durch die Breite des Feuerraums die Teilung der Primärluftzufuhr sowie Sekundärluftzufuhr in rechts und links erfolgen musste. So gibt es die Primärluftventilatoren 1 bis 4 und die Sekundärluftventilatoren 1 und 2 jeweils in zweifacher Ausführung.

Die Temperaturwerte unter dem Rost zeigen die Kühlwassertemperatur des Rostes an, hier wiederum jeweils innen und außen oder rechts und links. Auch die Feuerraumtemperaturen sind an den vorgegebenen Stellen platziert worden.

Die Prozentangaben bei SV (Sekundärventilator) I, II und III sowie RZV (Rezirkulationsventilator) geben Aufschluss über die momentane Drehzahl.

Im Anschluss an den Feuerraum folgt der Wärmetauscher, welcher dem Rauchgas Wärme entzieht und diese an den Kesselkreislauf abgibt. Die rote Leitung symbolisiert den Vorlauf mit der entsprechenden Vorlauftemperatur und die blaue Leitung den Rücklauf mit der zugehörigen Rücklauftemperatur.

Die Schnecke oberhalb der ZRS (Zellenradschleuse) dient der Abfuhr von Flugasche. Die Zellenradschleuse verhindert ein sogenanntes Agglomerieren der Flugasche.

Rechts davon sieht man eine elektromechanisch betriebene Klappe (Überhitzerklappe). Bei zu geringer Feuerraumtemperatur ist sie geöffnet, da im Rauchgas zu wenig Energie für eine weitere Entnahme im zweiten Zug des Wärmetauschers vorhanden wäre. Mit steigender Feuerraumtemperatur wird die Klappe stetig bis zur maximalen Feuerraumtemperatur geschlossen.

Der Unterdruck im Feuerraum ist ebenfalls Teil der Betriebsparameter und ist als Momentaufnahme dargestellt.

Brennstoff

In Tabelle 12 werden verschiedenste Brennstoffe samt ihren Anteilen dargestellt. Späne sind nur als Beigabe zum eigentlichen Brennstoff (Rinde bzw. Hackgut) anzusehen.

| <i>Brennstoff</i> | <i>Anteil</i> |
|--------------------------|----------------------|
| [] | [%] |
| Rinde naturbelassen | 0 – 100 |
| Hackgut naturbelassen | 0 – 100 |
| Späne naturbelassen | 0 – 30 |

Tabelle 12: Mögliche Brennstoffanteile SCA Timber Bollstabruk [15]

Brennstoffspezifikation

Tabelle 13 zeigt die relevanten Eigenschaften (Wassergehalt, Schüttgewicht, Aschegehalt, Ascheerweichungspunkt, Heizwert) des Brennstoffes.

| <i>Eigenschaften</i> | <i>Wert</i> | <i>Einheit</i> |
|-------------------------|-------------|----------------|
| Wassergehalt | 30 - 60 | m-% |
| Schüttgewicht | 250 - 350 | kg/Srm |
| Aschegehalt | 1 - 3 | m-% |
| Ascheerweichungspunkt | > 1000 | °C |
| Heizwert H _u | 1,5 - 3,2 | kWh/kg |

Tabelle 13: Mögliche Brennstoffeigenschaften SCA Timber Bollstabruk [15]

Beschickungseinrichtung

Die Materialaustragung aus dem Silo erfolgt mit einem bauseitigen Förderer, welcher den stirnseitig montierten, hydraulisch betätigten Querförderer beaufschlagt. Durch intervallweise Betätigung schiebt der Kolben des Querförderers den Brennstoff über den Fallschacht zum Einschubsender. Der Rindenscherer verhindert die Bildung von Brennstoffbrücken. Vom Einschubsender aus gelangt der Brennstoff über den Einschubkonus in den Brennraum der Feuerung.

Brennraum und Kessel

Die Feuerbox ist als ungekühlter, schamottierter Hochtemperaturbrennraum mit gusseisernem, beweglichem Stufenrost ausgeführt.

Durch die spezielle Flammenführung und die hohe Strahlungswärme im ungekühlten Schamottbrennraum trocknet und entgast der Brennstoff, verbrennt anschließend auf dem Stufenrost und wird währenddessen langsam bis zur Rostaschengosse transportiert.

Die Primär und Sekundärluftzufuhr erfolgt durch stufenlos einstellbare Ventilatoren.

Für ein optimales Brennverhalten werden sowohl die Intervalle für Brennstoffeinbringung als auch die Primär- und Sekundärluftmenge, unabhängig voneinander, automatisch über die Kesselregelung eingestellt.

Nach der Feuerbox ist ein stehender 3-Zug-Heißwasserkessel für Warmwasser mit max. 120 °C Betriebstemperatur montiert.

Wärmeübertragungsmedium

Als Wärmeträgermedium wird Wasser verwendet, welches gemäß ÖNORM H 5195, Teil 1 aufbereitet wird.

Funktion der Kesselsteuerung

Die SPS (Speicher Programmierbare Steuerung) übernimmt die gesamte Regelung des Brennstofftransportes, von Primär- und Sekundärluft sowie Saugzuggebläse und der Aschenaustragung.

Die Kesselregelung erfolgt in einem Leistungsbereich von 25% - 100% der Nennleistung vollautomatisch in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur, dem Restsauerstoffgehalt im Reingas, der Feuerraumtemperatur und des Feuerraumunterdruckes.

Der Brennstoffmassenstrom richtet sich nach dem Restsauerstoffgehalt im Rauchgas, die Primär- und Sekundärluftvolumina nach der Vorlauftemperatur und die Drehzahl des Rauchgasgebläses nach dem Feuerraumunterdruck.

Die Steuerung hat eine Anheiz-, Betriebs- und Anlagenabschaltung.

Die zuletzt gespeicherten Daten bleiben bei Spannungsausfall erhalten und die gesamte Anlage nimmt, sofern keine Konfigurationswerte unter- oder überschritten werden, nach Wiederaufnahme der Spannung den Automatikbetrieb selbständig wieder auf.

Restsauerstoffregelung

Die Restsauerstoffkonzentration im Rauchgas wird kontinuierlich erfasst und angezeigt. Die Messung und Anzeige berücksichtigt den ganzen theoretischen Messbereich von 0 bis 20,95 Vol.-% O₂.

Durch eine restsauerstoffabhängige Brennstoffdosierung wird der Brennstoff in die Primärverbrennungszone des Brennraumes transportiert.

Rauchgasreinigung

Die Rauchgasreinigung erfolgt mittels Multizyklon und Elektro-Filter, die dem Wärmetauscher und dem Luftvorwärmer nachgeschaltet sind.

Nach dem Abscheidvorgang wird das Rauchgas über das Saugzuggebläse, die Rauchrohrleitung und den Kamin an die Atmosphäre abgegeben.

Die abgeschiedene Flugasche des Elektrofilters wird über Zellenradschleusen und eine Ascheschnecke im darunter positionierten Container für Feinasche gesammelt und muss je

nach Füllungsgrad entleert werden. Die Asche des Multizyklons wird über eine Zellenradschleuse und eine Ascheschnecke ebenfalls zum Aschecontainer befördert.

Betriebszeiten

Die gesamte Anlage ist für einen 24-Stunden Betrieb konzipiert und regelt die Verbrennung in Abhängigkeit der Wärmeabnahme vollautomatisch.

Somit wird nur ein täglicher Kontrollgang eines Kesselwärters unbedingt vorgeschrieben.

Technische Daten einer Feuerung

Tabelle 14 und Tabelle 15 beinhalten/zeigen die technischen Daten der Feuerung bzw. des Warmwasserkessels:

| BIO THERM-Automatik-Feuerung | | |
|-------------------------------------|-------------|--------------------|
| Daten | Wert | Einheit |
| Typ | UR-TR-12000 | |
| Nennleistung | 12.000 | kW |
| Brennstoffwärmeleistung | 14.035 | kW |
| Brennstoffmenge bei Nennleistung | 10.300 | kg/h |
| Abgasvolumenstrom bei Nennleistung | 33.000 | Nm ³ /h |

Tabelle 14: Technische Daten BIO THERM-Feuerung SCA Timber Bollstabruk [15]

| Hochleistungs-Warmwasserkessel | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------------|
| Daten | Wert | Einheit |
| Typ | UR-FRR-12000 | |
| Leistung | 12.000 | kW |
| Höchstzulässiger Druck | 6 | bar |
| Höchstzulässige Betriebstemperatur | 120 | °C |
| Kaltwasserprüfdruck | 11,1 | bar |
| Heizfläche | 707 | m ² |
| Wasserinhalt | 27.340 | l |
| Minstdurchfluss | 154 | m ³ /h |
| Rauchgasaustrittstemperatur nach LUVO | 140 | °C |

Tabelle 15: Technische Daten Warmwasserkessel SCA Timber Bollstabruk [15]

Emissionswerte

Folgende Emissionswerte, bezogen auf 6 % O₂-Gehalt, trockenes Abgas und 1013 mbar, können garantiert werden:

| <i>Emission</i> | <i>Wert</i> | <i>Einheit</i> |
|-----------------|-------------|--------------------|
| Staubgehalt | 20 | mg/Nm ³ |
| CO-Gehalt | 300 | mg/Nm ³ |
| NO _x | 100 | mg/MJ |

Tabelle 16: Garantierte Emissionswerte SCA Timber Bollstabruck [15]

4 Messtechnik

4.1 Allgemeines

Eine systematische Vorgehensweise erfordert die Feststellung der momentanen Emissionswerte unter Berücksichtigung der Anlagenparameter wie Bauweise, Länge des Rostes, Primärluft-, Sekundärluft-, Abgasmengen und die Schütthöhe des Brennstoffbettes.

Mit den derzeitigen Anlagentypen der Firma URBAS (Mittelstrom- und Gegenstromprinzip) sind nicht alle oben genannten, aber wichtigen Messgrößen für eine maximal mögliche Reduktion von NO_x -Emissionen umgesetzt worden. Da es aber entscheidend ist, die Unterschiede bei normaler Verbrennung und einer optimierten Verbrennung mit vollautomatischer Regelung feststellen zu können, sollte in Zukunft angedacht werden, mehr Messgrößen zu erfassen und auszuwerten, um nachfolgend die Regelung mit den gewonnenen Erkenntnissen zu erweitern.

Momentan werden die Primär- und Sekundärluftmenge und der O_2 -Gehalt im Abgas messtechnisch erfasst. Für die Regelung der Anlage werden, wie schon unter den Punkten 3.3.1 und 3.3.2 beschrieben, ein Leistungsregler und ein O_2 -Regler verwendet.

Die Iststandserfassung erfolgte mit Messgeräten für die Rauchgasanalyse und für die Holzfeuchte. Diese beiden werden in den Kapiteln 4.2 und 4.3 beschrieben.

Abschließend wird noch das Messprogramm für die Anlage in Bollstabruk (Schweden) näher erläutert (Kapitel 4.4).

4.2 Rauchgasanalysegerät Testo 350XL

Dieses Messgerät dient der Analyse von Rauchgasen und besteht aus einer Control Unit, die der Analysebox angeschlossen ist. Die Analysebox kann je nach Ausstattungsvariante bis zu sechs Messzellen haben. In der Ausstattungsvariante der Firma URBAS wird mit einem prandtl'schem Rohr der Differenzdruck erfasst und daraus die Gasgeschwindigkeit über die Control Unit berechnet. Mit Hilfe der Analysebox können folgende Größen gemessen bzw. ermittelt werden. Zu den Messwerten zählen O_2 -Gehalt, CO -Gehalt (mit H_2 -Kompensation), NO -Gehalt, NO_2 -Gehalt, SO_2 -Gehalt, H_2S -Gehalt, HC -Gehalt, die Temperatur an der Messstelle und die Umgebungstemperatur. Daraus können Größen wie CO_2 -Gehalt, Wirkungsgrad, Abgasverlust usw. berechnet werden.

Abbildung 22 zeigt das Rauchgasanalysegerät mit seinen Komponenten.



Abbildung 22: Rauchgasanalysegerät Testo 350XL [8]

Um statistisch signifikante Aussagen und Schlussfolgerungen treffen zu können, sind die Messgenauigkeit und der Messbereich von Interesse. In Tabelle 17 werden diese Daten für das Abgasanalysegerät Testo 350XL zusammengefasst:

| Fühlertyp | O₂ | CO (H₂-kompensiert) | CO-low (H₂-kompensiert) |
|----------------------------------|---|--|---|
| Messbereich | 0...+25 Vol.-% | 0...+10.000 ppm | 0...+500 ppm |
| Genauigkeit ± 1 Digit | ± 0,8% v. Ew. | ± 10 ppm (0...+99 ppm) ± 5% v. Mw. (+100...+2.000 ppm) ± 10% v. Mw. (+2.001...10.000 ppm) | ± 2 ppm (0...+39,9 ppm) ± 5% v. Mw. (+40...+500 ppm) |
| Auflösung | 0,01 Vol.-% | 1 ppm (0...+10.000 ppm) | 0,1 ppm (0...+500 ppm) |
| Ansprechzeit | 20 sec | 40 sec | 40 sec |
| Ansprechtyp | t95 | t90 | t90 |
| Fühlertyp | NO | NO-low | NO₂ |
| Messbereich | 0...+3.000 ppm | 0...+300 ppm | 0...+500 ppm |
| Genauigkeit ± 1 Digit | ± 5 ppm (0...+99 ppm) ± 5% v. Mw. (+100...+1.999,9 ppm) ± 10% v. Mw. (+2.000...+3.000 ppm) | ± 2 ppm (0...+39,9 ppm) ± 5% v. Mw. (+40...+300 ppm) | ± 5 ppm (0...+99,9 ppm) ± 5% v. Mw. (100...+500 ppm) |
| Auflösung | 1 ppm (0...+3.000 ppm) | 0,1 ppm (0...+300 ppm) | 0,1 ppm (0...+500 ppm) |
| Ansprechzeit | 30 sec | 30 sec | 40 sec |
| Ansprechtyp | t90 | t90 | t90 |

Tabelle 17: Wichtige Messgrößen für die Erhebung des Iststandes der Emissionen [8]

4.2.1 Messprinzip

Im Folgenden wird das elektrochemische Messprinzip zur O₂, CO, NO sowie NO₂-Messung näher beschrieben:

Potentiometrische Sensoren nutzen die Potenzialdifferenz zwischen einer Mess- und einer Bezugselektrode. In der physikalischen Chemie beschreibt die Nernst'sche Gleichung diese Potenzialdifferenz.

$$\Delta\varphi = \varphi_0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{ox}}{a_{red}} \quad (36)$$

Das Herzstück eines potenziometrischen Sensors ist eine ionenselektive Membran. Zusätzlich müssen diese Messwertverstärker Eingangswiderstände ($R_E > 10^{12} \Omega$) besitzen und möglichst geringe Strombelastungen aufweisen ($I < 10^{-12} \text{ A}$) [3].

4.2.1.1 O_2 -Messprinzip (Ionenselektive Elektroden: ISE)

Dieser Sensor zählt zu den galvanischen Sensoren. Es kommt zu einer chemischen Reaktion, wenn O_2 mit der Messlösung (Kaliumhydroxid) in Berührung tritt. Der daraus resultierende elektrische Strom fließt zwischen der Blei-Anode und der vergoldeten Kathode durch einen Lastwiderstand. Der produzierte Strom ist proportional zur vorhandenen Sauerstoffkonzentration [3].

Die Firma Testo bezeichnet diesen Sensor als Zwei-Elektroden-Sensor und hat Modifikationen an diesem vorgenommen. Abbildung 23 zeigt dessen Aufbau.

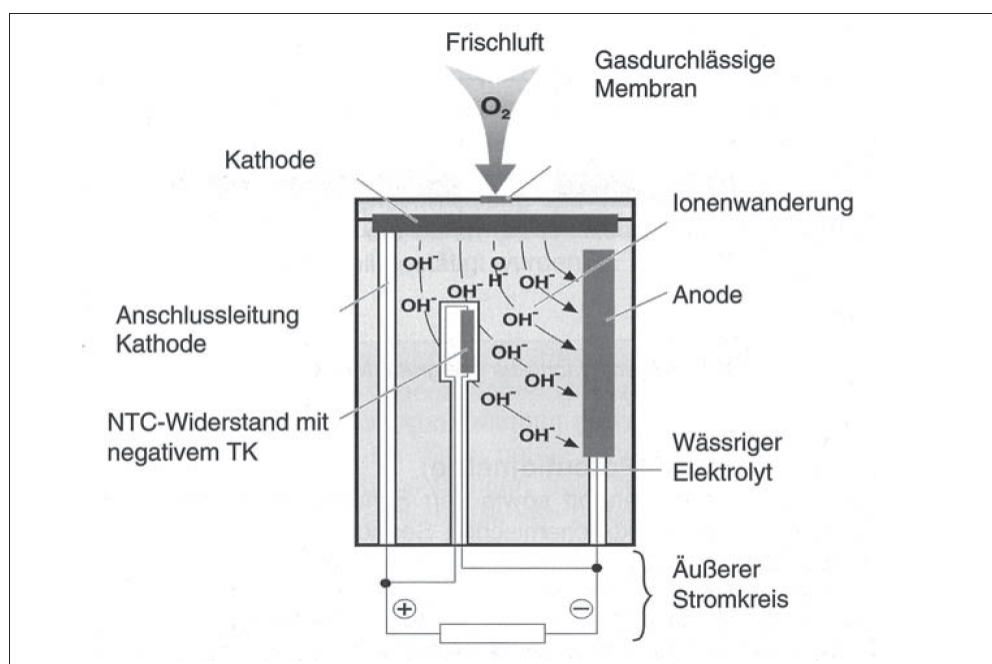


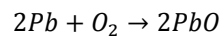
Abbildung 23: schematischer Aufbau der Sauerstoffsonde der Firma Testo [9]

Zu der oben bereits genannten Funktionsweise kommt in der Ausführung der Firma Testo ein integrierter Widerstand mit negativem Temperatureinfluss (NTC) zum Einsatz, welcher die Messung temperaturkompensieren soll.

Die Lebensdauer eines solchen Sensors beträgt etwa 3 Jahre.

Folgende Reaktionen laufen ab [3,9]:





(39)

4.2.1.2 NO und NO₂-Messprinzip (Ionenselektiver Feldeffekttransistor: ISFET)

Hier erfolgt die Messung im Gegensatz zu den ionenselektiven Elektroden mittels Transistor. Die Veränderung der Größe der Raumladungszone zwischen Source (S) und Drain (D) wird durch die Ionenkonzentration in der Messlösung verursacht. Abbildung 24 zeigt den schematischen Aufbau eines ISFET-Sensors:

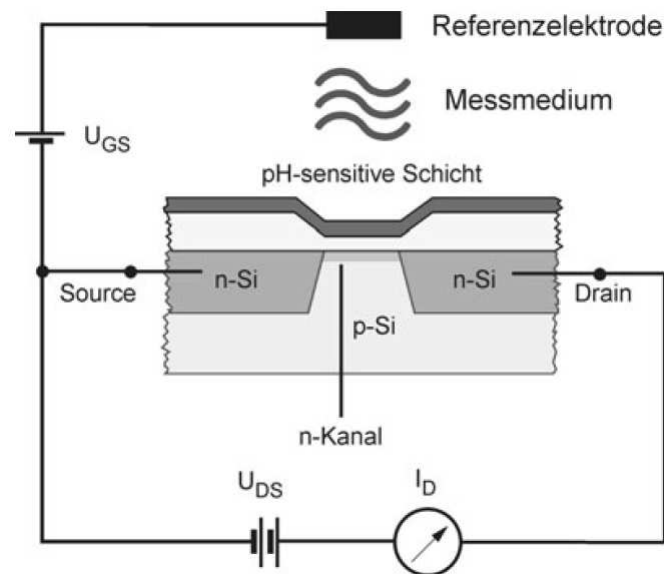


Abbildung 24: Schematischer Aufbau eines ionenselektiven Feldeffekttransistors (ISFET) [3]

Eine Spannung wird zwischen Source und der Referenzelektrode, welche ebenfalls in die Messlösung eintaucht, angelegt. Zusätzlich zur Gate-Spannung wird zwischen der ionenkonzentrierten Messlösung und der ionensensitiven Schicht die Drain-Spannung erzeugt. Die Beeinflussung der Raumladungszone zwischen Drain und Source hat einen sogenannten Drain-Strom (I_D) zur Folge. Der Drain-Strom wird gemessen und ist proportional der Ionenkonzentration in der Messlösung.

Die Vorteile dieses Sensortyps sind die geringe Baugröße, die leichte Veränderbarkeit der Sensitivität, die mechanische Stabilität und die geringen Kosten [3].

Der Messsensor wird am Beispiel der Messung von CO näher erläutert. Abbildung 25 zeigt die schematische Darstellung einer CO-Messzelle. Diese wird auch für die Gase NO, NO₂ und SO₂ verwendet.

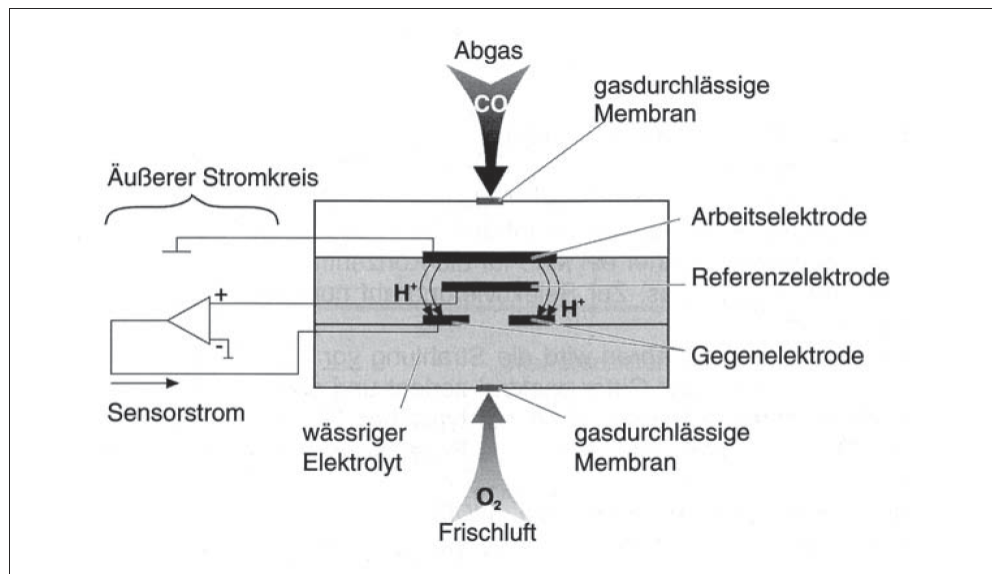
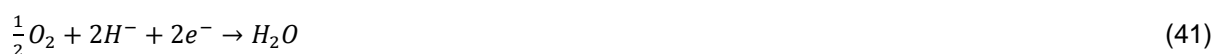


Abbildung 25: Schematische Darstellung einer CO-Messzelle (gilt auch für NO, NO₂ und SO₂) [9]

Das CO gelangt durch die gasdurchlässige Membran zur Arbeitselektrode, wo durch eine chemische Reaktion H⁺-Ionen gebildet werden. Die H⁺-Ionen (befinden sich im wässrigen Elektrolyt) wandern anschließend zur Gegenelektrode. Dort reagieren sie mit dem Sauerstoff, der aus der zugeführten Frischluft durch die Membran und den Elektrolyten ebenfalls zur Gegenelektrode gewandert ist. Dadurch wird im äußeren Stromkreis ein Stromfluss verursacht. Die Referenzelektrode dient der Stabilisierung des Sensorsignals.

Die Lebensdauer wird hier mit 2 Jahren angesetzt.

Die Reaktionsgleichungen für den CO-Sensor [9].



4.2.2 Abgas-Entnahmesonde

Für diesen Anwendungsfall wird die Standard-Entnahmesonde verwendet, da bei den Messpunkten im Abgastrakt der Anlagen nicht mit höheren Temperaturen als 500 °C zu rechnen ist. Für diesen Typ gibt es entweder den Standardschlauch oder den Spezienschlauch für die Messung von NO₂/SO₂. Der Spezienschlauch beinhaltet einen eingezogenen PTFE-Schlauch, welcher die Gasgeschwindigkeit drastisch erhöht und somit verhindert, dass Kondensattropfen im Schlauch hängenbleiben. Kondensattropfen begünstigen die Absorption von NO₂ oder SO₂, was zu einem höheren Messwert führen kann.

Da die gemessenen Gase staubhaltig sind, wird auch ein Filter an der Messlanze verwendet. Dieser verhindert Ablagerungen und das Zusetzen des Gasweges.

Ein Thermoelement für die Messung der Abgastemperatur ist in der Sonde integriert.

Abbildung 26 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Abgas-Entnahmesonde.

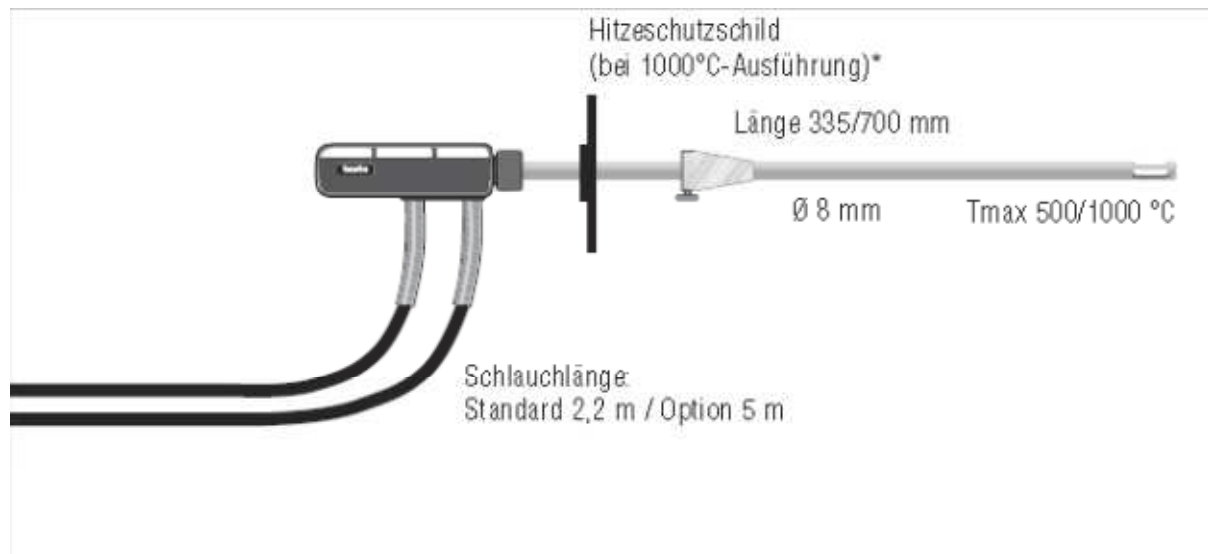


Abbildung 26: Abgas-Entnahmesonde für Rauchgasanalysegerät Testo 350XL [8]

Vor jeder Messung ist eine Dichtheitsprobe der Sonde und der Gaswege erforderlich. Diese erfolgt folgendermaßen [8]:

- Kunststoffkappe über die Sondenspitze aufchieben, bis die Ausfräsungen komplett abgedeckt sind
- im Messmenü die Durchflussanzeige der Pumpe auswählen
- Pumpe einschalten
- Durchflussanzeige kleiner 0,1 l/min → Sonde und Gaswege sind dicht
- Durchflussanzeige größer 0,1 l/min → Sonde oder Gaswege undicht → auf Leckagen prüfen

4.3 Hackschnitzelfeuchtemesser Schaller FS_3 Biomasse

Dieses Messgerät dient der Bestimmung des Wassergehaltes von Holz. In der Auswerteeinheit sind die verschiedensten Holzarten hinterlegt, um eine möglichst genaue Messwertanzeige nach der kapazitiven Methode zu ermöglichen [7].

Für die Messung benötigt man einen Eimer mit 13 Litern Fassungsvermögen, eine Waage und den Hackschnitzelfeuchtemesser. Die Probennahme erfolgt möglichst von verschiedenen Standortstellen des Hackgutes und wird im Eimer gesammelt. Anschließend wird der Eimer auf die Waage gestellt und solange Messgut entfernt, bis die nächst niedrigere Gewichtsstufe erreicht wird. Fehlt allerdings nur wenig (ca. 100g) auf die nächst höhere Stufe, so ist auf diese aufzufüllen. Die Befüllgenauigkeit muss +/- 10 g betragen.

Das Feuchtemessgerät (siehe Abbildung 27) darf nur ohne Füllgut eingeschalten werden. Nun wird die benötigte Biomassesorte eingestellt.

Tabelle 18 zeigt die Auswahlmöglichkeiten an Biomassesorten.

| Biomassesorte | Füllmenge |
|--------------------------|------------------|
| [Kennlinien] | [g] |
| Hobelspäne (HoSpäne) | 1000 |
| Sägespäne (SäSpäne) | 1300 |
| Sägespäne (SäSpäne) | 2000 |
| Hackgut | 2000 |
| Hackgut | 2400 |
| Hackgut | 2800 |
| Hackgut | 3500 |
| Hackgut | 4500 |
| Grobhackgut (GrobHG) | 2800 |
| Frischhackgut (FrischHG) | 2800 |
| Grobhackgut (GrobHG) | 3500 |
| Frischhackgut (FrischHG) | 3500 |
| Rinden | 2400 |
| Rinden | 2800 |
| Pellets | 5000 |
| Referenz | |

Tabelle 18: Auswahlmöglichkeiten der Biomassesorten [7]

Unter Hackgut versteht man hier Hackgut der Klasse G30 nach ÖNORM M 7133. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei GrobHG um Hackgut der Klasse G50. Frischhackgut

(FrischHG) beinhaltet frisches Hackgut der Klasse G30 und G50 sowie grobes Hackgut ohne Feinanteil.

Das Hackgut aus dem Eimer muss langsam und gleichmäßig von hinten in das Messgerät eingefüllt werden. Nach Abschluss dieser Prozedur wird das Messgut glattgestrichen und der Messwert abgelesen.

Beim Entleeren des Messgutes ist darauf zu achten, dass keine Reste in der Messkammer zurückbleiben.

Die Genauigkeit wird erhöht, indem man mehrere Messungen von verschiedenen Entnahmestellen durchführt und den Mittelwert dieser bildet.



Abbildung 27: Holzfeuchtemessgerät FS_3 Biomasse [7]

Die messtechnischen Aspekte des Messgeräts sind in Tabelle 19 näher beschrieben.

| <i>Gerät</i> | <i>Auflösung</i> | <i>Kalibriergenauigkeit</i> | <i>Messbereich Wassergehalt</i> | <i>Probenmenge</i> |
|---------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| [] | [%] | | | [l] |
| FS_3 Biomasse | 0,5 | 1,5 | 5 – 60 | 13 |

Tabelle 19: Holzfeuchtemessgerät FS_3 Biomasse messtechnische Daten [7]

Diese Messmethode der kapazitiven Messung ist, wie man in Tabelle 19 sieht, durch die Kalibriergenauigkeit nur als Richtwert zu verwenden. Unter Umständen kann es zu größeren Ungenauigkeiten kommen, wenn zu wenige Proben genommen werden. Daher werden immer drei Messungen erfasst und daraus der Mittelwert gebildet [7].

4.3.1 Kapazitives Prinzip

Die Messung nach dem kapazitiven Prinzip erfolgt durch den Zusammenhang der Kapazität mit elektrischen und geometrischen Größen im Gleichstromkreis.

Ein Kondensator besteht aus zwei Leiteroberflächen, welche durch ein Dielektrikum gegeneinander isoliert sind und in einem bestimmten Abstand voneinander positioniert werden. Zwischen diesen beiden Leiteroberflächen baut sich bei Anlegen einer Quellenspannung (U_q) eine Spannungsdifferenz U auf. Je nach Höhe der Quellenspannung ergibt sich eine Ladungsmenge in der Leiteroberfläche auf, welche als Kapazität C bezeichnet wird. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang [3]:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (42)$$

Der Plattenkondensator findet in sehr vielen Anwendungen wie auch in der Messung des Wassergehalts des Holzbrennstoffes Verwendung. Er ist eine Bauart, bei der die Kapazität unter anderem von der Fläche A der Platten sowie dem Abstand d der Platten zueinander abhängt.

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \frac{A}{d} \quad (43)$$

Die elektrische Feldkonstante ε_0 hat den Wert $8,854 * 10^{-12} \frac{As}{Vm}$. ε_r ist die Dielektrizitätszahl und hängt vom verwendeten Dielektrikum ab. Tabelle 20 zeigt eine Auswahl an Stoffen mit den dazugehörigen Dielektrizitätszahlen (Permittivitätszahl, Dielektrizitätskoeffizient).

| Material | Permittivitätszahl ϵ_r |
|---|---------------------------------|
| Vakuum, Luft | 1 |
| Holz (je nach Feuchte) | 2 bis 7 |
| Paraffin, Petroleum, Terpentinöl, Trafoöl | 2,2 |
| Papier, Polyethylen, Polypropylen | 2,3 |
| Weichgummi, Polystyrol | 2,5 |
| Zelluloid | 3 |
| Polyester, Plexiglas | 3,3 |
| Quarzglas | 3,7 |
| Hartgummi, Ölpapier, Press-Span | 4 |
| Porzellan, Hartpapier, Quarzsand | 4,5 |
| Glas, Poliamid | 5 |
| Marmor | 8 |
| Al_2O_3 | 12 |
| Alkohol | 26 |
| Ta_2O_5 | 27 |
| Wasser | 81 |
| Keramik (NDK: niedriger Dielektrizitätskoeffizient) | 10 bis 200 |
| Keramik (HDK: hoher Dielektrizitätskoeffizient) | 10^3 bis 10^4 |

Tabelle 20: Auswahl einiger relevanter Materialien mit Angabe der Dielektrizitätszahl ϵ_r [3]

Für die Veränderung der Kapazität C können folgende Maßnahmen getroffen werden:

- a) Änderung des Plattenabstandes d
- b) Änderung der Fläche A
- c) Änderung des Dielektrikums ϵ_r

Die Änderung des Plattenabstandes ist nicht linear kann aber durch geeignete Schaltungen linearisiert werden.

Ändert man die Fläche A des Plattenkondensators so ändert sich auch die Kapazität C. in diesem Fall ist die Änderung linear.

Auch die Änderung der Dielektrizitätszahl ist linear und erfolgt durch ein zusätzliches Medium, welches zwischen die Kondensatorplatten geschoben wird [3].

Die Materialfeuchte wird im Fall des Holzfeuchtemessgeräts der Firma Schaller GmbH durch Messung der elektrischen Eigenschaften (indirekte Methode) des Messgutes erfasst. Durch diese Messmethode ist eine kontinuierliche Messung im Prozess möglich. Die Erfassung einzelner spezifischer Eigenschaften von Wasser (z.B.: Permittivitätszahl ϵ_r , optische Absorption, Wärmeleitfähigkeit) ergibt ein zugehöriges Signal für den Wassergehalt des

Materialgemisches. Für eine hinreichende Aussage müssen aber materialspezifische Kennlinien (durch experimentelle Bestimmung) hinterlegt sein.

Der komplexe elektrische Widerstand des Messgutes ermöglicht die Erfassung der Materialfeuchte. Das Messgut muss möglichst homogen sein und sollte keine leitenden Fremdkörper enthalten.

Elektromagnetische Felder oder elektromagnetische Wellen dienen als Messsignal und können laut Tabelle 21 folgend unterschieden werden.

| Bezeichnung der Messmethode | Mess-Signal/ Messprinzip | Technische Ausführung | Besonderheit/Beispiel |
|---------------------------------------|--|--|--|
| Niederfrequenz | Erfassung im Wesentlichen des ohmschen Widerstands Wirkwiderstand | Messfrequenz $f \leq 10$ kHz Handmessgeräte Festinstallationen | einfache Handmessgeräte Geräte, die auf bestimmte Materialien kalibriert sind |
| Hochfrequenz | Erfassen von Wirk- und Blindwiderstand | Messfrequenz bis 100 kHz | Schüttgüter, Baustoffe Handmessgeräte |
| FDR Frequency Domain Reflectometry | Dämpfung einer Schwingung | Messfrequenz ~ 100 MHz | Bodenfeuchte, Schüttgüter |
| TDR Time Domain Reflectometry | Laufzeitdifferenz der Schwingung | Messfrequenz ~ 1 GHz gepulste Messung | Bodenfeuchte, Schüttgüter Handsonde, Prozess-Einbausonde |
| Mikrowelle | Frequenzverschiebung Dämpfung | Messfrequenz 2,5 MHz bis 20 MHz | fest installierte Einbaugeräte |
| Radar radio detecting and ranging | Laufzeitmessung | | Hydrologie, Geologie, permanente Bauwerksüberwachung |

Tabelle 21: Liste der unterschiedlichen Prinzipien der Feuchtebestimmung mit elektromagnetischen Feldern oder Wellen [3]

Der Unterschied der Dielektrizitätszahl von Wasser ($\epsilon_r = 80,18$) zu Holz (ϵ_r von 2 bis 7) ergibt eine gute Selektivität der Messung.

Bei Messungen mit elektromagnetischen Wellen wird der volumetrische Wassergehalt gemessen [3].

Der volumetrische Wassergehalt w_V ist der prozentuale Volumenanteil des Wasser am Gesamtmaterialvolumen.

$$w_V = \frac{V_W}{V_{ges}} * 100 \quad (44)$$

Eine Umrechnung zwischen dem volumetrischen und gravimetrischen Wassergehalt erfolgt über den Zusammenhang mit der Dichte ρ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (45)$$

4.4 Messprogramm

Die Komplexität der messtechnischen Erfassung von Rauchgasen und die Abhängigkeiten der einzelnen Abgaskomponenten untereinander, machten ein Messprogramm zur systematischen Herangehensweise nötig. Aus Erkenntnissen der Probenmessungen beim HKW Klagenfurt können folgende wichtige Aspekte abgeleitet werden:

- Volumenstromsensoren der Firma Schmachtl mit Testo abgleichen
- Abgaswerte aufnehmen
- Restsauerstoff reduzieren
- Änderung der Luftzufuhr in der Primärzone 1 bis 4 ($\lambda = 0,7$ bis $0,9$ optimal)
 - Primärluftmenge 1 variieren: 20% bis 80%-Bereich
 - Primärluftmenge 2 variieren: 20% bis 80%-Bereich
 - Primärluftmenge 3 variieren: 20% bis 80%-Bereich
 - Primärluftmenge 4 variieren: 20% bis 80%-Bereich
- Primärluftrezirkulation verändern
- Eigentliche Verbrennung in die Tertiärzone verschieben
- Sekundärluftmenge 1 bis 2 verändern: 20% bis 80%-Bereich
- Sekundärluftrezirkulation variieren
- Restsauerstoffbezug beachten (Österreich: 13%; Schweden: 6%)
- Umrechnung von ppm auf mg/MJ in Excel umsetzen
- Kombination der Ergebnisse (Abhängigkeiten der Abgaskomponenten untereinander)

Der Punkt „Abgaswerte aufnehmen“ hat sehr große Bedeutung, weil bei Langzeitmessungen mit der Analysebox von Testo bei toxischen Sensoren, die in Tabelle 22 angegebenen Spül- und Messzyklen, empfohlen werden.

| <i>Abgaskomponente</i> | <i>Konzentration</i> | <i>Messen</i> | <i>Spülen</i> |
|--------------------------------------|----------------------|---------------|---------------|
| [] | [ppm] | [1/min] | |
| CO (H ₂ -kompensiert) | 50 | 60 | 5 |
| | 100 | 30 | 5 |
| | 200 | 20 | 10 |
| | 500 | 10 | 10 |
| | 1000 | 10 | 15 |
| | 2000 | 10 | 20 |
| | 4000 | 5 | 30 |
| | 8000 | 5 | 45 |
| | 10000 | 5 | 60 |
| CO-low (H ₂ -kompensiert) | 10 | 60 | 5 |
| | 20 | 30 | 5 |
| | 50 | 20 | 10 |
| | 100 | 10 | 10 |
| | 200 | 10 | 15 |
| | 500 | 10 | 20 |
| NO | 50 | 60 | 5 |
| | 100 | 45 | 5 |
| | 200 | 30 | 5 |
| | 500 | 20 | 10 |
| | 1000 | 10 | 10 |
| | 2000 | 10 | 20 |
| | 3000 | 5 | 30 |
| NO-low | 10 | 60 | 5 |
| | 20 | 45 | 5 |
| | 50 | 30 | 5 |
| | 100 | 20 | 10 |
| | 200 | 10 | 10 |
| | 300 | 10 | 20 |
| NO ₂ | 10 | 60 | 5 |
| | 20 | 45 | 5 |
| | 50 | 30 | 5 |
| | 100 | 20 | 10 |
| | 200 | 10 | 10 |
| | 500 | 10 | 20 |

Tabelle 22: Vorschlag für Mess- und Spülzyklen bei toxischen Sensoren (für Langzeitmessungen) [8]

Grundsätzlich wurden bei den Probemessungen im HKW Klagenfurt für die Abgaskomponente NO_x Werte um die 130 ppm gemessen. Also kann man auf dieser Grundlage und nach den empfohlenen Mess- und Spülzyklen aus Tabelle 22 die Werte der Abgaskomponente NO_x -low (Konzentration: 200ppm) einen Messzyklus von 10 mal pro Minute und einen Spülzyklus von ebenfalls 10 mal pro Minute für Langzeitmessungen zur Anwendung bringen [8].

5 Messergebnisse

Dieses Kapitel soll die Ergebnisse der Messungen von den Anlagen aus Klagenfurt und Bollstabruk näher behandeln. Die beiden wichtigen Abgaskomponenten CO und NO_x, wobei NO_x wiederum aus NO und NO₂ besteht, werden in Diagrammen einzeln dargestellt. Anschließend erfolgt eine Darstellung von CO und NO_x in einem gemeinsamen Diagramm, um die Abhängigkeiten voneinander besser veranschaulichen zu können. Wie bereits aus Abbildung 16 [Links] bekannt ist, besteht ein theoretischer Zusammenhang zwischen den beiden, welcher nun praktisch anhand der Messergebnisse belegt werden soll.

Um eine Vergleichbarkeit der Messwerte untereinander gewährleisten zu können, wurden die Messwerte mit Hilfe des O₂-Bezuges auf 13% vereinheitlicht. Die Einheit mg/Nm³ ist in Österreich gesetzlich für die Luftreinhaltung festgeschrieben. In Schweden wiederum wird der NO_x-Gehalt in mg/MJ gefordert (kein O₂-Bezug erforderlich), der CO-Gehalt wird dort aber auf 6% Restsauerstoff bezogen und, wie in Österreich, in mg/Nm³ angegeben.

5.1 HKW Klagenfurt

Das Heizkraftwerk in Klagenfurt wurde bereits unter Punkt 3.3.1.1 näher beschrieben und es wird folgend eine Abbildung (28) zur Vollständigkeit gezeigt.



Abbildung 28: Außenansicht HKW Klagenfurt [10]

Die Elementarzusammensetzung des Brennstoffes ergibt sich aus einer Mischung von 50 m.-% Sägespänen und 50 m.-% Hackschnitzel. Der durchschnittliche Wassergehalt (40 %) wird durch die Mischung der beiden Brennstoffe erreicht.

des Brennstoffes wird laufend durch die Eingangskontrolle mittels Trockenschrankmethode (nach DIN 51718) ermittelt. Die Daten wurden vom Betreiber zur Verfügung gestellt.

| <i>Element</i> | <i>C</i> | <i>H</i> | <i>O</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>a</i> |
|--|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | |
| Hackschnitzel + Sägespäne (1:1) | 49,15 | 6,20 | 43,80 | 0,33 | 0,019 | 0,50 |

Tabelle 23: Elementarzusammensetzung des Brennstoffes (Mischungsverhältnis: 1 Teil Sägespäne - 1 Teil Hackschnitzel) im HKW Klagenfurt

Die einzuhaltenden Abgaswerte von NO_x und CO sind in Tabelle 24 noch einmal dargestellt.

| <i>Emission</i> | <i>Wert</i> | <i>Einheit</i> | <i>O₂-Bezug</i> |
|---------------------------|-------------|--------------------|----------------------------|
| Staubgehalt | 20 | mg/Nm ³ | |
| CO-Gehalt | 100 | mg/Nm ³ | 13% |
| NO _x | 200 | mg/Nm ³ | 13% |
| Organischer Kohlenstoff C | 20 | mg/Nm ³ | |

Tabelle 24: Betrachtete Abgasgrenzwerte des HKW Klagenfurt (rot dargestellt) [12]

5.1.1 Anlage 1

Die erste Messung erfolgte am 24.07.2012 im Abgastrakt in der Zeit von 11:42 bis 13:23 Uhr vor dem ECO. Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen den Messaufbau.

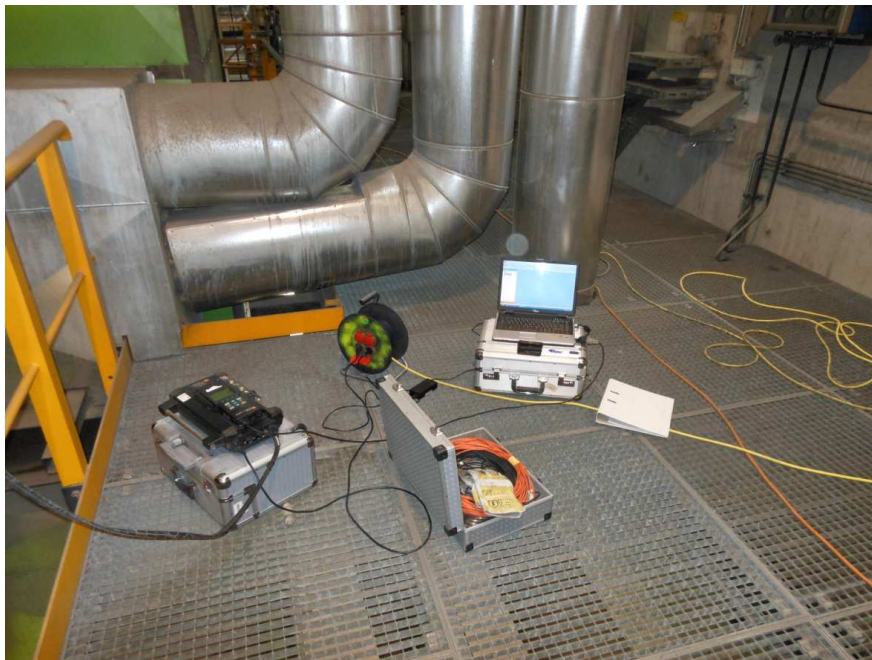


Abbildung 29: Messaufbau der Probemessungen im HKW Klagenfurt [von links nach rechts]
Analysebox und Messtechnik-Laptop [11]



Abbildung 30: Abgas-Entnahmesonde im HKW Klagenfurt [11]

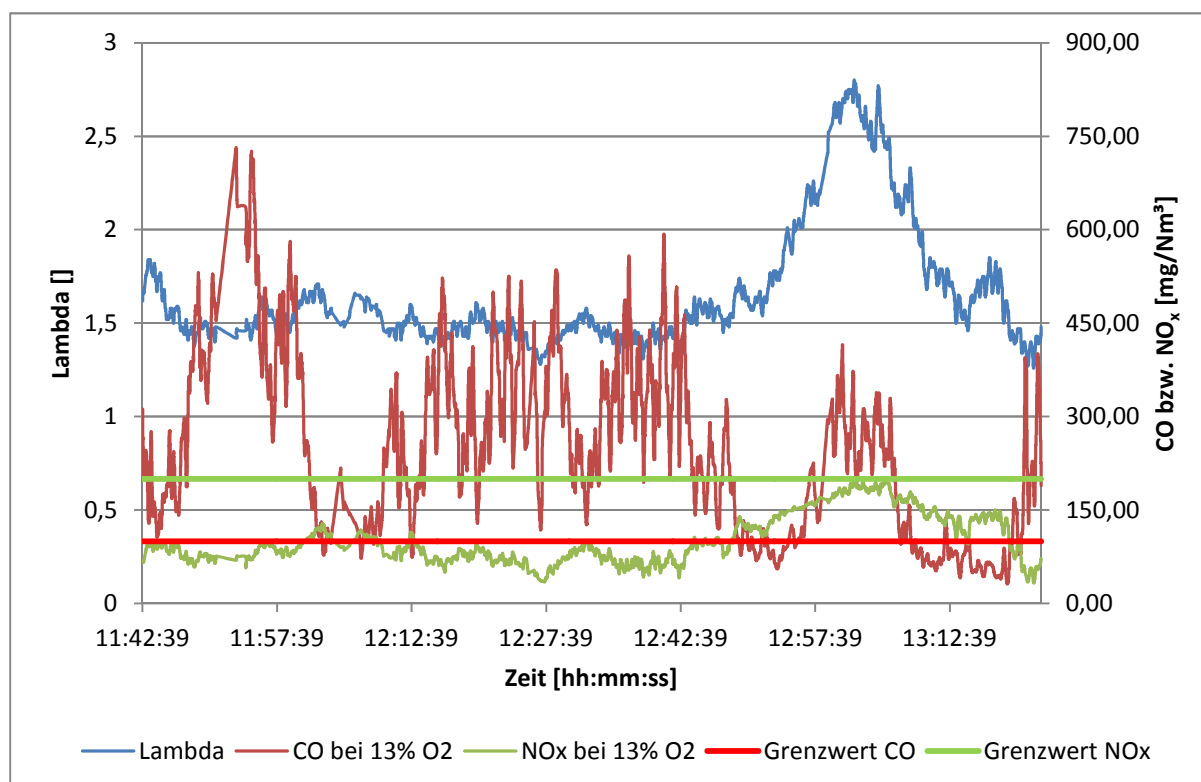


Abbildung 31: Abgaswerte CO und NO_x in mg/Nm³ (13% O₂-Bezug) mit der Luftüberschusszahl der Anlage 1 im HKW Klagenfurt

Die Anlage 1 hat im Zeitraum von 11:42 bis 12:42 Uhr ein mittleres Lambda von ca. 1,5. Durch die Mischung von Sägespänen und Hackschnitzeln handelt es sich selten um eine homogene Mischung des Brennstoffes. Anhand der obigen Daten erklären sich die drastischen Spitzen des CO-Gehaltes aus einer Konzentration von Sägespänen und Reisig im Brennstoff. Deshalb wird der Grenzwert von CO phasenweise um das 7-fache überschritten.

Beim NO_x wiederum ist durch den Überschuss an CO die Wahrscheinlichkeit der Reduktion von bereits gebildetem NO_x höher und somit wird der Grenzwert über den gesamten Messbereich nicht überschritten. Erhöht sich allerdings das Luftverhältnis, so ist mit einem Anstieg der NO_x-Emissionen zu rechnen (12:50 bis 13:20 Uhr).

Eine indirekte Proportionalität zwischen CO und NO_x kann aus den Messdaten von Abbildung 31 herausgelesen werden, sowie eine Abhängigkeit der NO_x-Emissionen vom Luftüberschuss (11:42 bis 12:50 Uhr).

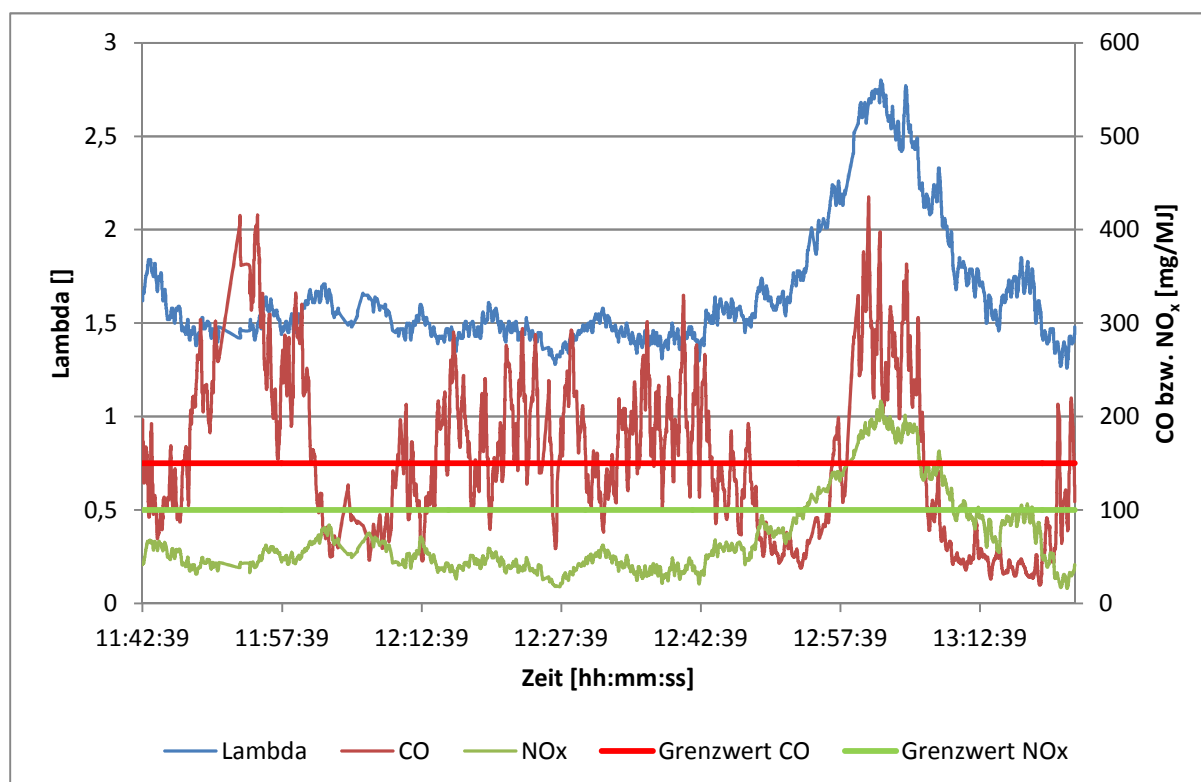


Abbildung 32: Abgaswerte CO und NO_x in mg/MJ mit der Luftüberschusszahl der Anlage 1 im HKW Klagenfurt

Abbildung 32 zeigt denselben Zeitraum wie Abbildung 31 mit dem Unterschied, dass CO und NO_x in mg/MJ aufgetragen wurden.

Es zeigen sich deutliche Überschreitungen der CO-Konzentration im Abgas, wobei diese mit der betrachteten Einheit (mg/MJ) nicht so eklatant ausfallen wie in Abbildung 31. Die Überschreitung beträgt phasenweise das 2-fache des Grenzwertes von CO.

Bei den NO_x-Emissionen birgt der Bezug auf den Energiegehalt Abhängigkeiten von zwei Variablen. Zu diesen Variablen zählen die Elementarzusammensetzung des Brennstoffes und der Wassergehalt. Die Zusammensetzung des Brennstoffes und der Wassergehalt haben direkten Einfluss auf den Heizwert, der für eine Einheit mit Bezug auf den Energiegehalt benötigt wird.

Es hängt also alles vom Heizwert des Brennstoffes ab. So kann auch der direkt proportionale Zusammenhang zwischen dem Lambda-Wert und den NO_x-Emissionen, wie in Abbildung 31 zuvor, bestätigt werden.

Betrachtet man den gesamten Verlauf in Abbildung 32, so kann ein indirekt proportionaler Zusammenhang zwischen CO und NO_x beobachtet werden. Um eine deutlichere Illustration zu erhalten zeigt Abbildung 33 einen kleineren Zeitbereich, welcher die indirekt proportionale Tendenz zwischen CO und NO_x feststellbar machen soll.

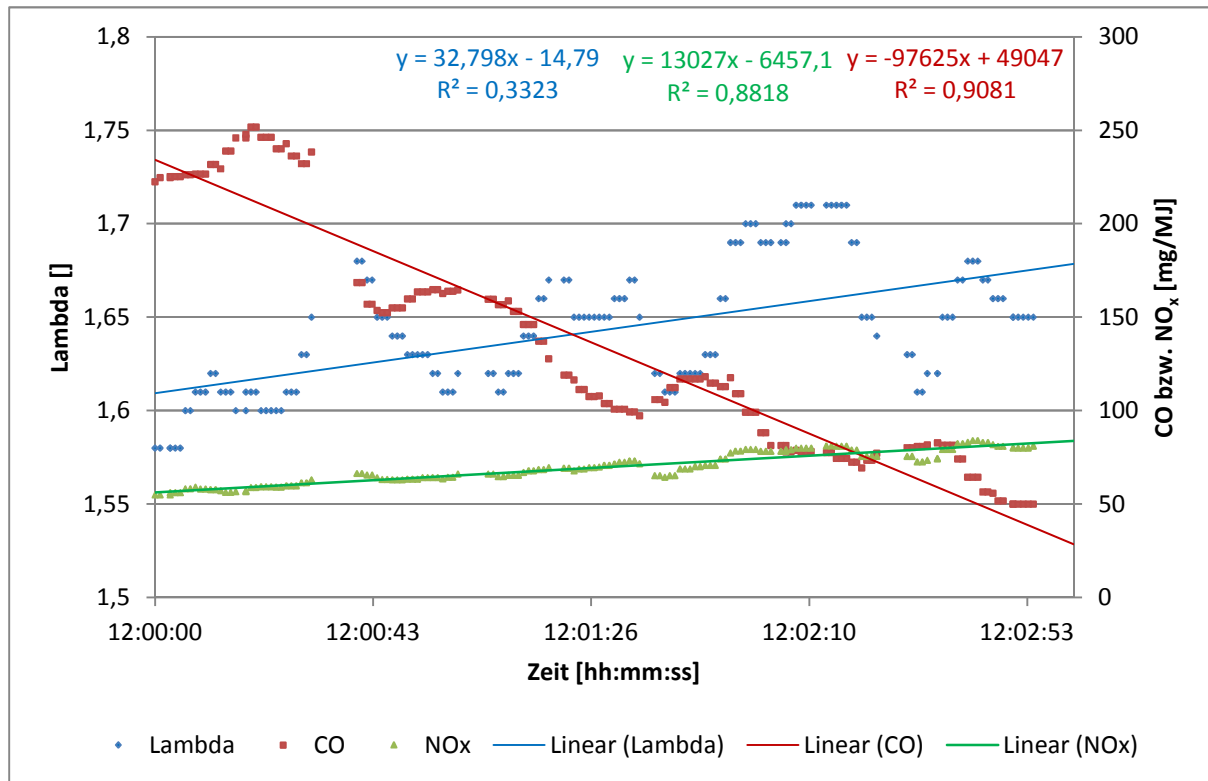


Abbildung 33: Tendenzen von Lambda, CO und NO_x in einem Zeitraum von 3 Minuten (Anlage 1 – HKW Klagenfurt)

In Abbildung 33 wurden als Grundlage 151 Messpunkte in einem ausgewählten Zeitraum von 3 Minuten (12:00 bis 12:03 Uhr) zur Erhebung der Tendenzen von CO, NO_x und Lambda verwendet. Die Trendlinien von NO_x und Lambda zeigen einen stetigen Anstieg, die Trendlinie von CO einen stetigen Abfall. Die Bestimmtheitsmaße von CO ($R^2 = 0,9$) und NO_x ($R^2 = 0,8$) lassen darauf schließen, dass die Messwerte statistisch reproduzierbar sind. Die Datenpunkte von Lambda weisen allerdings eine sehr hohe Streubreite auf und können daher nicht seriös mit einer linearen Trendlinie statistisch beschrieben werden.

Des Weiteren kann aus Abbildung 33 abgeleitet werden, dass ein Abfall des CO-Gehaltes zu einem Anstieg von NO_x im Abgas führt.

Halbstundenmittelwerte:

| Datum | Zeit | | Halbstundenmittelwerte | | | |
|--------------|------------|----------|------------------------|-----------------|---------|-----------------|
| | von | bis | CO | NO _x | CO | NO _x |
| [tt.mm.jjjj] | [hh:mm:ss] | | [mg/Nm ³] | | [mg/MJ] | |
| 24.07.2012 | 11:42:39 | 12:23:39 | 305,16 | 83,93 | 178,48 | 50,22 |
| 24.07.2012 | 12:23:39 | 13:00:57 | 253,45 | 92,50 | 151,40 | 60,14 |
| 24.07.2012 | 12:48:25 | 13:22:49 | 136,03 | 142,64 | 111,74 | 111,32 |

Tabelle 25: Halbstundenmittelwerte von CO und NO_x der Anlage 1 im HKW Klagenfurt

Die Halbstundenmittelwerte (siehe Tabelle 25) geben Aufschluss darüber, dass es den in Abbildung 33 beobachteten Zusammenhang zwischen CO und NO_x tatsächlich gibt. Maßnahmen zur Reduktion von NO_x, wie sie bereits unter Punkt 3.2 thematisiert wurden, können in Zukunft zu einer besseren und leistungstärkeren Regelung führen.

5.1.2 Anlage 2

Der Messaufbau wurde in derselben Art durchgeführt wie bei Anlage 1. Die Messung fand am 24.07.2012 in der Zeit von 09:16 bis 10:57 Uhr vor dem ECO statt.

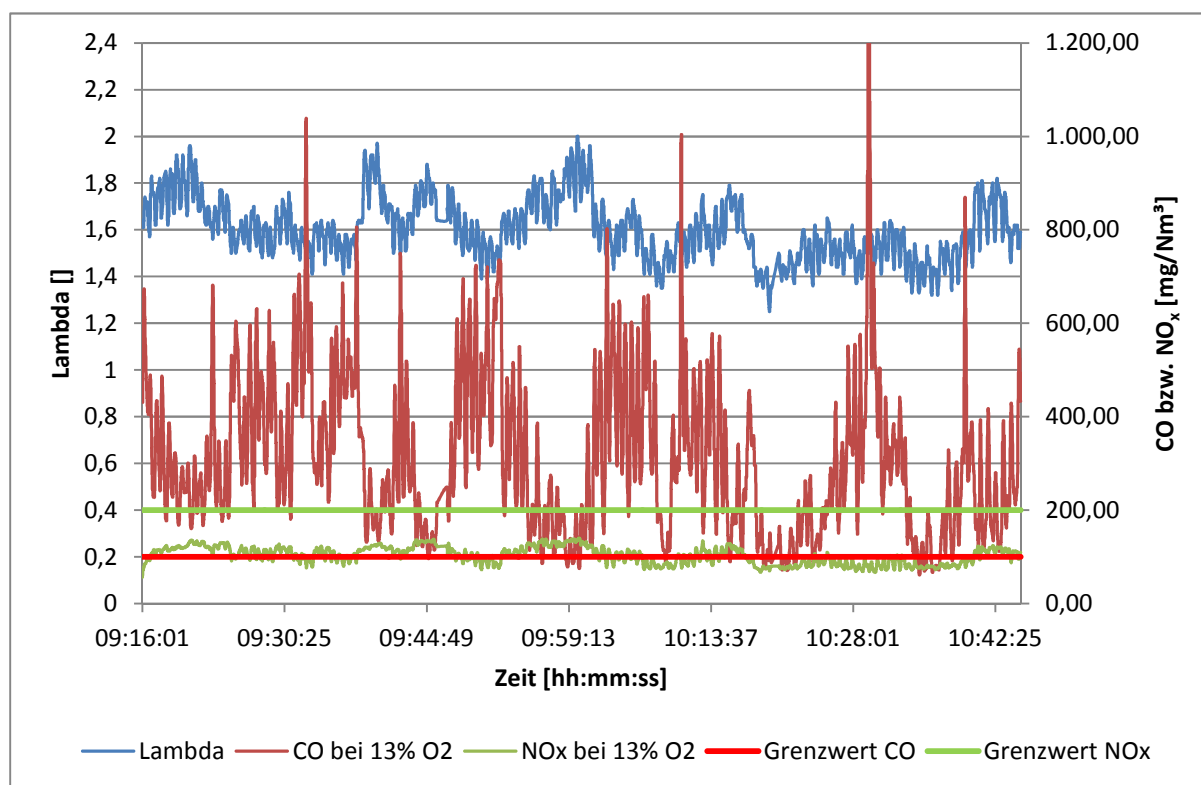


Abbildung 34: Abgaswerte CO und NO_x in mg/Nm³ (13% O₂-Bezug) mit der Luftüberschusszahl der Anlage 2 im HKW Klagenfurt

Obwohl die beiden Anlagen in Klagenfurt identisch aufgebaut wurden, so weisen sie jedoch erhebliche Unterschiede bei den Emissionen auf. Beide betrachteten Emissionen CO und NO_x pulsieren über die Zeit viel stärker als dies bei Anlage 1 der Fall ist. Dies rührt hauptsächlich vom ebenfalls stärker schwankenden Lambda-Wert her. Ursachen dafür könnte eine Einstreuung bei der Übertragung des Messsignals der O₂-Sonde sein.

Die NO_x-Emissionen können mit Anlage 2 im Gegensatz zu Anlage 1 im Mittel um ca. die Hälfte reduziert werden. Allerdings steigen die CO-Emissionen phasenweise um das 12-fache über den erlaubten Grenzwert von 100 mg/Nm³.

Lambda bewegt sich zwischen Werten von 1,4 und 2 im betrachteten Zeitraum.

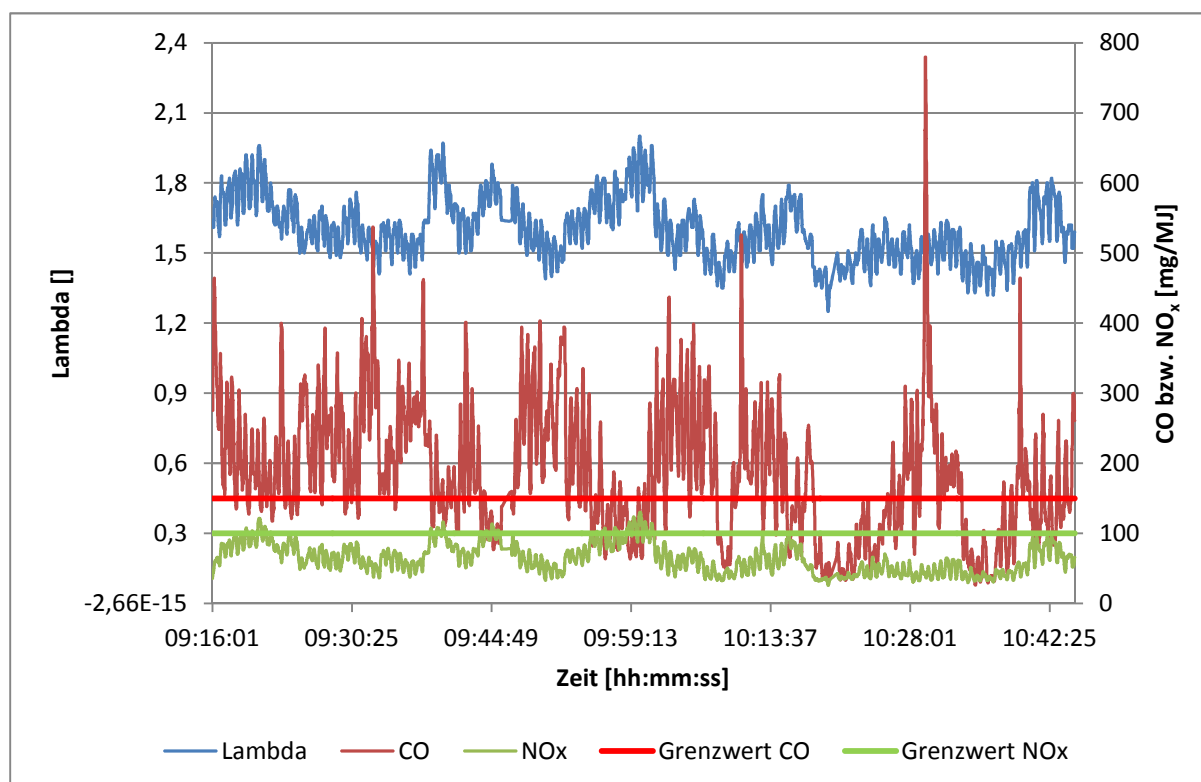


Abbildung 35: Abgaswerte CO und NO_x in mg/MJ mit der Luftüberschusszahl der Anlage 2 im HKW Klagenfurt

In Abbildung 35 verhält es sich ähnlich wie in Abbildung 34. Die CO-Emissionen können ebenfalls nicht eingehalten werden, sie werden aber in der Zeit von 10:15 bis 10:25 unter dem Grenzwert gehalten. Das erstaunliche hier ist, dass auch die NO_x-Emissionen deutlich unter dem Grenzwert geblieben sind. Die Vermutung aus den theoretischen Grundlagen dieser Arbeit legt nahe, dass die gesamte zugeführte Primärluftmenge bei Anlage 2 geringer ausfällt als bei Anlage 1. Zusätzlich erfolgt der Ausbrand der Gase mit der Sekundärluft im genau richtigen Verhältnis der Überstöchiometrie. Ein weiterer Grund für die niedrigen Emissionen von CO und NO_x kann auch die zufällig mathematisch korrekte Rezirkulationsmenge, welche von der Abgastemperatur abhängig ist, sein.

Beim Verbrennungsprozess spielen viele Variablen eine Rolle, daher können mit den erhaltenen Messergebnissen auch neue Zusammenhänge erkannt und weiter untersucht werden.

Die weitere Betrachtung dieser Verhältnisse erfolgt in Kapitel 6 (Berechnungen).

Abbildung 33 zeigte Tendenzen von Lambda, CO und NO_x. Diese Tendenzen wurden auch bei den Messungen der Anlage 2 gefunden und werden repräsentativ in Abbildung 36 untermauert.

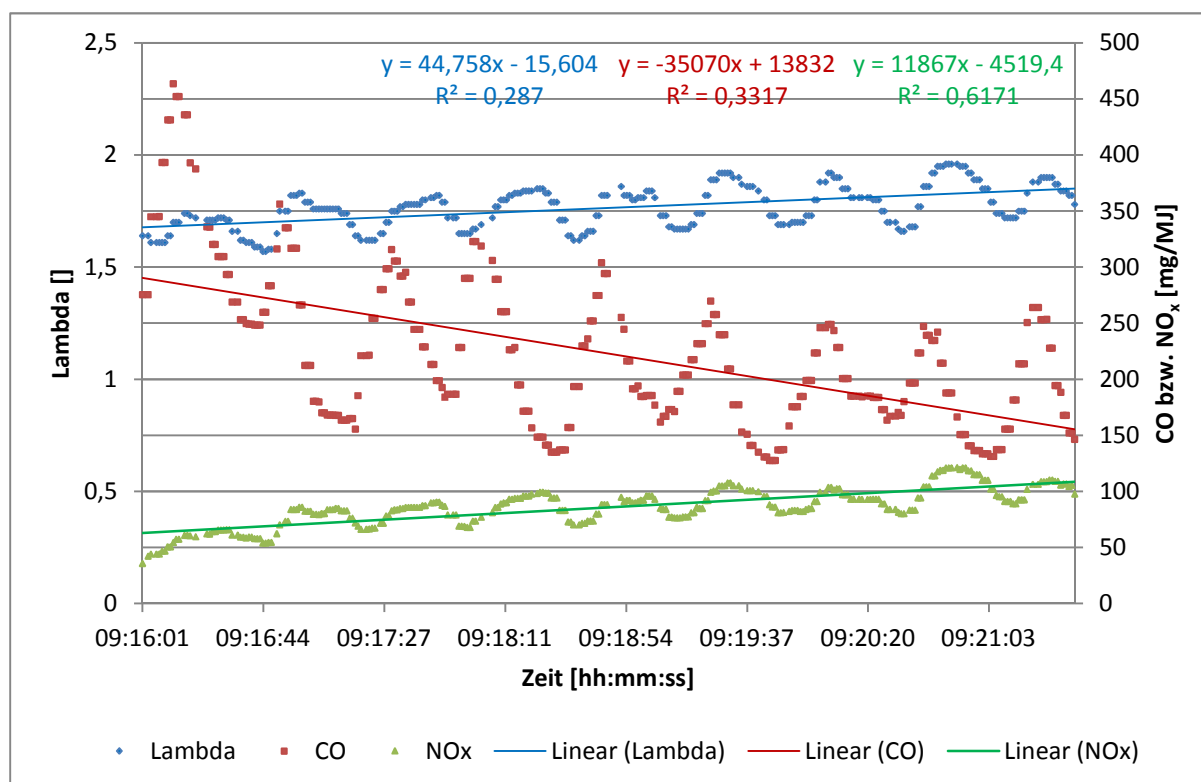


Abbildung 36: Tendenzen von Lambda, CO und NO_x in einem Zeitraum von 6 Minuten (Anlage 2 – HKW Klagenfurt)

Als Grundlage für Abbildung 36 wurden 295 Messpunkte herangezogen. Deutlich erkennbar ist hier das Pendeln des Lambda-Wertes um einen Durchschnittswert. Dies kann damit zusammenhängen, dass die Regelung nach dem O₂-Wert zu langsam eingestellt ist. Trotz alledem ist auch hier die Tendenz aus Abbildung 33 erneut aufgetreten. Sobald der Restsauerstoffgehalt im Abgas steigt, so steigt NO_x an und gleichzeitig sinkt CO.

Das Bestimmtheitsmaß ist hier bei allen drei Trendlinien niedrig ($R^2 < 0,62$). Statistisch gesehen ist daher keine eindeutige Aussage machbar.

Anhand dieser Probemessungen am Standort Klagenfurt kann der Schluss gezogen werden, dass grundsätzlich die Verhältnisse und der Zusammenhang zwischen CO und NO_x auch die Anlage in Schweden betreffen werden.

Halbstundenmittelwerte:

| Datum | Zeit | | Halbstundenmittelwerte | | | |
|--------------|------------|----------|------------------------|-----------------|---------|-----------------|
| | von | bis | CO | NO _x | CO | NO _x |
| [tt.mm.jjjj] | [hh:mm:ss] | | [mg/Nm ³] | | [mg/MJ] | |
| 24.07.2012 | 09:16:01 | 09:50:34 | 353,24 | 111,96 | 219,85 | 73,69 |
| 24.07.2012 | 09:50:34 | 10:24:36 | 289,90 | 101,87 | 170,22 | 63,63 |
| 24.07.2012 | 10:24:36 | 10:57:04 | 308,40 | 89,04 | 187,96 | 71,14 |

Tabelle 26: Halbstundenmittelwerte von CO und NO_x der Anlage 2 im HKW Klagenfurt

Der Halbstundenmittelwert (Tabelle 26) in der Zeit von 10:24 bis 10:57 Uhr ist nicht repräsentativ, weil die Anlage 2 durch einen Zubringungsausfall heruntergefahren werden musste. Die beiden ersten Halbstundenmittelwerte zeigen denselben Zusammenhang wie Tabelle 25.

5.2 SCA Timber Bollstabruk

Die Anlagen in Schweden wurden unter Punkt 3.3.2.1 bereits eingehend beschrieben. Zur Veranschaulichung der Anlagen wird eine Abbildung von der Außenansicht der Anlage gezeigt.



Abbildung 37: Außenansicht SCA Timber Bollstabruk [13]

In der ersten Woche (17.09. bis 24.09.2012) der messtechnischen Untersuchung bestand der Brennstoff aus 100 m.-% Rinde. In der zweiten Woche (25.09. bis 27.09.2012) setzte er sich aus 70 m.-% Rinde und 30 m.-% Sägespäne bestand. Daher ergeben sich aus der Literatur folgende mittlere Elementarzusammensetzungen (Tabelle 27 und Tabelle 28):

| Element | <i>C</i> | <i>H</i> | <i>O</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>a</i> |
|--|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | |
| Rindensorten Fichte, Nadelholz und Buche gemittelt | 51,37 | 5,83 | 39,53 | 0,53 | 0,08 | 2,66 |

Tabelle 27: Elementarzusammensetzung Rinde gemittelt über Holzarten der Anlagen in Bollstabruk (17.09. bis 24.09.2013) [1]

| Element | <i>C</i> | <i>H</i> | <i>O</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>a</i> |
|---------------------------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | |
| Mischrinde + Sägespäne (7:3) | 50,52 | 5,94 | 40,85 | 0,49 | 0,07 | 2,13 |

Tabelle 28: Elementarzusammensetzung Rinde & Sägespäne (gewichtet im Verhältnis 7:3) der Anlagen in Bollstabruk (25.09. bis 27.09.2013) [1]

Die Auflagen der Luftreinhaltung in Schweden zeigt Tabelle 29.

| <i>Emission</i> | <i>Wert</i> | <i>Einheit</i> | <i>O₂-Bezug</i> |
|-----------------|-------------|--------------------|----------------------------|
| Staubgehalt | 20 | mg/Nm ³ | |
| CO-Gehalt | 300 | mg/Nm ³ | 6% |
| NO _x | 100 | mg/MJ | |

Tabelle 29: Betrachtete Abgasgrenzwerte bei SCA Timber Bollstabruk (rot dargestellt) [15]

Die Einheit der NO_x-Emissionen (mg/MJ) macht die Messung des Wassergehalts notwendig, da eine Korrelation zum Heizwert des Brennstoffes besteht.

In Tabelle 30 und 31 sind die erhaltenen Messwerte angegeben.

| Datum | Uhrzeit | Messwerte von Holzfeuchtemessgerät Humimeter | | | | | | Wassergehalt |
|--------------|----------|--|-----------------------------------|-------|------------|------|------------|--------------|
| | | Ort | Zusammensetzung Rinde - Sägespäne | Menge | Temperatur | Wert | Mittelwert | gemittelt |
| [tt.mm.jjjj] | [hh:mm] | [] | [m.-%] | [kg] | [°C] | [%] | [%] | |
| 19.09.2012 | 10:30:00 | Bunker Kessel 2 | 100 0 | 2,40 | 12,5 | 38,0 | | |
| 19.09.2012 | 10:38:00 | Bunker Kessel 2 | 100 0 | 2,80 | 11,0 | 42,5 | | |
| 19.09.2012 | 10:42:00 | Bunker Kessel 2 | 100 0 | 2,81 | 10,5 | 44,5 | 41,7 | |
| 19.09.2012 | 10:52:00 | Bunker Kessel 1 | 100 0 | 2,74 | 10,0 | 40,0 | | |
| 19.09.2012 | 10:57:00 | Bunker Kessel 1 | 100 0 | 2,69 | 10,0 | 37,5 | | |
| 19.09.2012 | 11:01:00 | Bunker Kessel 1 | 100 0 | 2,59 | 10,0 | 47,5 | 41,7 | |
| 20.09.2012 | 14:55:00 | Freilager | 100 0 | 2,82 | 17,0 | 39,0 | | |
| 20.09.2012 | 15:00:00 | Freilager | 100 0 | 2,81 | 21,0 | 47,0 | | |
| 20.09.2012 | 15:05:00 | Freilager | 100 0 | 2,81 | 16,5 | 56,0 | 47,3 | |
| 21.09.2012 | 17:24:00 | Freilager | 100 0 | 2,80 | 18,0 | 42,5 | | |
| 21.09.2012 | 17:27:00 | Freilager | 100 0 | 2,87 | 16,5 | 42,0 | | |
| 21.09.2012 | 17:31:00 | Freilager | 100 0 | 2,83 | 16,5 | 45,5 | 43,3 | |
| 22.09.2012 | 16:52:00 | Freilager | 100 0 | 2,83 | 15,5 | 37,5 | | |
| 22.09.2012 | 16:55:00 | Freilager | 100 0 | 2,84 | 12,0 | 35,5 | | |
| 22.09.2012 | 16:58:00 | Freilager | 100 0 | 2,79 | 11,5 | 54,0 | 42,3 | |
| 23.09.2012 | 11:56:00 | Freilager | 100 0 | 2,86 | 19,0 | 44,0 | | |
| 23.09.2012 | 11:58:00 | Freilager | 100 0 | 2,80 | 21,5 | 38,0 | | |
| 23.09.2012 | 12:01:00 | Freilager | 100 0 | 2,82 | 21,5 | 51,5 | 44,5 | |
| 24.09.2012 | 13:57:00 | Freilager | 100 0 | 2,83 | 20,5 | 52,0 | | |
| 24.09.2012 | 14:03:00 | Freilager | 100 0 | 2,80 | 20,0 | 57,0 | | |
| 24.09.2012 | 14:07:00 | Freilager | 100 0 | 2,82 | 19,5 | 42,0 | 50,3 | 44,4 |

Tabelle 30: Wassergehalt-Messungen des Brennstoffes mit 100 m.-% Rinde

Der rot umrahmte Wert wird für alle weiteren Berechnungen unter dem Punkt 6 Berechnungen verwendet. In der ersten Messwoche bestand der Brennstoff aus 100 m.-% Rinde. Der Kunde möchte auch Sägespäne thermisch verwerten. So wurde in der zweiten Woche der Brennstoff innerhalb der Spezifikationen verändert. Er bestand aus 70 m.-% Rinde und 30 m.-% Sägespänen. Tabelle 31 zeigt den Wassergehalt bei dieser Zusammensetzung des Brennstoffes.

| Datum | Uhrzeit | Messwerte von Holzfeuchtemessgerät Humimeter | | | | | | | Wasser- gehalt | |
|--------------|----------|--|--|-----|-------|------------|-------|-----------------|-------------------|--|
| | | Ort | Zusammen- setzung Rinde - Sägespäne | | Menge | Temperatur | Wert | Mittel- wert | gemittelt | |
| [tt.mm.jjjj] | [hh:mm] | [] | [m.-%] | | [kg] | [°C] | [%] | | [%] | |
| 25.09.2012 | 09:45:00 | Freilager | 70 | 30 | 2,83 | 18,0 | 47,0 | | | |
| 25.09.2012 | 09:50:00 | Freilager | 70 | 30 | 2,80 | 16,0 | 55,0 | | | |
| 25.09.2012 | 09:55:00 | Freilager | 70 | 30 | 2,80 | 14,5 | 47,0 | 49,7 | | |
| 25.09.2012 | 12:28:00 | Umstellung Brennstoff!!! | | | | | | | | |
| 26.09.2012 | 17:00:00 | Freilager | 0 | 100 | 2,01 | 16,0 | 59,5 | | | |
| 26.09.2012 | 17:05:00 | Freilager | 0 | 100 | 2,03 | 15,0 | 63,0 | | | |
| 26.09.2012 | 17:10:00 | Freilager | 0 | 100 | 2,01 | 11,5 | 39,0 | 53,8 | | |
| 26.09.2012 | 17:15:00 | Freilager | 70 | 30 | 2,79 | 12,5 | 54,5 | | | |
| 26.09.2012 | 17:20:00 | Freilager | 70 | 30 | 2,80 | 15,0 | 52,5 | | | |
| 26.09.2012 | 17:30:00 | Freilager | 70 | 30 | 2,84 | 11,5 | 54,0 | 53,7 | | |
| 27.09.2012 | 17:00:00 | Freilager | 100 | 0 | 2,82 | 17,0 | 36,5 | | | |
| 27.09.2012 | 17:05:00 | Freilager | 100 | 0 | 2,80 | 14,0 | 46,5 | 41,5 | | |
| 27.09.2012 | 17:10:00 | Freilager | 100 | 0 | 2,79 | 12,5 | 100,0 | | | |
| 27.09.2012 | 17:15:00 | Freilager | 100 | 0 | 2,81 | 11,0 | 99,0 | | 49,7 | |

Tabelle 31: Wassergehalt-Messungen des Brennstoffes mit 70 m.-% Rinde und 30 m.-% Sägespänen

Tendenziell ist diese Brennstoffmischung feuchter als der 100 m.-%ige Rindenbrennstoff. Die letzten beiden Messwerte der Tabelle 31 sind außerhalb des Messbereiches und dürfen daher bei der Mittelung nicht berücksichtigt werden.

5.2.1 Anlage 1

Zuerst erfolgt die Betrachtung der Stundenwerte über den gesamten Aufenthalt in Schweden. Für Detaildarstellungen wurden die Minutenwerte herangezogen. Die Daten stammen vom Emissionsrechner (bereitgestellt von Enviloop Systemtechnik AB) der Anlage 1.

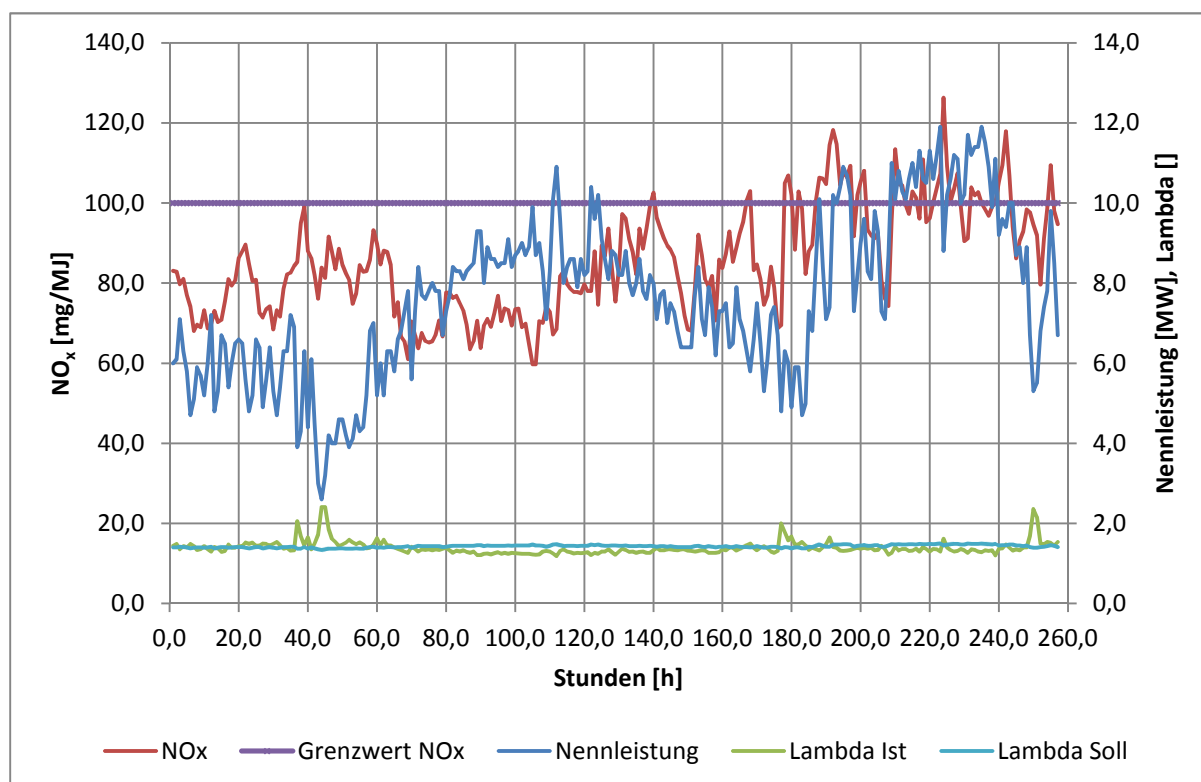


Abbildung 38: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO_x-Emissionen inklusive Grenzwertkurve (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

Zu Beginn der Messkampagne in Bollstabruk fuhr die Anlage 1 mit ca. 6 MW Nennleistung und die NO_x-Emissionen kamen zwischen 70 und 100 mg/MJ zu liegen. Bis etwa zum sechzigsten Stundenmittelwert (19.09.2012 11:00 bis 12:00 Uhr) wurde Anlage 1 beobachtet und keine Einstellungen zur Verbesserung der NO_x-Emissionen vorgenommen. Am 19.09.2012 beschränkten sich die Einstellungsänderungen auf die Primärluftverteilung inklusive Min/Max-Änderung, die Rezirkulationsmenge (Rezirkulationsventilator, Rezirkulationsklappe) und die Rostlaufzeiten (Rostimpuls, Rostpause).

Im Bereich der Stundenmittelwerte von 60 bis 80 (19.09.2012 11:00 bis 20.09.2012 08:00 Uhr) erhöhte sich die Nennleistung auf Werte zwischen 6 und 8 MW. Trotzdem konnten die NO_x-Emissionen auf Werte zwischen 60 und 80 mg/MJ reduziert werden.

Der nächste Abschnitt (Stunden 80 bis 100; 20.09.2012 07:00 bis 21.09.2012 04:00 Uhr) zeigt eine Stabilisierung der NO_x-Emissionen, obwohl die Nennleistung (7 bis 9 MW) weiter gesteigert werden konnte. Sie bewegen sich zwischen 65 und 75 mg/MJ.

Im Bereich der Stundenmittelwerte von 100 bis 120 (21.09.2012 03:00 bis 00:00 Uhr) wurden bei einer Nennleistung von 7 bis 11 MW NO_x-Emissionen zwischen 60 und 80 mg/MJ beobachtet.

Danach wurden die Einstellungen verändert, damit die Leistung von 12 MW (Stunden 220 bis 240; 26.09.2012 03:00 bis 00:00 Uhr) erreicht werden konnte. Dies hatte eine

signifikante Erhöhung der NO_x-Emissionen zur Folge. Sie bewegten sich nach einer Umstellungsphase des Kessels im Bereich von 80 und 130 mg/MJ bei Nennleistungen von 5 bis 12 MW.

Bei Annahme des Soll-Lambda-Wertes für Treppenrostfeuerungen (1,3 bis 1,5) aus der Literatur, sieht man bei den Stundenmittelwerten (60 bis 120) einen glatten Verlauf des Ist-Lambda-Wertes, welcher minimal unter dem Sollwert liegt.

Der Bereich zwischen den Stundenmittelwerten 60 und 120 wird im Folgenden eingehend hinsichtlich der vorgenommenen Einstellungen und signifikant geringeren NO_x-Emissionen betrachtet.

| Stunden- mittelwerte Nummer | Datum | Uhrzeit | Einstellungen | | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------|---------------|---|-------------|-------------|---------|
| | | | Anlage | Bezeichnung 1 | Wert alt | Wert neu | Einheit |
| [] | [tt.mm.jjjj] | [hh:mm] | [] | [] | [] | [] | [] |
| 62 | 19.09.2012 | 13:15:00 | Kessel 1 | Leistungsregler - T _{Nmin} | 350 | 300 | s |
| 62 | 19.09.2012 | 13:16:00 | Kessel 1 | Leistungsregler - T _{Nmax} | 750 | 700 | s |
| 62 | 19.09.2012 | 13:17:00 | Kessel 1 | Einschubpause bei Leistungsregler 100% | 92 | 90 | s |
| 62 | 19.09.2012 | 13:18:00 | Kessel 1 | Rost Zone 2 - Einschaltpause | 40 | 0 | s |
| 62 | 19.09.2012 | 13:19:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 2 max | 40 | 42 | % |
| 63 | 19.09.2012 | 14:00:00 | Kessel 1 | Rost Zone 2 - Einschaltpause | 0 | 20 | s |
| 63 | 19.09.2012 | 14:01:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 1 max | 40 | 42 | % |
| 63 | 19.09.2012 | 14:02:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 2 max | 42 | 40 | % |
| 63 | 19.09.2012 | 14:30:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 1 max | 42 | 40 | % |
| 63 | 19.09.2012 | 14:31:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 2 max | 40 | 35 | % |
| 63 | 19.09.2012 | 14:35:00 | Kessel 1 | Rost Zone 2 - Einschaltpause | 20 | 40 | s |
| 64 | 19.09.2012 | 15:00:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 2 min | 8 | 5 | % |
| 64 | 19.09.2012 | 15:01:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 min | 7 | 5 | % |
| 65 | 19.09.2012 | 16:52:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 max | 26 | 30 | % |
| 67 | 19.09.2012 | 18:50:00 | Kessel 1 | Rezirkulation - Rezi-Ventilator Druck | 50 | 60 | Pa |
| 68 | 19.09.2012 | 19:00:00 | Kessel 1 | Rezirkulation - Stellung Rezi-Klappe max | 32 | 37 | % |
| 68 | 19.09.2012 | 19:10:00 | Kessel 1 | Rezirkulation - Stellung Rezi-Klappe max | 37 | 42 | % |
| 68 | 19.09.2012 | 19:15:00 | Kessel 1 | Rezirkulation - Stellung Rezi-Klappe max | 42 | 50 | % |
| 68 | 19.09.2012 | 19:16:00 | Kessel 1 | Rezirkulation - Stellung Rezi-Klappe max | 50 | 100 | % |
| 70 | 19.09.2012 | 21:06:00 | Kessel 1 | Sekundär-Rezi-Klappe O ₂ -Gehalt Min | 14 | 16 | % |

Tabelle 32: Vorgenommene Einstellungen an Anlage 1 am 19.09.2012 (SCA Timber Bollstabruk)

Eine Gegenüberstellung von Nennleistung (MW), Lambda (λ) und NO_x (mg/MJ) folgt in Abbildung 39 der Stundenmittelwerte von 60 bis 80.

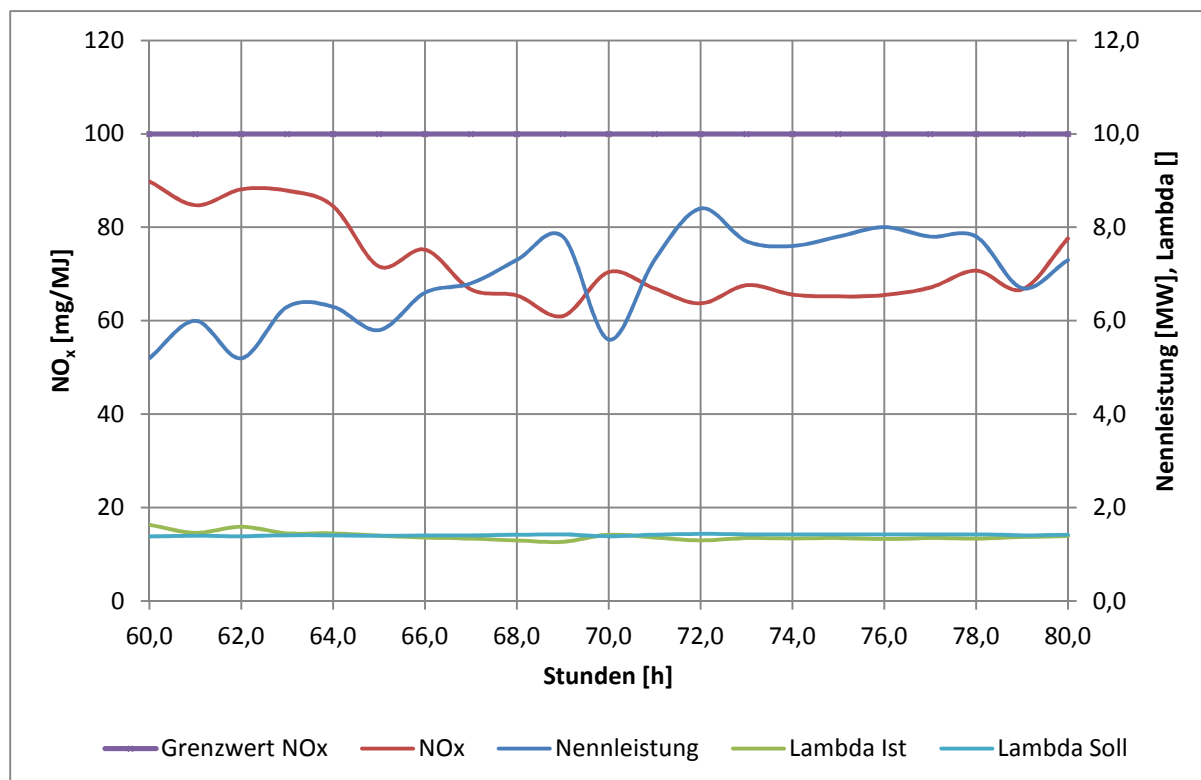


Abbildung 39: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO_x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 19.09.2012 (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

Die Feuerfront befand sich am Anfang des betrachteten Zeitraumes ca. auf Höhe von Rost 2. Als Erstmaßnahme musste die Feuerfront zumindest auf Höhe von Rost 3 gebracht werden. Dies erfolgte mit Hilfe der Änderungen bezüglich der Einschaltpause von Rost 2, der maximalen Drehzahlen von Primärventilator 1 bis 3, der minimalen Drehzahlen von Primärventilator 2 & 3 und der Erniedrigung des Materialeinschubes. $T_{N,\min}$ und $T_{N,\max}$ wurden entsprechend Tabelle 32 ebenfalls verringert. Später wurden noch Einstellungen für die Rezirkulation vorgenommen. Die detaillierten Einstellungsänderungen können Tabelle 32 entnommen werden.

Die höhere Rezirkulationsrate hatte zur Folge, dass sich die NO_x -Emissionen stabilisierten und im Bereich von 60 bis 70 mg/MJ bei Nennleistungen von 6 bis 8,5 MW auftraten.

Vor der Erhöhung der Rezirkulationsrate hatte die Reduktion der maximalen Drehzahl aller Primärluftventilatoren eine Reduktion der NO_x -Emissionen von rund 20 % zur Folge. Die Rezirkulationsrate hat also wesentlich weniger Potential als die Reduktion der Primärluft.

Weiters zeigt Abbildung 39, dass eine positive Abweichung zum Sollwert von Lambda einen negativen Einfluss auf die NO_x -Emissionen hat. Daher sollte der Istwert von Lambda ein wenig unterhalb vom Sollwert von Lambda zu liegen kommen.

| Stunden- mittelwerte Nummer | Datum | Uhrzeit | Einstellungen | | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------|---------------|--|-------------|-------------|---------|
| | | | Anlage | Bezeichnung 1 | Wert alt | Wert neu | Einheit |
| [] | [tt.mm.jjjj] | [hh:mm] | [] | [] | [] | [] | [] |
| 80 | 20.09.2012 | 07:35:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 1 max | 40 | 45 | % |
| 80 | 20.09.2012 | 07:36:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 2 max | 35 | 40 | % |
| 80 | 20.09.2012 | 07:42:00 | Kessel 1 | Sekundär-Rezi-Klappe O ₂ -Gehalt min | 16 | 15 | % |
| 83 | 20.09.2012 | 10:00:00 | Kessel 1 | Einschaltpause Rost Zone 2 | 40 | 38 | s |
| 83 | 20.09.2012 | 10:01:00 | Kessel 1 | Einschaltpause Rost Zone 3 | 36 | 50 | s |
| 86 | 20.09.2012 | 13:00:00 | Kessel 1 | Einschaltpause 0% Leistung | 360 | 300 | s |
| 86 | 20.09.2012 | 13:01:00 | Kessel 1 | Einschaltpause 100% Leistung | 88 | 80 | s |
| 86 | 20.09.2012 | 13:25:00 | Kessel 1 | O ₂ -Minimum untere Grenze | 4 | 3 | % |
| 86 | 20.09.2012 | 13:26:00 | Kessel 1 | Einschaltpause bei O ₂ -Regler 0% | 360 | 300 | s |
| 86 | 20.09.2012 | 13:27:00 | Kessel 1 | Einschaltpause bei O ₂ -Regler 100% | 80 | 70 | s |
| 86 | 20.09.2012 | 13:28:00 | Kessel 1 | Einschubpause bei Leistungsregler 100% | 80 | 70 | s |
| 86 | 20.09.2012 | 13:38:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 1 max | 45 | 50 | % |
| 87 | 20.09.2012 | 14:15:00 | Kessel 1 | Einschubpause bei Leistungsregler 100% | 70 | 60 | s |
| 87 | 20.09.2012 | 14:16:00 | Kessel 1 | Einschubpause bei O ₂ -Regler 100% | 70 | 60 | s |
| 87 | 20.09.2012 | 14:17:00 | Kessel 1 | Einschaltpause - Rost Zone 1 | 2 | 1 | min |
| 87 | 20.09.2012 | 14:18:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 2 max | 40 | 45 | % |
| 88 | 20.09.2012 | 15:21:00 | Kessel 1 | Zone 1 - k _p O ₂ -Gehalt | 0 | 0,5 | |
| 88 | 20.09.2012 | 15:22:00 | Kessel 1 | Zone 1 - T _N Min O ₂ -Gehalt | 0 | 50 | |
| 88 | 20.09.2012 | 15:23:00 | Kessel 1 | Zone 1 - T _N Max O ₂ -Gehalt | 0 | 80 | |
| 88 | 20.09.2012 | 15:24:00 | Kessel 1 | Zone 2 - k _p O ₂ -Gehalt | 0 | 0,5 | |
| 88 | 20.09.2012 | 15:25:00 | Kessel 1 | Zone 2 - T _N Min O ₂ -Gehalt | 0 | 50 | |
| 88 | 20.09.2012 | 15:26:00 | Kessel 1 | Zone 2 - T _N Max O ₂ -Gehalt | 0 | 80 | |
| 88 | 20.09.2012 | 15:28:00 | Kessel 1 | Zone 3 - k _p O ₂ -Gehalt | 0 | 0,5 | |
| 88 | 20.09.2012 | 15:29:00 | Kessel 1 | Zone 3 - T _N Min O ₂ -Gehalt | 0 | 50 | |
| 88 | 20.09.2012 | 15:30:00 | Kessel 1 | Zone 3 - T _N Max O ₂ -Gehalt | 0 | 80 | |
| 89 | 20.09.2012 | 16:00:00 | Kessel 1 | Einschubpause bei 100% | 60 | 45 | s |
| 89 | 20.09.2012 | 16:02:00 | Kessel 1 | O ₂ -Regelung - Primär-Rezi-Klappe min | 16 | 16,5 | % |
| 89 | 20.09.2012 | 16:03:00 | Kessel 1 | O ₂ -Regelung - Primär-Rezi-Klappe max | 19 | 20 | % |
| 89 | 20.09.2012 | 16:43:00 | Kessel 1 | Laufzeit - Rost Zone 3 max | 17 | 15 | s |
| 90 | 20.09.2012 | 17:32:00 | Kessel 1 | Rezi-Ventilator - Feuerraumtemperatur | 950 | 970 | °C |
| 91 | 20.09.2012 | 18:04:00 | Kessel 1 | Rezi-Klappe - Reglerparameter - T _N | 30 | 60 | s |

Tabelle 33: Vorgenommene Einstellungen an Anlage 1 am 20.09.2012 (SCA Timber Bollstabruk)

Am zweiten Tag der Beobachtungen wurde die O₂-Regelung aktiviert, die Einschaltzeiten der Roste 1, 2 und 3 und die Einschubzeiten von Leistungsregler und O₂-Regler adaptiert. Die Drehzahlen der Primärventilatoren 1 und 2 wurden dagegen nur leicht erhöht, da auch die Einschubzeiten kürzer gestellt wurden. Der Regelparameter O₂-Gehalt Rezirkulation (primäre und sekundäre Rezirkulationsklappe) ist verändert worden, um eine homogenere Temperaturverteilung über den gesamten Feuerraum zu erhalten. Zusätzlich ist der Regelparameter T_N der Klappe von 30 s auf 60 s erhöht worden. Dies ermöglicht ein konstanteres Halten der berechneten Sauerstoffkonzentration.

Regelungstechnisch wird der Rezirkulationsventilator bei einer einstellbaren mittleren Temperatur der drei Feuerraumtemperaturen gestartet.

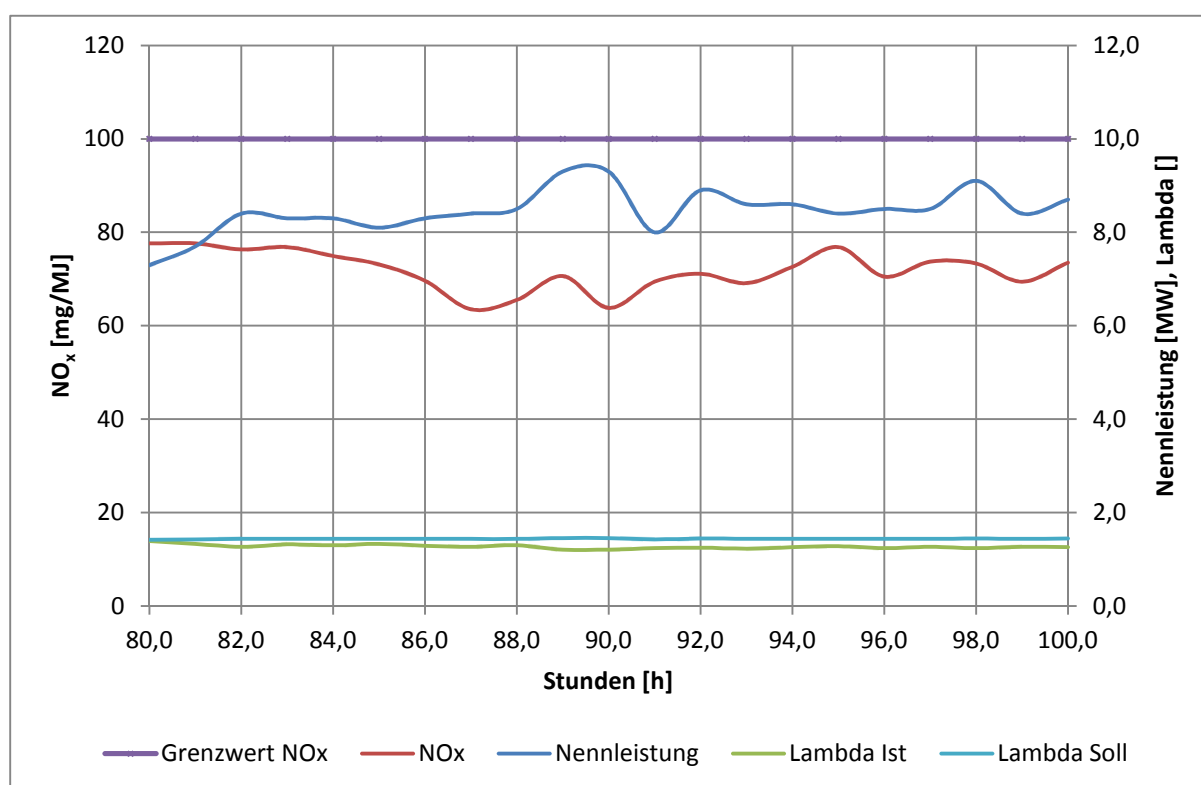


Abbildung 40: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO_x-Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 20.09.2012 (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

Trotz Erhöhung der Nennleistung um im Mittel 1 MW konnten die NO_x-Emissionen wie in Abbildung 39 bereits gezeigt, im Bereich von 60 bis 80 mg/MJ gehalten werden. Die mittlere Nennleistung betrug ca. 9 MW in Abbildung 40. Auch hier zeigt sich, dass ein Halten des Istlambdawertes unter dem Solllambdawert positiven Einfluss auf die NO_x-Emissionen hat.

Vergleicht man die Nennleistungen aus Abbildung 39 und 40 im Hinblick auf die NO_x-Emissionen, so ist zu erkennen, dass bei geringeren Nennleistungen auch weniger NO_x-Emissionen entstehen. Erhöht man dagegen die Nennleistung, so steigen auch die NO_x-Emissionen.

| Stunden- mittelwerte Nummer | Datum | Uhrzeit | Einstellungen | | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------|---------------|---|-------------|-------------|---------|
| | | | Anlage | Bezeichnung 1 | Wert alt | Wert neu | Einheit |
| [] | [tt.mm.jjjj] | [hh:mm] | [] | [] | [] | [] | [] |
| 105 | 21.09.2012 | 08:03:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 1 max | 50 | 55 | % |
| 105 | 21.09.2012 | 08:04:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 max | 30 | 35 | % |
| 105 | 21.09.2012 | 08:30:00 | Kessel 1 | Materialeinbringung | 45 | 40 | s |
| 105 | 21.09.2012 | 08:31:00 | Kessel 1 | Materialeinbringung - O ₂ | 45 | 40 | s |
| 105 | 21.09.2012 | 08:37:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 max | 35 | 40 | % |
| 105 | 21.09.2012 | 08:38:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 4 max | 10 | 15 | % |
| 105 | 21.09.2012 | 08:52:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 1 max | 55 | 60 | % |
| 106 | 21.09.2012 | 09:00:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 1 max | 60 | 55 | % |
| 106 | 21.09.2012 | 09:01:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 2 max | 45 | 50 | % |
| 106 | 21.09.2012 | 09:50:00 | Kessel 1 | O ₂ -Regelung - O ₂ min | 3,0 | 3,5 | % |
| 107 | 21.09.2012 | 10:37:00 | Kessel 1 | Einschaltquote - Rost Zone 4 | 10 | 15 | x |
| 107 | 21.09.2012 | 10:38:00 | Kessel 1 | Einschaltpause - Rost Zone 4 | 8 | 10 | min |
| 107 | 21.09.2012 | 10:39:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 1 - O ₂ -Gehalt max | | +10 | % |
| 107 | 21.09.2012 | 10:40:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 2 - O ₂ -Gehalt max | | +10 | % |
| 107 | 21.09.2012 | 10:41:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 3 - O ₂ -Gehalt max | | +10 | % |
| 107 | 21.09.2012 | 10:49:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 1 - O ₂ -Gehalt max | | -5 | % |
| 107 | 21.09.2012 | 10:50:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 2 - O ₂ -Gehalt max | | -5 | % |
| 107 | 21.09.2012 | 10:51:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 3 - O ₂ -Gehalt max | | -5 | % |
| 107 | 21.09.2012 | 10:55:00 | Kessel 1 | O ₂ -Regelung - O ₂ min | 3,5 | 3,0 | % |
| 108 | 21.09.2012 | 11:03:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 max | 40 | 45 | % |
| 108 | 21.09.2012 | 11:04:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 1 - O ₂ -Gehalt max | | -5 | % |
| 108 | 21.09.2012 | 11:05:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 2 - O ₂ -Gehalt max | | -5 | % |
| 108 | 21.09.2012 | 11:06:00 | Kessel 1 | SL - Drehzahl Zone 3 - O ₂ -Gehalt max | | -5 | % |
| 108 | 21.09.2012 | 11:32:00 | Kessel 1 | Rezi-Ventilator - Feuerraumtemp. Max | 970 | 980 | °C |
| 109 | 21.09.2012 | 12:02:00 | Kessel 1 | Nachbelüften - Sekundärluft | 4,0 | 3,5 | % |
| 109 | 21.09.2012 | 12:03:00 | Kessel 1 | Primär-Rezi-Klappe - O ₂ -Gehalt max | 20,0 | 19,5 | % |
| 110 | 21.09.2012 | 13:18:00 | Kessel 1 | Einschubpause bei Leistungsregler 0% | 300 | 280 | s |
| 110 | 21.09.2012 | 13:19:00 | Kessel 1 | Einschubpause bei O ₂ -Regler 0% | 300 | 280 | s |
| 111 | 21.09.2012 | 14:00:00 | Kessel 1 | Nachbelüften - Sekundärluft | 3,5 | 4,0 | % |
| 111 | 21.09.2012 | 14:06:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 max | 45 | 50 | % |
| 111 | 21.09.2012 | 14:32:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 max | 50 | 55 | % |
| 111 | 21.09.2012 | 14:44:00 | Kessel 1 | Primär-Rezi-Klappe - O ₂ -Gehalt max | 20 | 20 | % |

Tabelle 34: Vorgenommene Einstellungen an Anlage 1 am 21.09.2012 – Teil 1 (SCA Timber Bollstabruk)

| Stunden- mittelwerte Nummer | Datum | Uhrzeit | Einstellungen | | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------|---------------|---|-------------|-------------|---------|
| | | | Anlage | Bezeichnung 1 | Wert alt | Wert neu | Einheit |
| [] | [tt.mm.jjjj] | [hh:mm] | [] | [] | [] | [] | [] |
| 112 | 21.09.2012 | 15:08:00 | Kessel 1 | Sekundär-Rezi-Klappe - Stellung max | 40 | 100 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:09:00 | Kessel 1 | Sekundär-Rezi-Klappe - O ₂ -Gehalt min | 15,0 | 16,5 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:10:00 | Kessel 1 | Sekundär-Rezi-Klappe - O ₂ -Gehalt max | 19,0 | 20,0 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:22:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - O ₂ -Gehalt - Zone 1 max | | +5 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:23:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - O ₂ -Gehalt - Zone 2 max | | +5 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:24:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - O ₂ -Gehalt - Zone 3 max | | +5 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:28:00 | Kessel 1 | Nachbelüften Sekundärluft | 4,00 | 3,75 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:31:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - O ₂ -Gehalt - Zone 1 max | | +5 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:32:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - O ₂ -Gehalt - Zone 2 max | | +5 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:33:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - O ₂ -Gehalt - Zone 3 max | | +5 | % |
| 112 | 21.09.2012 | 15:43:00 | Kessel 1 | Einschaltquote - Rost Zone 1 | 1 | 2 | xES |
| 113 | 21.09.2012 | 16:32:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 max | 55 | 60 | % |
| 115 | 21.09.2012 | 18:08:00 | Kessel 1 | O ₂ -Gehalt max bei Drehzahl min | 10 | 5 | % |
| 115 | 21.09.2012 | 18:24:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 3 max | 60 | 53 | % |
| 115 | 21.09.2012 | 18:25:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - PV Zone 4 max | 20 | 18 | % |
| 115 | 21.09.2012 | 18:36:00 | Kessel 1 | Drehzahlen - O ₂ -Gehalt Zone 2 max | 20 | 22 | % |
| | 22.09.2012 | 09:00:00 | | Ankunft Andreas Pucher (Inbetriebnahmetechniker) | | | |

Tabelle 35: Vorgenommene Einstellungen an Anlage 1 am 21.09.2012 – Teil 2 (SCA Timber Bollstabruk)

Für die weitere Steigerung der Nennleistung und die gleichzeitig nicht höheren NO_x-Emissionen wurden am 21.09.2012, mit den Erkenntnissen aus den beiden vorangegangenen Tagen, die Einstellungen weiter verfeinert.

Die Materialeinbringung und die Drehzahlen der Primärventilatoren wurden als erstes sukzessive an die Nennleistung von 12 MW herangetastet. Zusätzlich ist die Funktion des Nachbelüftens mit Hilfe der Sekundärventilatoren eingestellt worden.

Da die Sekundärventilatoren ebenfalls an die Rezirkulationsleitung angeschlossen sind, wurden dieselben Einstellungen der Primär-Rezirkulationsklappe übernommen.

Aufgrund der optischen Sichtkontrolle des Feuerraumes fiel auf, dass durch das höhere Drehzahlmaximum von Primärventilator 1 weniger Material am Rost 1 zu liegen kam. Deshalb ist die Einschaltquote von Rost 1 von einmal pro Einschub auf jeden zweiten Einschub verringert worden. Diese Maßnahme war wichtig, da es sonst zu

Unregelmäßigkeiten im Brennstoffbett kommen kann. Eine Folge davon wäre die vermehrte Bildung von NO_x , welches durch ein lokales Überangebot an Verbrennungsluft entsteht.

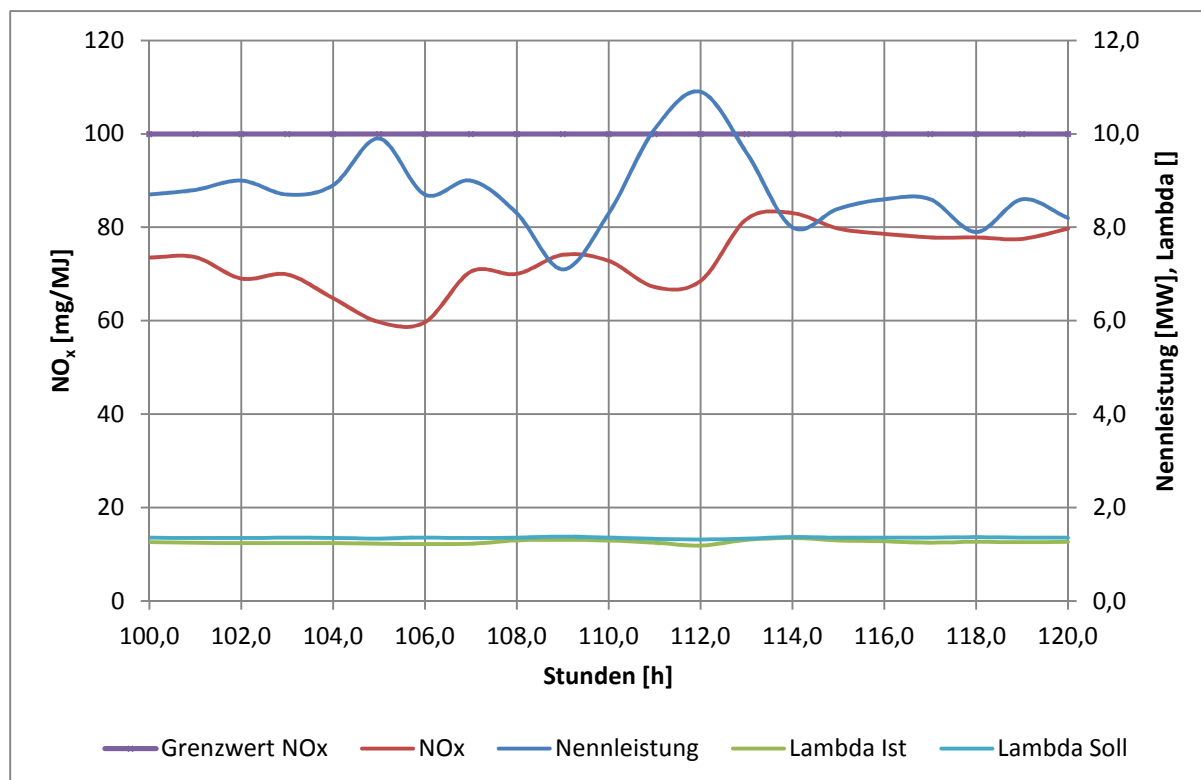


Abbildung 41: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO_x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 21.09.2012 (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

Die Schwankungen der Nennleistung sind in den Abnahmeunterschieden des Netzes begründet. Daher ist es schwieriger, die optimalen Einstellungen für die Anlage 1 zu finden. Wie schon aus den Abbildungen 39 und 40 ersichtlich wurde, konnten mit Hilfe der Anpassungen der Einstellungen die NO_x -Emissionen nahezu beibehalten werden. Sie bewegten sich im Bereich von ungefähr 60 bis ca. 80 mg/MJ in einem Leistungsbereich von 7 bis 11 MW.

Betrachtet man in Abbildung 41 den Bereich der Stundenwerte 110 bis 114, so ergibt sich trotz stärkerem Anstieg der Nennleistung ein leichter Rückgang der NO_x -Emissionen. Wohingegen ein stärkerer Abfall der Nennleistung zu einem stärkeren Anstieg der NO_x -Emissionen führt. Für eine genauere Analyse müssen die Minutenwerte herangezogen werden.

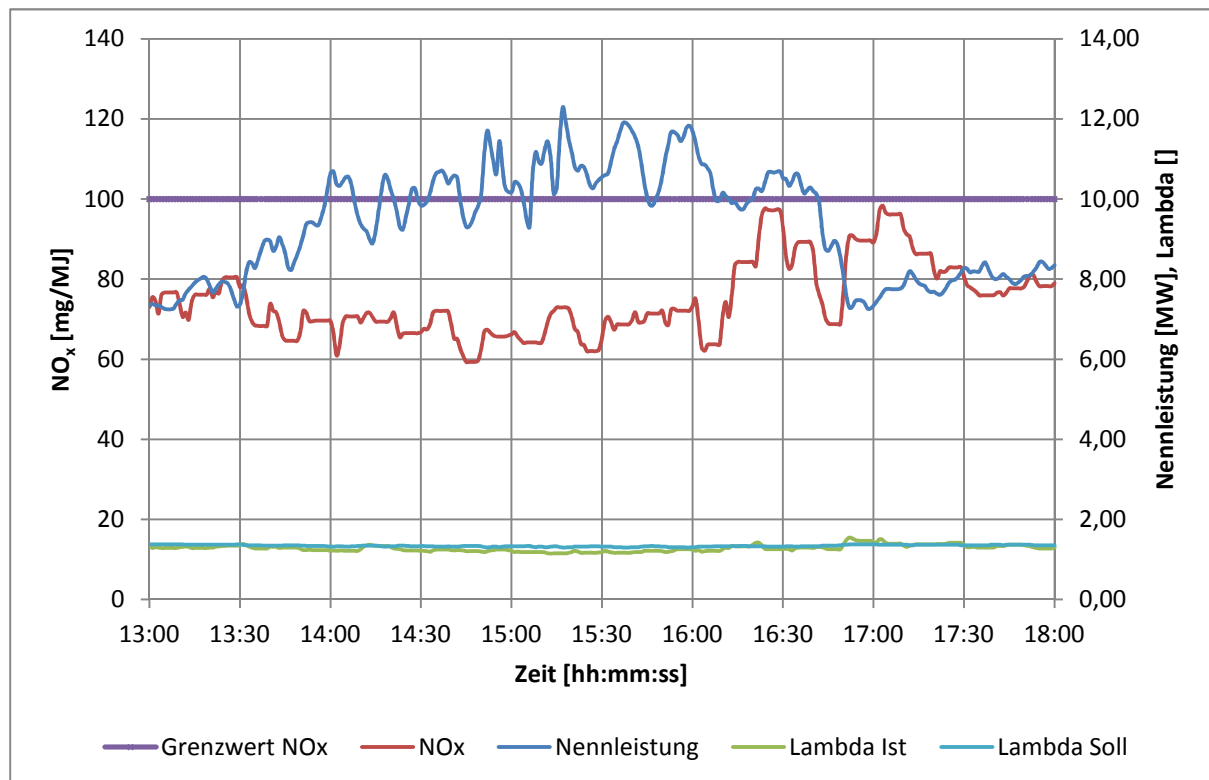


Abbildung 42: Minutenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO_x-Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 21.09.2012 in der Zeit von 13:00 bis 18:00 Uhr (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

Im Zeitbereich von 13:00 bis 16:00 Uhr wurde die Nennleistung kontinuierlich von ungefähr 7 auf 12 MW erhöht, ohne dabei die NO_x-Emissionen wesentlich zu erhöhen. Der Istwert von Lambda bewegt sich unter dem des Sollwertes von Lambda. Nach einem stärkeren Lastwechsel im Bereich von 16:00 bis 18:00 Uhr (12 auf 8 MW) erhöhten sich die NO_x-Emissionen tendenziell, pendelten sich aber dann bei ca. 80 mg/MJ ein. In diesem Bereich näherte sich der Istwert von Lambda dem Sollwert von Lambda an und übertraf ihn phasenweise. Zusätzlich dazu können auch andere nicht erfasste Einflussgrößen (z.B.: Brennstoffmengenerfassung) und lokale Phänomene (z.B.: Temperaturmaxima) sowie der CO-Gehalt diesen Anstieg der NO_x-Emissionen erklären.

Aus den bisherigen Erkenntnissen stellt sich die Frage, wie weit Lambda „Ist“ unter Lambda „Soll“ sein darf, um nicht die CO-Emissionen über den Grenzwert ansteigen zu lassen.

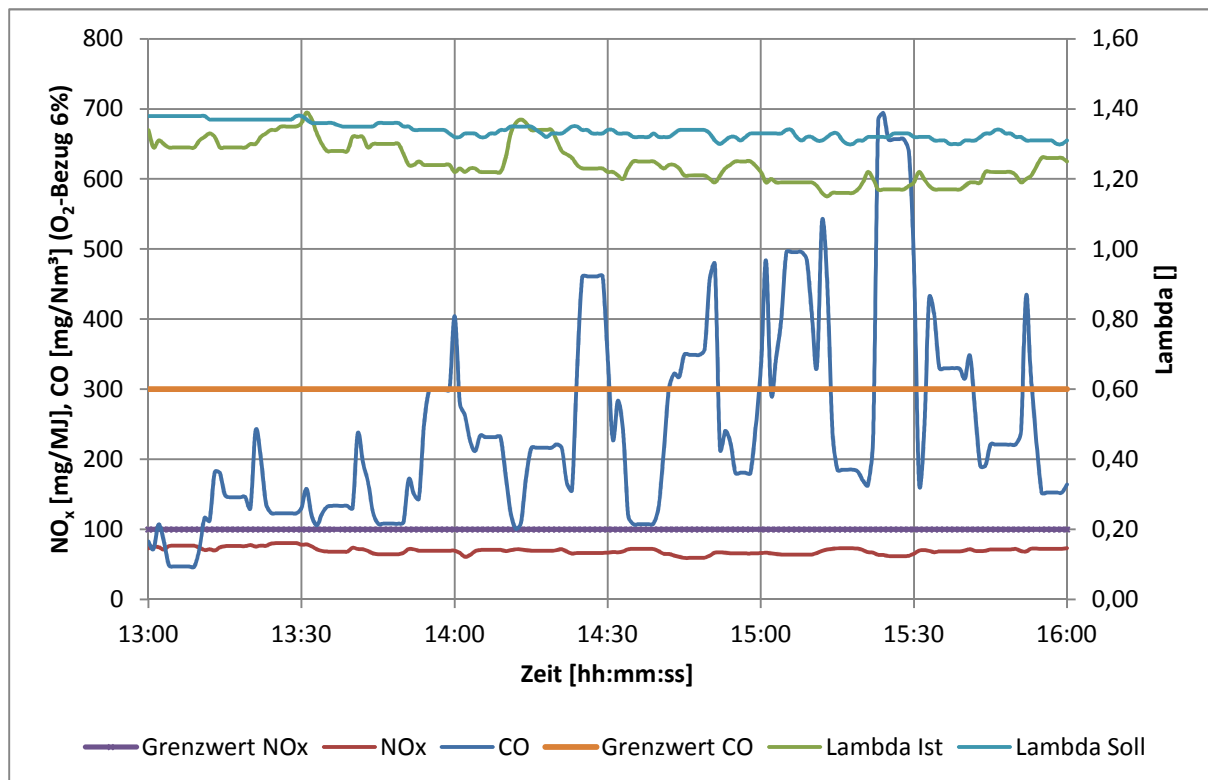


Abbildung 43: Minutenmittelwerte der CO-Emissionen inklusive Grenzwertkurve, Lambda und der NO_x-Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 21.09.2012 in der Zeit von 13:00 bis 16:00 Uhr (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

Ab 14:00 Uhr wird der Grenzwert von CO (300 mg/Nm³) überschritten. Dabei liegen die Messwerte teilweise um 200 % über dem eigentlichen Grenzwert.

Schließt man die Überschreitungen des CO-Grenzwertes aus und ermittelt die maximale Abweichung zwischen Lambda „Ist“ und Lambda „Soll“, so darf diese nicht mehr als 0,15 von Lambda „Soll“ betragen.

Abbildung 44 zeigt einen Gegenüberstellung von NO_x und CO für Anlage 1:

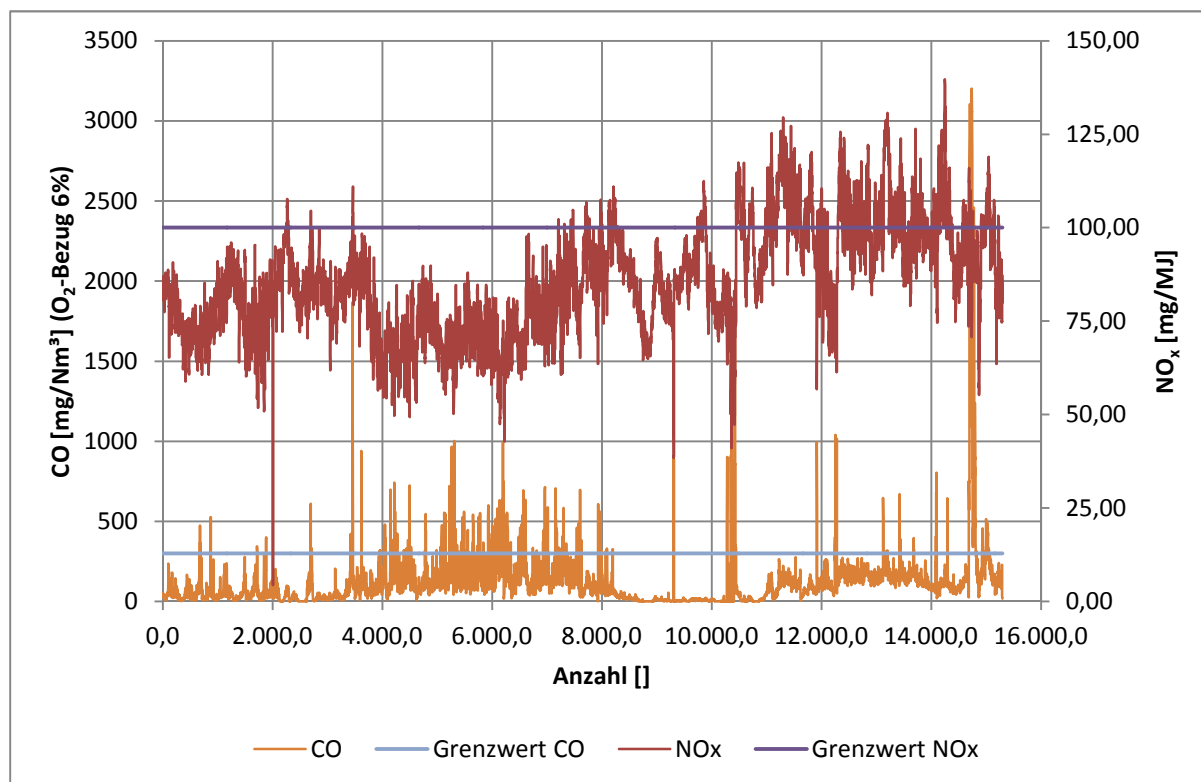


Abbildung 44: Gegenüberstellung CO & NO_x über den Messzeitraum vom 17.09. bis 27.09.2012
(Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

In den ersten Tagen des Messzeitraumes bewegten sich die NO_x-Emissionen im Mittel bei ca. 85 mg/MJ und die CO-Emissionen im Schnitt unter 100 mg/Nm³ (6% O₂-Bezug). Dieser Umstand änderte sich in den darauffolgenden Tagen dahingehend, dass eine Reduktion der NO_x-Emissionen auf Mittelwerte von 70 mg/MJ, eine Erhöhung der CO-Emissionen auf Mittelwerte um die 400 mg/Nm³ zur Folge hatte.

Wie schon bei den Anlagen in Klagenfurt tritt der Zusammenhang zwischen NO_x und CO auch hier auf. Es ist unumgänglich, dass neben dem optimalen Lambdawert auch CO als Parameter auf die Regelung der Anlage Einfluss hat.

Nach Ankunft von Andreas Pucher (Inbetriebnahmetechniker im Dienste der Firma URBAS) wurden die Einstellungen zu Testzwecken verworfen und mit der üblichen Vorgehensweise bei Inbetriebnahmen fortgefahren (in der Nacht vom 21. auf den 22.09.2012).

Aufgrund der veränderten Einstellungen und des veränderten Brennstoffes (von 100 m.-% Rinde zu 70 m.-% Rinde und 30 m.-% Sägespäne) kam es wieder zu einem Umschwung der Verhältnisse von NO_x- und CO-Emissionen. Die NO_x-Emissionen pendelten sich bei ungefähr 105 mg/MJ ein und die CO-Emissionen kamen im Mittel auf ca. 150 mg/Nm³.

Bis inklusive 24.09.2012 ist der für die Umrechnung von mg/MJ nach mg/Nm³ erforderliche Wassergehalt des Brennstoffes mit 44,4 % gemessen worden. Ab dem 25.09.2012 erhöhte

sich der Wassergehalt des Brennstoffes auf 49,7 %. Der Wassergehalt erhöhte sich aufgrund des Brennstoffwechsels und der feuchteren Witterungsbedingungen.

5.2.2 Anlage 2

Der Vollständigkeit halber wird hier auf Anlage 2, im Hinblick auf Vergleichszwecke mit Anlage 1, eingegangen. Sie soll die Unterschiede zwischen der emissionsgeführten Inbetriebnahme und einer traditionellen Inbetriebnahme wiedergeben.

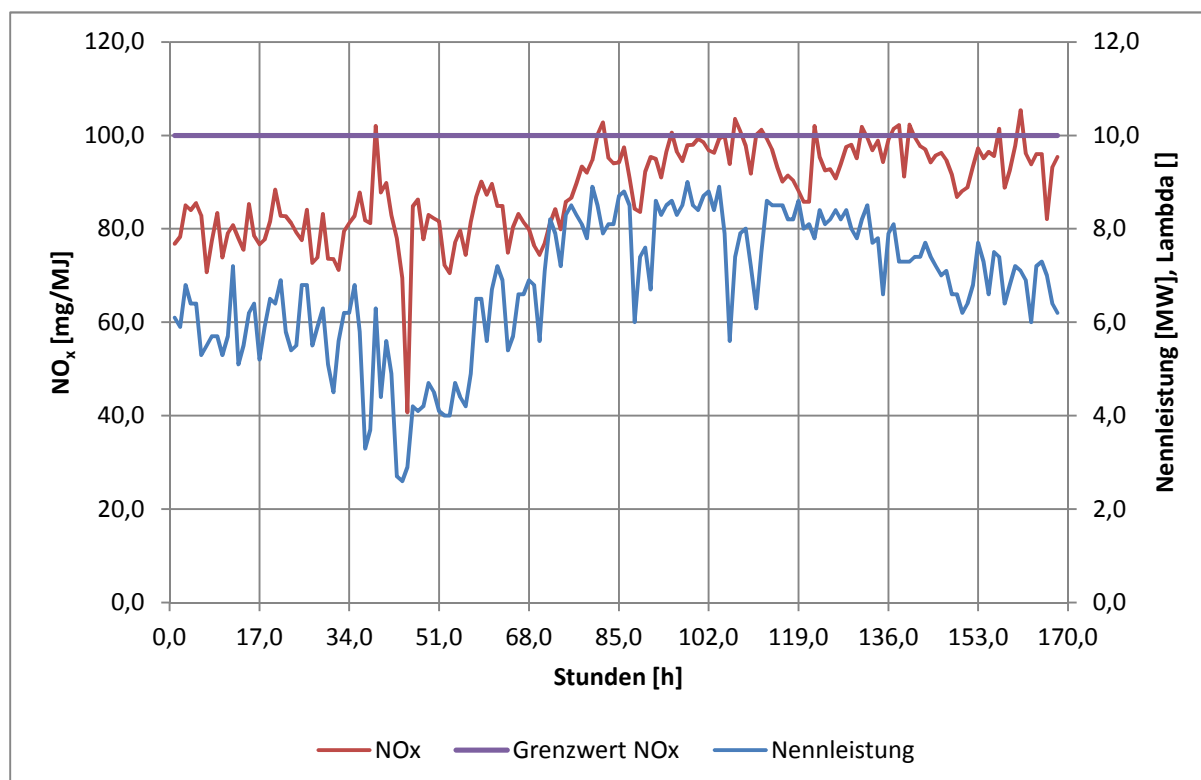


Abbildung 45: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO_x-Emissionen inklusive Grenzwertkurve (Anlage 2 – SCA Timber Bollstabruk)

Bei Anlage 2 ist der Ist-Lambda-Wert immer über dem Soll-Lambda-Wert aus der Literatur (Bereich bei Rostfeuerungen: 1,3 bis 1,5). Die NO_x-Emissionen sind aufgrund dieser Tatsache im Nennleistungsbereich von 3 bis 9 MW zwischen 40 und 105 mg/MJ angesiedelt. Wie in Abbildung 45 zu sehen, konnte die Reduktion der NO_x-Emissionen mit der traditionellen Inbetriebnahmemethode nicht wesentlich vermindert werden.

5.2.3 Vergleich Anlage 1 – Anlage 2

In diesem Kapitel soll einen Überblick über die NO_x -Emissionen, deren Nennleistungen und der CO-Emissionen geben.

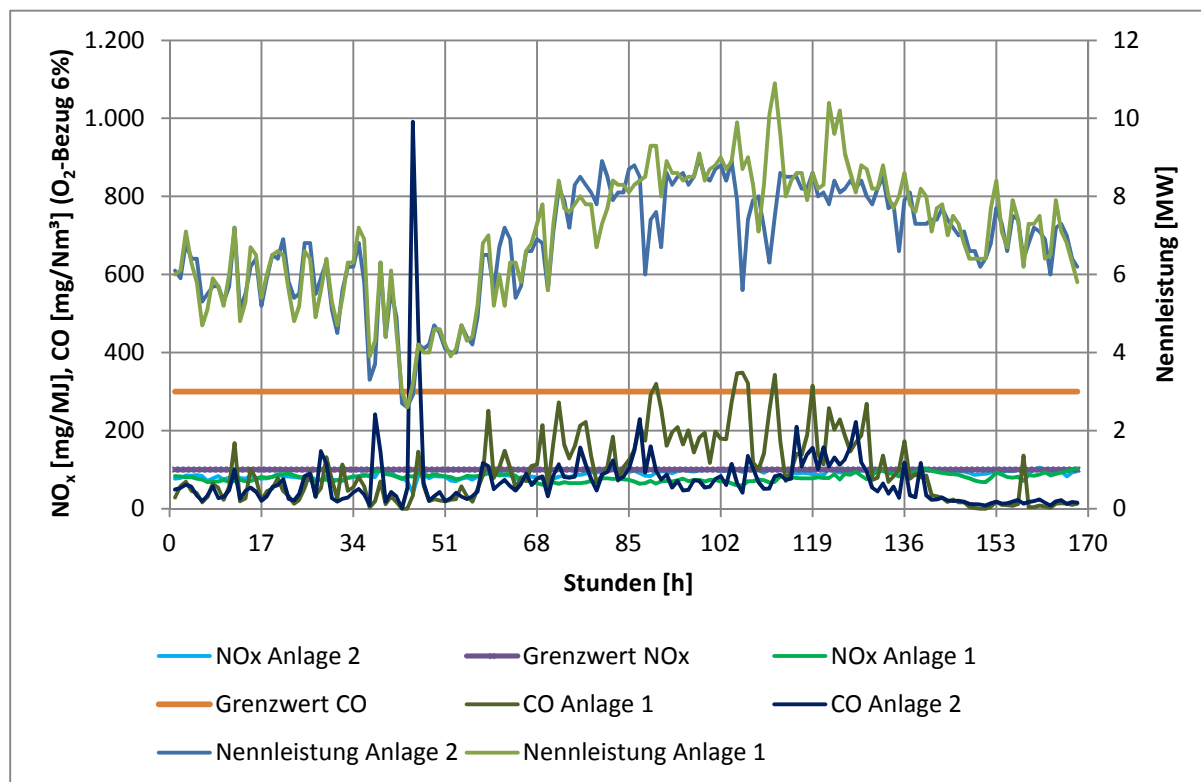


Abbildung 46: Stundenmittelwerte der Nennleistung, CO- und NO_x -Emissionen inklusive Grenzwertkurven (Anlage 1 & Anlage 2 – SCA Timber Bollstabruk)

Anfangs hatten beide Anlagen dieselben Einstellungen und fuhren deshalb nahezu im Einklang. Es gab keine gravierenden Unterschiede in den Emissionswerten beider Abgaskomponenten (CO und NO_x). Erst mit der Veränderung der Einstellungen von Anlage 1 und den aus der Literatur gewonnenen Erkenntnissen verbesserte sich das Emissionsverhalten. Die NO_x -Emissionen konnten verringert werden. Unterdessen stiegen die CO-Emissionen leicht an, blieben aber unter dem geforderten Grenzwert.

Die Tabellen 36, 37 und 38 zeigen die Stundenmittelwerte aus Abbildung 46 (60 bis 120) und stellen die beiden Anlagen gegenüber.

| Nr. | Datum | Zeitraum | Anlage 1 | | | Anlage 2 | | | Vergleich | | |
|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------|-------|
| | | | Nennleistung | NO _x | CO | Nennleistung | NO _x | CO | Nennleistung | NO _x | CO |
| [] | [tt.mm.jjjj] | [hh:mm - hh:mm] | [MW] | [mg/MJ] | [mg/Nm ³] | [MW] | [mg/MJ] | [mg/Nm ³] | [%] von Anlage 1 | | |
| 60 | 19.09.2012 | 11:00 - 12:00 | 5,2 | 89,8 | 78,38 | 5,6 | 87,3 | 49,84 | 108 | 97 | 64 |
| 61 | 19.09.2012 | 12:00 - 13:00 | 6,0 | 84,7 | 105,27 | 6,7 | 89,6 | 62,62 | 112 | 106 | 59 |
| 62 | 19.09.2012 | 13:00 - 14:00 | 5,2 | 88,1 | 148,08 | 7,2 | 84,9 | 73,75 | 138 | 96 | 50 |
| 63 | 19.09.2012 | 14:00 - 15:00 | 6,3 | 87,8 | 103,61 | 6,9 | 84,9 | 57,91 | 110 | 97 | 56 |
| 64 | 19.09.2012 | 15:00 - 16:00 | 6,3 | 84,5 | 53,77 | 5,4 | 74,9 | 46,43 | 86 | 89 | 86 |
| 65 | 19.09.2012 | 16:00 - 17:00 | 5,8 | 71,6 | 78,68 | 5,7 | 80,4 | 63,27 | 98 | 112 | 80 |
| 66 | 19.09.2012 | 17:00 - 18:00 | 6,6 | 75,2 | 70,35 | 6,6 | 83,2 | 90,16 | 100 | 111 | 128 |
| 67 | 19.09.2012 | 18:00 - 19:00 | 6,8 | 66,7 | 109,58 | 6,6 | 81,4 | 60,40 | 97 | 122 | 55 |
| 68 | 19.09.2012 | 19:00 - 20:00 | 7,3 | 65,4 | 112,80 | 6,9 | 79,9 | 76,64 | 95 | 122 | 68 |
| 69 | 19.09.2012 | 20:00 - 21:00 | 7,8 | 61,0 | 213,90 | 6,8 | 76,4 | 82,24 | 87 | 125 | 38 |
| 70 | 19.09.2012 | 21:00 - 22:00 | 5,6 | 70,4 | 51,44 | 5,6 | 74,4 | 31,95 | 100 | 106 | 62 |
| 71 | 19.09.2012 | 22:00 - 23:00 | 7,3 | 66,9 | 168,63 | 7,1 | 76,9 | 84,61 | 97 | 115 | 50 |
| 72 | 19.09.2012 | 23:00 - 00:00 | 8,4 | 63,7 | 272,31 | 8,2 | 81,3 | 113,64 | 98 | 128 | 42 |
| 73 | 20.09.2012 | 00:00 - 01:00 | 7,7 | 67,6 | 163,88 | 7,9 | 84,2 | 81,22 | 103 | 125 | 50 |
| 74 | 20.09.2012 | 01:00 - 02:00 | 7,6 | 65,6 | 128,77 | 7,2 | 79,9 | 78,91 | 95 | 122 | 61 |
| 75 | 20.09.2012 | 02:00 - 03:00 | 7,8 | 65,2 | 159,26 | 8,3 | 85,8 | 82,03 | 106 | 132 | 52 |
| 76 | 20.09.2012 | 03:00 - 04:00 | 8,0 | 65,5 | 212,92 | 8,5 | 86,6 | 156,32 | 106 | 132 | 73 |
| 77 | 20.09.2012 | 04:00 - 05:00 | 7,8 | 67,1 | 222,00 | 8,3 | 89,7 | 112,41 | 106 | 134 | 51 |
| 78 | 20.09.2012 | 05:00 - 06:00 | 7,8 | 70,7 | 134,57 | 8,1 | 93,3 | 75,71 | 104 | 132 | 56 |
| 79 | 20.09.2012 | 06:00 - 07:00 | 6,7 | 66,7 | 67,90 | 7,8 | 92,0 | 46,07 | 116 | 138 | 68 |
| 80 | 20.09.2012 | 07:00 - 08:00 | 7,3 | 77,6 | 82,98 | 8,9 | 94,7 | 87,29 | 122 | 122 | 105 |
| Min | | | | | | | | | | | |
| | | | 5,2 | 61,0 | 51,4 | 5,4 | 74,4 | 32,0 | 86,0 | 89,0 | 38,0 |
| Max | | | | | | | | | | | |
| | | | 8,4 | 89,8 | 272,3 | 8,9 | 94,7 | 156,3 | 138,0 | 138,0 | 128,0 |
| Mittelwert | | | | | | | | | | | |
| | | | 6,9 | 72,5 | 130,4 | 7,2 | 83,9 | 76,8 | 104,0 | 117,3 | 64,5 |

Tabelle 36: Stundenmittelwerte 60 bis 80 von Anlage 1, Anlage 2 und im Vergleich mit Basiswert von Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk)

| Nr. | Datum | Zeitraum | Anlage 1 | | | Anlage 2 | | | Vergleich | | |
|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------|-------|
| | | | Nennleistung | NO _x | CO | Nennleistung | NO _x | CO | Nennleistung | NO _x | CO |
| [] | [tt.mm.jjjj] | [hh:mm - hh:mm] | [MW] | [mg/MJ] | [mg/Nm ³] | [MW] | [mg/MJ] | [mg/Nm ³] | [%] von Anlage 1 | | |
| 80 | 20.09.2012 | 07:00 - 08:00 | 7,3 | 77,6 | 82,98 | 8,9 | 94,7 | 88,78 | 122 | 122 | 107 |
| 81 | 20.09.2012 | 08:00 - 09:00 | 7,7 | 77,6 | 108,22 | 8,5 | 100,1 | 93,93 | 110 | 129 | 87 |
| 82 | 20.09.2012 | 09:00 - 10:00 | 8,4 | 76,3 | 184,01 | 7,9 | 102,8 | 123,83 | 94 | 135 | 67 |
| 83 | 20.09.2012 | 10:00 - 11:00 | 8,3 | 76,8 | 71,66 | 8,1 | 95,2 | 73,71 | 98 | 124 | 103 |
| 84 | 20.09.2012 | 11:00 - 12:00 | 8,3 | 74,9 | 105,57 | 8,1 | 94,0 | 81,57 | 98 | 126 | 77 |
| 85 | 20.09.2012 | 12:00 - 13:00 | 8,1 | 73,1 | 124,31 | 8,7 | 94,2 | 102,12 | 107 | 129 | 82 |
| 86 | 20.09.2012 | 13:00 - 14:00 | 8,3 | 69,6 | 151,51 | 8,8 | 97,4 | 148,69 | 106 | 140 | 98 |
| 87 | 20.09.2012 | 14:00 - 15:00 | 8,4 | 63,5 | 212,26 | 8,5 | 90,9 | 229,06 | 101 | 143 | 108 |
| 88 | 20.09.2012 | 15:00 - 16:00 | 8,5 | 65,5 | 174,40 | 6,0 | 84,3 | 91,92 | 71 | 129 | 53 |
| 89 | 20.09.2012 | 16:00 - 17:00 | 9,3 | 70,6 | 291,67 | 7,4 | 83,6 | 159,52 | 80 | 118 | 55 |
| 90 | 20.09.2012 | 17:00 - 18:00 | 9,3 | 63,8 | 319,76 | 7,6 | 92,2 | 96,02 | 82 | 145 | 30 |
| 91 | 20.09.2012 | 18:00 - 19:00 | 8,0 | 69,4 | 254,35 | 6,7 | 95,4 | 74,30 | 84 | 137 | 29 |
| 92 | 20.09.2012 | 19:00 - 20:00 | 8,9 | 71,1 | 161,51 | 8,6 | 95,0 | 87,48 | 97 | 134 | 54 |
| 93 | 20.09.2012 | 20:00 - 21:00 | 8,6 | 69,1 | 195,49 | 8,3 | 91,0 | 53,36 | 97 | 132 | 27 |
| 94 | 20.09.2012 | 21:00 - 22:00 | 8,6 | 72,6 | 209,17 | 8,5 | 96,5 | 71,11 | 99 | 133 | 34 |
| 95 | 20.09.2012 | 22:00 - 23:00 | 8,4 | 76,8 | 164,31 | 8,6 | 100,6 | 46,41 | 102 | 131 | 28 |
| 96 | 20.09.2012 | 23:00 - 00:00 | 8,5 | 70,5 | 200,73 | 8,3 | 96,5 | 47,90 | 98 | 137 | 24 |
| 97 | 21.09.2012 | 00:00 - 01:00 | 8,5 | 73,7 | 143,66 | 8,5 | 94,5 | 72,24 | 100 | 128 | 50 |
| 98 | 21.09.2012 | 01:00 - 02:00 | 9,1 | 73,3 | 181,54 | 9,0 | 97,9 | 70,57 | 99 | 134 | 39 |
| 99 | 21.09.2012 | 02:00 - 03:00 | 8,4 | 69,4 | 194,04 | 8,5 | 98,0 | 53,81 | 101 | 141 | 28 |
| 100 | 21.09.2012 | 03:00 - 04:00 | 8,7 | 73,5 | 116,59 | 8,4 | 99,3 | 56,40 | 97 | 135 | 48 |
| Min | | | | | | | | | | | |
| | | | 7,3 | 63,5 | 71,7 | 6,0 | 83,6 | 46,4 | 71,0 | 118,0 | 24,0 |
| Max | | | | | | | | | | | |
| | | | 9,3 | 77,6 | 319,8 | 9,0 | 102,8 | 229,1 | 122,0 | 145,0 | 108,0 |
| Mittelwert | | | | | | | | | | | |
| | | | 8,5 | 71,8 | 173,7 | 8,2 | 95,0 | 91,6 | 97,3 | 132,5 | 58,5 |

Tabelle 37: Stundenmittelwerte 80 bis 100 von Anlage 1, Anlage 2 und im Vergleich mit Basiswert von Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk)

| Nr. | Datum | Zeitraum | Anlage 1 | | | Anlage 2 | | | Vergleich | | |
|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------|-------|
| | | | Nennleistung | NO _x | CO | Nennleistung | NO _x | CO | Nennleistung | NO _x | CO |
| [] | [tt.mm.jjjj] | [hh:mm - hh:mm] | [MW] | [mg/MJ] | [mg/Nm ³] | [MW] | [mg/MJ] | [mg/Nm ³] | [%] von Anlage 1 | | |
| 100 | 21.09.2012 | 03:00 - 04:00 | 8,7 | 73,5 | 116,59 | 8,4 | 99,3 | 56,90 | 97 | 135 | 49 |
| 101 | 21.09.2012 | 04:00 - 05:00 | 8,8 | 73,6 | 197,48 | 8,7 | 98,5 | 75,97 | 99 | 134 | 38 |
| 102 | 21.09.2012 | 05:00 - 06:00 | 9,0 | 69,0 | 179,02 | 8,8 | 96,8 | 83,24 | 98 | 140 | 46 |
| 103 | 21.09.2012 | 06:00 - 07:00 | 8,7 | 69,9 | 177,25 | 8,4 | 96,3 | 60,53 | 97 | 138 | 34 |
| 104 | 21.09.2012 | 07:00 - 08:00 | 8,9 | 64,8 | 273,10 | 8,9 | 99,3 | 114,07 | 100 | 153 | 42 |
| 105 | 21.09.2012 | 08:00 - 09:00 | 9,9 | 59,7 | 346,88 | 7,9 | 99,9 | 65,47 | 80 | 167 | 19 |
| 106 | 21.09.2012 | 09:00 - 10:00 | 8,7 | 59,7 | 348,15 | 5,6 | 93,9 | 40,87 | 64 | 157 | 12 |
| 107 | 21.09.2012 | 10:00 - 11:00 | 9,0 | 70,5 | 320,86 | 7,4 | 103,5 | 134,69 | 82 | 147 | 42 |
| 108 | 21.09.2012 | 11:00 - 12:00 | 8,3 | 70,0 | 117,70 | 7,9 | 101,0 | 103,94 | 95 | 144 | 88 |
| 109 | 21.09.2012 | 12:00 - 13:00 | 7,1 | 74,1 | 99,59 | 8,0 | 97,8 | 67,89 | 113 | 132 | 68 |
| 110 | 21.09.2012 | 13:00 - 14:00 | 8,3 | 72,8 | 141,88 | 7,2 | 91,8 | 50,29 | 87 | 126 | 35 |
| 111 | 21.09.2012 | 14:00 - 15:00 | 10,1 | 67,2 | 251,57 | 6,3 | 100,2 | 51,61 | 62 | 149 | 21 |
| 112 | 21.09.2012 | 15:00 - 16:00 | 10,9 | 68,5 | 342,08 | 7,5 | 101,2 | 82,59 | 69 | 148 | 24 |
| 113 | 21.09.2012 | 16:00 - 17:00 | 9,6 | 81,7 | 172,38 | 8,6 | 99,3 | 86,80 | 90 | 122 | 50 |
| 114 | 21.09.2012 | 17:00 - 18:00 | 8,0 | 83,0 | 70,86 | 8,5 | 97,0 | 73,79 | 106 | 117 | 104 |
| 115 | 21.09.2012 | 18:00 - 19:00 | 8,4 | 79,7 | 97,83 | 8,5 | 93,1 | 77,13 | 101 | 117 | 79 |
| 116 | 21.09.2012 | 19:00 - 20:00 | 8,6 | 78,6 | 140,93 | 8,5 | 90,1 | 209,89 | 99 | 115 | 149 |
| 117 | 21.09.2012 | 20:00 - 21:00 | 8,6 | 77,8 | 137,85 | 8,2 | 91,4 | 107,91 | 95 | 117 | 78 |
| 118 | 21.09.2012 | 21:00 - 22:00 | 7,9 | 77,8 | 189,31 | 8,2 | 90,4 | 138,79 | 104 | 116 | 73 |
| 119 | 21.09.2012 | 22:00 - 23:00 | 8,6 | 77,5 | 314,40 | 8,6 | 88,1 | 155,81 | 100 | 114 | 50 |
| 120 | 21.09.2012 | 23:00 - 00:00 | 8,2 | 79,7 | 139,08 | 8,0 | 85,8 | 100,29 | 98 | 108 | 72 |
| Min | | | | | | | | | | | |
| | | | 7,1 | 59,7 | 70,9 | 5,6 | 85,8 | 40,9 | 62,0 | 108,0 | 12,0 |
| Max | | | | | | | | | | | |
| | | | 10,9 | 83,0 | 348,1 | 8,9 | 103,5 | 209,9 | 113,0 | 167,0 | 149,0 |
| Mittelwert | | | | | | | | | | | |
| | | | 8,8 | 72,8 | 198,8 | 8,0 | 95,9 | 92,3 | 92,2 | 133,1 | 55,9 |

Tabelle 38: Stundenmittelwerte 100 bis 120 von Anlage 1, Anlage 2 und im Vergleich mit Basiswert von Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk)

Vergleicht man die Mittelwerte aus Tabelle 36 miteinander, so sind unter Berücksichtigung einer um 4 % höheren mittleren Nennleistung von Anlage 2 die NO_x-Emissionen um ca. 17 % höher als bei Anlage 1. Die CO-Emissionen wiederum verhalten sich im Gegensatz dazu im umgekehrten Verhältnis und sind bei Anlage 1 deutlich höher (ca. 36 %) als bei Anlage 2.

Sie bewegen sich aber trotzdem noch unterhalb des Grenzwertes von 300 mg/Nm³ bei 6 % O₂-Bezug.

Tabelle 37 zeichnet ein noch eindeutigeres Bild der Unterschiede zwischen Anlage 1 und Anlage 2. Hier ist die mittlere Nennleistung um ca. 3 % höher als die von Anlage 2. Die Folge daraus ist, dass die NO_x-Emissionen bei Anlage 2 (um ungefähr 33 %) höher ausgefallen sind als bei Anlage 1. Noch mehr Unterschied gibt es bei den CO-Emissionen. Anlage 2 produziert um 43 % weniger CO als Anlage 1. Mit den vorher beschriebenen Einstellungen stößt man an die Grenze des technisch möglichen Einsparungspotentials der NO_x-Emissionen.

Als Abschluss dieses Punktes gibt Tabelle 38 ähnliche Werte wie Tabelle 37. Bei Erhöhung der mittleren Nennleistung von Anlage 1 zu Anlage 2 im Ausmaß von 8 % konnte keine wesentliche weitere Einsparung bei den NO_x-Emissionen festgestellt werden. Aber die CO-Emissionen von Anlage 1 wurden im Gegensatz zu Anlage 2 im Mittel um weitere 2 % erhöht. Der Maximumwert der CO-Emissionen lag mit über 10 % deutlich über dem erlaubten Grenzwert von 300 mg/Nm³.

Bei zu starker Reduktion von NO_x kann es im Feuerraum lokal zu kleinen Lambdazahlen kommen. Diese kleinen Lambdazahlen ($\lambda < 1,3$) haben zur Folge, dass die CO-Bildung drastisch zunimmt. Abbildung 47 zeigt diesen Zusammenhang zwischen Lambda, CO und NO_x.

Im normalen Betriebsbereich einer Rostfeuerung ($\lambda = 1,3$ bis 1,5) befinden sich die NO_x-Werte im quadratischen Mittel von 70 bis 80 mg/MJ. Will man kleinere Lambdawerte fahren, so muss man bei drastisch steigenden CO-Emissionen im Gegensatz dazu mit nur leichten Rückgängen der NO_x-Emissionen rechnen.

Die CO-Emissionen haben ihren Tiefpunkt zwischen Lambdawerten von 1,4 bis 1,5. Je weiter man in Richtung $\lambda = 1$ geht, desto stärker steigen die CO-Emissionen an.

Die NO_x-Werte dagegen sinken mit fallenden Lambdawerten und steigen mit höher werdenden Lambdawerten.

Bei der betrachteten Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk) deckt sich der Kurvenverlauf der CO-Emissionen mit jenem aus der Literatur, wohingegen der der NO_x-Emissionen abweichend verläuft. Die fehlenden Messwerte bei kleineren und größeren Lambdawerten sind der Grund für den anderwärtigen Verlauf dieser Kurve (siehe Abbildung 47). Die fehlende Möglichkeit der exakten Steuerung der Rezirkulationsmenge in Abhängigkeit der mittleren Feuerraumtemperatur und der Abgastemperatur hat zur Folge, dass der Tiefpunkt der CO-Emissionen nicht in Richtung kleinerer Lambdawerte verschoben werden kann. In Anbetracht der Tatsache, dass die NO_x-Emissionen mit kleineren Lambdawerten ebenfalls weniger werden, wäre es sinnvoll, sich diesen Umstand zunutze zu machen.

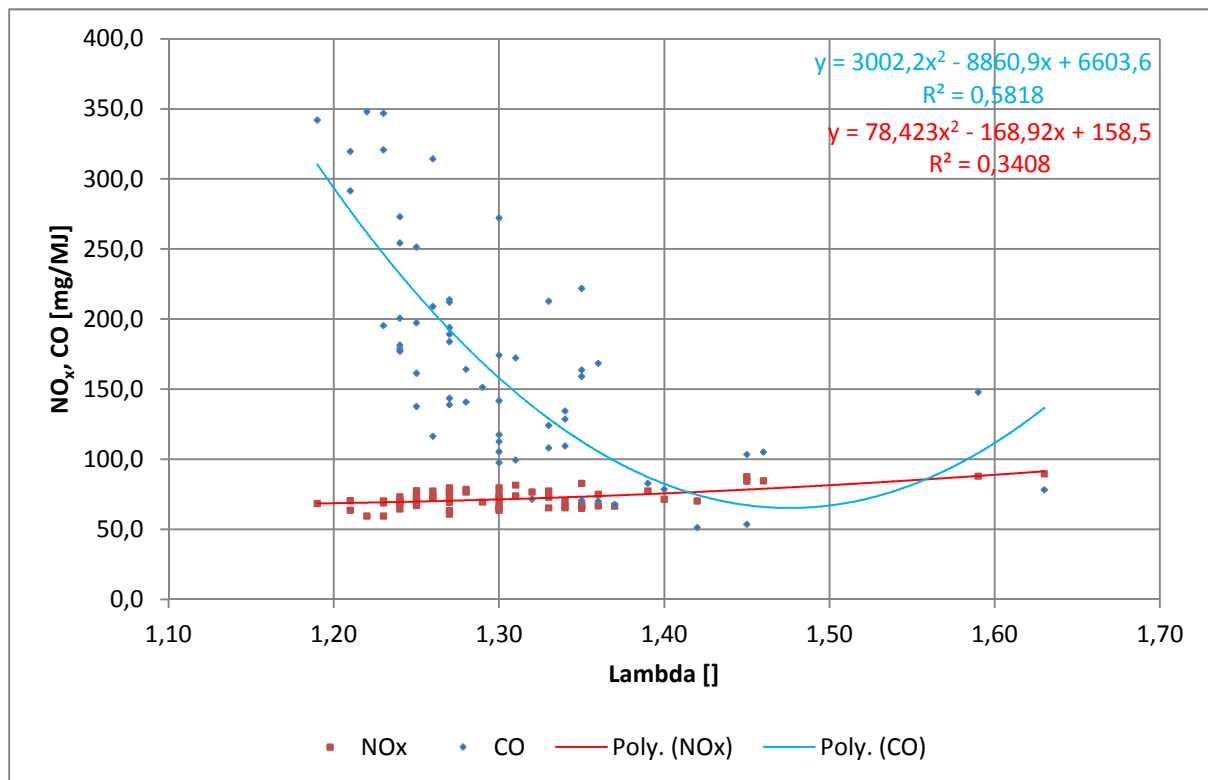


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen CO und NO_x anhand der Messwerte vom Emissionsrechner
(Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

5.2.4 Vergleich EnviLoop Emissionsrechner – Testo Rauchgasanalysegerät

Dieser Punkt dient dem Vergleich der eigenen Messwerte mit jenen des Emissionsrechners.

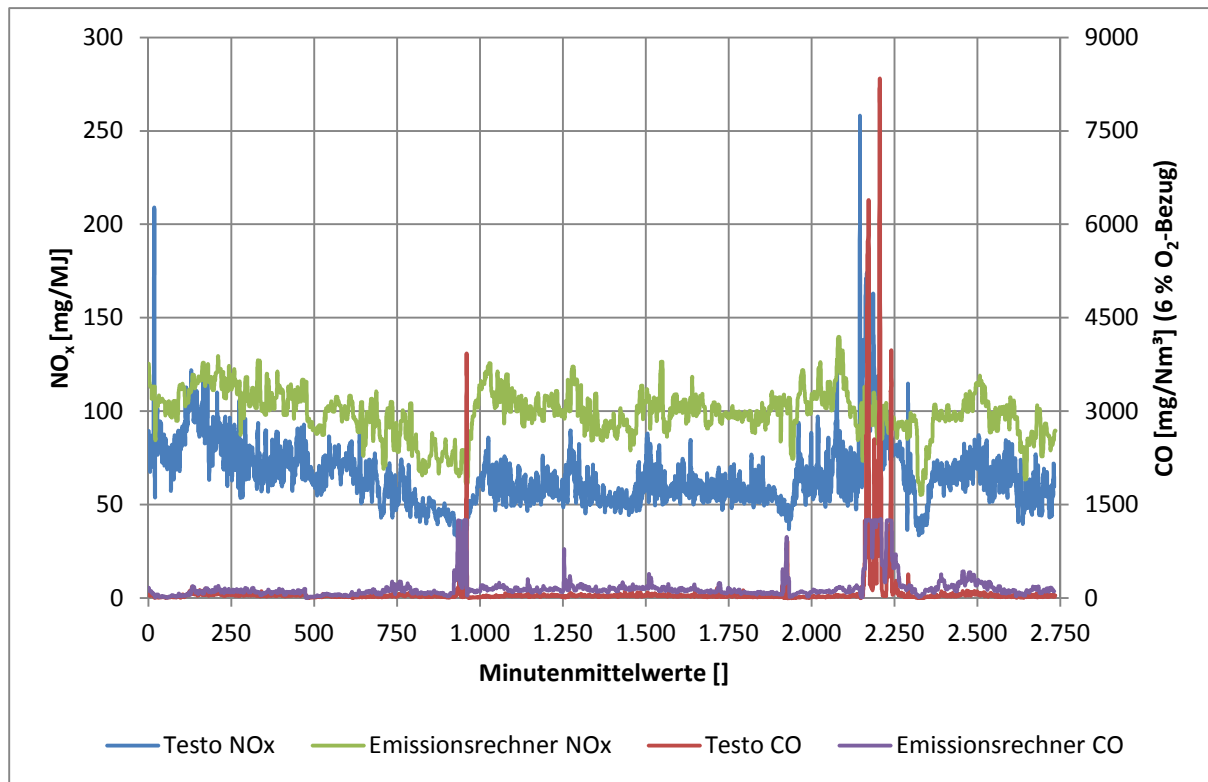


Abbildung 48: Gegenüberstellung der CO- und NO_x-Messwerte des Emissionsrechners und des Testo Rauchgasanalysegerätes (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk)

Aus Abbildung 48 ist ersichtlich, dass die CO und NO_x-Konzentrationen qualitativ gleich sind. Tabelle 39 zeigt einen Vergleich der Min- und Max-Werte sowie der Mittelwerte. Zusätzlich werden die Unterschiede beider Messungen in Zahlen gefasst.

| | <i>EnviLoop Systemtechnik AB</i> | | | | <i>Testo 350XL + Control-Unit</i> | | | |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | <i>Messwerte</i> | | <i>Berechnungen</i> | | <i>Messwerte</i> | | <i>Berechnungen</i> | |
| | <i>NO_x</i> | <i>O₂-Gehalt</i> | <i>Lambda Ist</i> | <i>CO</i> | <i>O₂</i> | <i>Lambda</i> | <i>CO</i> | <i>NO_x</i> |
| | | | λ_{IST} | | | | | |
| [mg/MJ] | [Vol.-%] | [] | [mg/Nm ³] | [Vol.-%] | [] | [mg/Nm ³] | [mg/MJ] | |
| Min | 4,43 | 0,49 | 1,02 | 0,00 | 0,58 | 1,03 | 2,26 | 26,44 |
| Max | 139,70 | 15,72 | 3,98 | 1.272,49 | 17,08 | 5,35 | 8.333,33 | 258,01 |
| Mittelwert | 85,53 | 5,75 | 1,40 | 111,56 | 6,11 | 1,45 | 91,19 | 65,30 |
| Vergleich Mittelwert | 100 | 100 | 100 | 100 | 106 | 104 | 82 | 76 [%] |

Tabelle 39: Gegenüberstellung Min-, Max- und Mittelwerte von NO_x, CO, O₂ und Lambda der Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk); Vergleich der Messwerte von EnviLoop Systemtechnik AB (Emissionsrechner) und Testo Rauchgasanalysegerät

Die Messwerte von O₂ und dem daraus berechneten Lambdawert beider Messverfahren sind innerhalb der Toleranzen des Testo Rauchgasanalysegerätes. Bei CO und NO_x fallen signifikante Unterschiede auf. Diese haben ihren Ursprung in der Tatsache, dass zwei wichtige Parameter (angenommener trockener Heizwert und angenommener Wassergehalt des Brennstoffes) für die Umrechnung der Messwerte nicht zur Verfügung gestellt wurden.

Deshalb wurden eigene Messungen des Wassergehaltes vom Brennstoff vorgenommen und der trockene Heizwert aus der Elementarzusammensetzung berechnet. Es muss von einer nicht unwesentlichen Fehlerfortpflanzung (nicht bekannter angenommener Heizwert bei den Berechnungen des Emissionsrechners) ausgegangen werden.

Die Kalibrierung des Rauchgasanalysegerätes erfolgt mit dem jährlichen Service. Eine Kalibrierung vor und nach der Messung ist nicht möglich, da kein entsprechendes Prüfgas vorhanden war.

In Kapitel 6 (Berechnungen) wird exemplarisch von einem Messwert ausgegangen und die verschiedenen angewandten Formeln sowie Zusammenhänge mathematisch näher erläutert.

6 Berechnungen

In diesem Kapitel wird anhand einer Beispielkonzentration die Vorgehensweise bei der Auswertung der Messdaten dargestellt. Die wichtigen Schritte werden in Anlehnung an die Verbrennungsrechnung (Kapitel 2.3) vorgenommen.

6.1 Zusammensetzung Brennstoff

Die Zusammensetzung des Brennstoffes war bei den betrachteten Kraftwerken unterschiedlich. So muss bei beiden Kraftwerken gesondert auf die Brennstoffzusammensetzung eingegangen werden. Die Grundlage für die Zusammensetzung bildete Tabelle 40 im Hinblick auf die verschiedenen Holzarten aus Österreich von der AGRAR PLUS GmbH.

| <i>Holzart</i> | <i>C</i> | <i>H</i> | <i>O</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>Asche</i> |
|--------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| | [%] in der Trockenmasse | | | | | |
| Nadelholz | 50,0 | 6,3 | 42,8 | 0,3 | 0,023 | 0,6 |
| Fichtenholz | 50,3 | 6,2 | 43,1 | 0,2 | 0,005 | 0,2 |
| Fichtenholz mit Rinde | 49,7 | 6,3 | 43,2 | 0,1 | 0,019 | 0,7 |
| Fichtenrinde | 52,6 | 6,0 | 39,0 | 0,6 | 0,063 | 1,7 |
| Kiefernholz mit Rinde | 53,2 | 5,9 | 40,4 | 0,1 | 0,060 | 0,3 |
| Rinde von Nadelholz | 51,4 | 5,7 | 38,7 | 0,5 | 0,085 | 3,6 |
| Laubholz | 47,3 | 6,2 | 45,0 | 0,5 | 0,040 | 1,0 |
| Buchenholz | 49,0 | 6,1 | 44,3 | 0,3 | 0,007 | 0,3 |
| Buchenholz mit Rinde | 47,9 | 5,2 | 45,2 | 0,2 | 0,020 | 1,5 |
| Buchenrinde | 50,1 | 5,8 | 40,9 | 0,5 | 0,079 | 2,6 |
| Eichenholz mit Rinde | 56,5 | 5,1 | 37,0 | 0,2 | 0,090 | 1,1 |
| Pappelholz (Kurzumtrieb) | 47,5 | 6,2 | 44,1 | 0,4 | 0,033 | 1,8 |
| Weidenholz (Kurzumtrieb) | 47,1 | 6,1 | 44,3 | 0,5 | 0,049 | 2,0 |
| Altholz | 47,3 | 6,5 | 44,3 | 0,5 | 0,052 | 1,3 |

Tabelle 40: Charakterisierung von Holz nach AGRAR PULS GmbH [1]

6.1.1 HKW Klagenfurt (Österreich)

Die Zusammensetzung des Brennstoffes war eine Mischung aus 50 m.-% Hackschnitzeln und 50 m.-% Sägespänen. Die genaue Zusammensetzung wurde nicht analysiert. Sie musste daher aus den Daten in der Literatur [1] mit Berücksichtigung der Gewichtung berechnet werden.

$$c_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} = \frac{c_{\text{Nadelholz}} + c_{\text{Fichtenholz}} + c_{\text{Laubholz}} + c_{\text{Buchenholz}}}{n_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})}} = \frac{50,0 + 50,3 + 47,3 + 49,0}{4} = \frac{196,6}{4} = 49,15 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (46)$$

$$h_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} = \frac{h_{\text{Nadelholz}} + h_{\text{Fichtenholz}} + h_{\text{Laubholz}} + h_{\text{Buchenholz}}}{n_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})}} = \frac{6,3 + 6,2 + 6,2 + 6,1}{4} = \frac{24,8}{4} = 6,2 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (47)$$

$$o_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} = \frac{o_{\text{Nadelholz}} + o_{\text{Fichtenholz}} + o_{\text{Laubholz}} + o_{\text{Buchenholz}}}{n_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})}} = \frac{42,8 + 43,1 + 45,0 + 44,3}{4} = \frac{175,2}{4} = 43,8 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (48)$$

$$n_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} = \frac{n_{\text{Nadelholz}} + n_{\text{Fichtenholz}} + n_{\text{Laubholz}} + n_{\text{Buchenholz}}}{n_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})}} = \frac{0,3 + 0,2 + 0,5 + 0,3}{4} = \frac{1,3}{4} = 0,325 \cong 0,33 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (49)$$

$$s_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} = \frac{s_{\text{Nadelholz}} + s_{\text{Fichtenholz}} + s_{\text{Laubholz}} + s_{\text{Buchenholz}}}{n_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})}} = \frac{0,023 + 0,005 + 0,04 + 0,007}{4} = \frac{0,075}{4} = 0,01875 \cong 0,02 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (50)$$

$$a_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} = 100 - (c_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} + h_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} + o_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} + n_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})} + s_{1:1(\text{Hackschnitzel:Sägespäne})}) = 100 - 49,15 + 6,2 + 43,8 + 0,33 + 0,019 = 5 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (51)$$

Tabelle 41 zeigt zusammenfassend die Brennstoffzusammensetzung beim HKW Klagenfurt.

| Element | C | H | O | N | S | a |
|---------------------------------|------------------------------|------|-------|------|-------|------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | |
| Hackschnitzel + Sägespäne (1:1) | 49,15 | 6,20 | 43,80 | 0,33 | 0,019 | 0,50 |

Tabelle 41: Relevante Brennstoffzusammensetzung für die Auswertung beim HKW Klagenfurt

6.1.2 SCA Timber Bollstabruk (Schweden)

Aus dem Kapitel Messergebnisse (Kapitel 5) ist der Umstand bekannt, dass zwei verschiedene Brennstoffe zum Einsatz kamen. Unter den folgenden Punkten werden die Unterschiede herausgearbeitet. Die Daten der AGRAR PLUS GmbH [1] wurden auch für Schweden herangezogen.

6.1.2.1 Brennstoff vom 17.09. bis 24.09.2012

Hierbei handelte es sich um einen reinen Rindenbrennstoff, sprich 100 m.-% Rinde. Also sind nur die Holzarten mit reinem Rindenanteil von Bedeutung.

$$c_{Rinde} = \frac{c_{Fichtenrinde} + c_{Rinde\ von\ Nadelholz} + c_{Buchenrinde}}{n_{Rinde}} = \frac{52,6 + 51,4 + 50,1}{3} = \frac{154,1}{3} = 51,3667 \cong$$

$$51,37 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (52)$$

$$h_{Rinde} = \frac{h_{Fichtenrinde} + h_{Rinde\ von\ Nadelholz} + h_{Buchenrinde}}{n_{Rinde}} = \frac{6,0 + 5,7 + 5,8}{3} = \frac{17,5}{3} = 5,83333 \cong$$

$$5,83 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (53)$$

$$o_{Rinde} = \frac{o_{Fichtenrinde} + o_{Rinde\ von\ Nadelholz} + o_{Buchenrinde}}{n_{Rinde}} = \frac{39,0 + 38,7 + 40,9}{3} = \frac{118,6}{3} = 39,5333 \cong$$

$$39,53 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (54)$$

$$n_{Rinde} = \frac{n_{Fichtenrinde} + n_{Rinde\ von\ Nadelholz} + n_{Buchenrinde}}{n_{Rinde}} = \frac{0,6 + 0,5 + 0,5}{3} = \frac{1,6}{3} = 0,533333 \cong$$

$$0,53 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (55)$$

$$s_{Rinde} = \frac{s_{Fichtenrinde} + s_{Rinde\ von\ Nadelholz} + s_{Buchenrinde}}{n_{Rinde}} = \frac{0,063 + 0,085 + 0,079}{3} = \frac{0,227}{3} = 0,075667 \cong$$

$$0,08 \text{ [\% i. d. Trockenmasse]} \quad (56)$$

$$a_{Rinde} = 100 - (c_{Rinde} + h_{Rinde} + o_{Rinde} + n_{Rinde} + s_{Rinde}) = 100 - (51,37 + 5,83 + 39,53 + 0,53 + 0,08) = 2,66 \text{ \% i. d. Trockenmasse} \quad (57)$$

Eine Zusammenfassung der Berechnungen zeigt Tabelle 42.

| Element | C | H | O | N | S | a |
|--|------------------------------|------|-------|------|------|------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | |
| Rindensorten Fichte, Nadelholz und Buche gemittelt | 51,37 | 5,83 | 39,53 | 0,53 | 0,08 | 2,66 |

Tabelle 42: Relevante Brennstoffzusammensetzung (17.09. bis 24.09.2012) für die Auswertung bei SCA Timber Bollstabruk

6.1.2.2 Brennstoff vom 25.09. bis 27.09.2012

In diesem Zeitraum wurde eine Brennstoffmischung aus 70 m.-% Rinde und 30 m.-% Sägespänen der Anlage zugeführt.

$$c_{7:3(Rinde:Sägespäne)} = c_{Rinde} * 0,7 + c_{1:1(Hackschnitzel:Sägespäne)} * 0,3 = 51,37 * 0,7 + 49,15 * 0,3 = 50,704 \cong 50,7 \text{ [% i. d. Trockenmasse]} \quad (58)$$

$$h_{7:3(Rinde:Sägespäne)} = h_{Rinde} * 0,7 + h_{1:1(Hackschnitzel:Sägespäne)} * 0,3 = 5,83 * 0,7 + 6,2 * 0,3 = 5,941 \cong 5,94 \text{ [% i. d. Trockenmasse]} \quad (59)$$

$$o_{7:3(Rinde:Sägespäne)} = o_{Rinde} * 0,7 + o_{1:1(Hackschnitzel:Sägespäne)} * 0,3 = 39,53 * 0,7 + 43,8 * 0,3 = 40,811 \cong 40,81 \text{ [% i. d. Trockenmasse]} \quad (60)$$

$$n_{7:3(Rinde:Sägespäne)} = n_{Rinde} * 0,7 + n_{1:1(Hackschnitzel:Sägespäne)} * 0,3 = 0,53 * 0,7 + 0,33 * 0,3 = 0,47 \text{ [% i. d. Trockenmasse]} \quad (61)$$

$$s_{7:3(Rinde:Sägespäne)} = s_{Rinde} * 0,7 + s_{1:1(Hackschnitzel:Sägespäne)} * 0,3 = 0,08 * 0,7 + 0,019 * 0,3 = 0,0617 \cong 0,06 \text{ [% i. d. Trockenmasse]} \quad (62)$$

$$a_{7:3(Rinde:Sägespäne)} = 100 -$$

$$(c_{7:3(Rinde:Sägespäne)} + h_{7:3(Rinde:Sägespäne)} + o_{7:3(Rinde:Sägespäne)} + n_{7:3(Rinde:Sägespäne)} + s_{7:3(Rinde:Sägespäne)}) = 100 - 50,7 + 5,94 + 40,81 + 0,47 + 0,06 = 2,02 \text{ % i. d. Trockenmasse} \quad (63)$$

Abschließend dient Tabelle 43 als Überblick der Berechnungen.

| Element | <i>C</i> | <i>H</i> | <i>O</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>a</i> |
|---|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | |
| Mischrinde + Sägespäne (7:3) | 50,70 | 5,94 | 40,81 | 0,47 | 0,06 | 2,02 |

Tabelle 43: Relevante Brennstoffzusammensetzung (25.09. bis 27.09.2012) für die Auswertung bei SCA Timber Bollstabruk

6.2 Heizwert

Um den Heizwert (H_u) berechnen zu können, muss der Wassergehalt des Brennstoffes bekannt sein. Mit der Kenntnis des Wassergehaltes wird die Zusammensetzung des Brennstoffes neu berechnet. Es gilt folgende allgemeine Formel:

$$c_i = c_{TM} * \frac{(100-w)}{100} \quad (64)$$

Für die Anlagen wird der Heizwert jeweils feucht und trocken nach der Formel von Boie ausgewertet.

6.2.1 HKW Klagenfurt

Beim HKW Klagenfurt betrug der Wassergehalt des Brennstoffes 40 %.

$$c_{c,1:1} = c_{TM,c,1:1} * \frac{(100-w_{1:1})}{100} = 49,15 * \frac{(100-40)}{100} = 29,49 \text{ [%]} \quad (65)$$

$$c_{h,1:1} = c_{TM,h,1:1} * \frac{(100-w_{1:1})}{100} = 6,2 * \frac{(100-40)}{100} = 3,72 \text{ [%]} \quad (66)$$

$$c_{o,1:1} = c_{TM,o,1:1} * \frac{(100-w_{1:1})}{100} = 43,8 * \frac{(100-40)}{100} = 26,28 \text{ [%]} \quad (67)$$

$$c_{n,1:1} = c_{TM,n,1:1} * \frac{(100-w_{1:1})}{100} = 0,33 * \frac{(100-40)}{100} = 0,198 \cong 0,2 \text{ [%]} \quad (68)$$

$$c_{s,1:1} = c_{TM,s,1:1} * \frac{(100-w_{1:1})}{100} = 0,019 * \frac{(100-40)}{100} = 0,0114 \cong 0,011 \text{ [%]} \quad (69)$$

$$c_{a,1:1} = c_{TM,a,1:1} * \frac{(100-w_{1:1})}{100} = 0,5 * \frac{(100-40)}{100} = 0,3 \text{ [%]} \quad (70)$$

Kontrolle der berechneten Werten, ob diese in Summe 100 % ergeben.

$$100 = c_{c,1:1} + c_{h,1:1} + c_{o,1:1} + c_{n,1:1} + c_{s,1:1} + c_{a,1:1} + w_{1:1}$$

$$100 = 29,49 + 3,72 + 26,28 + 0,2 + 0,011 + 0,3 + 40$$

$$100 = 100,001 \Rightarrow w. A.$$

Nun folgt die Berechnung des trockenen und feuchten Heizwertes nach Boie (für flüssige und feste Brennstoffe anwendbar).

$$H_{u,feucht,1:1} = \frac{34,8 \cdot c_c + 93,9 \cdot c_h + 6,3 \cdot c_n + 10,5 \cdot c_s - 10,8 \cdot c_o - 2,5 \cdot w_{1:1}}{100} = \frac{34,8 \cdot 29,49 + 93,9 \cdot 3,72 + 6,3 \cdot 0,2 + 10,5 \cdot 0,011 - 10,8 \cdot 26,28 - 2,5 \cdot 40}{100} = 9,93112 \cong 9,93 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (71)$$

$$H_{u,trocken,1:1} = \frac{34,8 \cdot c_{1:1} + 93,9 \cdot h_{1:1} + 6,3 \cdot n_{1:1} + 10,5 \cdot s_{1:1} - 10,8 \cdot o_{1:1} - 2,5 \cdot w_{1:1}}{100} = \frac{34,8 \cdot 49,15 + 93,9 \cdot 6,2 + 6,3 \cdot 0,33 + 10,5 \cdot 0,019 - 10,8 \cdot 43,8 - 2,5 \cdot 40}{100} = 17,2184 \cong 17,22 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (72)$$

Tabelle 44 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Berechnungen des Heizwertes.

| Element | C | H | O | N | S | a | w | H _u |
|--|------------------------------|------|-------|------|-------|------|----|----------------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | | | [%] |
| Hackschnitzel + Sägespäne (1:1) | 49,15 | 6,20 | 43,80 | 0,33 | 0,019 | 0,50 | 40 | 17,22 |
| Element | C | H | O | N | S | a | | |
| | [%] (feuchter Brennstoff) | | | | | | | |
| Hackschnitzel + Sägespäne (1:1) | 29,49 | 3,72 | 26,28 | 0,20 | 0,011 | 0,30 | 40 | 9,93 |

Tabelle 44: Zusammenfassung von Heizwert feucht, trocken, Elementarzusammensetzungen und des Wassergehaltes beim HKW Klagenfurt

6.2.2 SCA Timber Bollstabruk

Hier erfolgt wiederum die Trennung von Woche 1 (17.09. bis 24.09.2012) und Woche 2 (25.09 bis 27.09.2012).

6.2.2.1 Brennstoff vom 17.09. bis 24.09.2012

Aus den Messungen mit dem Feuchtemessgerät betrug der Wassergehalt des Brennstoffes 44,4 %.

$$c_{c,Rinde} = c_{TM,c,Rinde} \cdot \frac{(100 - w_{Rinde})}{100} = 51,37 \cdot \frac{(100 - 44,4)}{100} = 28,56 \text{ [%]} \quad (73)$$

$$c_{h,Rinde} = c_{TM,h,Rinde} \cdot \frac{(100 - w_{Rinde})}{100} = 5,83 \cdot \frac{(100 - 44,4)}{100} = 3,24 \text{ [%]} \quad (74)$$

$$c_{o,Rinde} = c_{TM,o,Rinde} \cdot \frac{(100 - w_{Rinde})}{100} = 39,53 \cdot \frac{(100 - 44,4)}{100} = 21,98 \text{ [%]} \quad (75)$$

$$c_{n,Rinde} = c_{TM,n,Rinde} \cdot \frac{(100 - w_{Rinde})}{100} = 0,53 \cdot \frac{(100 - 44,4)}{100} = 0,29 \text{ [%]} \quad (76)$$

$$c_{s,Rinde} = c_{TM,s,Rinde} \cdot \frac{(100 - w_{Rinde})}{100} = 0,08 \cdot \frac{(100 - 44,4)}{100} = 0,04 \text{ [%]} \quad (77)$$

$$c_{a,Rinde} = c_{TM,a,Rinde} * \frac{(100-w_{Rinde})}{100} = 2,66 * \frac{(100-44,4)}{100} = 1,48 \text{ [%]} \quad (78)$$

Schnelle Kontrolle der berechneten Werten, ob die Summe 100 % ergibt.

$$100 = c_{c,Rinde} + c_{h,Rinde} + c_{o,Rinde} + c_{n,Rinde} + c_{s,Rinde} + c_{a,Rinde} + w_{Rinde}$$

$$100 = 28,56 + 3,24 + 21,98 + 0,29 + 0,04 + 1,48 + 44,4$$

$$100 = 99,99 \Rightarrow w. A.$$

Es folgt die Berechnung des trockenen und feuchten Heizwertes nach Boie (für flüssige und feste Brennstoffe anwendbar).

$$H_{u,feucht,Rinde} = \frac{34,8*c_{c,Rinde}+93,9*c_{h,Rinde}+6,3*c_{n,Rinde}+10,5*c_{s,Rinde}-10,8*c_{o,Rinde}-2,5*w_{Rinde}}{100} = \frac{34,8*28,56+93,9*3,24+6,3*0,29+10,5*0,04-10,8*21,98-2,5*44,4}{100} = 9,52 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (79)$$

$$H_{u,trocken,Rinde} = \frac{34,8*c_{Rinde}+93,9*h_{Rinde}+6,3*n_{Rinde}+10,5*s_{Rinde}-10,8*o_{Rinde}-2,5*w_{Rinde}}{100} = \frac{34,8*51,37+93,9*5,83+6,3*0,53+10,5*0,08-10,8*39,53-2,5*44,4}{100} = 18,01 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (80)$$

Zusammenfassend noch Tabelle 45 zu den Berechnungen des Heizwertes der Woche 1 (17.09. bis 24.09.2012).

| Element | C | H | O | N | S | a | w | H_u |
|-----------------------|------------------------------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | | [%] | |
| 100 m.-% Rinde | 51,37 | 5,83 | 39,53 | 0,53 | 0,04 | 2,66 | 44,4 | 18,01 |
| Element | C | H | O | N | S | a | | |
| | [%](feuchter Brennstoff) | | | | | | | |
| 100 m.-% Rinde | 28,56 | 3,24 | 21,98 | 0,29 | 0,04 | 1,48 | 44,4 | 9,52 |

Tabelle 45: Zusammenfassung von Heizwert feucht, trocken, Elementarzusammensetzungen und des Wassergehaltes bei SCA Timber Bollstabruk (17.09. bis 24.09.2012)

6.2.2.2 Brennstoff vom 25.09. bis 27.09.2012

Der Wassergehalt des Brennstoffes der Woche 2 war 49,7 %. Der Brennstoff setze sich aus 70 m.-% Rinde und 30 m.-% Sägespäne zusammen.

$$c_{c,7:3} = c_{TM,c,7:3} * \frac{(100-w_{7:3})}{100} = 50,52 * \frac{(100-49,7)}{100} = 25,41 \text{ [%]} \quad (81)$$

$$c_{h,7:3} = c_{TM,h,7:3} * \frac{(100-w_{7:3})}{100} = 5,94 * \frac{(100-49,7)}{100} = 2,99 \text{ [%]} \quad (82)$$

$$c_{o,7:3} = c_{TM,o,7:3} * \frac{(100-w_{7:3})}{100} = 40,85 * \frac{(100-49,7)}{100} = 20,55 \text{ [%]} \quad (83)$$

$$c_{n,7:3} = c_{TM,n,7:3} * \frac{(100-w_{7:3})}{100} = 0,49 * \frac{(100-49,7)}{100} = 0,25 \text{ [%]} \quad (84)$$

$$c_{s,7:3} = c_{TM,s,7:3} * \frac{(100-w_{7:3})}{100} = 0,07 * \frac{(100-49,7)}{100} = 0,04 \text{ [%]} \quad (85)$$

$$c_{a,7:3} = c_{TM,a,7:3} * \frac{(100-w_{7:3})}{100} = 2,13 * \frac{(100-49,7)}{100} = 1,07 \text{ [%]} \quad (86)$$

Schnelle Kontrolle der berechneten Werten, ob die Summe 100 % ergibt.

$$100 = c_{c,7:3} + c_{h,7:3} + c_{o,7:3} + c_{n,7:3} + c_{s,7:3} + c_{a,7:3} + w_{7:3}$$

$$100 = 25,41 + 2,99 + 20,55 + 0,25 + 0,04 + 1,07 + 49,7$$

$$100 = 100,01 \Rightarrow w. A.$$

Es folgt die Berechnung des trockenen und feuchten Heizwertes nach Boie.

$$H_{u,feucht,7:3} = \frac{34,8 * c_{c,7:3} + 93,9 * c_{h,7:3} + 6,3 * c_{n,7:3} + 10,5 * c_{s,7:3} - 10,8 * c_{o,7:3} - 2,5 * w_{7:3}}{100} =$$

$$\frac{34,8 * 25,41 + 93,9 * 2,99 + 6,3 * 0,25 + 10,5 * 0,04 - 10,8 * 20,55 - 2,5 * 49,7}{100} = 8,21 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (87)$$

$$H_{u,trocken,7:3} = \frac{34,8 * c_{7:3} + 93,9 * h_{7:3} + 6,3 * n_{7:3} + 10,5 * s_{7:3} - 10,8 * o_{7:3} - 2,5 * w_{7:3}}{100} =$$

$$\frac{34,8 * 50,52 + 93,9 * 5,94 + 6,3 * 0,49 + 10,5 * 0,07 - 10,8 * 40,85 - 2,5 * 49,7}{100} = 17,54 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (88)$$

Zusammenfassend noch Tabelle 46 zu den Berechnungen des Heizwertes der Woche 2 (25.09. bis 27.09.2012).

| <i>Element</i> | <i>C</i> | <i>H</i> | <i>O</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>a</i> | <i>w</i> | <i>H_u</i> |
|--|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------|
| | [%] bezogen auf Trockenmasse | | | | | | [%] | [MJ/kg] |
| 70 m.-% Rinde + 30 m.-% Sägespäne | 50,52 | 5,94 | 40,85 | 0,49 | 0,07 | 2,13 | 49,7 | 17,54 |
| <i>Element</i> | <i>C</i> | <i>H</i> | <i>O</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>a</i> | | |
| | [%] (feuchter Brennstoff) | | | | | | | |
| 70 m.-% Rinde + 30 m.-% Sägespäne | 25,41 | 2,99 | 20,55 | 0,25 | 0,04 | 1,07 | 49,7 | 8,21 |

Tabelle 46: Zusammenfassung von Heizwert feucht, trocken, Elementarzusammensetzungen und des Wassergehaltes bei SCA Timber Bollstabruk (25.09. bis 27.09.2012)

6.3 Sauerstoffbedarf

Ein repräsentativer Messwert aus Woche 2 wird herangezogen, um die Daten des Messtechnikrechners und der Messwerte aus den Messungen mit dem Rauchgasanalysegerät vergleichbar zu machen.

Für alle weiteren exemplarischen Berechnungen wurden Messwerte vom 25.09.2012 um 05:41 Uhr an Anlage 1 herangezogen.

Der minimale Sauerstoffbedarf beträgt nach Formel 15:

$$O_{2,min} = 1,867 * c_{c,7:3} + 5,6 * c_{h,7:3} + 0,7 * c_{s,7:3} - 0,7 * c_{o,7:3} = 1,867 * 25,41 + 5,6 * 2,99 + 0,7 * 0,04 - 0,7 * 20,55 = 0,5 \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad (89)$$

6.4 Luftbedarf

Aus dem minimalen Sauerstoffbedarf folgt die Mindestluftmenge.

Der Mindestluftbedarf ergibt sich aus Formel 16.

$$L_{min} = \frac{O_{2,min}}{0,21} = \frac{0,5 \left[\frac{Nm^3}{kg} \right]}{0,21} = 2,38 \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad (90)$$

6.5 Abgas

Ein weiterer wichtiger Wert für die Berechnung von ppm nach mg/MJ ist der trockene Mindestabgasvolumenstrom. Dieser fließt in den sogenannten Brennstofffaktor ein.

Als erstes benötigt man den zum Messwert gehörenden Lambdawert.

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_{2,gemessen}} = \frac{21}{21 - 4,34 [Vol.-%]} = 1,26 \quad (91)$$

Dann kann der trockene Mindestabgasvolumenstrom aus Formel 25 und dem zuvor ermitteltem Lambda-Wert berechnet werden.

$$V_{A,tr,min} = 1,867 * c_{c,7:3} + 0,7 * c_{s,7:3} + (\lambda - 0,21) * L_{min} = 1,867 * 0,2541 + 0,7 * 0,0004 + (1,26 - 0,21) * 2,38 = 2,97 Nm^3/kg \quad (92)$$

Der Brennstofffaktor wird für die Umrechnung von ppm in mg/MJ gebraucht und setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$FBr = \frac{V_{A,tr,min}}{H_{u,trocken,7:3}} = \frac{2,97}{17,54} = 0,17 \left[\frac{Nm^3}{MJ} \right] \quad (93)$$

6.6 Emissionen

Für NO_x bzw. CO gelten in Schweden verschiedene Grenzwerte. NO_x wird in mg/MJ und CO in mg/Nm³ bei 6 % O₂-Bezug angegeben. Allgemein gelten folgende Beziehungen:

$$CO = \frac{21 - O_{2,Bezug}}{21 - O_{2,gemessen}} * c_{CO,1} * \frac{T_1 * p_2}{T_2 * p_1} * \frac{MG_{CO}}{V_{ideal}} \quad (94)$$

Als Normbedingungen gelten 0°C und 1013mbar.

$$NO_x = \frac{21}{21 - O_{2,gemessen}} * c_{NO_x,1} * \frac{T_1 * p_2}{T_2 * p_1} * \frac{MG_{NO_x}}{V_{ideal}} * FBr \quad (95)$$

V_{ideal} wird als das ideale Gasvolumen (22,4 l/mol) und die Konstanten MG_{NO_x} bzw. MG_{CO} (46,01 g/mol bzw. 28,01 g/mol) als Molekulargewichte definiert.

Es ergibt sich für den ausgewählten Zeitpunkt (25.09.2012, 05:41 Uhr) ein Wert für CO von

$$CO = \frac{21 - O_{2,Bezug}}{21 - O_{2,gemessen}} * c_{CO,1} * \frac{T_1 * p_2}{T_2 * p_1} * \frac{MG_{CO}}{V_{ideal}} = \frac{21 - 6}{21 - 4,34} * 26 * \frac{307,35 * 1013}{273,15 * 1013} * \frac{28,01}{22,4} = 32,94 \left[\frac{mg}{Nm^3} \right] \quad (96)$$

Abschließend noch der verbleibende Wert für NO_x.

$$NO_x = \frac{21}{21 - O_{2,gemessen}} * c_{NO_x,1} * \frac{T_1 * p_2}{T_2 * p_1} * \frac{MG_{NO_x}}{V_{ideal}} * FBr = \frac{21}{21 - 4,34} * 125 * \frac{307,35 * 1013}{273,15 * 1013} * \frac{46,01}{22,4} * 0,17$$

$$= 61,91 \left[\frac{mg}{MJ} \right] \quad (97)$$

7 Zusammenfassung

Im Hinblick immer strenger werdender Gesetze zur Luftreinhaltung entstand die Idee zu dieser Masterarbeit. Aus aktuellem Anlass und aufgrund der Gesetzeslage in Schweden wurde die Reduktion der NO_x-Emissionen einer URBAS Biomasseverbrennungsanlage zum Thema gemacht.

Der Start dieser Arbeit erfolgte mit einer intensiven Recherche in der einschlägigen Literatur. Grundsätzlich muss man bei der Reduktion von NO_x-Emissionen zwischen den primären und sekundären Maßnahmen unterscheiden. Das Hauptaugenmerk lag bei den primären Maßnahmen zur Reduktion von NO_x. Auf die sekundären Maßnahmen wurde nur theoretisch eingegangen.

Die Entscheidung, nur die primären Maßnahmen intensiv zu behandeln, hatte den Grund in der vorhergehenden Optimierung der Biomasseverbrennungsanlage. Anschließend kann dann immer noch darüber entschieden werden, ob und in welchem Ausmaß sekundäre Maßnahmen nötig werden, um die gesetzlichen Grenzwerte einhalten zu können.

Die drei sinnvollsten Einsparungspotentiale sind die Luftstufung, die Brennstoffstufung und die Abgasrezirkulation. Luftstufung und Brennstoffstufung ergeben das größere Einsparungspotential im Gegensatz zur Abgasrezirkulation. Diese ergibt bei optimaler Auslegung eine maximale Einsparung von 10%. Hingegen gibt es bei der Luftstufung und der Brennstoffstufung ein Einsparungspotential von bis zu 50%. Alle Prozentangaben beziehen sich auf naturbelassene Holzbrennstoffe. Im vorliegenden Fall fiel die Entscheidung auf eine Luftstufung, weil die baulichen Gegebenheiten der Anlage keine Brennstoffstufung ohne erheblichen technischen und wirtschaftlichen Aufwand zuließen.

Die Luftstufung ist zwar regelungstechnisch anspruchsvoller als die Brennstoffstufung erwies sich aber auf Grund der Anlagenbauweise als geeigneter.

Brennstoff und Primärluft werden in der Vergasungszone ($\lambda < 1$) gemischt, in der Reduktionszone ($\lambda < 1$, $1100^\circ\text{C} < T < 1200^\circ\text{C}$) reduziert und unter Zugabe von Sekundärluft in der Nachbrennkammer ($\lambda > 1$) verbrannt. Umgelegt auf eine Anlage der Firma URBAS zeigt Abbildung 49, wie die Luftstufung aussehen sollte.

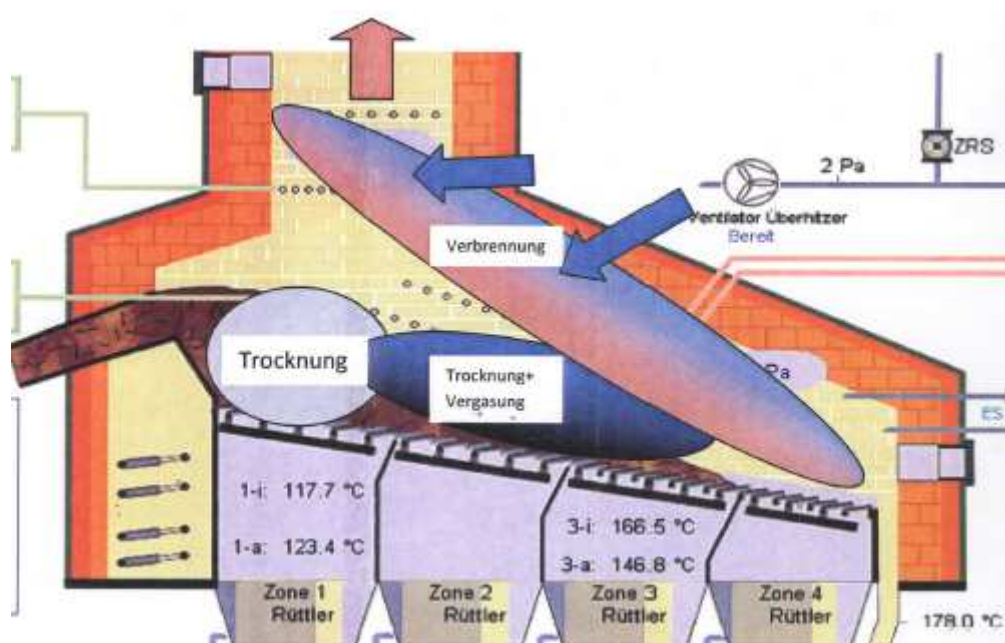


Abbildung 49: Zonenübersicht der idealen Umsetzung des Brennstoffes in einer URBAS Biomasseverbrennungsanlage

Die eigentliche Verbrennung sollte nur im gekennzeichneten Bereich (siehe Abbildung 49) stattfinden, also in Zone 4. In Zone 1 darf der Brennstoff nur getrocknet und von überschüssigem Wasser befreit werden. Die Zonen 2 und 3 sollen hauptsächlich der pyrolytischen Zersetzung dienen. Die Trocknung hat nur mehr eine untergeordnete Rolle. In den Zonen 1, 2 und 3 darf λ nicht größer als 1,0 werden.

In Zone 4 und dem nachfolgenden Rauchgasweg ist, je nach Lastfall, ein λ von 1,3 bis 1,5 wünschenswert.

Durch Parameterveränderungen an der Anlage 1 in Bollstabruk (Schweden) konnten zumindest phasenweise Reduktionen von rund 50 % reproduziert werden.

Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass ohne entsprechendes Regelungskonzept keine Fahrweise auf niedrigem Emissionsniveau mit der Biomasseverbrennungsanlage der Firma URBAS möglich ist.

Ein übliches bzw. häufig verwendetes Regelungskonzept wäre eine CO-Lambda-Regelung der Biomasseverbrennungsanlage. Hierbei wird nicht nur nach Lambda geregelt, sondern auch nach Kohlenmonoxid. Wie in Abbildung 47 ersichtlich, muss emissionstechnisch das Minimum der CO-Emissionen durch einen selbstlernenden Regler gefunden werden. Mathematisch kann man diese Suche mit einer Extremwertaufgabe vergleichen (Suchen eines Tiefpunktes).

Dabei darf aber nicht auf die Abgaskomponente NO_x vergessen werden, da aus der Literatur bekannt ist, dass ein Zusammenhang von NO_x -Emissionen mit Lambda besteht. Des

Weiteren konnte dieser im Rahmen der durchgeführten Arbeiten bestätigt werden. Während das CO-Minimum mittels messtechnischer Erfassung bei einem Lambda zwischen 1,4 und 1,5 zu liegen kommt, so gibt es bei NO_x mit fallendem Lambda noch ein entsprechendes Einsparungspotential.

Zusätzlich zu diesen beiden Feststellungen kann auch die Abgasrezirkulation einen kleinen Beitrag zur Reduktion der Emissionswerte leisten. Mit der entsprechenden Abgasrezirkulationsmenge, welche abhängig von der mittleren Feuerraumtemperatur und der Abgastemperatur ist, kann die Kurve der CO-Emissionen nach links (siehe Abbildung 16) verschoben werden. Somit ist auch eine weitere Reduktion der NO_x-Emissionen möglich.

Auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass das Einsparungspotential an NO_x-Emissionen bei bis zu 50 % liegt. Damit werden Anlagen der Firma URBAS auch in Zukunft mit dem Stand der Technik schritthalten können.

8 Ausblick

Die eigenen Messungen wurden ohne die Möglichkeit der Prüfung des Rauchgasanalysegerätes mittels Prüfgas für NO_x und CO durchgeführt. Daher lassen die Unterschiede in den Messwerten zwischen dem Emissionsrechner und dem Rauchgasanalysegerät nur den Schluss einer Falschmessung zu. Dieses Problem kann in Zukunft mit einem genormten Prüfgas für NO_x und CO vermieden werden. Es müssen Referenzmessungen für NO_x und CO vor und nach den eigentlichen Messungen auf jeden Fall vorgenommen werden.

Der Entwicklungsstand bei URBAS Biomasseverbrennungsanlagen hat gezeigt, dass für eine dem Stand der Technik entsprechende Regelung (CO-Lambda-Regelung) nicht alle benötigten Parameter aufgenommen werden. Für diese Art der Regelung muss ein CO-Sensor integriert und über dessen sinnvolle Positionierung nachgedacht werden.

Es ist ratsam die einfache Regelung der Rezirkulationsmenge über den Vordruck und die Feuerraumtemperatur ebenfalls zu ersetzen. Hier würde sich der Zusammenhang aus Abbildung 16 [Rechts] anbieten. In Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur ergibt sich eine entsprechende Rezirkulationsrate. Die Steigung der Geraden aus dieser Abbildung ändert sich mit der Abgastemperatur. Dieser Umstand sollte ebenfalls mathematisch in die Regelung einfließen. Dadurch ergibt sich durch die optimale Rezirkulationsrate eine Verschiebung der CO-Emissionen nach links und somit auch eine Reduktion der NO_x -Emissionen, so wie in Abbildung 16 [Links] ersichtlich.

Ein weiterer Verbesserungspunkt ist die notwendige Aufnahme der Volumenströme in die und aus der Anlage, sprich eine Bilanz (was geht hinein, was geht hinaus). Um die Kosten niedriger halten zu können, empfiehlt es sich vorerst nur die Gesamtvolumenströme von Primärluft, Sekundärluft, wenn vorhanden Tertiärluft und des Rauchgases aufzunehmen. Mit diesen Daten könnten dann Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten besser dargestellt werden. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen könnten dann Verbesserungen in die Regelung der Anlage einfließen.

Um den Brennstoff zu charakterisieren sollte eine in-situ-Messung des Wassergehaltes und des Gewichts erfolgen. Damit kann man die geänderten Parameter in die Verbrennungsrechnung einfließen lassen und somit die Verbrennungsluftmenge in Echtzeit verändern.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] AGRAR PLUS GmbH: Elementarzusammensetzung verschiedener biogener Brennstoffe, http://www.agrarplus.at/charaktereiomasse.html?file=tl_files/agrarplus-inhalte/faustzahlen-pdf/charakterisierung_biomasse.pdf, (03.10.2013)
- [2] Bariska, Mihaly; Pöhler Rotach, Evelyn; Seubert Hunziker, Heike: Holzkunde II – Teil 2, Holzchemie, <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:26434/eth-26434-02.pdf>, (12.12.2013)
- [3] Hering, Eckbert; Schönfelder, Gert: Sensoren in Wissenschaft und Technik, Funktionsweise und Einsatzgebiete, 1. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Heubach und Dresden, 2012
- [4] Hofbauer, Hermann: Basic Engineering, Prozesse und Anlagen IV, Verbrennungsanlagen, Wien, Technische Universität Wien, Skriptum, 2012
- [5] Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Leipzig/Hamburg, Straubing, Wien, 2009
- [6] Joos, Franz: Technische Verbrennung, Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Hamburg, 2006
- [7] Messtechnik Schaller GmbH: Bedienungsanleitung Hackschnitzel-Feuchtemesser FS_3 Biomasse, Version 1.7_de, Gleisdorf, 2005
- [8] TESTO AG: Bedienungsanleitung testo 350 M/XL – Logger, Lenzkirch, 2008
- [9] TESTO AG: Praxisfibel – Industrielle Abgasanalyse, Praktischer Leitfaden für Emissions- und Prozessmessungen, 2., überarbeitete Auflage, Lenzkirch, 2006
- [10] URBAS Maschinenfabrik Ges.m.b.H.: Photographien Anlage HKW Klagenfurt, Völkermarkt, 2007
- [11] URBAS Maschinenfabrik Ges.m.b.H.: Photographien Probemessungen HKW Klagenfurt, Völkermarkt, 2012
- [12] URBAS Maschinenfabrik Ges.m.b.H.: Technische Beschreibung HKW Klagenfurt, Völkermarkt, 2006

- [13] URBAS Maschinenfabrik Ges.m.b.H.: Photographien Anlage SCA Timber Bollstabruk, Völkermarkt, 2012
- [14] URBAS Maschinenfabrik Ges.m.b.H.: Photographien Messungen SCA Timber Bollstabruk, Völkermarkt, 2012
- [15] URBAS Maschinenfabrik Ges.m.b.H.: Technische Beschreibung SCA Timber Bollstabruk, Völkermarkt, 2012
- [16] Warnatz, Jürgen; Maas, Ulrich; Dibble, Robert W.: Combustion, Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, Karlsruhe, Berkley, 2006

9.1.1 Im Anhang verwendete Literatur

- [17] Warnatz, Jürgen; Maas, Ulrich; Dibble, Robert W.: Combustion, Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, Karlsruhe, Berkley, 2006

9.1.2 Weiterführende Literatur

Chen, Liang; Li, Junhua; Ge, Maofa; Zhu, Ronghai: Enhanced activity of tungsten modified CeO₂/TiO₂ for selective catalytic reduction of NO_x with ammonia, in: Catalysis Today, 153 (2010), 77 – 83

Dalaouti, Natassa; Seferlis, Panos: Design sensitivity of reactive absorption units for improved dynamic performance and cleaner production, The NO_x removal process, in: Journal of Cleaner Production, 13 (2005), 1461 – 1470

Dvorak, Radek; Chlapek, Petr; Jecha, David; Puchyr, Radim; Stehlik, Petr: New approach to common removal of dioxins and NO_x as a contribution to environmental protection, in: Journal of Cleaner Production, 18 (2010), 881 – 888

Goemans, Marcel; Clarysse, Patrick; Joannes, Joseph; De Clercq, Petra; Lenaerts, Silvia; Matthys, Karel; Boels, Kris: Catalytic NO_x reduction with simultaneous dioxin and furan oxidation, in: Chemosphere, 50 (2003), 489 – 497

Hering, Eckbert; Schönfelder, Gert: Sensoren in Wissenschaft und Technik, Funktionsweise und Einsatzgebiete, 1. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Heubach und Dresden, 2012

Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Leipzig/Hamburg, Straubing, Wien, 2009

Lee, Jong H.; Schmiege, Steven J.; Oh, Se H.: Improved NO_x reduction over the staged Ag/Al₂O₃ catalyst system, in: Applied Catalysis A: General, 342 (2008), 78 – 86

Pisupati, Sarma V.; Bhalla, Sumeet: Numerical modeling of NO_x reduction using pyrolysis products from biomass-based materials, in: Biomass and Bioenergy, 32 (2008), 146 – 154

Poskrobko, Slawomir; Krol, Danuta; Lach, Jan: A primary method for reducing nitrogen oxides in coal combustion through addition of Bio-CONO_x, in: Fuel Processing Technology, 101 (2012), 58 – 63

Schaub, G.; Unruh, D.; Wang, J.; Turek, T.: Kinetic analysis of a selective catalytic NO_x reduction (SCR) in a catalytic filter, in: Chemical Engineering and Processing, 42 (2003), 365 – 371

Skreiberg, Oyvind; Kilpinen, Pia; Glarborg, Peter: Ammonia chemistry below 1400 K under fuel-rich conditions in a flow reactor, in: Combustion and Flame, 136 (2004), 501 – 518

Sterner, Thomas; Turnheim, Bruno: Innovation and diffusion of environmental technology, Industrial NO_x abatement in Sweden under refunded emission payments, in: Ecological Economics, 68 (2009), 2996 – 3006

Warnatz, Jürgen; Maas, Ulrich; Dibble, Robert W.: Combustion, Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, Karlsruhe, Berkley, 2006

Williams, A.; Jones, J. M.; Ma, L.; Pourkashanian, M.: Pollutants from the combustion of solid biomass fuels, in: Progress in Energy and Combustion Science, 38 (2012), 113 – 137

9.2 Abkürzungsverzeichnis

9.2.1 Allgemein

| <i>Abkürzung</i> | <i>Bedeutung</i> |
|------------------|---|
| Univ.Prof. | Universitätsprofessor |
| Dipl.-Ing. | Diplom-Ingenieur |
| Dr.techn. | Doktor der technischen Wissenschaften |
| Ing. | Ingenieur |
| BSc | Bachelor of Science |
| österr.-amerik. | österreichisch-amerikanisch |
| u. | und |
| MIT | Masseachusetts Institute of Technology |
| Ges.m.b.H., GmbH | Gesellschaft mit beschränkter Haftung |
| bzw. | beziehungsweise |
| UF | Urea Formaldehyd Klebstoff |
| 3T | temperature, turbulence and time (Temperatur, Turbulenz und Zeit) |
| d.h. | das heißt |
| z.B. | zum Beispiel |
| SWS | Stationäre Wirbelschicht |
| TM | Trockenmasse |
| FM | Frischmasse |
| usw. | und so weiter |
| etc. | et cetera (und so weiter) |
| < | kleiner als |
| SCR | Selektive katalytische NO _x -Reduktion |
| SNCR | Selektive nicht-katalytische NO _x -Reduktion |
| KWKen | Kraft-Wärme-Kopplungen |
| HKW | Heizkraftwerk |
| Anm. | Anmerkung |
| LS | Lichtschanke |
| ca. | circa (zirka); annähernd, ungefähr |
| SRZ | Sekundär-Rezirkulation |
| KWK | Kraft-Wärme-Kopplung |
| RZV | Rezirkulationsventilator |

Tabelle 47: Allgemeines Abkürzungsverzeichnis – Teil 1

| <i>Abkürzung</i> | <i>Bedeutung</i> |
|------------------|---|
| SV | Sekundärventilator |
| ZRS | Zellenradschleuse |
| Schn. | Schnecke |
| i | innen |
| a | außen |
| max., Max | maximal, Maximum |
| SPS | Speicherprogrammierbare Steuerung |
| NTC | Negative Temperature Coefficient |
| TK | Temperaturkoeffizient |
| ISE | Ionenselektive Elektroden |
| ISFET | Ionenselektiver Feldeffekttransistor |
| S | Source |
| D | Drain |
| pH | potentia Hydrogenii (Lateinisch: Kraft des Wasserstoffs) |
| n | negativ |
| p | positiv |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |
| GrobHG | Grobhackgut |
| FrischHG | Frischhackgut |
| NDK | niedriger Dielektrizitätskoeffizient |
| HDK | hoher Dielektrizitätskoeffizient |
| FDR | Frequence Domain Reflectometry (Frequenz-Reflexionsmessung) |
| TDR | Time Domain Reflectometry (Laufzeit-Reflexionsmessung) |
| ECO | Economizer (Speisewasservorwärmer) |
| SCA | Svenska Cellulosa Aktiebolag (Schwedische Zellulose Aktiengesellschaft) |
| AB | Aktiebolag (Aktiengesellschaft) |
| min., Min | minimal, Minimum |
| & | und |
| BEd | Bachelor of Education |
| Projektass. | Projektassistent |
| ES | Endschalter |

Tabelle 48: Allgemeines Abkürzungsverzeichnis – Teil 2

9.2.2 Chemisch

| <i>Abkürzung</i> | <i>Bedeutung</i> |
|------------------------------------|--|
| NO _x | Stickstoffoxide, bestehen aus NO und NO ₂ |
| NO | Stickstoffoxid |
| NO ₂ | Stickstoffdioxid |
| H ₂ | Molekularer Wasserstoff |
| O ₂ | Molekularer Sauerstoff |
| CO | Kohlenmonoxid |
| N | Atomarer Stickstoff |
| N ₂ | Molekularer Stickstoff |
| C | Kohlenstoff |
| HCN | Cyanwasserstoff (Blausäure) |
| O | Atomarer Sauerstoff |
| OH | Hydroxid |
| CH ₄ | Methan |
| NH ₂ | Aminogruppe der Amine und Aminosäuren |
| NH | Aminoradikal der Aminogruppe |
| N ₂ O | Lachgas |
| H | Atomarer Wasserstoff |
| CN | Cyanide |
| H ₂ O | Wasser |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| SO ₂ | Schwefeldioxid |
| S | Schwefel |
| SO ₃ | Schwefeltrioxid |
| CH | Kohlenwasserstoffradikal |
| NH ₃ | Ammoniak |
| CO(NH ₂) ₂ | Harnstoff |
| (NH ₄)HSO ₄ | Ammoniumhydrogensulfat |
| H ₂ S | Schwefelwasserstoff |
| H ⁺ | positiv geladenes Wasserstoffatom |
| H ⁻ | negativ geladenes Wasserstoffatom |

Tabelle 49: Chemisches Abkürzungsverzeichnis – Teil 1

| <i>Abkürzung</i> | <i>Bedeutung</i> |
|------------------|------------------|
| e ⁻ | Elektron |
| a | Asche |
| Pb | Blei |
| PbO | Bleioxid |
| Si | Silizium |
| c | Konzentration |
| Ar | Argon |

Tabelle 50: Chemisches Abkürzungsverzeichnis – Teil 2

9.2.3 Variablen

| Variable | Bezeichnung | Einheit | Bedeutung |
|-----------------|--|-------------------------------------|--|
| λ | Lambda | [] | dimensionslos |
| c | Massenanteil Kohlenstoff | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| h | Massenanteil Wasserstoff | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| s | Massenanteil Schwefel | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| o | Massenanteil Sauerstoff | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| n | Massenanteil Stickstoff | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| a | Massenanteil Asche | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| w | Massenanteil Wasser | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| m_w | Wassermasse | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| m_B | Brennstoffmasse | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| u | Brennstofffeuchte | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| H_o | oberer Heizwert | [MJ/kg] | Megajoule pro Kilogramm |
| H_u | unterer Heizwert | [MJ/kg] | Megajoule pro Kilogramm |
| r | Verdampfungsenthalpie von Wasser | [MJ/kg] | Megajoule pro Kilogramm |
| $O_{2,min}$ | Sauerstoffbedarf für stöchiometrische Verbrennung | [kg/kg Brennstoff] | Kilogramm pro Kilogramm Brennstoff |
| L_{min} | Mindestluftmenge | [Nm ³ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter pro Kilogramm Brennstoff |
| $L_{min,f}$ | Feuchte Mindestluftmenge | [Nm ³ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter pro Kilogramm Brennstoff |
| f | Korrekturfaktor für den Dampfgehalt der Luft | [] | dimensionslos |
| φ | relative Luftfeuchtigkeit | [%] oder [] | Prozent oder pro Einheit |
| p | Luftdruck | [mbar] oder [hPa] | Millibar oder Hektopascal |

Tabelle 51: Abkürzungsverzeichnis der Variablen – Teil 1

| Variable | Bezeichnung | Einheit | Bedeutung |
|-----------------|--|--|--|
| p_s | Wasserdampfdruck der gesättigten Luft | [mbar] oder [hPa] | Millibar oder Hektopascal |
| L | tatsächlich zuzuführende Luftmenge | [Nm ³ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter pro Kilogramm Brennstoff |
| $V_{A,f}$ | Feuchtes Abgasvolumen | [Nm ³ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter pro Kilogramm Brennstoff |
| V_{CO_2} | Volumenanteil CO ₂ am feuchten Abgasvolumen | [Nm ³ CO ₂ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter Kohlendioxid pro Kilogramm Brennstoff |
| V_{H_2O} | Volumenanteil H ₂ O am feuchten Abgasvolumen | [Nm ³ H ₂ O/kg Brennstoff] | Normkubikmeter Wasser pro Kilogramm Brennstoff |
| V_{SO_2} | Volumenanteil SO ₂ am feuchten Abgasvolumen | [Nm ³ SO ₂ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter Schwefeldioxid pro Kilogramm Brennstoff |
| V_{N_2} | Volumenanteil N ₂ am feuchten Abgasvolumen | [Nm ³ N ₂ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter Stickstoff pro Kilogramm Brennstoff |
| V_{O_2} | Volumenanteil O ₂ am feuchten Abgasvolumen | [Nm ³ O ₂ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter Sauerstoff pro Kilogramm Brennstoff |
| $V_{min,tr}$ | trockene Mindestabgasmenge stöchiometrisch | [Nm ³ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter pro Kilogramm Brennstoff |
| V_{tr} | trockene Abgasmenge | [Nm ³ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter pro Kilogramm Brennstoff |
| V_f | feuchte Abgasmenge | [Nm ³ /kg Brennstoff] | Normkubikmeter pro Kilogramm Brennstoff |
| $CO_{2,max}$ | Kohlendioxidmaximum eines Brennstoffes bei $\lambda = 1$ | [Vol.-%] | Volumsprozent |
| $CO_{2,gem}$ | gemessener Kohlendioxidgehalt im Abgas | [Vol.-%] | Volumsprozent |
| O_2 | Sauerstoffgehalt im Abgas | [Vol.-%] | Volumsprozent |
| p_A | Absolutdruck | [mbar] | Millibar |
| p_0 | Wasserdampfdruck | [mbar] | Millibar |
| X_{H_2O} | Wassergehalt im Abgas | [g/m ³] | Gramm pro Kubikmeter |
| ρ_{H_2O} | Dichte des Wassers | [g/m ³] | Gramm pro Kubikmeter |
| t | Temperatur | [°C] oder [K] | Grad Celsius oder Kelvin |
| p'' | Sättigungsdampfdruck | [mbar] | Millibar |

Tabelle 52: Abkürzungsverzeichnis der Variablen – Teil 2

| Variable | Bezeichnung | Einheit | Bedeutung |
|-----------------|--|-------------------|-------------------------------------|
| x'' | Wassergehalt in der Luft | [g/kg] | Gramm pro Kilogramm |
| T_p | Taupunkttemperatur | [°C] oder [K] | Grad Celsius oder Kelvin |
| $\Delta\varphi$ | Potentialdifferenz zwischen Mess- und Bezugsselektrode | [mV] | Millivolt |
| φ_0 | Bezugsselektrodenpotential | [mV] | Millivolt |
| R | Universelle Gaskonstante | [J/molK] | Joule pro Mol und Kelvin |
| z | Anzahl der übertragenen Elektronen (Äquivalentzahl) | [] | dimensionslos |
| F | Faraday-Konstante | [C/mol] | Coulomb pro Mol |
| a_{ox} | Aktivität des Oxidationspartners | [] | dimensionslos |
| a_{red} | Aktivität des Reduktionspartners | [] | dimensionslos |
| R_E | Eingangswiderstand | [Ω] | Ohm |
| I | Strom | [A] | Ampere |
| I_D | Drainstrom | [A] | Ampere |
| U_q | Quellenspannung | [V] | Volt |
| U | Spannung | [V] | Volt |
| C | Kapazität | [F] | Farad |
| Q | Ladungsmenge | [C] | Coulomb |
| ϵ_0 | elektrische Feldkonstante | [As/Vm] | Amperesekunde(n) pro Volt und Meter |
| ϵ_r | materialabhängige Dielektrizitätszahl | [] | dimensionslos |
| A | Fläche | [m ²] | Quadratmeter |
| d | Abstand zwischen Kondensatorplatten | [m] | Meter |

Tabelle 53: Abkürzungsverzeichnis der Variablen – Teil 3

| Variable | Bezeichnung | Einheit | Bedeutung |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| w_v | volumetrischer Wassergehalt | [Vol.-%] | Volumsprozent |
| V_w | Volumenanteil von Wasser | [] | dimensionslos |
| V_{ges} | Gesamtvolumen | [] | dimensionslos |
| ρ | Dichte | [kg/m ³] | Kilogramm pro Kubikmeter |
| m | Masse | [kg] | Kilogramm |
| V | Volumen | [m ³] | Kubikmeter |
| λ_{IST} | Lambda Ist | [] | dimensionslos |
| FBr | Brennstofffaktor | [Nm ³ /MJ] | Normkubikmeter pro Megajoule |
| $O_{2,Bezug}$ | Sauerstoffbezug | [Vol.-%] | Volumsprozent |
| $O_{2,gemessen}$ | Sauerstoffgehalt gemessen | [Vol.-%] | Volumsprozent |
| MG_{CO} | Molekulargewicht Kohlenmonoxid | [g/mol] | Gramm pro Mol |
| V_{ideal} | ideales Gasvolumen | [l/mol] | Liter pro Mol |
| MG_{NOx} | Molekulargewicht Stickstoffdioxid | [g/mol] | Gramm pro Mol |
| T | Temperatur | [°C] oder [K] | Grad Celsius oder Kelvin |

Tabelle 54: Abkürzungsverzeichnis der Variablen – Teil 4

9.2.4 Einheiten

| <i>Abkürzung</i> | <i>Bedeutung</i> |
|--------------------|---|
| kW | Kilowatt |
| kg/h | Kilogramm pro Stunde |
| Nm ³ /h | Normkubikmeter pro Stunde |
| °C | Grad Celsius |
| m ² | Quadratmeter |
| mm | Millimeter |
| l | Liter |
| bar | Bar |
| mg/Nm ³ | Milligramm pro Normkubikmeter |
| m.-% | Massenprozent |
| kg/Srm | Kilogramm pro Schüttraummeter |
| kWh/kg | Kilowattstunde(n) pro Kilogramm |
| % | Prozent |
| m ³ /h | Kubikmeter pro Stunde |
| mg/MJ | Milligramm pro Megajoule |
| ppm | Parts per Million (Teile pro Millionstel) |
| v. EW. | von Endwert |
| v. MW. | von Messwert |
| sec | Sekunde(n) |
| 1/min | Pro Minute |
| tt.mm.jjjj | Tag.Monat.Jahr |
| hh:mm:ss | Stunde:Minute:Sekunde |
| s | Sekunde(n) |
| % | Prozent |
| Vol.-% | Volumsprozent |
| MW | Megawatt |

Tabelle 55: Abkürzungsverzeichnis der Einheiten

9.3 Tabellen

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Relevante chemische Reaktionen bei der Verbrennung [4] | 9 |
| Tabelle 2: Erfahrungswertevergleich der Luftverhältniszahl anhand der verschiedenen Feuerungsprinzipien [4]..... | 11 |
| Tabelle 3: Ermittlung der Abgasbestandteile [4] | 12 |
| Tabelle 4: Ermittlung der feuchten Abgaszusammensetzung [4] | 13 |
| Tabelle 5: Ermittlung der trockenen Abgaszusammensetzung [4] | 13 |
| Tabelle 6: Auszug aus der Wasserdampf tabel gesättigter Luft bei 1000mbar [4] | 15 |
| Tabelle 7: Gegenüberstellung der wichtigsten Bauarten von Biomassefeuerungen (Aschegehalt bezogen auf Trockenmasse (TM); Frischmasse (FM)) [5]..... | 20 |
| Tabelle 8: Beispiele für wichtige Bauarten automatisch beschickter Hackgut- und Rindenfeuerungen im kleinen und mittleren Leistungsbereich (Aschegehalt bezogen auf Trockenmasse (TM); FM Frischmasse) [5]..... | 23 |
| Tabelle 9: Technische Daten BIOTHERM-Feuerung HKW Klagenfurt [12] | 41 |
| Tabelle 10: Technische Daten Dampferzeuger HKW Klagenfurt [12] | 41 |
| Tabelle 11: Garantierte Emissionswerte HKW Klagenfurt [12] | 42 |
| Tabelle 12: Mögliche Brennstoffanteile SCA Timber Bollstabruk [15] | 44 |
| Tabelle 13: Mögliche Brennstoffeigenschaften SCA Timber Bollstabruk [15] | 45 |
| Tabelle 14: Technische Daten BIOTHERM-Feuerung SCA Timber Bollstabruk [15]..... | 47 |
| Tabelle 15: Technische Daten Warmwasserkessel SCA Timber Bollstabruk [15] | 47 |
| Tabelle 16: Garantierte Emissionswerte SCA Timber Bollstabruk [15] | 48 |
| Tabelle 17: Wichtige Messgrößen für die Erhebung des Iststandes der Emissionen [8] | 51 |
| Tabelle 18: Auswahlmöglichkeiten der Biomassesorten [7] | 56 |
| Tabelle 19: Holzfeuchtemessgerät FS_3 Biomasse messtechnische Daten [7] | 57 |
| Tabelle 20: Auswahl einiger relevanter Materialien mit Angabe der Dielektrizitätszahl ϵ_r [3]..... | 59 |
| Tabelle 21: Liste der unterschiedlichen Prinzipien der Feuchtebestimmung mit elektromagnetischen Feldern oder Wellen [3]..... | 60 |
| Tabelle 22: Vorschlag für Mess- und Spülzyklen bei toxischen Sensoren (für Langzeitmessungen) [8] | 62 |
| Tabelle 23: Elementarzusammensetzung des Brennstoffes (Mischungsverhältnis: 1 Teil Sägespäne - 1 Teil Hackschnitzel) im HKW Klagenfurt | 65 |
| Tabelle 24: Betrachtete Abgasgrenzwerte des HKW Klagenfurt (rot dargestellt) [12] | 65 |
| Tabelle 25: Halbstundenmittelwerte von CO und NO _x der Anlage 1 im HKW Klagenfurt | 69 |
| Tabelle 26: Halbstundenmittelwerte von CO und NO _x der Anlage 2 im HKW Klagenfurt | 73 |
| Tabelle 27: Elementarzusammensetzung Rinde gemittelt über Holzarten der Anlagen in Bollstabruk (17.09. bis 24.09.2013) [1] | 74 |
| Tabelle 28: Elementarzusammensetzung Rinde & Sägespäne (gewichtet im Verhältnis 7:3) der Anlagen in Bollstabruk (25.09. bis 27.09.2013) [1] | 75 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 29: Betrachtete Abgasgrenzwerte bei SCA Timber Bollstabruk (rot dargestellt) [15]..... | 75 |
| Tabelle 30: Wassergehalt-Messungen des Brennstoffes mit 100 m.-% Rinde | 76 |
| Tabelle 31: Wassergehalt-Messungen des Brennstoffes mit 70 m.-% Rinde und 30 m.-% Sägespänen | 77 |
| Tabelle 32: Vorgenommene Einstellungen an Anlage 1 am 19.09.2012 (SCA Timber Bollstabruk) ... | 79 |
| Tabelle 33: Vorgenommene Einstellungen an Anlage 1 am 20.09.2012 (SCA Timber Bollstabruk) ... | 81 |
| Tabelle 34: Vorgenommene Einstellungen an Anlage 1 am 21.09.2012 – Teil 1 (SCA Timber Bollstabruk) | 83 |
| Tabelle 35: Vorgenommene Einstellungen an Anlage 1 am 21.09.2012 – Teil 2 (SCA Timber Bollstabruk) | 84 |
| Tabelle 36: Stundenmittelwerte 60 bis 80 von Anlage 1, Anlage 2 und im Vergleich mit Basiswert von Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk) | 91 |
| Tabelle 37: Stundenmittelwerte 80 bis 100 von Anlage 1, Anlage 2 und im Vergleich mit Basiswert von Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk) | 92 |
| Tabelle 38: Stundenmittelwerte 100 bis 120 von Anlage 1, Anlage 2 und im Vergleich mit Basiswert von Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk) | 93 |
| Tabelle 39: Gegenüberstellung Min-, Max- und Mittelwerte von NO _x , CO, O ₂ und Lambda der Anlage 1 (SCA Timber Bollstabruk); Vergleich der Messwerte von EnviLoop Systemtechnik AB (Emissionsrechner) und Testo Rauchgasanalysegerät | 97 |
| Tabelle 40: Charakterisierung von Holz nach ARGRAR PULS GmbH [1] | 98 |
| Tabelle 41: Relevante Brennstoffzusammensetzung für die Auswertung beim HKW Klagenfurt | 99 |
| Tabelle 42: Relevante Brennstoffzusammensetzung (17.09. bis 24.09.2012) für die Auswertung bei SCA Timber Bollstabruk..... | 101 |
| Tabelle 43: Relevante Brennstoffzusammensetzung (25.09. bis 27.09.2012) für die Auswertung bei SCA Timber Bollstabruk..... | 102 |
| Tabelle 44: Zusammenfassung von Heizwert feucht, trocken, Elementarzusammensetzungen und des Wassergehaltes beim HKW Klagenfurt..... | 103 |
| Tabelle 45: Zusammenfassung von Heizwert feucht, trocken, Elementarzusammensetzungen und des Wassergehaltes bei SCA Timber Bollstabruk (17.09. bis 24.09.2012)..... | 104 |
| Tabelle 46: Zusammenfassung von Heizwert feucht, trocken, Elementarzusammensetzungen und des Wassergehaltes bei SCA Timber Bollstabruk (25.09. bis 27.09.2012)..... | 105 |
| Tabelle 47: Allgemeines Abkürzungsverzeichnis – Teil 1..... | 115 |
| Tabelle 48: Allgemeines Abkürzungsverzeichnis – Teil 2..... | 116 |
| Tabelle 49: Chemisches Abkürzungsverzeichnis – Teil 1 | 117 |
| Tabelle 50: Chemisches Abkürzungsverzeichnis – Teil 2 | 118 |
| Tabelle 51: Abkürzungsverzeichnis der Variablen – Teil 1 | 119 |
| Tabelle 52: Abkürzungsverzeichnis der Variablen – Teil 2..... | 120 |
| Tabelle 53: Abkürzungsverzeichnis der Variablen – Teil 3..... | 121 |
| Tabelle 54: Abkürzungsverzeichnis der Variablen – Teil 4..... | 122 |

| | |
|---|------|
| Tabelle 55: Abkürzungsverzeichnis der Einheiten | 123 |
| Tabelle 56: H ₂ -O ₂ -Reaktionen bei T > 1200K [17] | I |
| Tabelle 57: HO ₂ -Bildung/Verbrennung bei T > 1200K [17] | I |
| Tabelle 58: H ₂ O ₂ -Bildung/Verbrennung bei T > 1200K [17] | II |
| Tabelle 59: CO-Reaktionen bei T > 1200K [17] | II |
| Tabelle 60: N-Verbrennung bei T > 1200K [17] | III |
| Tabelle 61: NH-Verbrennung bei T > 1200K [17] | III |
| Tabelle 62: NH ₂ -Verbrennung bei T > 1200K [17] | IV |
| Tabelle 63: NH ₃ -Verbrennung bei T > 1200K [17] | IV |
| Tabelle 64: NO-Verbrennung bei T > 1200K [17] | V |
| Tabelle 65: NO ₂ -Verbrennung bei T > 1200K [17] | VI |
| Tabelle 66: N ₂ -Verbrennung bei T > 1200K [17] | VI |
| Tabelle 67: N ₂ H-Verbrennung bei T > 1200K [17] | VII |
| Tabelle 68: N ₂ O-Verbrennung bei T > 1200K [17] | VII |
| Tabelle 69: HNO-Verbrennung bei T > 1200K [17] | VIII |
| Tabelle 70: HNO ₂ -Verbrennung bei T > 1200K [17] | VIII |
| Tabelle 71: C-Verbrennung bei T > 1200K [17] | IX |
| Tabelle 72: HCN-Verbrennung bei T > 1200K [17] | IX |
| Tabelle 73: NCO-Verbrennung bei T > 1200K [17] | X |
| Tabelle 74: HNCO / HCNO-Verbrennung bei T > 1200K [17] | X |
| Tabelle 75: H ₂ CN-Verbrennung bei T > 1200K [17] | XI |
| Tabelle 76: CN / C ₂ N ₂ -Verbrennung bei T > 1200K [17] | XI |

9.4 Abbildungen

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Bildung von Brennstoff-NO _x , thermischem NO _x und promptem NO _x in Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur mit typischen Bereichen für Holz, Halmgüter und UF-Spannplatten (Richtwerte) [5] | 4 |
| Abbildung 2: Reaktionsschema für die NO _x -Bildung aus dem Brennstoffstickstoff [5]..... | 5 |
| Abbildung 3: Abhängigkeit des Brennstoffes und des Luftüberschuß auf den Taupunkt (links) [4] | 16 |
| Abbildung 4: Sättigungstemperatur in Korrelation zum Wassergehalt im Abgas (rechts) [4]..... | 16 |
| Abbildung 5: Diagramme zur einfachen Ermittlung des Säuretaupunktes [4] | 17 |
| Abbildung 6: Einteilung von Feuerungen nach zunehmender Gasgeschwindigkeit [5]..... | 18 |
| Abbildung 7: Festbettfeuerungen nach ihrer systematischen Einteilung [5]..... | 21 |
| Abbildung 8: Funktionsweise einer Kolbenbeschickung [5]..... | 23 |
| Abbildung 9: Vorschubrostfeuerung nach dem Gegenstromprinzip (für nasse Brennstoffe geeignet) [5] | 24 |
| Abbildung 10: Vorschubrostfeuerungen nach dem Gleichstromprinzip (links) und nach dem Mittelstromprinzip (rechts) [5]..... | 24 |
| Abbildung 11: Stickstoffemissionen als Funktion des Brennstoffstickstoffgehalts für konventionelle Verbrennung, Low-NO _x -Verbrennung mit Luftstufung sowie Entstickung mit SNCR und SCR für die Brennstoffe Holz, UF-Spannplatten, Altholz, Gras, Stroh und Miscanthus (TM Trockenmasse, SCR Selektive katalytische NO _x -Reduktion, SNCR Selektive nicht katalytische NO _x -Reduktion) [5]..... | 27 |
| Abbildung 12: Prinzip der Luftstufung [5]..... | 28 |
| Abbildung 13: Low-NO _x -Vorschubrostfeuerung mit horizontal angeordneter Reduktionskammer zur Luftstufung und Sekundärluftzugabe nach der Reduktionskammer [5]..... | 29 |
| Abbildung 14: Prinzip der Brennstoffstufung [5]..... | 30 |
| Abbildung 15: Anlagenkonzept der Brennstoffstufung für die Verbrennung von staubförmigen und stückigen Brennstoffen [5]..... | 30 |
| Abbildung 16: [Links] Einfluss der Abgasrezirkulation auf die CO- und NO _x -Emissionen bei Holzfeuerungen (durch die verbesserte Gasmischung im Brennraum ist ein Betrieb bei niedrigerem Luftüberschuß möglich, so dass die NO _x -Emissionen geringfügig vermindert werden können). [Rechts] maximal erreichbarer Einfluss der Abgasrezirkulation auf die Verbrennungstemperatur (berechnete Werte unter idealen Bedingungen; der effektiv im praktischen Betrieb erzielbare Effekt ist geringer; die Rezirkulationsrate ist definiert als das Verhältnis des rezirkulierenden Abgases zu dem gesamten der Verbrennung zugeführten Verbrennungsvolumenstrom (d.h. der Summe aus rezirkuliertem Abgas und zugeführter frischer Verbrennungsluft) [5] | 31 |
| Abbildung 17: Vorschubrostfeuerung mit SNCR-Verfahren im Bereich von 250kW bis 4MW thermischer Leistung [5]..... | 32 |
| Abbildung 18: Emissionen an NO _x , NH ₃ und N ₂ O sowie der Massenstrom des Reduktionsmittels in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Molverhältnisse (n) von 1, 2 und 4 (Brennstoff = | |

| | |
|---|----|
| Altholz; Luftüberschusszahl $\lambda = 2$; Verweilzeit = 1 s; Angaben bei 11 Vol.-% O ₂) [Links] unregelmäßige Eindüsung von Reduktionsmittel führt außerhalb des optimalen Temperaturfensters zu Ammoniak- und Lachgasemissionen [Rechts] durch temperaturgeregelte Eindüsung von Reduktionsmittel können Ammoniak- und Lachgasemissionen vermieden werden (das optimale Temperaturfenster wurde hier zwischen 840 und 920 °C gefunden; da die Messung mittels Thermoelement erfolgte, ist die effektive Gastemperatur etwas höher) [5] | 33 |
| Abbildung 19: Prinzip einer katalytischen Rauchgasentstickungsanlage [6] | 34 |
| Abbildung 20: Anlagenbild HKW Klagenfurt (Österreich) [12] | 37 |
| Abbildung 21: Anlagenbild SCA Timber in Bollstabruk (Schweden); stehende Feuerung (Typ: Mittelstrom) [15] | 43 |
| Abbildung 22: Rauchgasanalysegerät Testo 350XL [8] | 50 |
| Abbildung 23: schematischer Aufbau der Sauerstoffsonde der Firma Testo [9] | 52 |
| Abbildung 24: Schematischer Aufbau eines ionenselektiven Feldeffekttransistors (ISFET) [3] | 53 |
| Abbildung 25: Schematische Darstellung einer CO-Messzelle (gilt auch für NO, NO ₂ und SO ₂) [9] ... | 54 |
| Abbildung 26: Abgas-Entnahmesonde für Rauchgasanalysegerät Testo 350XL [8] | 55 |
| Abbildung 27: Holzfeuchtemessgerät FS_3 Biomasse [7] | 57 |
| Abbildung 28: Außenansicht HKW Klagenfurt [10] | 64 |
| Abbildung 29: Messaufbau der Probemessungen im HKW Klagenfurt [von links nach rechts] Analysebox und Messtechnik-Laptop [11] | 66 |
| Abbildung 30: Abgas-Entnahmesonde im HKW Klagenfurt [11] | 66 |
| Abbildung 31: Abgaswerte CO und NO _x in mg/Nm ³ (13% O ₂ -Bezug) mit der Luftüberschusszahl der Anlage 1 im HKW Klagenfurt | 67 |
| Abbildung 32: Abgaswerte CO und NO _x in mg/MJ mit der Luftüberschusszahl der Anlage 1 im HKW Klagenfurt | 68 |
| Abbildung 33: Tendenzen von Lambda, CO und NO _x in einem Zeitraum von 3 Minuten (Anlage 1 – HKW Klagenfurt) | 69 |
| Abbildung 34: Abgaswerte CO und NO _x in mg/Nm ³ (13% O ₂ -Bezug) mit der Luftüberschusszahl der Anlage 2 im HKW Klagenfurt | 70 |
| Abbildung 35: Abgaswerte CO und NO _x in mg/MJ mit der Luftüberschusszahl der Anlage 2 im HKW Klagenfurt | 71 |
| Abbildung 36: Tendenzen von Lambda, CO und NO _x in einem Zeitraum von 6 Minuten (Anlage 2 – HKW Klagenfurt) | 72 |
| Abbildung 37: Außenansicht SCA Timber Bollstabruk [13] | 74 |
| Abbildung 38: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO _x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 78 |
| Abbildung 39: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO _x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 19.09.2012 (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 80 |
| Abbildung 40: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO _x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 20.09.2012 (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 82 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 41: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO _x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 21.09.2012 (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 85 |
| Abbildung 42: Minutenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO _x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 21.09.2012 in der Zeit von 13:00 bis 18:00 Uhr (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 86 |
| Abbildung 43: Minutenmittelwerte der CO-Emissionen inklusive Grenzwertkurve, Lambda und der NO _x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve vom 21.09.2012 in der Zeit von 13:00 bis 16:00 Uhr (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 87 |
| Abbildung 44: Gegenüberstellung CO & NO _x über den Messzeitraum vom 17.09. bis 27.09.2012 (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 88 |
| Abbildung 45: Stundenmittelwerte der Nennleistung, Lambda und der NO _x -Emissionen inklusive Grenzwertkurve (Anlage 2 – SCA Timber Bollstabruk) | 89 |
| Abbildung 46: Stundenmittelwerte der Nennleistung, CO- und NO _x -Emissionen inklusive Grenzwertkurven (Anlage 1 & Anlage 2 – SCA Timber Bollstabruk)..... | 90 |
| Abbildung 47: Zusammenhang zwischen CO und NO _x anhand der Messwerte vom Emissionsrechner (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 95 |
| Abbildung 48: Gegenüberstellung der CO- und NO _x -Messwerte des Emissionsrechners und des Testo Rauchgasanalysegerätes (Anlage 1 – SCA Timber Bollstabruk) | 96 |
| Abbildung 49: Zonenübersicht der idealen Umsetzung des Brennstoffes in einer URBAS Biomasseverbrennungsanlage | 109 |

10 Anhang

10.1 Verbrennungsreaktionen

Wie bereits in der Arbeit erwähnt, beginnen wir mit den Reaktionen von Wasserstoff und Sauerstoff [17]. Alle dargestellten Reaktionen laufen bei Temperaturen über 1200 Kelvin (927 °C) ab. Für die Vollständigkeit werden dann weitere wichtige Reaktionen angegeben.

10.1.1 H₂-O₂ Reaktionen

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|----------------|------------|------------|------------------|-----------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| O ₂ | H | | OH | O | | 62,90 |
| H ₂ | O | | OH | H | | 33,30 |
| H ₂ | O | | OH | H | | 80,20 |
| H ₂ | OH | | H ₂ O | H | | 14,50 |
| OH | OH | | H ₂ O | O | | -8,06 |
| H | H | M1 | H ₂ | M1 | | 0,00 |
| O | O | M1 | O ₂ | M1 | | -7,40 |
| H | OH | M2 | H ₂ O | M2 | | 0,00 |

Tabelle 56: H₂-O₂-Reaktionen bei T > 1200K [17]

10.1.1.1 HO₂-Bildung/Verbrennung

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|-----------------|----------------|------------|------------------|----------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| H | O ₂ | M3 | HO ₂ | M3 | | 0,00 |
| H | O ₂ | M3 | HO ₂ | M3 | | 0,00 |
| HO ₂ | H | | OH | OH | | 5,82 |
| HO ₂ | H | | H ₂ | O ₂ | | 8,56 |
| HO ₂ | H | | H ₂ O | O | | 0,00 |
| HO ₂ | O | | OH | O ₂ | | -1,86 |
| HO ₂ | OH | | H ₂ O | O ₂ | | 73,30 |

Tabelle 57: HO₂-Bildung/Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.1.2 H₂O₂-Bildung/Verbrennung

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|-------------------------------|-----------------|------------|-------------------------------|-----------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| HO ₂ | HO ₂ | | H ₂ O ₂ | O ₂ | | 50,10 |
| HO ₂ | HO ₂ | | H ₂ O ₂ | O ₂ | | -6,82 |
| OH | OH | M1 | H ₂ O ₂ | M1 | | 0,00 |
| H ₂ O ₂ | H | | H ₂ | HO ₂ | | 15,70 |
| H ₂ O ₂ | H | | H ₂ O | OH | | 15,00 |
| H ₂ O ₂ | O | | OH | HO ₂ | | 16,60 |
| H ₂ O ₂ | O | | H ₂ O | O ₂ | | 16,60 |
| H ₂ O ₂ | OH | | H ₂ O | HO ₂ | | 123,00 |
| H ₂ O ₂ | OH | | H ₂ O | HO ₂ | | 1,79 |

Tabelle 58: H₂O₂-Bildung/Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.2 CO-Reaktionen

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------|-----------------|------------|-----------------|-----------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| CO | O | M1 | CO ₂ | M1 | | 12,50 |
| CO | OH | | CO ₂ | H | | 66,90 |
| CO | OH | | CO ₂ | H | | 0,25 |
| CO | OH | | CO ₂ | H | | 19,10 |
| CO | HO ₂ | | CO ₂ | OH | | 98,70 |
| CO | O ₂ | | CO ₂ | O | | 200,00 |

Tabelle 59: CO-Reaktionen bei T > 1200K [17]

Die Zusammensetzungen der Reaktanten M1, M2 und M3 beinhalten mehrere Verbindungen oder Elemente und werden, der Übersicht halber, folgend separat angegeben [17]:

$$M1 = H_2 + 6,5 * H_2O + 0,4 * O_2 + 0,4 * N_2 + 0,75 * CO + 1,5 * CO_2 + 3 * CH_4 + 0,35 * Ar \quad (98)$$

$$M2 = H_2 + 2,5 * H_2O + 0,4 * O_2 + 0,4 * N_2 + 0,75 * CO + 1,5 * CO_2 + 3 * CH_4 + 0,15 * Ar \quad (99)$$

$$M3 = H_2 + 6,5 * H_2O + 0,4 * O_2 + 0,4 * N_2 + 0,75 * CO + 1,5 * CO_2 + 3 * CH_4 + 0,29 * Ar \quad (100)$$

Nun kommen wir zur Verbrennung von Stickstoff und den beteiligten Spezies. Schnell wird klar, dass die Elemente Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Sauerstoff (O) und Kohlenstoff (C) in Wechselwirkung miteinander stehen. Dadurch werden diese Wechselwirkungen in zwei große Gruppen, H-N-O-Spezies und C-H-N-O-Spezies, eingeteilt.

Als erstes werden die H-N-O-Spezies und abschließend die C-H-N-O-Spezies betrachtet.

10.1.3 Verbrennung von N

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------|-------------------------------|------------|-------------------|------------------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| N | OH | | NO | H | | 0,00 |
| N | O ₂ | | NO | O | | 26,10 |
| N | CO ₂ | | NO | CO | | 14,20 |
| N | NO | | N ₂ | O | | 0,00 |
| N | N | M* | N ₂ | M* | | 32,20 |
| N | NH | | N ₂ | H | | 0,00 |
| N | CH | | CN | H | | 0,00 |
| N | ³ CH ₂ | | HCN | H | | 0,00 |
| N | CH ₃ | | H ₂ CN | H | | 0,00 |
| N | HCCO | | HCN | CO | | 0,00 |
| N | C ₂ H ₂ | | HCN | CH | | 0,00 |
| N | C ₂ H ₃ | | HCN | ³ CH ₂ | | 0,00 |

Tabelle 60: N-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.3.1 Verbrennung von NH

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------|----------------|------------|----------------|------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| NH | H | | N | H ₂ | | 0,00 |
| NH | O | | NO | H | | 0,00 |
| NH | OH | | NO | H ₂ | | 0,00 |
| NH | OH | | N | H ₂ O | | 0,02 |
| NH | OH | | HNO | H | | 0,00 |
| NH | O ₂ | | NO | OH | | 20,80 |
| NH | O ₂ | | HNO | O | | 27,20 |
| NH | NH | | N ₂ | H | H | 0,40 |

Tabelle 61: NH-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.3.2 Verbrennung von NH₂

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|-----------------|-----------------|------------|-----------------|------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| NH ₂ | H | | NH | H ₂ | | 0,00 |
| NH ₂ | O | | NH | OH | | 0,00 |
| NH ₂ | O | | HNO | H | | 0,00 |
| NH ₂ | O | | NO | H ₂ | | 0,00 |
| NH ₂ | N | | N ₂ | H | H | 0,00 |
| NH ₂ | O ₂ | | HNO | OH | | 105,00 |
| NH ₂ | O ₂ | | NH | HO ₂ | | 209,00 |
| NH ₂ | OH | | NH | H ₂ O | | -1,91 |
| NH ₂ | HO ₂ | | NH ₃ | O ₂ | | 0,00 |
| NH ₂ | NH ₂ | | NH ₃ | NH | | 41,80 |

Tabelle 62: NH₂-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.3.3 Verbrennung von NH₃

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|-----------------|------------|------------|-----------------|------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| NH ₃ | H | | NH ₂ | H ₂ | | 42,60 |
| NH ₃ | O | | NH ₂ | OH | | 21,80 |
| NH ₃ | OH | | NH ₂ | H ₂ O | | 2,37 |
| NH ₃ | M* | | NH ₂ | H | M* | 379,00 |

Tabelle 63: NH₃-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.4 Verbrennung von NO

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------|------------------------------|------------|-------------------|------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| NO | OH | M* | HNO ₂ | M* | | 0,28 |
| NO | HO ₂ | | NO ₂ | OH | | -2,01 |
| NO | NH | | N ₂ | OH | | 0,00 |
| NO | NH | | N ₂ O | H | | 0,00 |
| NO | NH | | N ₂ O | H | | 0,00 |
| NO | NH ₂ | | N ₂ | H ₂ O | | 3,87 |
| NO | NH ₂ | | N ₂ | H | OH | 0,81 |
| NO | NH ₂ | | N ₂ H | OH | | -1,63 |
| NO | CH | | HCN | O | | 0,00 |
| NO | ¹ CH ₂ | | HCN | OH | | 0,00 |
| NO | ³ CH ₂ | | HCNO | H | | 25,00 |
| NO | ³ CH ₂ | | HCN | OH | | 12,00 |
| NO | CH ₃ | | HCN | H ₂ O | | 91,00 |
| NO | CH ₃ | | H ₂ CN | OH | | 91,00 |
| NO | CHO | | CO | NHO | | 0,00 |
| NO | C ₂ H | | HCN | CO | | 0,00 |
| NO | HCCO | | HCNO | CO | | 0,00 |

Tabelle 64: NO-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.5 Verbrennung von NO₂

| <i>Reaktant 1</i> | <i>Reaktant 2</i> | <i>Reaktant 3</i> | <i>Produkt 1</i> | <i>Produkt 2</i> | <i>Produkt 3</i> | <i>Aktivierungsenergie</i> |
|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| NO ₂ | O | | NO | O ₂ | | 2,51 |
| NO ₂ | H | | NO | OH | | 6,27 |
| NO ₂ | N | | N ₂ | O ₂ | | 0,00 |
| NO ₂ | CO | | NO | CO ₂ | | 132,00 |
| NO ₂ | CH | | CHO | NO | | 0,00 |
| NO ₂ | ³ CH ₂ | | CH ₂ O | NO | | 0,00 |
| NO ₂ | CH ₃ | | CH ₃ O | NO | | 0,00 |
| NO ₂ | CHO | | CO ₂ | H | NO | 8,07 |
| NO ₂ | CHO | | CO | HNO | | 9,82 |
| NO ₂ | HCCO | | NCO | CO | OH | 0,00 |
| NO ₂ | HCCO | | HNCO | CO ₂ | | 0,00 |
| NO ₂ | HCCO | | HCN | CO ₂ | O | 0,00 |
| NO ₂ | M* | | NO | O | M* | 276,00 |
| NO ₂ | NO ₂ | | NO | NO | O ₂ | 109,00 |

Tabelle 65: NO₂-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.6 Verbrennung von N₂

| <i>Reaktant 1</i> | <i>Reaktant 2</i> | <i>Reaktant 3</i> | <i>Produkt 1</i> | <i>Produkt 2</i> | <i>Produkt 3</i> | <i>Aktivierungsenergie</i> |
|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| N ₂ | CH | | HCN | N | | 75,10 |
| N ₂ | ³ CH ₂ | | HCN | NH | | 150,00 |

Tabelle 66: N₂-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.6.1 Verbrennung von N₂H

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------------|------------|------------|------------------|------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| N ₂ H | O | | N ₂ O | H | | 0,00 |
| N ₂ H | O | | NO | NH | | 0,00 |
| N ₂ H | OH | | N ₂ | H ₂ O | | 0,00 |
| N ₂ H | M* | | N ₂ | H | M* | 59,90 |
| N ₂ H | NO | | N ₂ | HNO | | 0,00 |

Tabelle 67: N₂H-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.6.2 Verbrennung von N₂O

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------------|-----------------|------------|-------------------|-----------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| N ₂ O | H | | OH | N ₂ | | 63,10 |
| N ₂ O | O | | NO | NO | | 111,00 |
| N ₂ O | O | | N ₂ | O ₂ | | 117,00 |
| N ₂ O | OH | | HO ₂ | N ₂ | | 41,80 |
| N ₂ O | CO | | N ₂ | CO ₂ | | 72,80 |
| N ₂ O | CH ₃ | | CH ₃ O | N ₂ | | 119,00 |
| N ₂ O | M* | | O | N ₂ | M* | 263,00 |

Tabelle 68: N₂O-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.7 Verbrennung von HNO

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------|-----------------|------------|------------------|------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| HNO | H | | NO | H ₂ | | 4,16 |
| HNO | OH | | NO | H ₂ O | | -4,00 |
| HNO | N | | NO | NH | | 8,30 |
| HNO | O ₂ | | NO | HO ₂ | | 12,50 |
| HNO | NH ₂ | | NO | NH ₃ | | 4,20 |
| HNO | HNO | | N ₂ O | OH | | 209,00 |
| HNO | NO | | N ₂ O | H ₂ O | | 109,00 |
| HNO | NO ₂ | | HNO ₂ | NO | | 8,31 |
| HNO | M* | | NO | H | M* | 203,00 |

Tabelle 69: HNO-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.7.1 Verbrennung von HNO₂

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------------|------------|------------|-----------------|------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| HNO ₂ | H | | NO ₂ | H ₂ | | 30,70 |
| HNO ₂ | O | | NO ₂ | OH | | 25,10 |
| HNO ₂ | OH | | NO ₂ | H ₂ O | | 0,56 |

Tabelle 70: HNO₂-Verbrennung bei T > 1200K [17]

In den obigen Tabellen wurde, wegen der Übersichtlichkeit der Tabellen, auf die genaue Zusammensetzung von M* nicht näher eingegangen. Nichts desto trotz setzt sich M* wie folgt zusammen:

$$M^* = H_2 + 6,5 * H_2O + 0,4 * O_2 + 0,4 * N_2 + 0,75 * CO + 1,5 * CO_2 + 3 * CH_4 \quad (101)$$

Auf den nächsten Seiten werden die Spezies der Gattung C-H-N-O näher behandelt.

10.1.8 Verbrennung von C

| <i>Reaktant 1</i> | <i>Reaktant 2</i> | <i>Reaktant 3</i> | <i>Produkt 1</i> | <i>Produkt 2</i> | <i>Produkt 3</i> | <i>Aktivierungsenergie</i> |
|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| CH | H | | C | H ₂ | | 0,00 |
| C | O ₂ | | CO | O | | 0,00 |
| C | NO | | CN | O | | 0,00 |

Tabelle 71: C-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.8.1 Verbrennung von HCN

| <i>Reaktant 1</i> | <i>Reaktant 2</i> | <i>Reaktant 3</i> | <i>Produkt 1</i> | <i>Produkt 2</i> | <i>Produkt 3</i> | <i>Aktivierungsenergie</i> |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| HCN | O | | NCO | H | | 25,60 |
| HCN | O | | NH | CO | | 25,60 |
| HCN | OH | | HNCO | H | | 91,40 |
| HCN | CN | | C ₂ N ₂ | H | | 0,00 |

Tabelle 72: HCN-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.8.2 Verbrennung von NCO

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------|------------------|------------|------------------|------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| NCO | O | | NO | CO | | 0,00 |
| NCO | H | | NH | CO | | 0,00 |
| NCO | OH | | CHO | NO | | 62,70 |
| NCO | H ₂ | | HNCO | H | | 16,70 |
| NCO | N | | N ₂ | CO | | 0,00 |
| NCO | O ₂ | | NO | CO ₂ | | 83,60 |
| NCO | M* | | N | CO | M* | 195,00 |
| NCO | NO | | N ₂ O | CO | | 3,19 |
| NCO | NO | | N ₂ | CO ₂ | | 3,19 |
| NCO | NCO | | N ₂ | CO | CO | 0,00 |
| NCO | NO ₂ | | CO | NO | NO | 0,00 |
| NCO | NO ₂ | | CO ₂ | N ₂ O | | 0,00 |
| NCO | HNO | | HNCO | NO | | 0,00 |
| NCO | HNO ₂ | | HNCO | NO ₂ | | 0,00 |
| NCO | CHO | | HNCO | CO | | 0,00 |

Tabelle 73: NCO-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.8.3 Verbrennung von HNCO / HCNO

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|------------|-----------------|------------|-----------------|-------------------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| HCNO | H | | HCN | OH | | 0,00 |
| HCNO | H | | HNCO | H | | 0,00 |
| HNCO | H | | NH ₂ | CO | | 15,90 |
| HNCO | O | | NH | CO ₂ | | 35,60 |
| HNCO | O | | NCO | OH | | 47,80 |
| HNCO | O | | HNO | CO | | 184,00 |
| HNCO | OH | | NCO | H ₂ O | | 10,70 |
| HNCO | O ₂ | | HNO | CO ₂ | | 146,00 |
| HNCO | HO ₂ | | NCO | H ₂ O ₂ | | 121,00 |
| HNCO | M* | | NH | CO | M* | 359,00 |
| HNCO | NH | | NCO | NH ₂ | | 99,00 |
| HNCO | NH ₂ | | NCO | NH ₃ | | 25,90 |

Tabelle 74: HNCO / HCNO-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.8.4 Verbrennung von H₂CN

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|-------------------|------------|------------|----------------|------------------------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| H ₂ CN | N | | N ₂ | ³ CH ₂ | | 0,00 |
| H ₂ CN | M* | | HCN | H | M* | 92,00 |

Tabelle 75: H₂CN-Verbrennung bei T > 1200K [17]

10.1.8.5 Verbrennung von CN / C₂N₂

| Reaktant 1 | Reaktant 2 | Reaktant 3 | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Aktivierungsenergie |
|-------------------------------|------------------|------------|----------------|-----------------|-----------|---------------------|
| [] | | | [] | | | [kJ/mol] |
| CN | O | | CO | N | | 0,00 |
| CN | OH | | NCO | H | | 0,00 |
| CN | O ₂ | | NCO | O | | -1,70 |
| CN | H ₂ | | HCN | H | | 9,30 |
| CN | H ₂ O | | HCN | OH | | 31,10 |
| CN | N | | N ₂ | C | | 0,00 |
| CN | NO | | N ₂ | CO | | 33,40 |
| CN | NO | | NCO | N | | 176,00 |
| CN | N ₂ O | | NCO | N ₂ | | 0,00 |
| CN | NO ₂ | | NCO | NO | | 0,00 |
| CN | CH ₄ | | HCN | CH ₃ | | 7,82 |
| C ₂ N ₂ | O | | NCO | CN | | 37,10 |

Tabelle 76: CN / C₂N₂-Verbrennung bei T > 1200K [17]

Abschließend kann man sagen, dass diese Tatsachen der Bildung, Oxidation und Umwandlung der verschiedenen Spezies ein komplexes und interdisziplinäres Thema sind.

Für genauere Informationen zu den Zusammenhängen und Abläufen der Verbrennung wird unter Kapitel 9 (Verzeichnisse) entsprechende weiterführende Literatur genannt.