HTBLVA Dornbirn

Höhere Lehranstalt für Chemieingenieurwesen

Ausbildungsschwerpunkt Umwelt und Betriebstechnik

DIPLOMARBEIT

"Heizen wie die Schweden"

Abgasprüfung von herkömmlichen Schwedenöfen

In Zusammenarbeit mit:

DI Arthur Sottopietra

DI Joseph Matt

Durchgeführt im Schuljahr 2009/10 von:

Pascal Fitz	5aCB
Joachim Pfister	5aCB
Simon Spöttl	5aCB

Betreuer:

Dr. Eugen Anwander

DI Rudolf Sams

Danksagung

Für die tatkräftige Unterstützung, Motivation und fachlichen Beistand möchten wir uns an dieser Stelle bei allen Beteiligten unserer Projektarbeit bedanken.

Allen voran bedanken wir uns beim Umweltinstitut in Bregenz für die finanzielle Unterstützung bezüglich der Geräte und Chemikalien und die fachliche Kompetenz seitens unserer Betreuer Arthur Sottopietra und Joseph Matt.

Ebenfalls möchten wir uns bei Herrn Jürgen Beckbissinger von der Firma Acontec (Schaan) und Herrn Christian Walch von der Firma Böhler Analytik (Feldkirch) für die Bereitstellung spezieller Messtechnik bzw. fachliche Beratung bedanken.

Für die Bereitstellung des Ofens und den Bau des Kamins, Herrn Michael Beuchert und Herrn Helmut Baurenhas; Dem Kaminkehrer Walter Sutterlüti für die hilfreiche Einschulung im richtigen Heizen;

Bei unseren Betreuern Eugen Anwander und Rudolf Sams die uns stetig motivierten, vorangetrieben und aktiv begleitet haben. Wir danken ihnen auch für ihre fachlichen Ratschläge, die sie uns im Laufe der Diplomarbeit gegeben haben.

Für die Korrektur unserer Arbeit möchten wir uns ebenfalls bedanken.

Und "last but not least" unseren Familien und Freunden, welche uns bei dieser Diplomarbeit tatkräftig unterstützt haben und auch manchen Anstoß für eine zündende Idee gaben.

Danke

Joachim Pfister, Pascal Fitz, Simon Spöttl

Eidesstattliche Erklärung

"Heizen wie die Schweden"
Abgasprüfung von herkömmlichen Schwedenöfen

Wir versichern, dass wir die vorstehende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und uns anderer als der im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel nicht bedient haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Dornbirn, am .....

Unterschrift:…….
Pascal Fitz

Unterschrift:…….
Joachim Pfister

Unterschrift:…….
Simon Spöttl

Kurzfassung

Die Aufgabenstellung zu unserem Projekt lautete "Abgasprüfung von herkömmlichen Schwedenöfen". In Vorarlberg ist ein allgemeiner Trend zu beobachten, dass in immer mehr Haushalten die Zusatzheizung „Schwedenofen“ ihren Einzug hält. Ein Schwedenofen ist zur Energienutzung von Stückholz gänzlich ungeeignet, jedoch aus ästhetischen Gründen sehr beliebt.

Unsere Aufgabe war es, die Parameter für eine optimale Verbrennung mit minimierter Abgasbelastung und damit einhergehend die bestmögliche energetische Nutzung zu ermitteln.

Zu diesem Zweck errichteten wir im Innenhof unserer Schule einen Schwedenofen mit dazugehörigem Kamin und statteten den Ofen mit der notwendigen Messtechnik aus. Wir testeten diverse Anfeuerungsmethoden und Holzarten. Anschließend erfolgte die Auswertung und entsprechende Interpretation der Messergebnisse.

Die Messergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den Anheizmethoden „Gut", „Schlecht" und „Überladen". „Gut“ bedeutet, das Holz wurde im Blockhaus in den Ofen geschlichtet und von oben angezündet. „Schlecht“ bedeutet, das Holz dicht zusammen zu legen und von Unten anzuzünden und überladene Versuche basieren auf dem Prinzip einer guten Anheizmethode jedoch mit knapp doppelter Holzmenge.

Bei den einzelnen Versuchen wurden die verschiedensten Abgasparameter gemessen. Um die Versuche am besten zu charakterisieren, eigneten sich der Kohlenmonoxid - Gehalt und die Staubmenge im Abgas. Wenn man nun den Kohlenmonoxid - Gehalt der „guten“ Versuche in Verhältnis mit dem Kohlenmonoxid-Gehalt der „Schlechten“ setzt, erhält man den Faktor 2. Bei „Überladenen“ Versuchen ergibt sich der Faktor 3. Dies bedeutet, man kann drei Mal mit guter Anheizmethode den Schwedenofen befeuern und erhält die gleiche Schadstoffmenge, wie bei einem einzigen schlechten Durchgang. Beim Staub zeigt sich ein ähnliches Ergebnis. Zwischen Gut/Schlecht liegt ein Faktor 3 und zwischen Gut/Überladen sogar der Faktor 4. Also 67% und 75% Staubemissionsreduzierung !

Der Kohlenmonoxid- und Staubgrenzwert im Abgas wurde bei den schlechten bzw. überladenen Anheizmethoden immer überschritten, bei guten Versuchen liegt die Emission für Kohlenmonoxid knapp am Grenzwert für Staub weit unterhalb des Grenzwertes. Die Emission flüchtiger Kohlenwasserstoffe erweist sich als kritisch und der betreffende Grenzwert wird bei allen Anheizverfahren überschritten.

Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die Umwelt ein Stück zu verbessern und einen Schritt in Richtung ökonomischer Energieverbrauch gehen.

Abstract (Englisch)

The challenge of our project was to check the exhaust gases of conventional Swedish stove "Schwedenöfen". In Vorarlberg, there is a general trend that more and more households use the Swedish stove in addition to conventional heating. A stove called "Schwedenofen" is only poorly suitable for the burning of wood in the form of pieces or chucks, but nevertheless this type is very popular for aesthetic reasons.

Our task was to find parameters for optimal combustion including minimized exhaust load and the best possible energy use.

That is why we assembled a "Schwedenofen" with appropriate chimney in the courtyard of our school and equipped it with the necessary measuring technology. We tested several methods to inflame the wood. Afterwards we made the evaluation and interpretation of the measurement data.

The results show a clear difference between the methods to inflame the wood called “Good”, "Poor" and "Overcharged". “Good” means the wood was arranged in a log cabin in the stove and lit from the top. “Poor” means the wood was tightly packed together and fire was set from below and “Overcharged” experiments were based on the principle of the good method, but with almost twice the amount of wood.

In the different experiments, the various exhaust parameters were measured. The amount of carbon monoxide and the amount of dust in the exhaust gases have qualified to characterize the experiments. If you set the ratio of the amount of carbon monoxide of the good experiment and the carbon monoxide amount of the poor experiment, you get the factor 2, and in case of overcharged experiments a factor 3. This means that you can fire the wood three times with the good method and get the same amount of toxic exhaust gases as you will get with a single run with poor method. Almost the same is true for the amount of dust, between “Good” and “Poor” there is the factor 3, between “Good” and Overcharged” there is a factor 4. That means a reduction of dust by 67% and 75%, respectively.

The carbon monoxide and dust limits are always exceeded in our "Poor" and "Overcharged" experiments. When the good method is used the amount of dust is far below the limit value while carbon monoxide comes close to its limit. The emission of elusive hydrocarbons turned out to be critical as the concerning limits are exceeded no matter which method was used

This project should contribute to improve the environment and taking a step towards an economic energy consumption.

Problemstellung/Zielsetzung

Problemstellung

Durch die aktuelle Zunahme von Holz als nachwachsender Rohstoff für die Energienutzung von Gebäudeheizungen, ergibt sich ein automatischer Anstieg an Abgasen aus dessen Nutzung. Da herkömmliche Stückholzkessel in Haushalten über keinerlei Rauchgasreinigung verfügen, besteht eine Notwendigkeit die Abgase kritisch zu untersuchen, um eine entsprechende Auswirkung auf die Umwelt zu charakterisieren.

In der vorliegenden Arbeit betrachtete man die Umwelteinflüsse von herkömmlichen Schwedenöfen, deren rasante Nachfragezunahme beachtliche Ausmaße annimmt.

Zielsetzung:

Eine realitätsnahe Aussage über die Emissionen soll anhand eines Versuchsstandes mit einem marktüblichen Schwedenofen erstellt werden. Mit diesem Realversuch werden die unterschiedlichsten Heizgewohnheiten getestet und überprüft und deren Effizienz und Abgasverhalten charakterisiert. Parameter wie Sauerstoffzufuhr, Feuchtigkeitsgehalt des Brennstoffes und Art der Beschickung sollen in Bezug zur Qualität des Abgases gebracht werden. Hieraus sollen Informationen über das korrekte Heizverhalten gefunden werden.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung 2

Eidesstattliche Erklärung 3

Kurzfassung 4

Abstract (Englisch) 5

Problemstellung/Zielsetzung 6

Inhaltsverzeichnis 7

2. Theoretischer Hintergrund 9

2.1 Holzverbrennung 9

2.1.1 Wenn Holz verbrennt 9

2.1.2 Verbrennung aus chemischer Sicht 13

2.1.3 Abgaszusammensetzung 16

2.1.4 Wassergehalt 22

2.2 Funktion des Ofens 23

2.2.1 Der Schwedenofen 23

2.3 Messtechnik 26

2.3.1 Messung der Abgasgeschwindigkeit 26

2.3.2 Messung der Temperatur 27

2.3.3 Messung von Kohlendioxid (CO_2) 27

2.3.4 Staubmessung 29

2.3.5 Messung des partikulären Kohlenstoffs im Staub 30

2.3.6 Multifunktionelles Abgasmessgerät (O_2, CO, NO_x) 33

2.3.7 Flammenionisationsdetektor FID 36

3. Praktische Umsetzung 38

3.1 Versuchsaufbau 38

3.2 Versuchsparameter 39

3.2.1 Vorbereitung 39

3.2.2 Zusatzinformationen/Nachbearbeitung 46

3.2.3 Instrumentelle Messdaten 48

3.3 Messdurchführung 51

3.3.1 Messtechnische Einrichtung 51

3.3.2 Abbrand 57

4. Ergebnisse 61

4.1 Herleitung der Ergebnisse 61

4.1.1 CO - Gehalt ... 61
4.1.2 Staubgehalt ... 64
4.1.3 Partikulärer Kohlenstoff im Staub ... 65
4.1.5 „Chemischer“ Gesamtenergieverlust aus CO, OGC und C in Staub ... 66
4.2 Zusammenfassung ... 69
4.2.1 Fichten Versuche ... 69
4.2.2 Buche Versuche ... 75
4.2.3 Brikett ... 80
4.2.3 Zusatzversuche ... 81
5. Interpretation ... 87
5.1 Auswertung der Abgaskonzentrationen ... 87
5.2 Auswertung des partikulären Kohlenstoffs im Staub ... 88
5.3 Auswertung „chemischer“ Gesamtenergieverluste ... 90
5.4 Abgasemissionen bezogen auf Brennstoffenergien ... 92
5.5 Grenzwerte für Abgasemissionen ... 93
6. Öffentlichkeitsarbeit ... 95
6.1 Tag der offenen Türe der HTL ... 95
6.2 Vol.at ... 96
6.3 EESA –Award / IUSES –Projekt ... 96
6.4 Umweltwoche Dornbirn ... 96
6.5 Gemeinde Lustenau ... 97
8. Anhang ... 98
8.1 Zeitplan/Arbeitsaufwand ... 98
8.2 Quellenangaben ... 99
8.3 Abbildungsverzeichnis ... 100
8.4. Tabellenverzeichnis ... 101
8.5 Diagrammverzeichnis ... 101
8.6 Berechnungen ... 102
8.6.1 Abgasgeschwindigkeit/ Abgaszusammensetzung ... 102
8.6.2 Berechnung der Staubmenge ... 104
8.7 Diagramm Wassergehalt ... 107
8.8 Plakate vom Tag der offenen Türe ... 108

2. Theoretischer Hintergrund

2.1 Holzverbrennung

2.1.1 Wenn Holz verbrennt

Um Holz als umweltverträgliche Energiequelle verwenden zu können, ist es notwendig, dass dessen Verbrennung vollständig und effizient erfolgt. Zusätzlich zur höchstmöglichen Energienutzung muss durch den Heizvorgang sichergestellt werden, dass keine umweltschädlichen Stoffe entstehen, während das Holz vollständig genützt werden soll.

Damit dieser Prozess stattfinden kann, muss gewährleistet sein, dass die Wärme von einer bereits brennenden Materie auf den anderen Brennstoff einwirkt. Darüber hinaus sollte man beachten, dass die entstehenden Gase als Feuer brennen, während Partikel verglimmen.

Grundsätzlich durchläuft der Brennstoff drei Abschnitte auf seinem Weg der Verbrennung: die erste Phase ist die Trocknung, worin das Wasser der Brennstoffoberfläche verdampft und entweicht. Dann beginnt die Oberfläche des Holzes zu entgasen, die Gase brennen über dem Brennmaterial, während simultan dazu das Wasser auch aus dem Inneren langsam verdampft. Nun brennt der Stoff und da immer mehr Gas und Wasser entweichen, läuft der Prozess ab hier von Allein ab. Der glühende Überrest des Holzes (Kohlenstoff) reagiert mit Sauerstoff zu Asche (unbrennbare Oxide) und Kohlendioxid.

Die Größe des Brennstoffes spielt eine wichtige Rolle für die Verbrennungsgeschwindigkeit. Kleineres Gut, wie zum Beispiel Hackschnitzel, verbrennt schnell, da dessen Ausmaße eine rasche Trocknung und Entgasung ermöglichen. Die Verbrennung ist intensiv, der Stoffkontakt zwischen Luft und Brennmaterial ist gut. Im Gegensatz dazu verbrennt ein Scheit langsam. Es ist groß und kompakt womit die Ausgasung länger dauert.

Flüchtige Bestandteile im Holz

Ca. 80% der Trockensubstanz von Holz und von diversen anderen Biomassen sind bei Temperaturen von mehreren 100 Grad flüchtige Bestandteile. Wird das Holz nun auf rund 300 °C erwärmt, so verliert es 80% seiner üblichen Masse und hinterlässt den Rest als Holzkohle. Da der Anteil von flüchtigen Stoffen so hoch ist, muss man Verbrennungszuluft grundsätzlich oberhalb der Brennstoffschicht einleiten (Sekundärluft) - also dort wo die Gase aus dem Holz diffundieren und sich mit Luftsauerstoff vermischen sollen - anstatt unterhalb der Brennstoffschicht (Primärluft, abkühlender Effekt). Damit entsteht eine gute energetische Nutzung der Verbrennungsenergie ausgegaster Holzbestandteile.

Holzkohle

Nach Ausgasen und Verbrennen der flüchtigen Bestandteile aus dem Holz verbleibt ein Rückstand, welcher die Holzkohle darstellt. Holzkohle besteht aus Kohlenstoff und aus nicht brennbaren Aschebestandteilen. Sie verbrennt flammenfrei (glühen) und es ergeben sich höhere Verbrennungstemperaturen als beim Abbrennen der flüchtigen Bestandteile des Holzes.

Abb.2.1.1: *Holzkohle.*

Aschegehalt von Holz

Holz enthält diverse Inhaltsstoffe, welche nicht brennbar sind. Man nennt diese Asche. Bei Großverbrennungsanlagen erfordert Asche eine Reinigung der Abgase von Partikeln (Flugasche). Die unbrennbaren Stoffe im Holz sind Erde oder Sand in der Rinde, welche der Baum während seines Lebensweges aufgenommen hat, beziehungsweise Salze, die sich durch die Wasseraufnahme vom Boden im Baum abgelagert haben. Zusätzlich können in der Asche Schwermetalle enthalten sein, welche umweltschädlich sind. Der Schwermetallgehalt ist bei anderen Brennstoffen im festen Aggregatszustand jedoch höher als im Holz.

Asche verfügt auch über wärmedämmende Charakteristika. Bei Verbrennungsanlagen bildet die Asche eine heiße Schicht, auf der z.B. das Verglühen von Kohle besser funktioniert. Die Asche kann aber auch schützend wirken: rostbefeuerte Anlagen werden durch die Asche vor Wärmestrahlung geschützt. Die im Holz enthaltenen Salze nehmen in der Verbrennungstechnologie eine nicht unwichtige Rolle ein. Hauptsächlich sind dies Natrium- und Kaliumsalze, sie verursachen eine „klebrige“ Asche, die sich in Schichten im Ofenraum anlagern kann und vermehrt Reinigungen notwendig macht. Normalerweise ist der Salzgehalt von Holz jedoch so gering, dass bei konventionellen Verbrennungsvorgängen keine Probleme auftreten.

Holzfeuchte

Umso höher der Wassergehalt des Holzes ist, desto mehr wird dadurch dessen Heizwert gesenkt, da ein Teil der Verbrennungsenergie für das Verdampfen des Wassers aufgebracht wird. Trockenes Holz hat folglich einen hohen Heizwert. Die Feuerräume in Öfen sind deshalb meist so konzipiert, dass auch feuchtes Holz – bis zu einem bestimmten Feuchtegrad – verbrannt werden kann. Bringt es das Holz auf Wassergehalte von über 55% wird eine stetige Verbrennung schwer erreichbar.

Luftüberschuss

Die stöchiometrische Umsetzung des Brennstoffes mit Luft hat Auswirkung auf den energetischen Wirkungsgrad der Verbrennung. Eine gewisse Menge an Brennstoff benötigt ein gewisses Volumen an Sauerstoff um richtig zu verbrennen.

Man hat als Hilfe die Luftüberschusszahl Lambda λ eingeführt. Erhält der Vorgang genau so viel Sauerstoff wie er benötigt, so ist λ = 1. Bei einem λ von 2 wird dem Vorgang doppelt so viel Luft und Sauerstoff, wie stöchiometrisch benötigt, zugeführt. Ist die Luftüberschusszahl größer als 1, enthalten die Rauchgase Sauerstoff. Prinzipiell wird eine Luftüberschusszahl höher als 1 eingestellt, da die Verbrennung ansonsten nicht zufriedenstellend verläuft. Die Luftüberschusszahl hängt vom Verbrennungsverfahren sowie in etwas geringerem Ausmaß vom Brennstoff selbst ab, z.B. ist bei Stückholzheizungen λ typischerweise 2,6 entsprechend einer mittleren Konzentration von Sauerstoff von 13%.

Abgase - Umweltaspekte

(siehe auch im Kapitel 2.1.3 „Abgaszusammensetzung“)

Wird Holz vollständig verbrannt, so werden Kohlendioxid (CO_2) und Wasser freigesetzt. Eine ungünstig gewählte Kombination aus Luftzufuhr, Anlage und Brennmaterial führt zu einer schlechten Verbrennung und schlechter energetischer Nutzung, daraus ergeben sich dann Umweltbelastungen in Form unerwünschter Abgasinhaltsstoffe wie Kohlenmonoxid (CO), Feinstaub, unverbrannte Kohlenwasserstoffe (organisch gebundener Kohlenstoff OGC), polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), etc. Aus lufthygienischer Sicht ist dabei der Feinstaub die bedeutendste Emission aus Holzfeuerungen.

Um eine gute Verbrennung zu erreichen müssen

- genügend Sauerstoffzufuhr,
- genügend hohe Temperatur,
- genügend Aufenthaltszeit der brennbaren Gase im Brennraum und
- eine ordentliche Vermischung der Gase mit Luft

gegeben sein.

Dadurch wird eine möglichst niedere Schadstoffemission sichergestellt, außerdem wird der Anteil an unverbrannten Kohlenstoff (Ruß) reduziert. Diese oben genannten Bedingungen fördern jedoch leider auch die Entstehung von Stickoxiden, daher muss die Technologie des Verbrennungsverfahrens so ausgelegt sein, dass es die Bildung von Stickoxiden zumindest unterdrückt.

Quellen: [1];[2]

2.1.2 Verbrennung aus chemischer Sicht

Eine Verbrennung ist eine Redoxreaktion, die unter Abgabe von Licht und Wärme exotherm abläuft, wobei Holz (Kohlenstoff) als Reduktionsmittel und Sauerstoff als Oxidationsmittel wirken.

Die für das Heizen relevanten Arten der Verbrennung sind

- Verbrennung von flüchtigen, glühenden Stoffen: Verbrennung unter Feuer, bei Feststoffen wie Holz verbrennen Pyrolyseprodukte als Gase mit Flammen.
- Verbrennung als Glut: Keine flüchtigen, glühenden Stoffe, daher kein Feuer.
- Unvollständige Verbrennung: Die höchste mögliche Oxidationsstufe des Reduktionsmittels Kohlenstoff (Kohlendioxid) wird nicht erreicht, Kohlenstoff geht teilweise in Kohlenmonoxid über.

Verbrennungsablauf

Um eine Verbrennung überhaupt möglich zu machen, müssen gewisse Bedingungen zutreffen. Dem Brennstoff müssen ausreichende Mengen an Oxidationsmittel zur Verfügung stehen, außerdem müssen Oxidations- und Reduktionsmittel in geeigneten Verhältnissen vorliegen. Im verwendeten Schwedenofen sind dies 1,5 kg Holz (entsprechend der Nennleistung von 21,5 MJ/h), mit entsprechenden Primär- und Sekundärlufteinstellungen. Um den Vorgang einzuleiten, ist selbstverständlich auch eine entsprechende Zündung notwendig. Dies geschieht mit einem Bioanzünder, welcher auf luftig geschichtetes Holz (Blockhaus-Stapelung) gelegt werden sollte.

Abb.2.1.2: *Verbrennungsdreieck*

Eine Verbrennung ist eine thermische Kettenreaktion. Reagiert eine kleine Menge Brennstoff, so fungiert die entstehende Wärme als Aktivierungsenergie für die Reaktion von weiterem Brennstoff. Neben Wärme entsteht auch Licht, welches von glühenden Masseteilchen freigesetzt wird. Eine Verbrennung bringt als exotherme Reaktion immer einen starken Temperaturanstieg mit sich, dieser kann zur Verrichtung von Arbeit oder zu Heizungszwecken genutzt werden. Das Flammenbild dient mittlerweile auch als Dekoration, nicht zuletzt daher erfreuen sich Schwedenöfen großer Beliebtheit.

Brennstoff Holz

Die thermische Zersetzung von Holz beginnt bei ca. 105°C, erreicht bei über 200°C eine hohe Geschwindigkeit und hat ihren Zenit bei ca. 275°C, auch der Flammpunkt liegt zwischen letzteren beiden Temperaturwerten. Kommt bei diesem Prozess kein Sauerstoff hinzu, setzt die Pyrolyse ein. In Gegenwart von Luft erreichen mitteleuropäische Nutzgehölze Heizwerte zwischen 13 und 20 MJ/kg.

Holz besteht größtenteils aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Schadstoffe, wie Schwefel, Chlor oder Schwermetalle, können je nach Exposition enthalten sein. Materialien wie Spanplatten sollten auf Grund ihrer enthaltenen Schadstoffe nicht verbrannt werden, zu Testzwecken wurden diese im Zuge der Diplomarbeit jedoch trotzdem eingesetzt. Dabei wurde eine enorme Bandbreite an Schadstoffen unter starker Geruchsentwicklung freigesetzt.

Durchläuft Holz eine vollständige Verbrennung so entstehen Kohlendioxid, Wasser und in geringem Maße Aschereste. Die schlechte Verbrennung kann Schadstoffe wie Kohlenmonoxid, Phenole, Formaldehyd, Ruß, Feinstaub usw. erzeugen (siehe im Kapitel 2.1.3 Abgaszusammensetzung).

Die Verbrennung von Holz fördert den Treibhauseffekt nicht. Wird ein Baum verbrannt, setzt er so viel Kohlendioxid frei, wie er auch durch natürliche Fäulnisprozesse freisetzen würde (CO_2-Neutralität). Im Gegensatz dazu stehen fossile Rohstoffe: bei deren Verbrennung wird Kohlendioxid in die Atmosphäre abgegeben, welches ansonsten im Boden isoliert wäre.

Verbrennungsberechnungen

(siehe auch im Anhang 8.6.1)

Oberer Heizwert H_o (Brennwert)

Beim Brennwert wird die Energiemenge berücksichtigt, die bei einer vollständigen Verbrennung frei wird. Die Energie, die das verdampfte Wasser durch die Kondensation freigibt, geht beim Brennwert nicht im Wasserdampf in der Abluft verloren, sondern wird im Brennwert mitberücksichtigt (auskondensierter Wasserdampf).

$$H_o = H_u + m_w * r\,(T)$$

m_w Massengehalt des Wassers im Abgas [%]

r(T) Verdampfungsenthalpie bei gegebener Temperatur T

H_u Heizwert [MJ/kg]

H_0 Brennwert [MJ/kg]

Unterer Heizwert H_u (Heizwert)

Der Heizwert gibt jene Energiemenge an, die durch die Verbrennung effektiv genutzt werden kann. Die Kondensationsenthalpie wird hier nicht genutzt, da Wasserdampf mit der Abluft verloren geht. Daher liegt der Heizwert immer unter dem Brennwert, bei Holz ist der Unterschied ca. 10%.

Berechnet wird H_u näherungsweise nach Boie mit folgender Formel

$$H_u = (34.0*C + 101{,}6*H + 6{,}3*N + 19{,}1*S - 9.8*O - 2.5*H_2O)\ [MJ/kg]$$

Die Elementsymbole stehen für ihren Massenanteil (%) im Brennstoff. H_u kann experimentell nicht bestimmt werden, dem Experiment ist nur H_o zugänglich.

Verbrennungsrechnung

Sie liefert Informationen über Rauchgasströme, Verbrennungsluftströme sowie Volumen und Zusammensetzung (Beladung) des Abgases (hier bei ausreichender Sauerstoffzufuhr):

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow H_2$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

$$N + O_2 \rightarrow NO_2$$

$$C_mH_n + (m+0{,}25n)*O_2 \rightarrow mCO_2 + 0{,}5\ nH_2O$$

In der Verbrennungsrechnung wird auch berücksichtigt, dass der Brennstoff einen Feuchtegehalt hat, aus welchem Wasserdampf entsteht. Das Wasser aus der Brennstofffeuchte trägt zur Feuchte im Abgas und zum Abgasvolumen bei, bzw bestimmt es den Heizwert.

Ein Beispiel für eine Berechnung des Abgasvolumens für Holzverbrennung bei Luftüberschuss ist in Anhang 8.6.1 angeführt.

Quellen: [3]; [4]; [5]; [6]; [7]; [8]

2.1.3 Abgaszusammensetzung

2.1.3.1 Kohlendioxid CO_2

Der Kohlenstoff im Holz wird bei guter Verbrennung hauptsächlich in Kohlendioxid umgewandelt:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

Unglücklicherweise muss Kohlendioxid mittlerweile als Schadstoff angesehen werden. CO_2 ist einer der Hauptverantwortlichen am anthropogenen Treibhauseffekt. Durch die Verbrennung fossiler Energieträger sind die CO_2-Emissionen enorm angestiegen, daher wird wesentlich mehr Infrarotstrahlung absorbiert und das Klima auf der Erde wird wärmer, CO_2 aus Holzverbrennung ist jedoch als klimaneutral anzusehen.

Durch den anthropogenen Treibhauseffekt ist CO_2 in den Fokus der Klimaforscher geraten, daher darf es bei der Bewertung der Atmosphärenbelastungen keinesfalls außer Acht gelassen werden.

CO_2 kann sich aber auch schädlich auf den Körper auswirken. Der MAK-Wert für tägliche Arbeit zu 8 Stunden (Maximale Arbeitsplatzkonzentration) beträgt 0,5% in der Luft. Höhere Konzentrationen verursachen Atemprobleme und können sogar bis zum Atemstillstand führen. Schwindelgefühle und Kopfschmerzen treten bei Konzentrationen ab etwa 5% CO_2 der eingeatmeten Luft auf, darüber liegende Konzentrationen führen zu Blutdruckanstieg, Tachykardie und Atemnot. Werden 8% erreicht so ist dies innerhalb von 30 bis 60 Minuten tödlich. Da CO_2 schwerer als Luft ist, müssen Abgasableitungen von Verbrennungsöfen immer gasdicht ausgeführt sein.

Bei den guten Feldversuchen in dieser Arbeit stellte sich heraus, dass die energetische Ausbeute auf Grund niederer Verluste potentieller Energieträger (Staubmenge, Kohlenmonoxid, erhöhte Abgastemperatur) höher ist. Dadurch wird weniger Brennstoff benötigt und der CO_2-Ausstoß wird insgesamt verringert.

2.1.3.2 Kohlenmonoxid CO

CO entsteht bei Verbrennungen von Kohlenstoffquellen (C) unter Sauerstoffmangel, daher wirkt es als Indikator für die Güte des Verbrennungsprozesses. Durch den Sauerstoffmangel kann die Oxidation von C bis zum CO_2 nicht optimal ablaufen.

Physiologische Bedeutung von CO

CO ist ein giftiges Gas. Da es farblos, geruchlos und geschmacklos ist, ist es schwer wahrzunehmen. Im Ofen ist es durch eine Blaufärbung der Flamme erkennbar. Eine leichte Kohlenmonoxidintoxikation verursacht Kopfschmerzen, Schwindel und grippeähnliche Erscheinungen. Kohlenmonoxid schädigt das Herz, das zentrale Nervensystem und kann sich negativ auf die Entwicklung von ungeborenen Kindern auswirken. Chronische Belastung kann zu Depressionen führen.

Im Blutkreislauf drängt es an das Eisenion vom Blutfarbstoff Hämoglobin und stört dort den Sauerstofftransport. Dadurch besteht akute Erstickungsgefahr, außerdem kann es die Lebenserwartung verkürzen. Der MAK-Wert beträgt 30 ppm.

Bildung von CO

Kohlenmonoxid kann sich aus der Direktoxidation des Kohlenstoffs bilden:

$$C + ½\ O_2 \text{ --> } CO$$

Da die Bildung von CO bei Verbrennungen mit Sauerstoffmangel abläuft, muss die Luftüberschusszahl $\lambda < 1$ sein. Dadurch wird folgende Reaktion limitiert.

$$2C + 2O_2 \text{ --> } 2CO_2$$

Dafür tritt nachstehende Reaktion ein.

$$2C + O_2 \text{ --> } 2\ CO$$

CO kann aber auch nach dem Boudouard-Gleichgewicht gebildet werden: Es tritt bei glühendem Kohlenstoff auf.

$$CO_2 + C \text{ <--> } 2\ CO$$

Bei höheren Temperaturen bildet sich auf Grund der Verschiebung des Gleichgewichts mehr CO als CO_2, durch erhöhten Druck verschiebt sich das Gleichgewicht aber wieder in Richtung der Edukte.

Hier eine Tabelle zur Veranschaulichung der Temperaturabhängigkeit des Gleichgewichts:

Temperatur in °C	**Bildung von CO_2 in %**	**Bildung von CO in %**
450	98	2
600	77	23
700	42	58
800	6	94
900	3	97
1000	1	99

Tabelle 2.1.1.: *Temperaturabhängigkeit des Boudouard-Gleichgewichtes (nach Wikipedia).*

2.1.3.3 Feinstaub

Feinstaub im Abgas werden die festen Bestandteile genannt, die durch die Verbrennung freigesetzt und aufgewirbelt werden. Als Feinstaub bezeichnet man in allgemeinen Sprachgebrauch Partikel mit einer Größe kleiner als 10 µm (daher im Englischen die Bezeichnung particulate matter PM_{10}). Sie sind lungengängig, da sie für die Filtermechanismen des Körpers zu klein sind und schädigen die Atemwege. Feinstaub kann allergische Reaktionen hervorrufen, asthmatische Anfälle verursachen und sogar Lungenkrebs auslösen.

Feinstaub im Winter und Ozon im Sommer sind Hauptverantwortliche für die Schädigung der Gesundheit durch Luftverschmutzungen.

In Privathaushalten entstehen die größten Mengen an Feinstaub durch Holzheizungen und offene Kamine. Die Ursache dafür ist, dass feste Brennstoffe erheblich höhere Mengen an Feinstaub emittieren, als es bei Flüssigkeiten oder Gasen der Fall ist.

Durch Schwarzfärbungen des Abgases ist eine hohe Feinstaubemission durch den Verbrennvorgang erkennbar. Eine gute Verbrennung gibt sehr wenig Feinstaub an die Umgebung ab, dies ist erkennbar an weißen (kondensierender Wasserdampf) oder fehlenden Rauchfahnen am oberen Ende des Kamins. Durch den emittierten Staub färbt sich die Innenseite des Kamins schwarz.

Die Grenzwerte für Feinstaub in der Luft betragen in der EU:

- 50 µg/m³ für den 24-Stunden-Mittelwert von PM_{10},
  (35 Überschreitungen jährlich erlaubt)
- 40 µg/m³ für den Jahresmittelwert von PM_{10}.

Die Kenngröße PM_{10} wurde zur Grenzwertfestlegung gewählt, da hierbei ca. die Hälfte der Partikel von menschlichen Atemwegen nicht gefiltert werden können.

Die Weltgesundheitsorganisation ist jedoch der Meinung, dass diese Grenzwerte viel zu hoch angesetzt sind.

Geht man von einer emittierten Gesamtmasse von 5 g Feinstaub pro einstündigem Abbranddurchgang eines Schwedenofens aus, so kann diese Feinstaubmasse in

einem Raumvolumen von 20 Meter Höhe in einem Umkreis von rund 70 Metern für eine Stunde zu einer Grenzwertüberschreitung für die PM_{10}-Immission führen.

2.1.3.4 Stickoxide NO_x

Generell liegt NO_x liegt bei den Bedingungen der Holzverbrennung (hohe Lambda-Werte) gänzlich in der Form von Stickstoffdioxid (NO_2) vor.

Bei der Bildung von Stickoxiden unterscheidet man drei Arten:

Brennstoff NO_x

Der Stickstoff wird hierfür aus dem Brennstoff freigesetzt. Dies kann sowohl durch Ausgasung infolge der Wärme, als auch durch thermische Zersetzung der Holzkohle/ des Restkoks erfolgen. Diese Art von Stickoxiden entsteht bei Verbrennungstemperaturen über 800°C und läuft über diverse Reaktionsschritte, wobei Stoffe wie Hydrazin oder Blausäure als Nebenprodukte entstehen können.

Thermisches NO_x

Dieses wird bei Temperaturen über 1250°C gebildet, wobei die Reaktionspartner Sauerstoff und Stickstoff aus der Verbrennungsluft gewonnen werden. Beschrieben wird dieser mehrstufige Vorgang als „Zeldovich-Mechanismus“.

a) $N_2 + O \rightarrow NO + N$

b) $N + O2 \rightarrow NO + O$

c) $N + OH \rightarrow NO + H$

Derartige Temperaturbedingungen sind bei Holzheizungen nicht bedeutsam.

Promptes NO_x

Hier wird der Stickstoff von Brennstoffradikalen umgesetzt.

2.1.3.5 Weitere Gase

Zusätzliche Stoffe im Abgas sind unter anderen noch Wasserdampf, Chlorverbindungen wie Dioxine, Blausäure, Hydrazine, Formaldehyd, Phenole, Schwefeldioxid, Ruß und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe.

2.1.3.6 Gesetzliche Grenzwerte für Schadstoffemissionen

Um die Umwelt mit den Emissionen dieser Schadstoffe nicht zu sehr zu belasten wurden folgende Grenzwerte festgelegt:

Abgas-Schadstoff	**Gewerbliche Holzfeuerung <0,1 MW**	**Stückholz Kleinfeuerung**	**Stückholz Kleinfeuerung**
		Betrieb	**Prüfstand**
CO	800 mg/Nm³ (13% O2)	1000 mg/Nm³ (13% O2)	1100 mg/MJ
	30% Teillast: 1200 mg/Nm³ (13% O2)	Toleranz: 1501 mg/Nm³ (13% O2)	
Staub	150 mg/Nm³ (13% O2)	150 mg/Nm³ (13% O2)	60 mg/MJ
OGC	50 mg/Nm³ (13% O2)	-	80 mg/MJ
Referenz	BGBl. II Nr. 331/1997 "Feuerungsanlagen-Verordnung"	LGBl. Nr. 82/1994 idgF "Luftreinhalteverordnung"	LGBl. Nr. 56/1998 idgF "Kleinfeuerungsanlagen-verordnung"

CO… Kohlenmonoxid
OGC…organisch gebundener Kohlenstoff

Quellen: [9]; [10]; [11]; [12]; [13]; [14]; [15]; [16]

2.1.4 Wassergehalt

Da der zunehmende Wassergehalt im Holz dessen Heizwert senkt, ist es wichtig getrocknetes Holz zu verwenden.

Der Wassergehalt wird nach folgender Formel berechnet:

$$M = \frac{(m(1) - m(2))}{m(1)} * 100$$

M Wassergehalt in %

m(1) Masse Holz feucht

m(2) Masse Holz trocken

Im Unterschied zum Wassergehalt wird bei der Berechnung der sogenannten Holzfeuchte in der obenstehenden Formel m(2) als Divisor eingesetzt.

Hier ist die Heizwertminderung durch Wasser im Brennholz graphisch dargestellt:

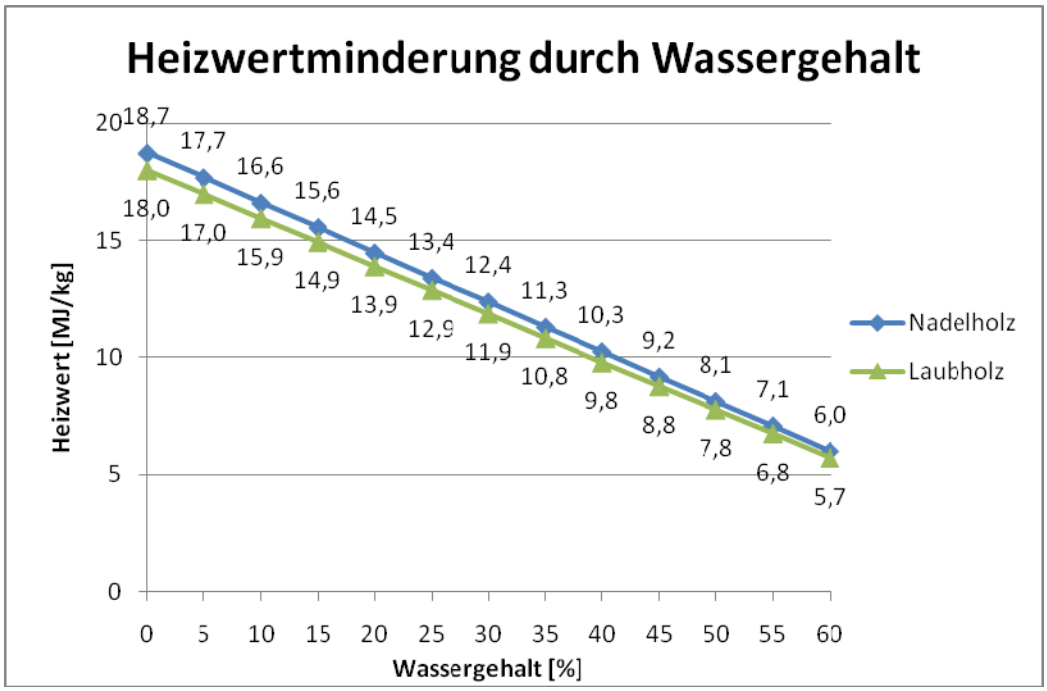


Diagramm 2.1.1: *Heizwertverminderung durch Holzwasser.*

Da trockenes Holz und gute Brennholzlagerung für einen Abbrand wichtig ist, ist es auch interessant zu wissen, wie das Wasser innerhalb des Scheitholzes verteilt ist und das Trocknungsverhalten zu verstehen. Dazu wurde in der Diplomarbeit ein Modellversuch mit angefeuchtetem Scheitholz durchgeführt.

Quelle [17]

2.2 Funktion des Ofens

2.2.1 Der Schwedenofen

Der bei den Feldversuchen eingesetzte Ofen ist ein Schwedenofen der Firma Hase vom Typ Bari mit einer in Österreich gültigen Zulassung.

Abb. 2.2.1.: *Bari Schwedenofen*

2.2.1.1 Der Aufbau

Der Schornstein zum Schwedenofen bedarf einer wirkvollen Mindesthöhe von 4,5 Metern, dessen Querschnitt sollte zumindest dem des Rauchrohres entsprechen, da dieses die Verbindung zum Ofen bildet. Treffen diese Parameter nicht zu, so wird das Zugverhalten verschlechtert.

Zu Messzwecken wurden in das Rauchrohr Löcher gebohrt um die Sonden für die Messparameter CO / O_2 / Temperatur und CO_2 in den Abgasstrom einzuführen. Der ideale Förderdruck im Abgas liegt bei neun Pa, dar maximale Förderdruck bei 35 Pa. Oberhalb von 9 Pa kommt es zu erhöhten Abgasemissionen. Da der Ofen während der praktischen Messungen im Freien platziert war, ist es im Sommer vorgekommen, dass der Rauchabzug nicht richtig funktionierte, weil durch Wetterlagen (wie z.B. Inversion oder starke Wärmestrahlung der Sonne) ein solches Zugverhalten beeinträchtigt wurde. Für den Anschluss der Messgeräte-Sonden für Staub, Differenzdruck und Temperatur wurde am Kaminende ein Aufsatz mit geringerem Querschnitt (16,2 cm) angebracht.

Im Innenraum des Ofens ist ein Feuerrost angebracht, dieser dient zur Entsorgung der Asche, dient aber nach dem Öffnen des Aschetresors - wie es während der Versuche gemacht wurde - auch als Verbrennungsluftzufuhr um den Verbrennungsvorgang etwas zu beschleunigen.

Die Wärmeleistung kann man grundsätzlich in einer gewissen Bandbreite selbst bestimmen, je nach dem, wie viel Brennstoff eingesetzt wird. Der Ofen hat jedoch eine Nennleistung von 6kW (21,5 MJ/h), daher ist bei einem Abbrand von etwa einer Stunde eine Menge von ca 1,5kg Holz energetisch betrachtet optimal, Das Holz hatte einen mittleren Wassergehalt von 12 %, wobei Scheite mit Längen von 20 – 25cm verwendet wurden. Gemäß diesen Vorgaben wurde in „Gut“-Versuchen 1,5 kg Scheitholz eingesetzt, während bei den „Schlecht“-Versuchen Holzmassen von 2,5 kg in den Verbrennungsraum gegeben wurden.

2.2.1.2 Anfeuern

Da in dieser Phase durchaus höhere Emissionen auftreten können, sollte sie möglichst kurz sein. Primär – und Sekundärluft waren in der Regel auf maximale Zuluft eingestellt.

Durch Schichtung des Holzes im „Blockhaussystem“ und der Platzierung eines Bioanzünders darauf werden die Emissionswerte minimiert. Dagegen liefert ein Einheizen mit kompakter Holzschicht über dem Anzünder erheblich höhere Abgaswerte. Verläuft das Anfeuern unzufriedenstellend, kann der Vorgang durch das Öffnen der Ascheluke beschleunigt werden, außerdem ist es ein optimales Anfeuern, wenn der Ofen bereits warm ist. Bei einer nicht optimalen Verbrennung kann es sein, dass Kondensation und Verrußung der Keramikglasscheibe auftreten.

Der Verbrennungsablauf sollte nach erfolgreichem Anfeuern nicht mehr durch Öffnen der Türe gestört werden, erst wenn die Flammen erloschen sind, sollte Holz nachgelegt werden.

Beurteilung der Verbrennung

Als Laie kann man die Güte der Verbrennung anhand folgender Merkmale feststellen:

- Die Farbe der Asche: Eine gute Verbrennung hinterlässt weise, feine Asche, wohingegen dunkle Asche auf eine unvollständige Ausbrandphase zurückzuführen ist, da sie Holzkohlereste enthält.
- Farbe der Abgase: Umso schlechter die Abgase zu erkennen sind, desto besser ist die Verbrennung. Keine Färbung der Abgase ist folglich am besten.

Brennwerte Österreich für den Schwedenofen Hase Typ Bari

Nennwärmeleistung	6 KW (21,5 MJ/h)
Heizleistung in min./max.	3,7 – 7,4 KW (13,3 – 26,6 MJ/h)
Brennstoff	Holz
Brennstoffwärmeleistung	9,1 KW (32,8 MJ/h)
Abgasmassenstrom	5,5 g/s
Abgasstutzentemperatur	377 °C
Mindestförderdruck bei Nennwertwärmeleistung	9 Pa

Emissionswerte für den Schwedenofen Hase Typ Bari

CO	673 mg/MJ
NO_x	65 mg/MJ
OGC	36 mg/MJ
Staub	37 mg/MJ
Wirkungsgrad:	81 %

Die Aufstellung des Ofens und des Kamins erfolgte durch die „Sponsorunternehmen“, sowie einem Kaminkehrermeister, der die Abnahme durchführte.

Quellen [18]

2.3 Messtechnik

2.3.1 Messung der Abgasgeschwindigkeit

Das Gesamtvolumen des Abgases kann aus der gemessenen Abgasgeschwindigkeit und dem bekannten Querschnitt des Rauchrohres ermittelt werden. Die Abgasgeschwindigkeit wird dabei aus dem dynamischen Druck im Rauchrohr berechnet.

Steckt man die Spitze eines Staurohres als Sonde (Prandtl Staurohr) in das Rauchrohr, so steht sie entgegen der Strömungsrichtung. Dadurch bildet sich als dynamischer Druck ein Staudruck, welcher zusätzlich zum statischen Druck (Luftdruck) wirkt. Zur Messung des dynamischen Drucks werden an der Sonde zwei Schläuche angebracht, welche die Verbindung zum Differenzdrucksensor herstellen. Durch einen der Schläuche wird auf den Drucksensor der statische Druck übertragen, durch den anderen die Summe von statischem und dynamischem Druck. Wird von diesem Summendruck der statische Druck subtrahiert so ergibt sich der dynamische Druck. Messtechnisch erfolgt diese Subtraktion durch eine Differenzdruckmessung mit einem piezoresistivem elektrischen Drucksensor, welcher im Bereich 0 – 50 Pa arbeitet.

Ist die Dichte des Gasmediums bekannt, so kann aus dem dynamischen Druck die Strömungsgeschwindigkeit nach Bernoulli berechnet werden:

$$v = \sqrt{\frac{(2 * p(dyn))}{\rho}}$$

v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

ρ Gasdichte [kg/m³]

p (dyn) Dynamischer Druck [Pa],[N/m²]

Der statische Druck ist der Druck der auf eine Fläche wirkt, die mit dem Medium in Verbindung steht – im Falle der Atmosphäre der Luftdruck. Der dynamische Druck ist jener Druck welcher an der Oberfläche eines Körpers in einer Strömung auf Grund der kinetischen Energie einwirkt, hier der Staudruck.

Das bei den Feldversuchen verwendete Messgerät war der “Drucksensor tesko 6344”, welcher über einen Datenlogger jede Sekunde ausgelesen wurde.

Quellen [19]; [20]

2.3.2 Messung der Temperatur

Die Messung der Abgastemperatur wird im Abgasrohr des Ofens und an der Stelle der Differenzdruckmessung am Kaminende mit Hilfe eines Thermoelementes vorgenommen. Das Thermoelement wurde jeweils über einen Datenlogger ausgelesen alle 30 Sekunden ausgelesen.

2.3.3 Messung von Kohlendioxid (CO_2)

Das eingesetzte Messgerät ist ein Prototyp der Firma Acontec AG für die Messung von Kohlendioxid in Abgasen. Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der nicht-dispersiven Infrarotdetektion (NDIR). Der Messbereich liegt zwischen 0 und 30 Volumenprozent CO_2.

Messprinzip

Das durch das Rauchrohr abgesaugte Abgas gelangt in den Proberaum des Messgerätes. Die Infrarotstrahlung durchwandert den Proberaum und trifft dort auf das Abgas. Durch spezielle optische Filter werden alle Wellenlängen der Strahlenquelle eliminiert, mit Ausnahme derer, die von Kohlendioxid spezifisch absorbiert werden (für Kohlendioxid die Wellenlänge 15 µm). Somit werden Störungen durch andere Gase weitgehend verhindert. Das nichtabsorbierte Licht trifft dann auf den Detektor. Die Intensität des dort auftreffenden Lichtstrahls ist umgekehrt proportional der Konzentration von Kohlendioxid im Abgas. Je mehr Moleküle, desto geringer die Intensität der in den Detektor gelangenden Infrarotstrahlen.

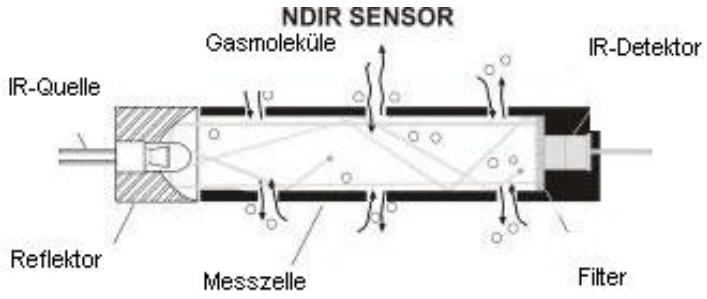


Abb. 2.3.1.: *Funktionsschema eines NDIR-Sensors.*

Mit dem Beerschen Gesetz kann nun auf die Konzentration von CO_2 im Abgas geschlossen werden.

$$I = I(0) * e^{k*p}$$

I Intensität der Rest-Infrarotstrahlung

I(0) Intensität der Strahlung im leeren Proberaum

K Extinktionskoeffizient

p Konzentration von Kohlendioxid [%]

Quellen [21]; [22]; [23]; [24]

2.3.4 Staubmessung

Aus dem Abgasstrom am Kaminende wird ein Teilgasstrom abgesaugt. Der darin enthaltene Staub wird durch ein Quarzwollfilter abgetrennt. Der Staubgehalt des Abgases kann nun aus dem Volumen des getrockneten Teilgasstromes und der im Filter enthaltenen Staubmasse errechnet werden. Um repräsentative Probenahme zu gewährleisten, muss die Absauggeschwindigkeit des Teilgasstromes der Geschwindigkeit des Gesamtgasstromes an der Probenahmestelle entsprechen.

Die mit Staub beladenen Quarzwollfilter werden nach dem Auswiegen auch zur Ermittlung des Kohlenstoffgehaltes im Staub (partikuläre Kohlenstoffemission) weiterverwendet.

Die Förderung des Gases vom Kamin zum Staubmessgerät erfolgte mittels einer Membranpumpe. Dies sind Verdrängerpumpen, bei denen das (aggressive) Fördermedium auf Grund einer Membran nicht mit dem Pumpenantrieb in Kontakt kommen kann.

Das verwendete Staubmessgerät stammt von der Firma E. Koneth. Es ist sowohl mit einer Gasuhr, einer Temperaturmessung und einem Manometer, als auch mit einem Wasserdampfkondensator und einem Silikagelbehälter zwecks Gasentfeuchtung ausgestattet.

Abb. 2.3.2: *Staubmessgerät*

Mit der Gasuhr wird das Gasvolumen der getrockneten Abgase in Kubikmetern ermittelt. Zur weiteren Berechnungen der Normkubikmeter, Nm³, wird der Temperaturwert und der mittlere Unterdruck eingesetzt.

Volumina, angegeben bei Normbedingungen in Nm³, sind die Volumina in m³ bei folgenden Bedingungen:

Temperatur: 0°C
Druck: 1,013 bar
Luftfeuchtigkeit: 0%.

Das Endergebnis für die Abgaskonzentrationen von Staub und des partikulären Kohlenstoffs werden in mg/Nm³ angegeben, zur Standardisierung von Verdünnungseffekten gegebenenfalls bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt des Abgases.
Die Ermittlung des korrekten Düsenquerschnittes der Entnahmelanze für den Teilstrom erfolgte tabellarisch aufgrund der abgeschätzten Abgasgeschwindigkeiten an der Entnahmestelle von 1,6 m/s. Nur für Einzelversuche mit sehr hoher Staubbelastung (überladene Brennholzmenge) wurde der Düsenquerschnitt bewusst verringert, um den Quarzwollefilter vor Überfüllung zu schützen.

Quellen [25]; [26]

2.3.5 Messung des partikulären Kohlenstoffs im Staub

Bei partikulärem Kohlenstoff handelt es sich um unverbrannten Kohlenstoff im Staub (zB Ruß). Da dieser Kohlenstoff zur Feinstaubbelastung im Abgas beiträgt und energetisch ungenützt bleibt, soll er quantitativ bestimmt werden, um Aussagen über den Heizverlust treffen zu können.

An den beladenen Filterwollen aus der Staubmessung wurde auch der Anteil des partikulären Kohlenstoffs im Staub des Abgases bestimmt. Die Messung wurde an einem Gesamtkohlenstoffanalysator für Feststoffe (Feststoff-TOC) am Umweltinstitut in Bregenz durchgeführt.

Der partikulär vorliegende totale organische Kohlenstoff (total organic carbon, TOC) im Abgas repräsentiert die festen Bestandteile im Abgas, die nicht verbrannt wurden, wie z.B. Ruß oder kondensierte hochsiedende Kohlenwasserstoffe. Dieser Bestandteil enthält thermische Energie, welche durch die Verbrennung nicht ausgeschöpft wurde. Somit sind aus den Mengen Rückschlüsse auf die Vollständigkeit und Effizienz der Verbrennung zu ziehen.

Ausmessung der Proben

Die Proben sind ident mit den Filtern der Staubmessung nach der abschließenden Ermittlung der staubbeladenen Filtermasse. Für die Einbringung der Probe in das TOC-Messgerät, welche in Schamottschiffchen stattfindet, muss der Filterwolle ein Aliquot entnommen werden. Daher muss jede Probe zunächst mit einem Wiegemesser solange zerschnitten werden, bis eine homogene Mischung aus Staub und Filterwolle eine Aliquotierung zulässt.

Um brauchbare Werte zu erhalten, müssen vor Messbeginn diverse Vorbereitungen getroffen werden. Einige Blindproben, Luftproben ohne Schamottschiffchen, werden analysiert, bis die Gerätewerte stabil sind. Anschließend muss das Gerät linearisiert und einer Driftkorrektur unterzogen werden.

Die optimale Füllmenge für ein Schiffchen ist ca. 0,2 Gramm, da das Schiffchen dann optimal gefüllt ist, und der Orientierungswert von 1,22% C innerhalb des linearisierten Bereiches der Kalibrierung liegt. Alle Proben werden dann mit ca. 0,2 Gramm auf 1/10 Milligramm genau eingewogen.

Die Proben werden in ein Gestell gestellt, von welchem die Proben automatisch in den Verbrennungsraum befördert werden. Als Ergebnis erhält man Stickstoff- und Kohlenstoffwerte, welche den prozentuellen Anteil dieser Elemente in der Probe angeben.

Von der unbeladenen Filterwolle wurde auch ein Blindwert ermittelt und von den Messwerten der Proben in Abzug gebracht.

Funktionsweise des Feststoff-TOC „LECO CN-2000“

Die Oxidation des organischen Kohlenstoffs erfolgt in reiner Sauerstoffatmosphäre über thermische Verbrennung bei > 1000 °C, als Messgröße wird der Gehalt des entstehenden Kohlendioxids infrarotphotometrisch nicht-dispersiv detektiert. Für die die abgewogenen Proben gibt es einen automatischen Probengeber.

Der Stickstoffanteil entweicht beim Verbrennen ebenso und wird in Stickoxide überführt. Haben die Gase den Ofen verlassen, durchqueren sie zwei Trocknungsrohre. Anschließend werden sie durch einen Staubfilter und einen thermoelektrischen Kühler geleitet. Das Gasgemisch wird homogenisiert und komprimiert und über die Aliquotdosierschleife zu den Infrarot-Zellen befördert. Dort wird das Kohlendioxid via Infrarotspektroskopie gemessen und detektiert.

Berechnung der Konzentration des partikulären Kohlenstoffs in der Abluft

Der Massenprozentsatz für TOC in der aliquotierten Messprobe aus dem Analysengerät stellt auch den TOC-Gehalt in der gesamten Filterwolle dar, daher kann zusammen mit der Gesamtmasse der Wolle die Masse des organischen Kohlenstoffs im Staub und damit die Masse des partikulären Kohlenstoffs bestimmt werden.

Aus der Masse errechnet sich die Konzentration von partikulärem Kohlenstoff im Abgas mit folgender Formel:

$$c(C) = \frac{m(C)}{V(N, trocken)}$$

m(C)	Masse des partikulären Kohlenstoffs im Filterstaub [mg]
V(N, trocken)	Trockenvolumen des Abgases, umgerechnet auf 0°C, 1,013 bar [Nm³].
c(C)	Konzentration von partikulärem Kohlenstoff [mg/Nm³]

Die Umrechnung der Abgaskonzentration auf eine Standardverdünnung im Abgas mit Bezugswert 13% O_2 erfolgt nach:

$$c(C, 13\%) = c(C) * \frac{(21 - 13)}{(21 - c(O2))}$$

c(C, 13%O2) Konzentration von partikulärem Kohlenstoff bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt im Abgas [mg/Nm³]

c(C) Konzentration von partikulärem Kohlenstoff [mg/Nm³]

c(O2) Sauerstoffgehalt im Abgas [%]

Bei der Umrechnung auf Bezugeswert 13% Sauerstoffgehalt wurden über die Versuchsdauer gemittelte Sauerstoffwerte für c(O2) eingesetzt.

Quellen [27]

2.3.6 Multifunktionelles Abgasmessgerät (O_2, CO, NO_x)

Das uns zur Verfügung gestellte Messgerät für Kohlenmonoxid und Sauerstoff im Abgas trägt den Namen ECOM J2KN und stammt von der Firma „rbr“

Zu Beginn jeder Messung sollte das Gerät kalibriert werden. Dieser Vorgang dauert ungefähr eine Minute und läuft nach Eingabe automatisch ab. Die Gase werden von der Sonde des Messgerätes angesaugt, durchlaufen eine mit Wasser gefüllte Waschflasche und ein Partikelfilter und werden mit einem Peltierelement auf 5 – 10 °C gekühlt. Dieses Gerät misst mehrere Emissionsparameter (Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Temperatur) simultan. Für den CO- und NOx-Sensor werden querempfindliche und sensorzerstörende Abgaskomponenten (beim CO-Sensor sind dies zB Schwefeldioxid, Stickoxide) chemisch herausgefiltert.

Der Vorteil dieses Messgerätes ECOM J2KN ist, dass es neben verschiedenen Messsonden auch die automatische Auswertung einbezieht. Die Werte werden von dem Gerät gespeichert, um Risiken zu vermeiden ist es aber möglich die Einstellungen so vorzunehmen, dass die Werte in periodischen Abständen ausgedruckt werden.

Kohlenmonoxid CO:

Der Kohlenmonoxidgehalt im Abgas wird elektrochemisch gemessen. Auf dem Weg in die Messkammer des Messgerätes, welche den Elektrolyten beinhaltet, muss das Prüfgas eine Kunststoffmembran passieren. In der Messkammer befinden sich eine Messelektrode und eine Referenzelektrode, zwischen denen eine konstante Spannung anliegt. Durch die elektrochemische Umwandlung des CO an der Anode entsteht ein Strom welcher sich proportional zum Partikeldruck des CO-Gases verhält. Die elektrochemische Reaktion läuft folgendermaßen ab:

$$\text{Anode: } CO + H_2O \rightarrow CO_2 + 2\,H^+ + 2\,e^-$$

$$\text{Kathode: } O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^- \rightarrow 2\,H_2O$$

Die CO-Messwerte werden in der Einheit ppm (parts per million) ausgegeben. Die CO-Messung erfolgt mit zwei unterschiedlich sensiblen Sensoren für den empfindlichen Bereich bis 2000 ppm und für den Bereich über 2000 ppm. Für die Durchführung der Feldversuche mit hochbelastetem Abgas war diese automatisch ablaufende CO-Sensor-Umschaltung als Geräteschutz wesentlich.

Da die einströmende Sekundärluft im Ofen ein homogenes Abgasverhalten verhindern kann, muss die CO-Messung nach einer Durchmischungsstrecke im Rauchrohr erfolgen.

Um die Verdünnungsfehler durch Luftüberschuss auszugleichen, werden CO-Werte in mg/m³ auf 13% Sauerstoffgehalt als Bezugsbasis für die Luftverdünnung (Lambda = 2,6) vereinheitlicht. Dies geschieht mit folgender Formel:

$$c(CO, 13\%\,O2) = c(CO) * \frac{(21 - 13)}{(21 - c(O2))}$$

c(CO, 13%O2)	Konzentration von Kohlenmonoxid bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt im Abgas [mg/Nm³]
c(CO)	Konzentration von Kohlenmonoxid [mg/Nm³]
c(O2)	Sauerstoffgehalt des Abgases [%]

Bei der Umrechnung auf Bezugeswert 13% Sauerstoffgehalt wurden über die Versuchsdauer gemittelte Sauerstoffwerte für c(O2) eingesetzt.

Sauerstoffmessung O_2:

Die Sauerstoffmoleküle wandern durch eine Membran zur Kathode. Dort entstehen aus dem Sauerstoff im Zuge der chemischen Reaktion OH^--Ionen, welche durch den Elektrolyten zur Anode kommen. Durch den Ionenfluss entsteht ein Strom, welcher proportional der Sauerstoffkonzentration ist. Im Widerstand entsteht dadurch ein Spannungsabfall, dieser wird gemessen und elektronisch ausgewertet.

Kathode: $O_2 + H_2O + 4\ e^- \rightarrow 4\ OH^-$

Anode: $2Pb + 4\ OH^- \rightarrow 2\ PbO + 2H_2O + 4e^-$

Die Spannung an der Sonde aufgrund der elektrochemischen Vorgänge ist mit der Nernstgleichung bestimmbar:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{z_e F} \ln \frac{a_{\mathrm{Ox}}}{a_{\mathrm{Red}}}$$

E	Elektrodenpotential
E°	Standardelektrodenpotential
R	Universelle oder molare Gaskonstante (R = 8,3145 J/(mol*K)
T	Temperatur (Kelvin)
z_e	Zahl übertragener Elektronen
F	Faradaykonstante (F = 96485,34 C/mol)
a_{Ox}, a_{Red}	Aktivität der entsprechenden Redoxpartner

Stickoxide NOx:

Sie entstehen hauptsächlich, wenn der Stickstoff der Luft auf zu hohe Verbrennungstemperaturen trifft. Daher wurde NOx in dieser Arbeit über Holzheizungen nicht ausgewertet. Auch Stickoxide werden nach elektrochemischem Prinzip gemessen. Erfasst werden dabei Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid als Summe (NOx), bei den hohen Lambda-Werten einer Holzfeuerung liegt jedoch ausschließlich Stickstoffdioxid vor.

Temperaturmessung:

Die Messung der Abgastemperatur wird im Abgasrohr des Ofens mit Hilfe eines Thermoelementes vorgenommen. Eine zweite Temperaturmessung erfolgte auch am Kaminende an der Stelle der Differenzdruckmessung.

Quellen [28]; [29]; [30]; [31]; [31]

2.3.7 Flammenionisationsdetektor FID

Dies ist eine Messmöglichkeit von organisch gebundenem Kohlenstoff (OGC) im Abgas. Das Funtionsprinzip beruht darauf, dass zwischen zwei Elektroden die Leitfähigkeit einer Wasserstoffflamme bestimmt werden kann. Brennt die Flamme rein, so ist die Bildungsrate von Ionen sehr gering. Kommen mit dem Abgas nun aber gasförmige Kohlenwasserstoffe in diese Flamme, so werden die Kohlenwasserstoffe darin ionisiert und bilden einen Ionenstrom welcher im direkten Zusammenhang mit der Konzentration der Kohlenstoffe im Abgasstrom steht. Dieser Strom richtet sich sowohl nach der Konzentration der Kohlenwasserstoffe, als auch der Anzahl der im Kohlenwasserstoff enthaltenen Kohlenstoffatome.

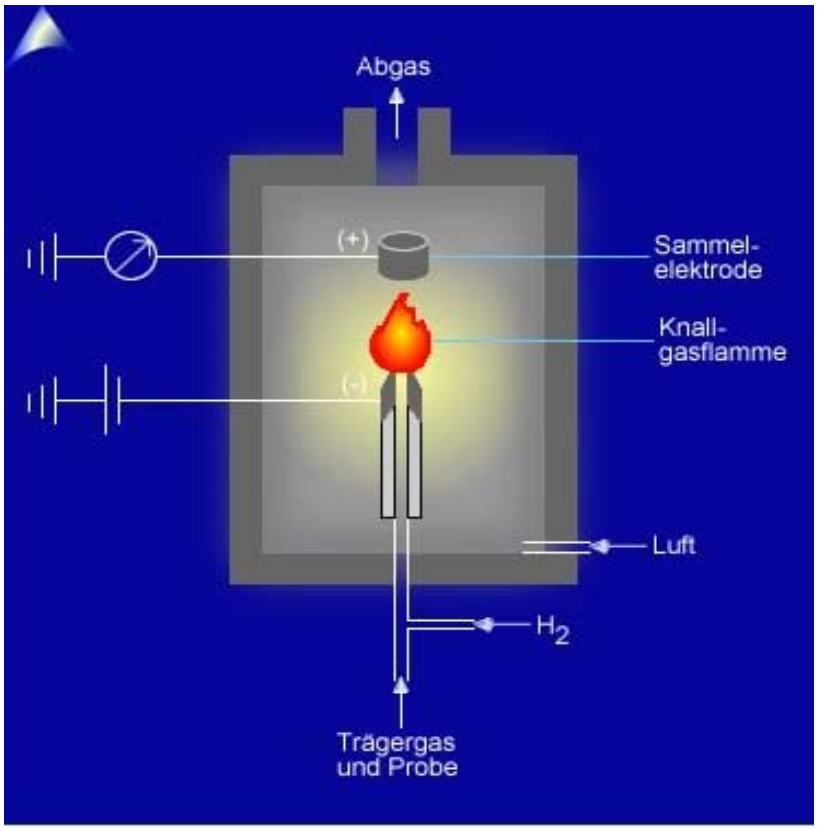


Abb. 2.3.3.: *Aufbau eines FID.*

Mit einem Gitter werden die Ionen aufgefangen und der sich damit ergebende Stromfluss von einem Schreibsystem in Form von Peaks über die Versuchslaufzeit aufgezeichnet. Da die Werte aus dem Schreiber, der den Konzentrationsverlauf als Peaks wiedergibt, „von Hand“ ausgewertet werden mussten, wird das Versuchsergebnis für OGC als Mittelwert über die Gesamtabbrandzeit angegeben.

Die Kalibrierung des Signals erfolgt mit Eichgas, typischerweise 80% Propan in Luft. Deshalb sind die Ergebnisse der Konzentrationen an organisch gebundenem Kohlenstoff im Abgas auf Propan (3 Kohlenstoffe) bezogen.

Quellen [32]; [33]

3. Praktische Umsetzung

3.1 Versuchsaufbau

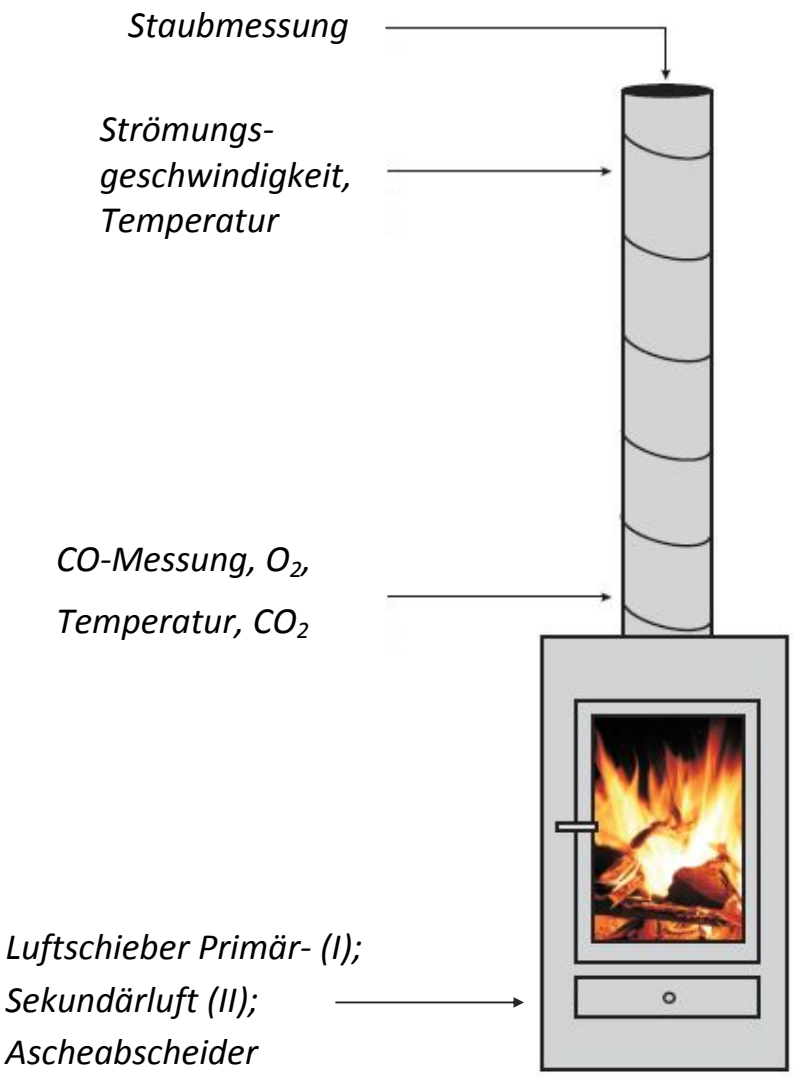


Abb. 3.1.1.: *Versuchsaufbau*

3.2 Versuchsparameter

Um ein überzeugendes und vor allem aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, wurden so viele Abbrandvariationen wie möglich durchgetestet. Die Holzverbrennung als solches, ist jedoch ein sehr komplexer Vorgang bei dem auf viele Parameter geachtet werden muss. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden daher die wichtigsten Versuchsparameter festgelegt und die Versuche danach gerichtet.

3.2.1 Vorbereitung

Die variierten Versuchsparameter beschränken sich auf:

- Brennstoffart
- Holzmenge
- Ofeneinstellungen
- Brennstoffanordnung im Ofen
- Anzündcharakteristik

3.2.1.1 Brennstoffart

Die grundlegenden Parameter sind in diesem Falle vor allem die verschiedenen Holzsorten Buche und Fichte, welche beide aus den Auwäldern Dornbirns stammen. Zusätzlich zu diesen beiden Brennstoffen wurden noch Alternativen getestet, um hier einen möglichst großen Praxisbezug zu erhalten. Daraus ergeben sich folgende Brennstoffe:

- Fichte
- Buche
- Holzbrikett
- Spanplatten/beschichtetes Holz
- Nasses Holz (Kiefer)
- Braunkohle

Abb. 3.2.1.: *Scheitholzgröße*

Fichte, Buche und auch das nasses Holz wurden in Form von Scheiten in den Verbrennungsraum gebracht, mit einer Länge von ca. 25 cm und einem Durchmesser von etwa 5 cm.

Die Holzbriketts sind in kleine Scheiben zerteilt worden, um eine möglichst optimale Verbrennung zu ermöglichen und das Entzünden zu erleichtern.

Spanplattenstücke bzw. Stücke beschichteten Holzes wurden ebenfalls in gegebener Menge und Größe in den Ofenraum eingebracht.

3.2.1.2 Holzmenge

Die Holzmenge wurde den verschiedenen Brennstoffarten und natürlich der Ofenleistung angepasst.

Abb. 3.2.2: *Scheitholz Fichte/Buche*

Fichte, Buche

Laut Betriebsanleitung des Ofens ist jener für eine Leistung von 21,5 MJ/h (6 kW) zugelassen. Dies bedeutet für die beiden Holzarten Buche und Fichte, dass in etwa 1,5 kg Holz genommen werden sollten, bei 20% Wassergehalt und einer Abbranddauer von 60 min. Dieser Wert ergibt sich aus dem Diagramm in Kapitel 2.1.4, welches den Bezug zwischen Wassergehalt und Heizwert darstellt. Die verwendeten Hölzer hatten eine Wassergehalt von typischerweise 12%.

Diese Informationen wurden uns dankenswerterweise von Kaminkehrer Walter Sutterlüti aus Dornbirn zur Verfügung gestellt.

Nasses Holz (Kiefer)

Als Zusatz wurde noch "nasses" Kiefernholz getestet mit einem Wassergehalt von 47%. Es zeigte sich jedoch sehr schnell, dass Holz mit einem solchen Wassergehalt gänzlich ungeeignet ist, da es nicht zu einem selbstständigen Abbrand kommt.

Spanplatten

Hierbei wurde die Menge passend zur Ofen-Nennleistung auf in etwa 1,5 kg geschätzt, da keine genauen Angaben vom Heizwert zur Verfügung standen.

Holzbrikett

Abb. 3.2.3.: *Brikett*

Diese wurden nach Angaben des Herstellers dem Ofen entsprechend angepasst. Der durchschnittliche Heizwert beträgt hier ca. 6 kWh/kg, daher wurden knapp 1 kg Holzbrikett in den Verbrennungsraum eingebracht.

3.2.1.3 Ofeneinstellungen

Luftzufuhr

Der Ofen war so konstruiert, dass sowohl die Primärluft als auch die Sekundärluft verändert werden konnten. Bei fast alle Versuchen beschränkte man sich, die Primär- bzw. Sekundärluft konstant auf maximale Luftzufuhr gestellt zu lassen. Sowohl in der Praxis, als auch aus dem Handbuch sind zu entnehmen, dass dies die beste Lösung darstellt.

Abb. 3.2.4.: *Luftschieber Primär- (I) und Sekundärluft (II) und Ascheabscheider*

Zusätzlich konnte bei dem verwendeten Modell eine „Ascheklappe“ geöffnet werden, welche das entfernen des Abbrandrückstandes ermöglicht. Wenn diese geöffnet wurde, konnte ein totaler Luftüberschuss an Primärluft im Verbrennungsraum erzielt werden. Des Ascheabscheiders bediente man sich meist, wenn das Anzünden mit der vorhandenen Luftzufuhr nicht mehr ausreichte und das Feuer zu ersticken drohte, oder wenn der Zug im Kamin noch nicht richtig vorhanden war.

Ofentemperatur

Die meisten Versuche wurden mit warmem Ofen durchgeführt. Die Ausnahmen stellten jedoch die „Schlechten“ Versuche dar, welche bei kaltem Ofen gestartet wurden. Der Grund für diese Unterscheidung liegt darin, dass der Ofen zum vollkommenen Auskühlen fast 2 Stunden benötigt. Nur ein Einzeltest wurde mit kaltem Ofen und guter Brennholzstapelweise gemacht.

3.2.1.4 Brennstoffanordnung im Ofen

Das Einschichten des Holzes in den Brennraum ist einer der wichtigsten Punkte für gutes Heizen, da hier die meisten Fehler gemacht werden können.

Der Brennstoff sollte zum einen locker übereinander gestapelt werden, damit genügend Luft durch das Holz ziehen kann.

Angezündet wird zum anderen immer gegenläufig dem Luftstrom. Bei diesem Ofenmodell bedeutet dies das Anzünden von Oben, da die Primärluft von unten nach oben durch das Holz strömt. Diese beiden Punkte bewirken, dass das Holz von oben nach unten abbrennt und immer genau so viel Brennstoff brennt, wie Sauerstoff zur Verfügung steht.

Abb. 3.2.5.: *Holz im Blockhaus gestapelt; „Gut“*

Diese Art der Stapelweise bezeichnet man als „Gut“.

Der gegenteilige Fall, also von Unten angezündet und dicht zusammengestapelt, wird als „Schlecht“ bezeichnet.

Abb. 3.2.6.: *Holz dicht gepackt; „Schlecht“*

Eine dritte Form der Stapelweise ist „Überladen“. Wie der Name schon sagt, wird in diesem Fall eine Holzmenge von ca. 2,5 kg Holz verwendet. Dies entspricht in etwa 10 kWh / 36 MJ Wärmeenergie (bei 20% Wassergehalt), welche die Nennleistung des Ofens während einer Stunde weit übersteigt. Diese Menge ist jedoch nicht willkürlich gewählt, sondern jene Menge, die von einem Laien rein vom "Gefühl" in den Ofen gepackt werden sollte. Das Holz wird dann wie bei einem „guten“ Versuch locker gestapelt und von Oben angezündet.

Abb. 3.2.7.: *Übermenge an Holz im Blockhaus; „Überladen“*

3.2.1.5 Anzündcharakteristik

Angezündet wurde durch Verwendung eines kommerziellen Anzündblocks auf 3 Arten:

- Gegenläufig dem Luftstrom (Von Oben)
- mit dem Luftstrom (Von Unten)
- auf das Glutbett aufgelegt (auf Glut)

3.2.2 Zusatzinformationen/Nachbearbeitung

Um den Versuch anschließend konkret zu charakterisieren mussten einige Daten gesammelt werden. Hierzu zählen sowohl die messtechnischen Daten, wie auch die visuelle Beobachtung des Versuches.

- Feuchtigkeit des Holzes
- Wettersituation
- Messdauer
- visuelle Beobachtungen

3.2.2.1 Feuchtigkeit des Holzes

Holzproben wurden immer, zeitgleich mit den Versuchen einmal täglich, aus der Mitte eines Holzstückes genommen. Diese wurden anschließend gewogen, über Nacht bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und im Exsiccator abgekühlt und wieder rückgewogen. Der angegebene Wassergehalt ist das Verhältnis zwischen Wassermenge und Nassgewicht, wie in Kapitel 2.1.4 bzw. Formel 3.2. zu sehen.

$$\frac{Wassermenge}{Nassgewicht} * 100 = Wassergehalt[\%]$$

Formel 3.2.: *Wassergehalt*

3.2.2.2 Wettersituation

Dank des Umweltinstitutes, welches uns die Luftdruckdaten von Dornbirn und eine portable Wetterstation zur Verfügung stellte, konnten wir zu jedem Versuch die Wetterverhältnisse ebenfalls bestimmen.

- Luftdruck
- Lufttemperatur
- Sonneneinstrahlung
- Luftfeuchtigkeit
- Allgemeine Wetterverhältnisse (sonnig, bewölkt, windig, …)

Abb. 3.2.8.: *Wetterstation (links); Strahlungsintensität Messgerät (rechts)*

Problematik bei der Messung der Strahlungsintensität

Da wir in einem Innenhof unsere Versuchsanlage aufgebaut hatten, kam es – je nach Tageszeit – durch Schattenwurf zu Schwankungen auf dem Strahlungsmessgerät. Daher gilt die gemessene Strahlung nicht direkt für den Ofen, sondern für das etwas abseits befindliche Strahlungsmessgerät.

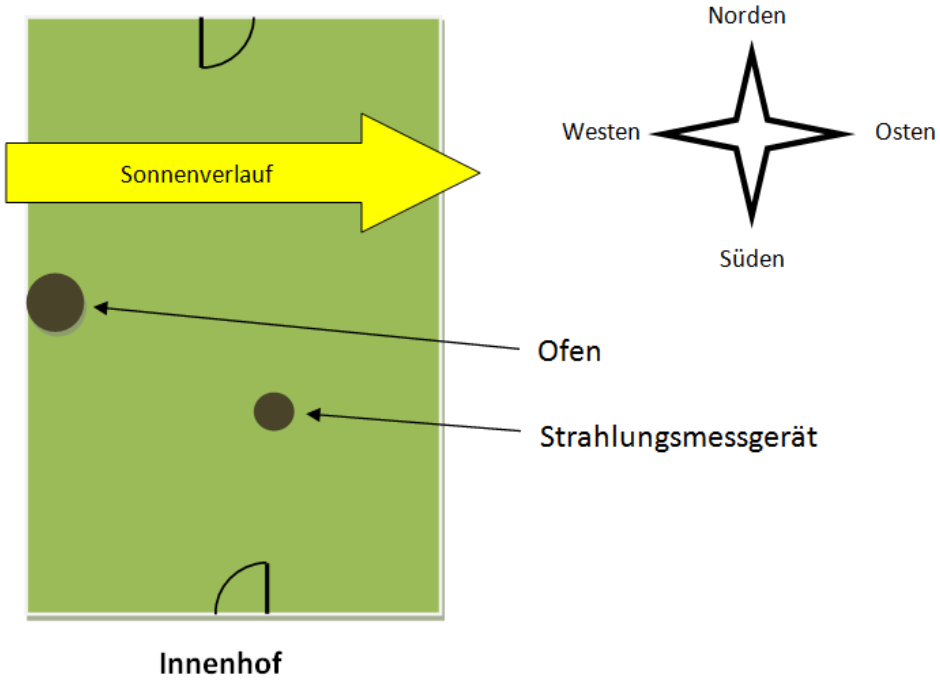


Abb.3.2.9: *Strahlungsmessgerät Positionierung im Innenhof*

3.2.2.3 Optische Beobachtungen

Zusätzlich zu allen bereits aufgenommen Messparametern und den messtechnischen Daten wurde noch eine verbale Beschreibung des Versuchs dokumentiert.

Dazu gehörten sowohl die Charakterisierung des Ofenraums (Flammenbild, Brandverhalten), als auch die Beschreibung des aus dem Kamin austretenden Rauches bzw. besondere Ereignisse, wie zum Beispiel das Öffnen des Ascheabscheiders.

3.2.3 Instrumentelle Messdaten

Wie bereits im theoretischen Teil beschrieben, wurden viele messtechnische Daten ermittelt um die Versuche entsprechend charakterisieren zu können. Die daraus resultierenden Messparameter im Abgas sind:

- Staubmenge
- Kohlenstoffgehalt des Staubes
- Strömungsgeschwindigkeit
- CO_2 – Gehalt
- Temperatur beim Rauchaustritt
- CO - Gehalt
- O_2 - Gehalt
- Organisch gebundener Kohlenstoff (FID-Messung)
- Verschiedene Schadstoffe mit Fourier Transformation-IR
- Temperatur direkt nach dem Ofen

3.2.3.1 Staubmenge

Die Staubermittlung im Abgas erfolgt über ein einfaches Filterprinzip. Eine Lanze mit Öffnung gegenläufig dem Abgasstrom wird mittig und horizontal zum Abgasstrom befestigt. Der Durchmesser der Lanzenspitze (Düse) wird tabellarisch ermittelt, entsprechend der durchschnittlichen Abgasgeschwindigkeit bzw. der Temperatur des Abgasstromes.

Die Abgastemperatur beim Kaminaustritt wurde Messtechnisch in einem der Vorversuche festgestellt und liegt in etwa bei 200°C.

Der Abgasgeschwindigkeit wurde mittels einer Berechnung für 1,5 kg Holz bei Normbedingungen festgelegt. Dieser berechnete Wert wurde anschließend noch an der Anlage selbst getestet. [Berechnung siehe Anhang 8.6.1]

Die Daten welche für die tatsächliche Berechnung der Staubmenge gebraucht wurden, konnten an den div. Anzeigen des Gerätes abgelesen werden.

Zum Berechnungsvorgang des Staubgehaltes im Abgas siehe Anhang 8.6.2.

Filter

Für jeden Versuch mussten die Filter zuerst gestopft werden. Dazu wurde in die sauberen leeren Filterhülsen ca. 1 bis 2 cm Quarzwatte gestopft. Hierzu ist es am besten die Wattefäden auseinander zu ziehen, um eine möglichst große Vernetzung der Fäden zu erreichen. Der Wattebausch (ca. 2,5 cm Durchmesser) wird nun mit Wasser benetzt.

Die Watte kann nun mit dem Daumen voran in die Hülse gestopft werden (Achtung auf das Netz unterhalb). Wichtig ist auch, dass am Rand der Hülsen die Watte zu einer eben Fläche gedrückt wird. Anschließend noch ein wenig Wasser durch die Watteschicht hindurch drücken um eventuelle Quarzsplitter auszuwaschen.

Diese Hülsen werden nun über Nacht getrocknet (Gewichtskonstanz) und am nächsten Tag aus dem Trockenschrank wieder entnommen. Nach Abkühlen im Exsiccator wird anschließend ausgewogen.

Nach der Messung sind die Filterhülsen mit Staub beladen und werden nochmals ausgewogen.

3.2.3.2 Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit konnten direkt aus den vom Differenzdrucksensor in den Datenlogger eingespeisten Daten online verfolgt und abgespeichert werden. Hierbei konnten auch weitgehend Werte entsprechend der berechneten Abgasgeschwindigkeit von durchschnittlich 1,6 m/s festgestellt werden.

Über die Gesamtversuchsdauer betrachtet ergaben sich jedoch in den meisten Fällen ein zu hoher Wert für die Strömungsgeschwindigkeit und damit auch ein zu hohes errechnetes Gesamtvolumen des Abgases.

3.2.3.3 CO_2 - Gehalt, Temperatur beim Rauchaustritt

Der CO_2 – Gehalt und die Temperatur beim Rauchaustritt konnten auch, ähnlich der Strömungsgeschwindigkeit, online aufgezeichnet werden.

3.2.3.4 CO - Gehalt, O_2 – Gehalt, Temperatur direkt nach dem Ofen

Diese Messdaten wurden gesammelt im multifunktionellen J2KN - Messgerät gemessen. Durch das tragbare Anzeigegerät konnten alle Daten angenehm in einiger Entfernung zum Ofen verfolgt werden und auf eventuelle Schwankungen im Sauerstoffverbrauch sofort reagieret werden. Weiteres verhalfen diese Online-Daten zu einem besseren Verständnis von den unmittelbaren Verbrennungsabläufen und Reaktionen in der Abgaszusammensetzung.

Die Daten wurden alle 30 Sekunden auf der SD-Speicherkarte gespeichert. Diese Daten konnten mit Hilfe einer einfachen Excel Datei ausgelesen und ohne große Probleme nachbearbeitet werden.

Der Mittelwert des Sauerstoffgehaltes (Mittelwert unter 18% O2) wurde dann zur weiteren Berechnung des Staubgehaltes verwendet.

Mit Hilfe der O_2 - Konzentration wurde auch der CO Gehalt pro Kubikmeter berechnet. Da der CO - Wert nur in ppm ausgegeben wurde, musste dieser zuerst noch umgerechnet werden, wie in Formel 3.2.1 ersichtlich.

$$CO\left[{}^{mg}/_{m^3}\right] = CO\,[ppm] * 1{,}249$$

Formel 3.2.1.: CO Umrechnung in [mg/m^3]

Der Faktor 1,249, errechnet sich aus der molaren Masse von CO (28 g/mol) dividiert durch das Volumen bei Normalbedingungen. (p*V=n*R*T => 22,4L)

Um den Verdünnungsfehler des Luftüberschusses auszuschließen, ist der CO Gehalt auf 13% O_2 bezogen (wobei der mittlere Gehalt von O_2 aus allen Werten kleiner 18% O_2 gemittelt wurde).

$$\sigma(CO, 13\%\, O2) = \sigma(CO) * \frac{(21-13)}{(21-\sigma(O2))}$$

Formel 3.2.2.: CO - Gehalt, Umrechnung auf 13% O_2 Bezug

3.3 Messdurchführung

3.3.1 Messtechnische Einrichtung

3.3.1.1 Vorbereitung

Vor jedem Versuch muss das gewünschte Scheitgut auf die richtige Größe gebracht, die erforderliche Menge abgewogen und im Ofen, je nach Versuchsart eingeschichtet werden.

Außerdem sollte sowohl die Vorbereitung als auch der Versuch selber mit Hilfe von Fotos dokumentiert werden.

Ein weiterer, sehr wichtiger Punkt ist die Probenahme zur Bestimmung der Holzfeuchte. Hier wird eine kleine Holzprobe von den an diesem Tag verwendeten Holzarten entnommen, abgewogen, getrocknet und erneut abgewogen (siehe Erläuterungen im Kapitel 3.2.2.1).

Am Anfang jedes Versuches muss ein Datenblatt ausgefüllt werden, auf dem alle Daten über den Versuch notiert werden:

- Datum und Uhrzeit
- Genaue Versuchsstartzeit und Ende (laut CO_2-Messgerät)
- Art des Versuches (Gut/ Schlecht/ Überladen)
- Ofeneinstellung (Primär-, Sekundärluftzufuhr)
- Wettersituation (nach eigener Beurteilung)
- Strahlenintensität, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit (nach Wetterstation im Hof)
- Holzart, Menge und Feuchte

- Gewicht des Silikagels am Anfang und am Ende
- Stand der Gasuhr am Anfang und am Ende (Staubmessgerät)
- Verlauf des Unterdrucks mit Zeitangabe (Staubmessgerät)
- Filternummer (Staubmessgerät)
- Düsennummer (Staubmessgerät)

3.3.1.2 Geräteinstallation

STAUBMESSGERÄT

Der erste Schritt beim Staubmessgerät ist, die Stromversorgung sicherzustellen. Bei der Vorbereitung der Lanze, die in den Kamin gestellt wird, muss darauf geachtet werden, dass die an der Spitze aufzuschraubende Düse die richtige Dimensionierung hat und somit den im Vorhinein errechneten zu erwartenden Volumenstrom korrekt wiedergibt. Bevor die Lanze einsatzbereit ist, muss noch ein frischer, zuvor abgewogener Filtereinsatz eingelegt werden, in dem sich der Staub und die sich in den Abgasen befindlichen Feststoffe ansammeln sollten. Außerdem muss am hinteren Ende der Lanze noch der Schlauch, der zum Messgerät führt richtig dicht angeschlossen werden.

Das andere Ende dieses Schlauchs muss nun beim dafür vorgesehenen und gekennzeichneten Anschluss angebracht werden. Auch der Verbindungsschlauch vom Messgerät zur Pumpe muss, wie vorgesehen, angeschlossen werden.

Abb.3.3.1: *Schlauchanschlüsse*

Achtung: Es muss unbedingt darauf geachtet werden, dass der Abgasschlauch nicht in einem geschlossenen Raum endet, da es sonst zu einer gefährlichen Konzentration von Abgasen kommen kann !

Anschließend wird noch die Silikagelpatrone, die nach dem Wasserabscheider noch zur vollständigen Trocknung der Luft nötig ist, abgewogen, die Dosennummer für die Dokumentation notiert und beim Messgerät eingesteckt.

Nun erfolgt die Dichtheitsprobe. Hierbei wird die Lanzenöffnung mit der Handfläche so gut wie möglich verschlossen und das Messgerät eingeschaltet. Jetzt sollte es zu einer klaren Unterdruckbildung kommen, die auf dem Unterdruckanzeiger zu sehen ist. Falls dies nicht der Fall ist, muss überprüft werden, wo sich die undichte Stelle befindet und diese dann behoben werden.

Nach der Dichtheitsprüfung wird das Messgerät wieder ausgeschalten und der Stand der Gasuhr notiert, um nach jedem Versuch die genauen Abgasvolumina zu wissen.

Nun kann auch die Lanze im Kamin positioniert und mit der Haltevorrichtung befestigt werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass, wenn zuvor schon ein Versuch gefahren wurde, kein Ascheflug mehr zu beobachten ist, bevor die Lanze in den Kamin gestellt wird, da es sonst zu einer Verfälschung des Ergebnis führen kann, wenn sich schon vor Beginn des Versuchs Feststoffe im Filter befinden.

DATENLOGGER (CO_2 – MESSGERÄT, DIFFERENZDRUCK)

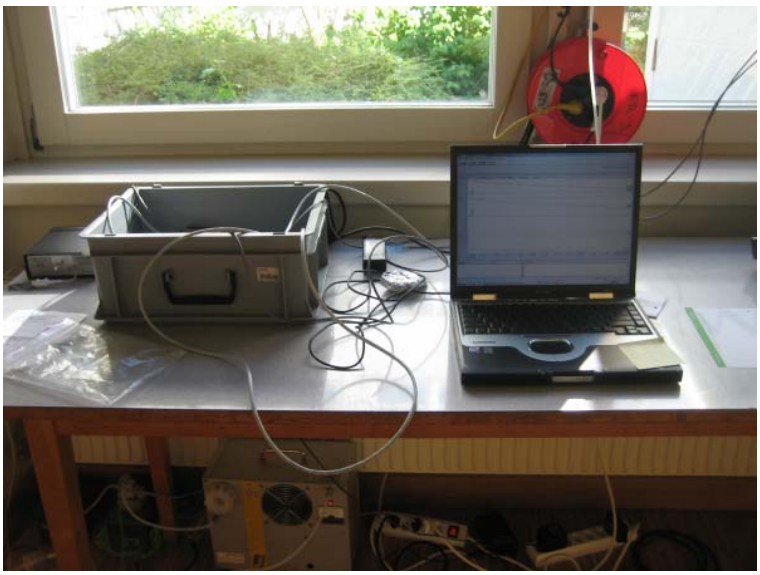


Abb. 3.3.2.: *CO_2/Strömung/Temperatur - Messtechnik*

- Datenlogger mit Strom versorgen und das Messprogramm auf dem Laptop starten
- Wasserfilter und Wattefilter für CO_2 kontrollierten und ggf. noch reinigen
- Die Eingangssignale (CO_2, Temperatur, Druck) beim Datenlogger anstecken
- Die Messung starten um ein Nullsignal zu erhalten
- Lanze des Kohlendioxidmessgerät am Kamin in Position bringen
- Druckmessgerät vor der Sonne geschützt aufstellen, da es sonst zu Beeinflussungen durch die Sonneneinstrahlung kommen kann
- Die Schläuche des Staurohrs an den vorgesehenen Anschlüssen anbringen

Abb.3.3.3: *Datenlogger mit Datenkabel*

J2KN MULTIMESSGERÄT FÜR ABGASE

Abb.3.3.4: *J2KN Multimessgerät für Abgase*

- Messgerät neben dem Ofen mit Strom versorgen
- Die relevanten Parameter einstellen
- Form in der die Daten gespeichert wird festlegen
- Die Kalibrierung starten
- Messlanze in das Rauchrohr einbringen
- Rußfilter kontrollieren und gegebenenfalls reinigen

3.3.1.3 Messung

STAUBMESSGERÄT

Das Staubmessgerät wird, sobald das CO_2-Messgerät einen Sauerstoffanteil von unter 20% anzeigt, gestartet, da ab diesem Zeitpunkt die Verbrennung richtig begonnen hat und Staub aus dem Brennvorgang entsteht. Nun ist darauf zu achten, dass sich das Rotameter, das für die Kontrolle des Volumenstroms zuständig ist, bei einem Wert von 25 L/min einpendelt. Dies kann beeinflusst werden, indem man das sich darunter befindliche Ventil justiert.

Während der Messung muss immer wieder kontrolliert werden, ob der Wert des Rotameters noch stimmt und, falls dies nicht der Fall ist, muss dieser nachjustiert werden. Dadurch wird jedoch auch immer der Unterdruck beeinflusst. Sollte der Wert des Rotameters nicht korrigiert werden können und ist der Unterdruck rasant gestiegen, ist das ein Zeichen dafür, dass der Filter in der Lanze bereits verstopft ist, kein weiteres Abgas angesaugt wird und die Staubmessung abgebrochen werden muss.

Falls die Messung jedoch die ganze Versuchsdauer gelaufen ist, kann ab einem Sauerstoffanteil von über 17 % die Messung ausgeschaltet werden, da ab diesem Zeitpunkt keine relevante Staubmengen aus dem Abbrand mehr entstehen.

ANDERE MESSGERÄTE UND MESSDATEN

Während der Messung muss dem J2KN und dem CO_2-Messgerät keine größere Aufmerksamkeit schenken, da diese Geräte den ganzen Verlauf selber dokumentieren. Falls gewünscht, kann mit Hilfe des Sauerstoffgehaltsanzeige des J2KN die Phase, in der sich die Verbrennung befindet, erkannt werden.

Außerdem ist es für eine möglichst genaue Dokumentation jedes Versuches nötig die Rauch- und Flammencharakteristik über den gesamten Verlauf zu beschreiben. Auch die Anzündcharakteristik sollte beschrieben werden. Wenn es nötig ist, den Aschebehälter zu öffnen um eine Verbrennung zu ermöglichen, muss die genaue Uhrzeit und Dauer notiert werden.

3.3.1.4 Nachbearbeitung

STAUBMESSGERÄT

Nun wird sofort der Wert der Gasuhr notiert, die Silikagelpatrone wird erneut abgewogen, der Wert notiert und die Patrone wieder eingesteckt. Auch die Lanze wird nun aus dem Kamin entfernt, der Filter gegen einen frischen ausgetauscht und die Lanzenspitze mit Wasser gereinigt.

Anschließend erfolgt noch die Reinigung, dazu wird der Ansaugschlauch von der Lanze entfernt und das Messgerät erneut gestartet. Somit wird, für ca. 2min frische Luft angesaugt und der Schlauch damit gereinigt.

DATENLOGGER (CO_2-MESSGERÄT, DIFFERENZDRUCK)

Im Anschluss an die Messung werden die Schläuche des Staurohrs wieder ausgesteckt und das Programm für 2-3min weitergelaufen lassen, damit die Signale wieder auf die Grundlinie kommen und bei der Auswertung wieder sichtbar wird, wo die Messung zu Ende war. Nun werden die Daten gespeichert. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass das Programm ein eigenes Format zur Speicherung verwendet und diese Daten dann nur mit Hilfe des speziellen Programms auch wieder geöffnet werden können! Daher sollte auch eine zweite Speicherung erfolgen, bei der man ein Excel-Format auswählt, da dieses dann unabhängig vom speziellen Programm auf jedem Computer geöffnet werden kann.

J2KN MULTIMESSGERÄT FÜR ABGASE (CO-MESSUNG)

Anschließend an den Versuch, sobald keine Flammen mehr sichtbar sind, wird die Messlanze entfernt und das Messgerät ausgeschaltet. Die auf der Speicherkarte festgehaltenen Messdaten werden nun auf ein sekundäres Speichermedium übertragen. Die Karte wird nun gelöscht und ist wieder einsatzbereit.

OFEN

Nach jedem Versuch sollte die restliche Kohle durch Öffnen des Ascheabscheiders ausgebrannt werden, wobei zu diesem Zeitpunkt alle Messgeräte inaktiv sein müssen und die Staublanze nicht im Kamin sein darf, damit es zu keiner Verfälschung der Ergebnisse kommt. Anschließend an das Ausbrennen kann die Asche nun aus dem Ofen entfernt werden und in einem dafür geeigneten Sammelbehälter gegeben werden.

3.3.2 Abbrand

Da während der Versuchszeit relativ konstante schöne und warme Wetterverhältnisse herrschten, abgesehen von den Versuchen im Oktober, kann man alle Abbrände einer Versuchsart als meteorologisch einheitlich und vergleichbar ansehen.

Am Anfang jedes Versuches steht das Entzünden des Feuers, was sich zum Beispiel bei feuchtem Holz als sehr schwierig herausstellte. Wenn sich das Feuer nicht entfachen ließ, musste immer wieder durch Öffnen des Ascheabscheiders nachgeholfen werden, da sonst der Versuch gar nicht möglich gewesen wäre.

Wenn das Feuer des Anzünders einmal auf den Holzstapel übergegriffen hat, verliefen die Versuche zu 95% immer gleich, nur die Geschwindigkeit konnte variieren.

Abb. 3.3.5: *Anzündphase*

Abb.3.3.6: *Anheizphase*

Abb.3.3.7: *Hauptbrandphase*

Abb.3.3.8: *Ausbrandphase*

Abb.3.3.9: *Schlechtversuch (links) führt zu verrauchtem Ofenraum (rechts)*

Abb.3.3.10: *Rauchfahne von „Schlechtem Anheizen“*

Bei Versuchen mit der Blockhausstapelweise des Brennholzes brannte sich das Feuer von oben langsam mit einer konstant großen Flamme nach unten durch. Beim Kamin war kaum eine Rauchfahne zu erkennen, und falls doch, nur eine weiße, also Wasserdampf.

Bei Versuchen mit der dichten Stapelweise brannte sich das Feuer von unten seitlich am Holz vorbei.

Dadurch wurde das gesamte Holz zum Ausgasen gebracht und somit entstand ein großer Verlust an Kohlenmonoxid und organisch gebundenem Kohlenstoff. Im Gegensatz zu guten Versuchen war hier bereits eine Abgasfahne klar sichtbar. Die Farbe des Abgases variierte je nach Verbrennungsstadium zwischen grau, braun und leicht schwarz.

Abb.3.3.11: *Überladener Versuch mit Ascheklappe geöffnet (links) und schwarzer Rauchfahne (rechts)*

Bei überladenen Versuchen war die Abbrandgeschwindigkeit viel größer. Die Flammen füllten die gesamte Brennkammer aus und schlugen an die Ofenoberkante. Viel Wärmeenergie ging über den Kamin verloren, da die geringe Menge an Speichermasse rasch gesättigt war und auch über die Scheibe nicht mehr Strahlungswärme abgegeben werden konnte.

Auch beim Kamin war eine klar sichtbare, meist dunkelbraune oder schwarze Abgasfahne zu erkennen. Aber auch die Staubmessung musste bei diesen Versuchen immer kurz nach Beginn abgebrochen werden, da der Filter rasch verstopft wurde.

Die Abbrandphase war bei allen Versuchen dann wieder gleich. Das gesamte Holz war in ein Glutnest aus Holzkohle umgesetzt worden und glühte nun flammenlos vor sich hin.

4. Ergebnisse

Die einzelnen Abbrandversuche zeigen sehr schön die Unterschiede im Abgasverhalten auf, welche zwischen den verschiedenen Anfeuerungsmethoden, insbesondere zwischen gutem und schlechtem / überladenem Abbrand liegen.

4.1 Herleitung der Ergebnisse

Während den rund 50 Versuchen wurde eine enorme Menge an Messdaten aufgenommen. Um jedoch die verschiedenen Versuche untereinander vergleichen zu können, wurden einige charakteristische Parameter festgelegt, welche die Abgassituation der Versuche eindeutig beschreiben können.

Zu diesen Parametern zählen:

- CO - Gehalt im Abgas
- Mittlerer Staubgehalt im Abgas
- Mittlerer Gehalt an partikulärer Kohlenstoff im emittierten Staub (Ruß)
- Mittlerer Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff im Abgas
- „Chemischer“ Gesamtenergieverlust durch Emission von Kohlenmonoxid, partikulärem Kohlenstoff und organisch gebundenem Kohlenstoff im Abgas

4.1.1 CO - Gehalt

Die CO - Werte wurden als Verlauf über die gesamte Messung vom J2KN Multimessgerät in [ppm] angegeben. Diese Werte wurden mit der mittleren Sauerstoffkonzentration auf eine Luftverdünnung mit 13% O_2 umgerechnet. Aus dem Verlauf des CO-Gehaltes im Abgas kann schließlich ein Mittelwert für den CO - Gehalt ermittelt werden, der zu Vergleichszwecken der Versuche dient.

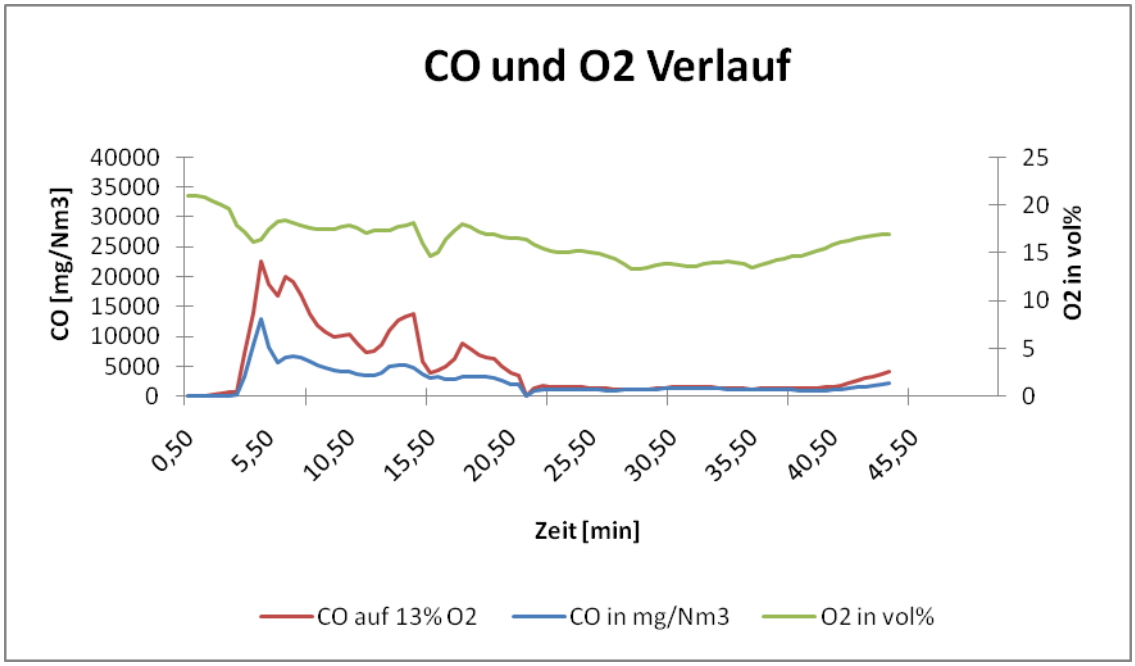


Diagramm 4.1.1.: *Abgasverhalten während eines schlechten Abbrandes mit Buche* (Versuch 15.09.09_V2, *blau = CO unbezogen; rot = auf 13% O_2 bezogen und grün = O_2 in Vol%)*

Aus dieser CO-Kurve (bezogen auf 13% O_2) ergibt sich ein Mittelwert über die Versuchsdauer, der in diesem Beispiel 2160 mg/m3 CO (bezogen auf 13% O_2) beträgt.

In diesem Diagramm sieht man einige Peaks, welche auch in anderen Versuchen immer wieder auftreten. Diese Peaks kommen durch verschiedenste Abbrandeinflüsse zustande, welche während dieses Feldversuches den Abbrand gestört haben, zB eine Sauerstofferhöhung während dem Öffnen der Ascheluke (siehe Ereignisbeschreibung unten).

Für diesen Abbrandversuch sieht das Gesamtbild mit dem Verlauf aller Messdaten folgendermaßen aus:

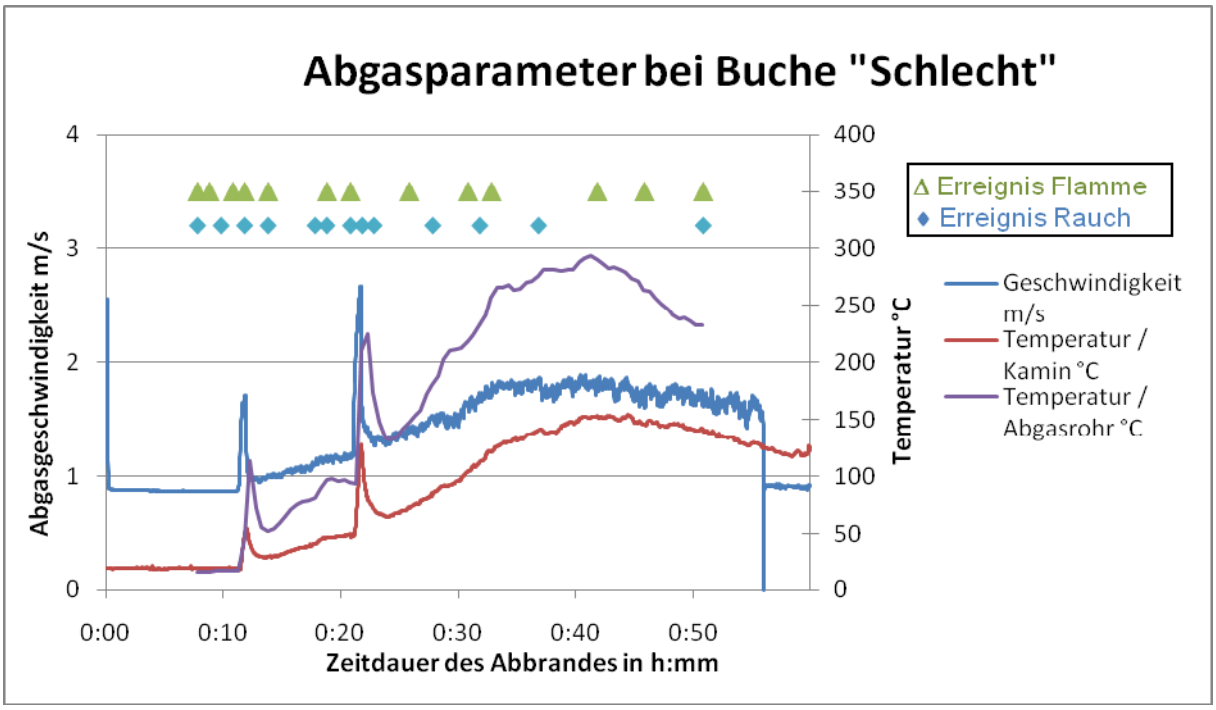


Diagramm 4.1.2.: *Satz von Abgasparameter mit Zeitpunkten besonderer Vorkommnisse beim schlechten Abbrand von Buche*

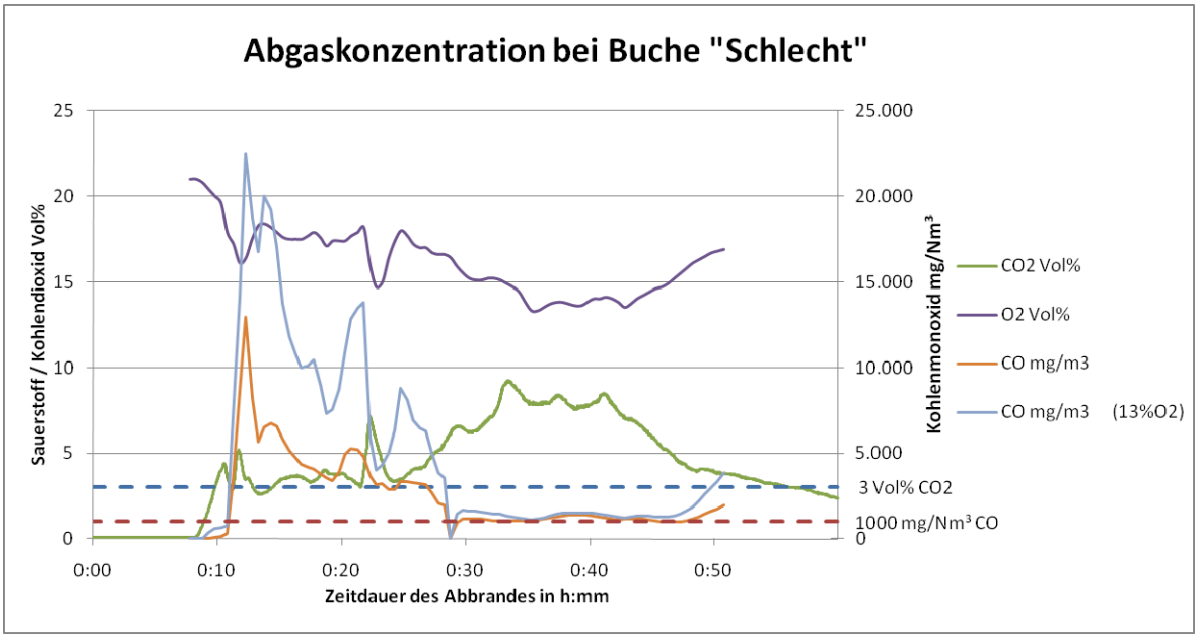


Diagramm 4.1.3.: *Diverse Abgaskonzentrationen beim schlechten Abbrand von Buche*

Liste der Ereignisse aus Abbildung 4.1.2 - Flammenverhalten

1	09:08:00	Start
2	09:09:00	starke Rauchentwicklung, Rauchaustritt an undichten Stellen im System Unten
3	09:11:00	Ascheabscheider 1min 30 sek
4	09:12:00	Rauch unten total ausgetreten
5	09:14:00	Holz beginnt zu brennen, immer noch Rauch im Ofen -> starke Geruchsbelästigung
6	09:19:00	Flammen züngeln langsam um das Holz, kein schönes Flammenbild
7	09:21:00	Fast keine Flamme - Ascheabscheider 30 sek offen
8	09:26:00	Obere Hälfte brennt bis Ofenoberkante
9	09:31:00	Holz brennt total, Flammen bis Ofenoberkante
10	09:33:00	Holz auseinandergefallen -> schöne Verbrennung
11	09:42:00	Holz größtenteils abgebrannt, Flammen halbhoch
12	09:46:00	Gluthaufen, nur noch vereinzelt kleine Flammen
13	09:51:00	Ende

Liste der Ereignisse aus Abbildung 4.1.2 - Rauchcharakteristik

1	09:08:00	Start
2	09:10:00	sehr dünner weißer Rauch
3	09:12:00	Ascheabscheider -> große weiße Rauchwolke
4	09:14:00	dünne weiße Rauchfahne
5	09:18:00	Ruckartiger Ausstoß einer Rauchwolke
6	09:19:00	dichter weißer Rauch
7	09:21:00	starker Rauch
8	09:22:00	öffnen der Ascheklappe, schwarzer Rauch
9	09:23:00	dünner weißer Rauch
10	09:28:00	kein Rauch mehr
11	09:32:00	leichte schwarze Rauchfahne
12	09:37:00	kein Rauch mehr
13	09:51:00	Ende

Im ersten Diagramm ist deutlich erkennbar, wie während des Abbrandes die Abgasgeschwindigkeit und damit einhergehend die Abgaswerte steigen und der Sauerstoffgehalt sinkt. Durch das Öffnen des Ascheabscheiders werden die Flammen entfacht und die Temperatur steigt.

4.1.2 Staubgehalt

Der Staubgehalt wird, wie im Kapitel Versuchsparameter beschrieben, aus den Messergebnissen als ein Mittelwert über die gesamte Versuchsdauer berechnet und auf eine Luftverdünnung mit 13% O_2 bei Normbedingungen und trockener Abluft bezogen [Berechnung siehe Anhang].

4.1.3 Partikulärer Kohlenstoff im Staub

Die Ergebnisse aus den Messungen des Feststoff-TOC wurden einerseits in Konzentrationen von partikulärem Kohlenstoff im Abgas umgerechnet (Bezugsbasis 13% O_2), andererseits wurde aus den Staubmassen und den Kohlenstoffmassen der Staubfilterhülsen der Prozentanteil von Kohlenstoff im Staub ermittelt. Eine grafische Darstellung für die partikulären Kohlenstoffkonzentrationen und die Staubkonzentrationen im Abgas zeigt, dass beide Konzentrationen stark miteinander korrelieren und bei guten Abbrandbedingungen niederere Konzentrationen aufweisen als bei schlechten Bedingungen.

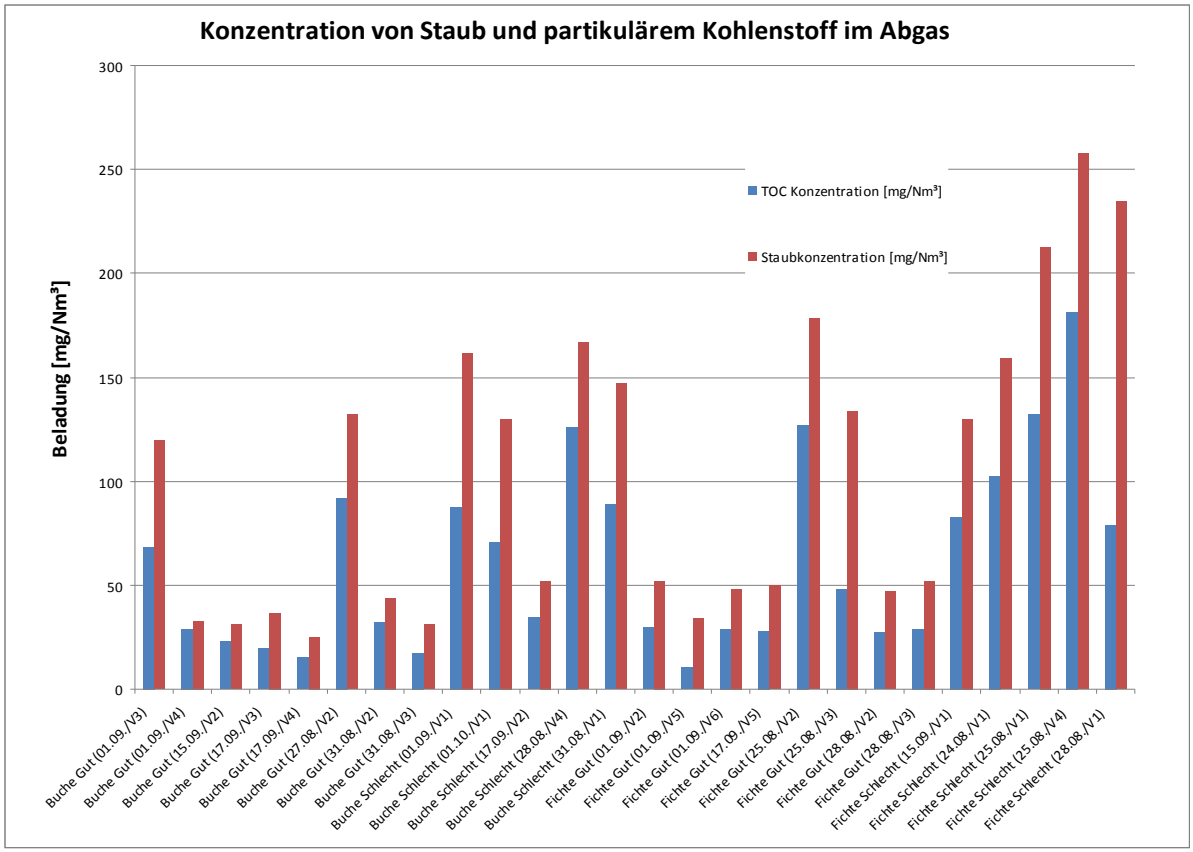


Diagramm 4.1.4.: *Abgasbeladung mit partikulärem Kohlenstoff und Gesamtstaub für alle guten und schlechte Abbrandversuche mit Buche und Fichte*

4.1.4 Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff

In den Feldversuchen erfolgten Messungen des organisch gebundenen Kohlenstoffs (OGC) mit dem Flammenionisationsdetektor (FID) bei Abbrandversuchen für Buche (gut/schlecht), Fichte (gut/schlecht), Spanplatten und Braunkohlebriketts. Das Abgas wurde dabei direkt aus dem Rauchrohr abgesaugt.

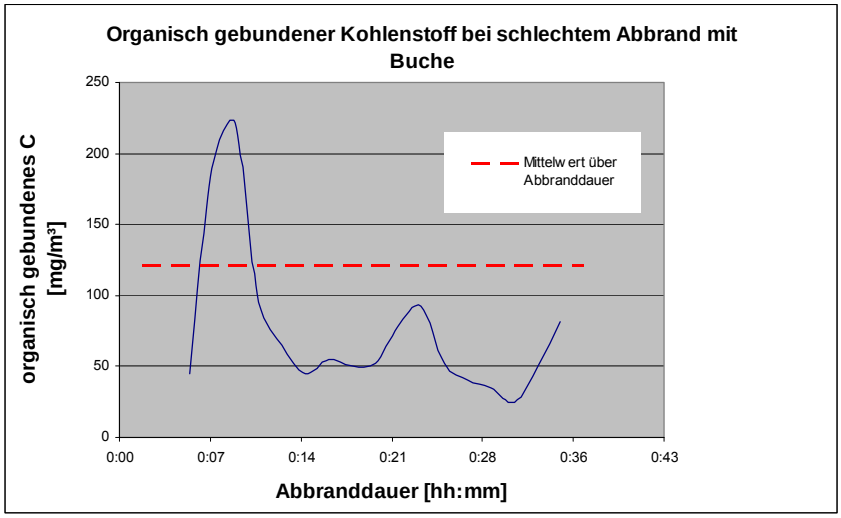


Diagramm 4.1.5.: *Verlauf des organisch gebundenen Kohlenstoffs bei schlechtem Abbrandversuch mit Buche*

Die Messergebnisse wurden vom Umweltinstitut ausgewertet und zur Verfügung gestellt. Die OGC-Resultate sind Mittelwerte über die Dauer des Gesamtabbrandes und auf feuchtes Abgas und auf 13% O2 bezogene Werte.

Gleichzeitig wurde durch Böhler Analytik in Feldkirch mit Fouriertransformation-Infrarottechnik der Gehalt von einigen Leitschadstoffen (zB Kohlenwasserstoffe, Blausäure, Salzsäure) exemplarisch bestimmt.

Quellen [34]

4.1.5 „Chemischer“ Gesamtenergieverlust aus CO, OGC und C in Staub

Da CO bei einer Verbrennung ein sehr wichtiger Energieträger ist, haben wir versucht aus den uns zu Verfügung stehenden Daten auf eine Energiemenge zu kommen, die durch den CO-Ausstoß als Verlust gewertet werden kann.

Neben diesem Hauptbeitrag wurden auch weitere Verlustbeiträge durch staubförmige Kohlenstoffemissionen und durch unverbrannte Kohlenwasserstoffe ebenfalls mitberücksichtigt

Als erster Schritt haben wir den Kamindurchmesser gemessen und mit Hilfe dieses Ergebnisses und der durchschnittlich gemessenen Abgasgeschwindigkeit auf den Volumenstrom in jeder Sekunde geschlossen. Um nun das Gesamtvolumens zu erhalten, wurden alle Teilvolumenströme integriert. Die derart ermittelten Gesamtvolumen ergaben jedoch Werte, welche deutlich zu hoch liegen. Es wurde daher für das Volumen der theoretisch berechnete Wert, welcher mit der Verbrennungsrechnung des Anhangs 8.6.1 ermittelt wurde, für alle weiteren Schritte herangezogen.

Weiters wurde für die Berechnung der Heizwertverluste durch den partikulären Kohlenstoff im Staub der Heizwert für Kohlenstoff (32,8 MJ/kg) und für Kohlenmonoxid der Heizwert für CO (10,1 MJ/kg) verwendet. Die Berechnung für den organisch gebundenen Kohlenstoff erfolgt ebenfalls nach dieser Vorgangsweise, jedoch wurden diese Verluste auf Propan (Heizwert: 46,3 MJ/kg) bezogen ausgewertet. [12]

Da als Abgasvolumen idealisierte, berechnete Werte eingesetzt werden, wurden die mittleren Abgaskonzentrationen der drei relevanten Abgasinhaltsstoffe CO, C in Staub und OGC mit Bezug auf eine Standardverdünnung mit Luft (dh Bezugsbasis 13% Sauerstoff) verwendet.

Zur Berechnung des Heizwertverlustes (erläutert am Beispiel CO) wurde nun die durchschnittliche CO-Konzentrationen pro m³ genommen und mit dem theoretischen Gesamtvolumen multipliziert, das Ergebnis war die Gesamtmenge an CO im Volumenstrom.

Um nun auf einen Energiewert zu kommen, wurde die Gesamtmenge CO mit dem Heizwert von CO (10,1 MJ/kg) [12] multipliziert. Nun erhält man die Energiemenge, die bei diesem Versuch in Form von CO verloren gegangen ist.

Weiters haben wir, um das Ergebnis besser vor Augen führen zu können, den Energiewert mit Hilfe des Heizwertes von Holz auf eine Holzmenge zurückgerechnet. Als Ergebnis erhält man die Menge an Holz, die bei diesem Versuch nur durch den Ausstoß an CO verloren gegangen ist.

Als letzten Schritt haben wir noch den Verlust im Wirkungsgrad errechnet, in dem wir die verloren gegangene Menge Holz durch die am Anfang eingeschichtete Holzmenge dividierten.

Schematisch dargestellt ergibt sich folgender Rechenweg:

$$Volumenstrom = Kaminquerschnittfläche \times Geschwindigkeit$$

$$\left[m^3/_s\right] = \left[m^2\right] \times \left[m/_{(s)}\right]$$

$$Gesamtvolumen\ (Abgas) = (Teilvolumenströme \times Messdauer\ (1sec)$$

$$\left[m^3\right] = \left[m^3/_{(s)} \times [s]\right)$$

$$Gesamtmenge\ (CO) = Durchschnittmenge\ (CO) \times Gesamtvolumen\ (Abgas)$$

$$[g] = \left[g/_{(m^3)} \times \left[m^3\right]\right)$$

$$Energiegehalt\ (CO) = \ Gesamtmenge\ (CO) \times Heizwert\ (CO)$$

$$[kJ] = [g] \times \left[kJ/_{(g)}\right)$$

$$Verlustmenge\ (Holz) = \frac{Energiegehalt\ (CO)}{Heizwert\ (Holz)}$$

$$[g] = \frac{[kJ]}{\left(kJ/_{(g)}\right)}$$

$$Wirkungsgradverlust = \frac{Verlustmenge\ (Holz)}{Gesamtmenge\ (Holz)}$$

$$\eta - \frac{[g]}{[g]}$$

Thermische Verluste sind natürlich auch aufgetreten, jedoch wurden diese bei den Wirkungsgradberechnungen nicht berücksichtigt, da sie messtechnisch nicht erfasst werden konnten.

4.2 Zusammenfassung

Die Versuche zeigen insofern interessante Ergebnisse, da nun endlich die Annahmen über die Abgasauswirkung einer guten bzw. schlechten Anfeuerungstechnik mit Messwerten belegt werden können.

Da jedoch die große Fülle an Daten in irgendeiner Form vergleichbar gemacht werden musste, wird die Präsentation der verschieden Versuchsergebnisse nach Brennstoffsorten unterteilt vorgenommen.

Jede Brennstoffart ist wiederum in die einzelnen Anheizmethoden gegliedert. Nach einer kurzen Kommentierung der Ergebnisse, sind auch die dazugehörigen Mittelwerte angegeben, welche im Kapitel 5 "Interpretation" zusammengefasst wurden, um eine bessere Übersicht zu schaffen.

Die Zusatzauswertungen für partikulären Kohlenstoff, organisch gebundenen Kohlenstoff und chemische Verlustberechnung sind am Ende des Kapitels 4 einzusehen.

4.2.1 Fichten Versuche

4.2.1.1 Fichte Gut

CO - Gehalt

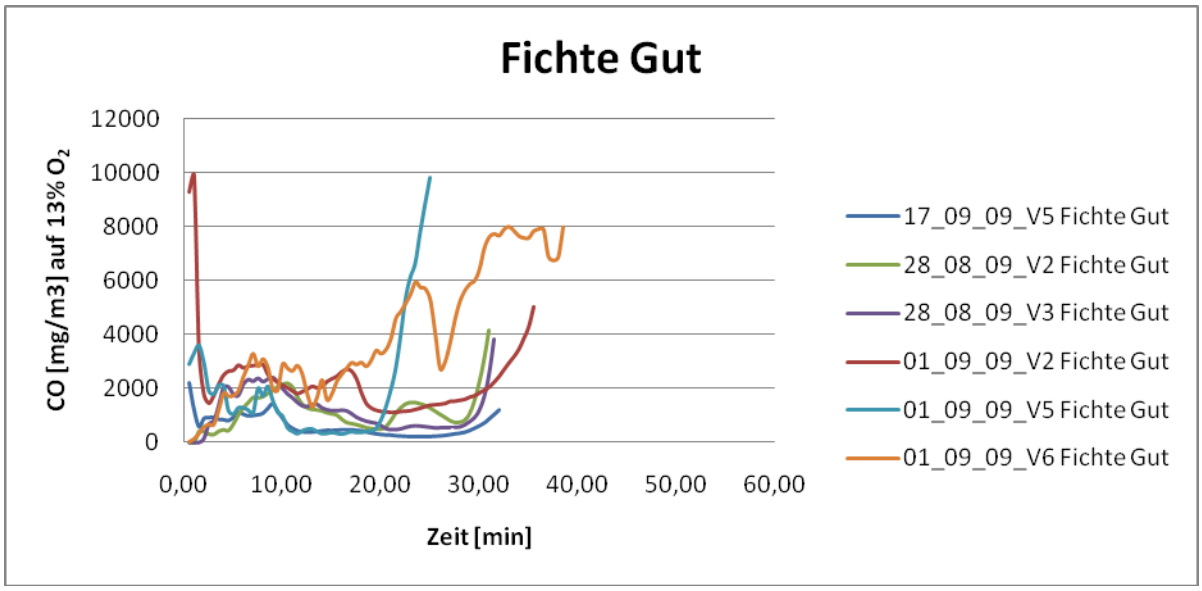


Diagramm 4.2.1.: *CO - Verlauf, Fichte Gut*

Die Werte schwanken in etwa zwischen 1000 - 3000 mg. Gegen Ende lässt sich ein Anstieg des CO Gehaltes erkennen, welcher dadurch zustande kommt, dass zu diesem Zeitpunkt sich nur noch ein Gluthaufen im Ofen befindet. Die letzten Reste an CO welche entweichen, werden nicht mehr durch Flammenwirkung verbrannt und gelangen in den Kamin. Durch den geringen Zug im Kamin kann es jetzt dazu führen, dass sich das CO im Kamin sammelt und diesen Peak zum Schluss der Messung verursacht.

Mittelwert: **2517 [mg/m3] CO auf 13% O2**

Staubwerte

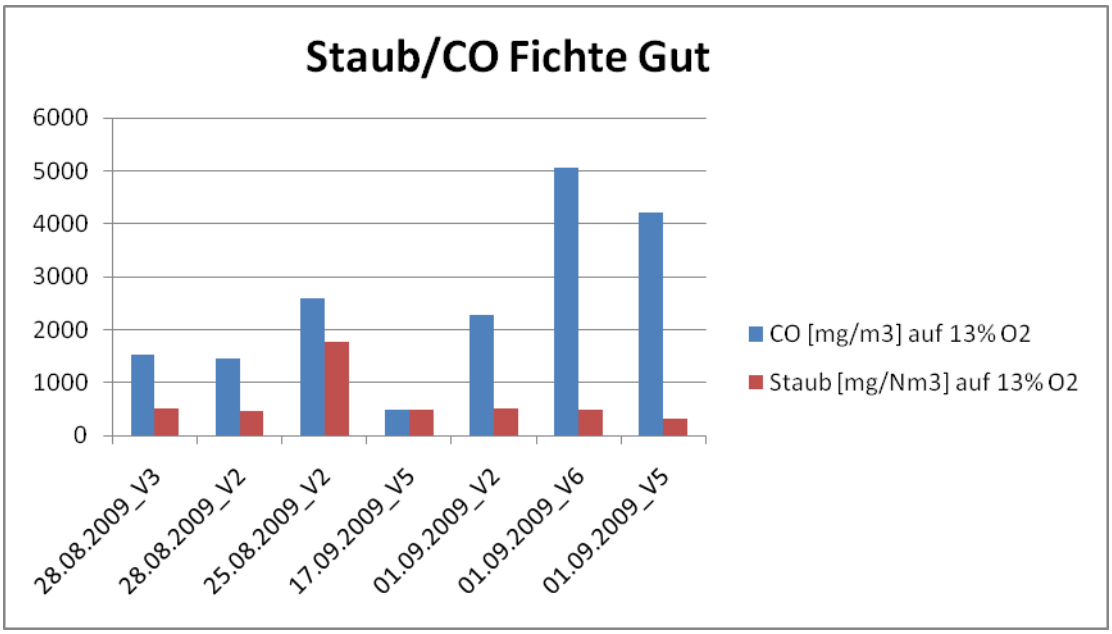


Diagramm 4.2.2.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Fichte Gut*

Die CO Mittelwerte sind bei dieser Versuchsreihe von "Fichte Gut" sehr Unterschiedlich, wie man auf den ersten Blick sehen kann. Diese Unstimmigkeit ist eventuell daher begründet, dass die letzten 3 Versuche "Fichte Feucht" Versuche waren, dh das Brennholz hatte einen um etwa 1% höheren Wassergehalt.

In diesem speziellen Fall von feuchtem Brennholz wurde das Holz eineinhalb Wochen in der nassen Wiese liegen gelassen und zusätzlich noch mit Wasser besprenkelt. Nach diesen 1,5 Wochen sollte das Holz eigentlich "feucht" sein.

Durch eine spätere Analyse des Wassergehaltes wurde jedoch festgestellt, dass das Holz nur außerhalb Feuchtigkeit aufgenommen hatte und im Inneren immer noch trocken war. Daher wurden diese Versuche ebenfalls als normale "Gute" Versuche gewertet.

Im Vergleich betrachtet sind diese Versuche fast noch besser, als jene mit trockenem Holz. Auf was dies jedoch zurückzuführen ist, lässt sich nur spekulieren.

Mittelwert: **65 [mg/Nm3] Staub auf 13% O2**

4.2.1.2 Fichte Schlecht

CO - Gehalt

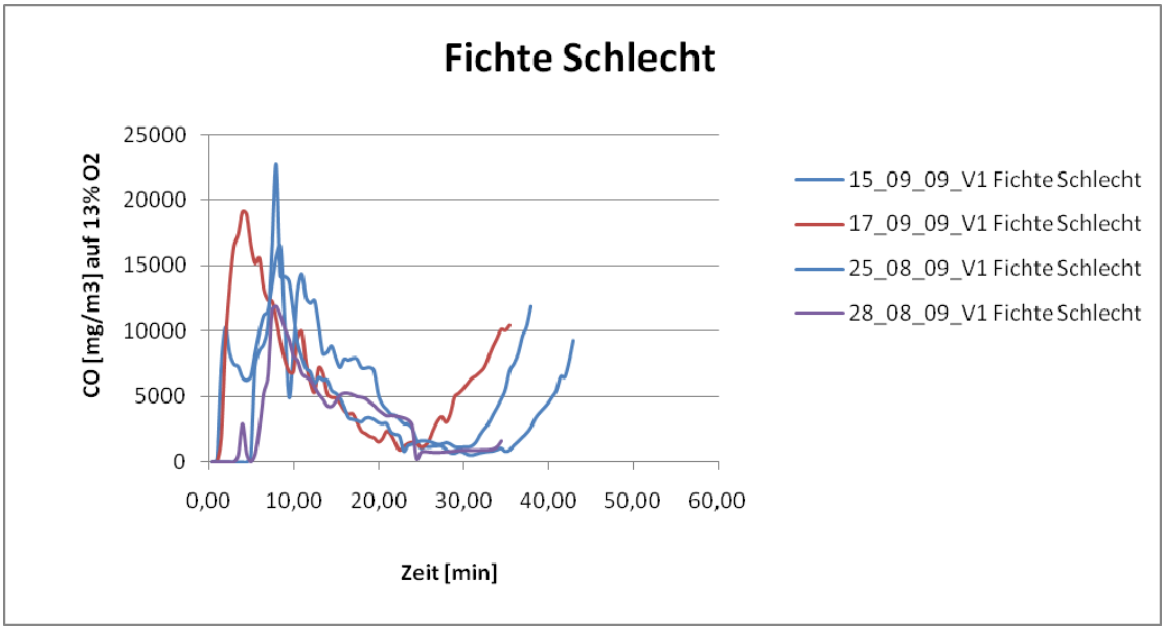


Diagramm 4.2.3.: *CO - Verlauf; Fichte Schlecht*

Bei den "Fichte Schlecht" Versuchen ist ein anderes Bild im CO - Verlauf zu sehen. Zu Beginn der Versuche ist der CO - Gehalt sehr hoch, da hier eine sehr schlechte Verbrennung stattfindet. Dies ist auch insofern bemerkbar, dass eine starke Rauch und Geruchsbelästigung zu diesem Zeitpunkt der Verbrennung zu beobachten sind.

Die CO - Werte zu Beginn zeigen Spitzen zwischen 10.000 und 23.000 mg/m^3. Dies sind wertvolle Energiemengen, welche über dieses zu schnelle Ausgasen des Holzes verloren gehen.

Im Verlauf der Verbrennung zerfällt das dicht gepackte Holz auseinander und somit entstehen Parameter für eine optimale Verbrennung, welche sich auch im Verlauf des CO - Gehaltes zeigen.

Gegen Ende des Versuches liegen die Werte gleich den "Fichte Gut" Versuchen. Auch hier ist wieder der starke Anstieg von CO zum Schluss des Versuches zu beobachten, welcher wiederum auf den minimalen Volumenstrom zurückzuführen ist bzw. auf die fehlenden Flammen.

Mittelwert: **6044 [mg/m3] CO auf 13% O2**

Staubwerte

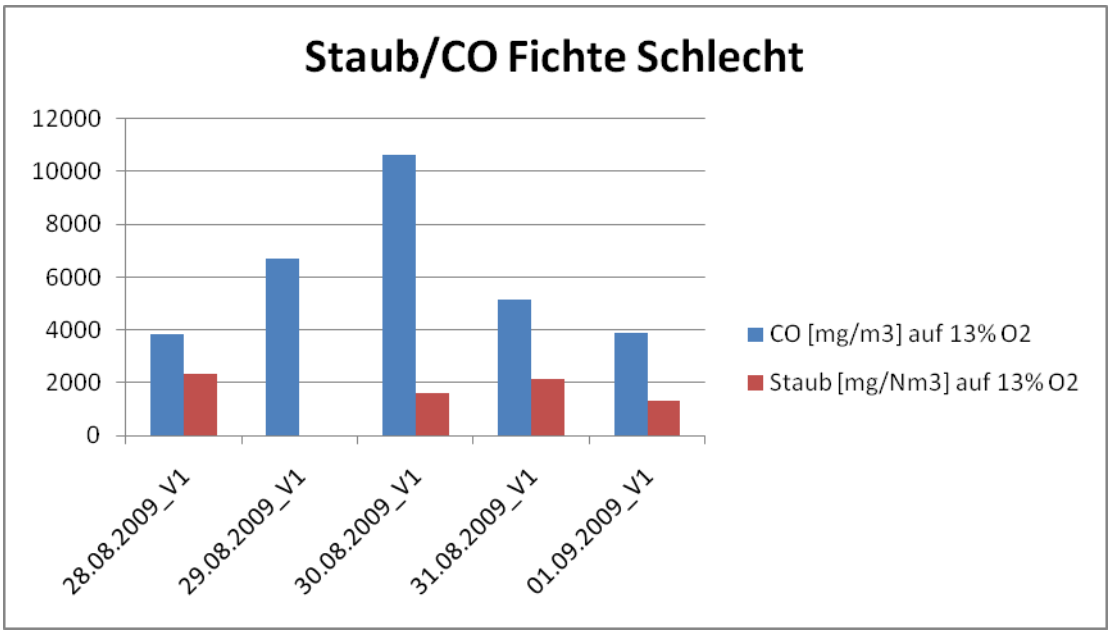


Diagramm 4.2.4.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Fichte Schlecht*

Mittelwert: **184 [mg/Nm3] Staub auf 13% O2**

4.2.1.3 Fichte Überladen

CO - Gehalt

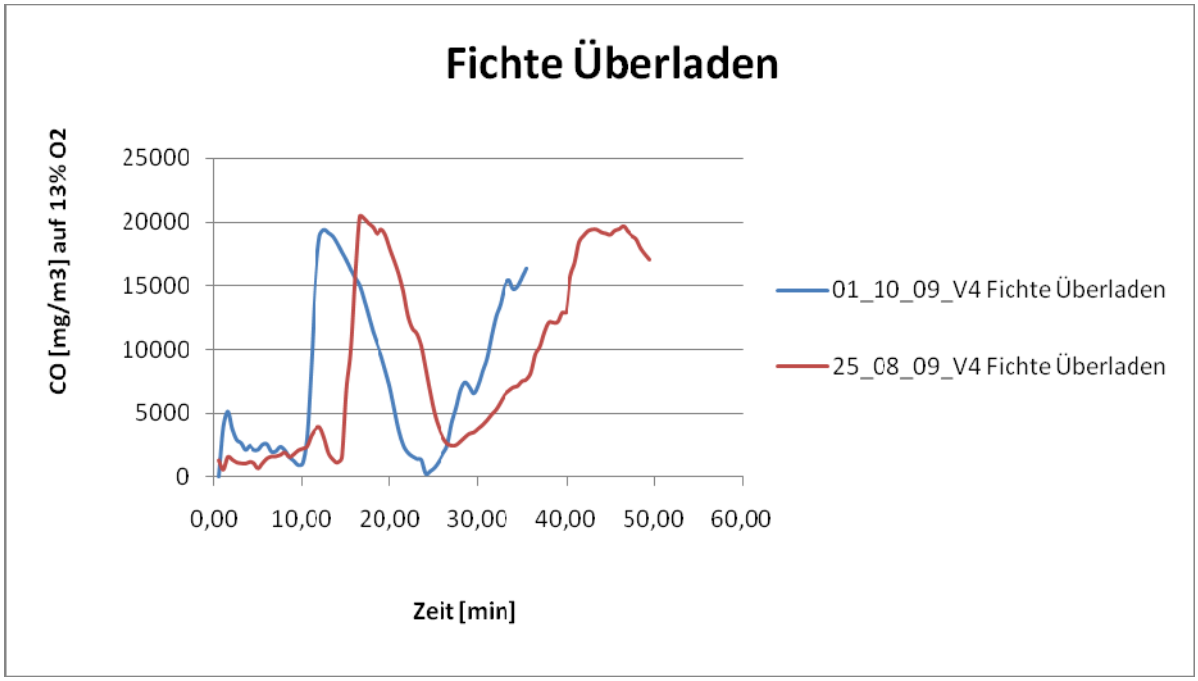


Diagramm 4.2.5.: *CO - Verlauf; Fichte Überladen*

Die Versuche mit "Fichte Überladen" zeigen im Diagramm diesen charakteristischen CO - Peak in der Hälfte der Verbrennungszeit. Dieser Peak entsteht dadurch, dass das Holz zwar wie bei einem Guten Versuch von Oben angezündet wird, jedoch die Flammen schnell bis zum Boden durchgebrannt sind und dann die vorhandene Verbrennungsluft für eine solche Brennstoffmenge nicht mehr ausreicht. Dies hat zur Folge, dass das Holz durch die hohe Temperatur zwar ausgast, dieses Holzgas jedoch nicht mit ausreichend Sauerstoff reagieren kann.

Nach dieser Phase verläuft der weitere Abbrand wie bei einem guten Durchlauf.

Mittelwert: **10718 [mg/m3] CO auf 13% O2**

Staubwerte

Zu den Staubwerten bei den "Überladen Versuchen" ist folgendes zu bemerken: aufgrund der großen Staubmenge, die entsteht, verstopft der Staubfilter der Staubmessung schon nach kurzer Zeit. Die Staubmenge, die gemessen wird, ist somit nur auf eine sehr kleine Menge an durchgesaugter Abluft bezogen. Deshalb wirken diese Werte sehr hoch.

Um diesen Artefakt zu vermeiden wurde der Versuch 01_10_09 mit einer kleineren Düse gestartet. Weil aber das abgesaugte Teilstromvolumen nun nicht mehr direkt vergleichbar ist, musste ein Korrekturfaktor von 1,2 verwendet werden. So sind bei Versuch 2, 20% an Staubgehalt hinzugerechnet worden.

Dieser Korrekturfaktor errechnet sich aus dem Verhältnis der unterschiedlichen Volumenströme, welche bei unterschiedlichem Düsendurchmesser durchfließen.

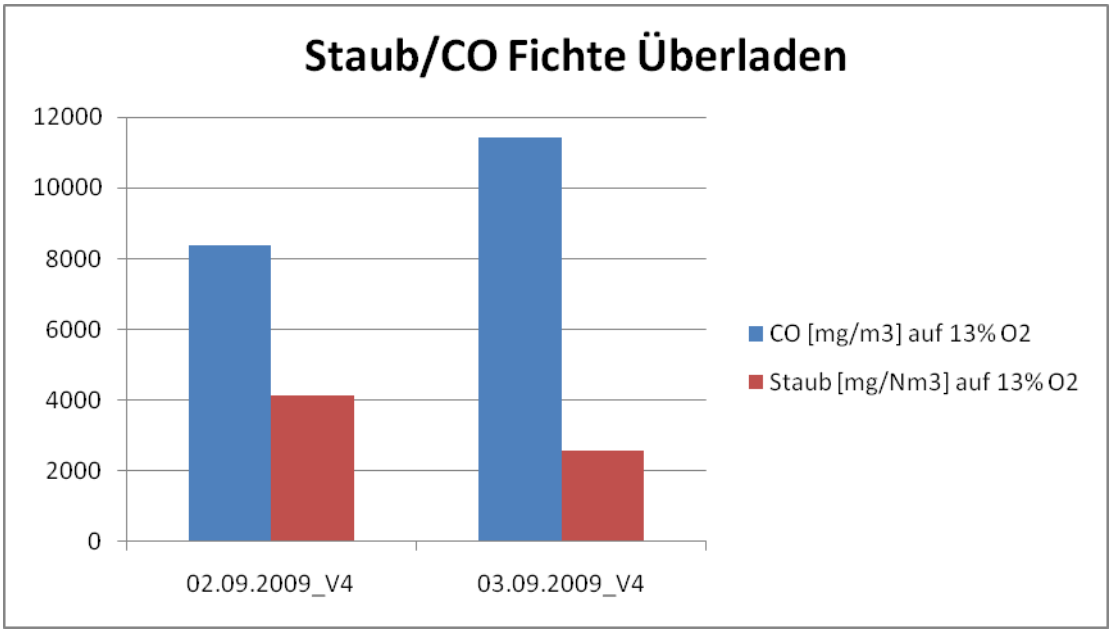


Diagramm 4.2.6.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Fichte Überladen*

Mittelwert: **336 [mg/Nm3] Staub auf 13% O2**

4.2.2 Buche Versuche

4.2.2.1 Buche Gut

CO - Gehalt

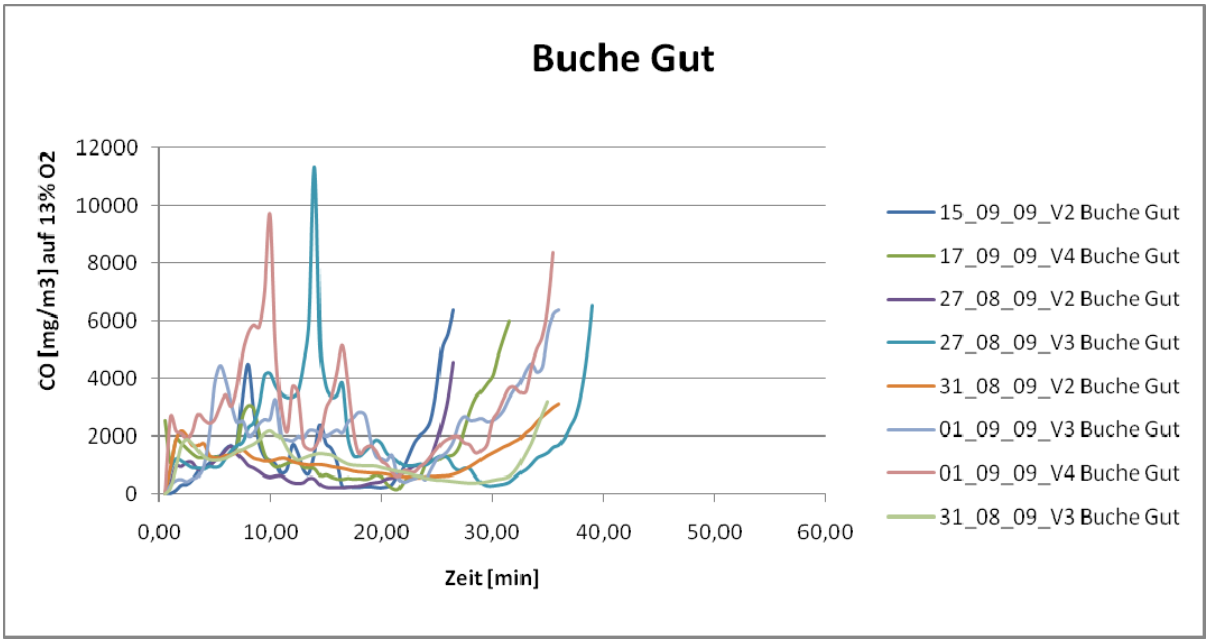


Diagramm 4.2.7.: *CO - Verlauf, Buche Gut*

Die "Buche Gut" Versuche zeigen ein etwas schlechteres Verbrennungsbild, was die CO - Werte anbelangt. Zwei Versuche mit Spitzenwerten mit 10.000 und 11.000 mg/m^3 stechen hier besonders hervor. Diese Spitzen sind auf Unstimmigkeiten im Verbrennungsverlauf zurückzuführen

Im Durchschnitt halten sich die Werte in etwa unter 4000 mg, was den Fichte Gut Versuchen in etwa gleichkommt.

Mittelwert: **2263 [mg/m3] CO auf 13% O2**

Staubwerte

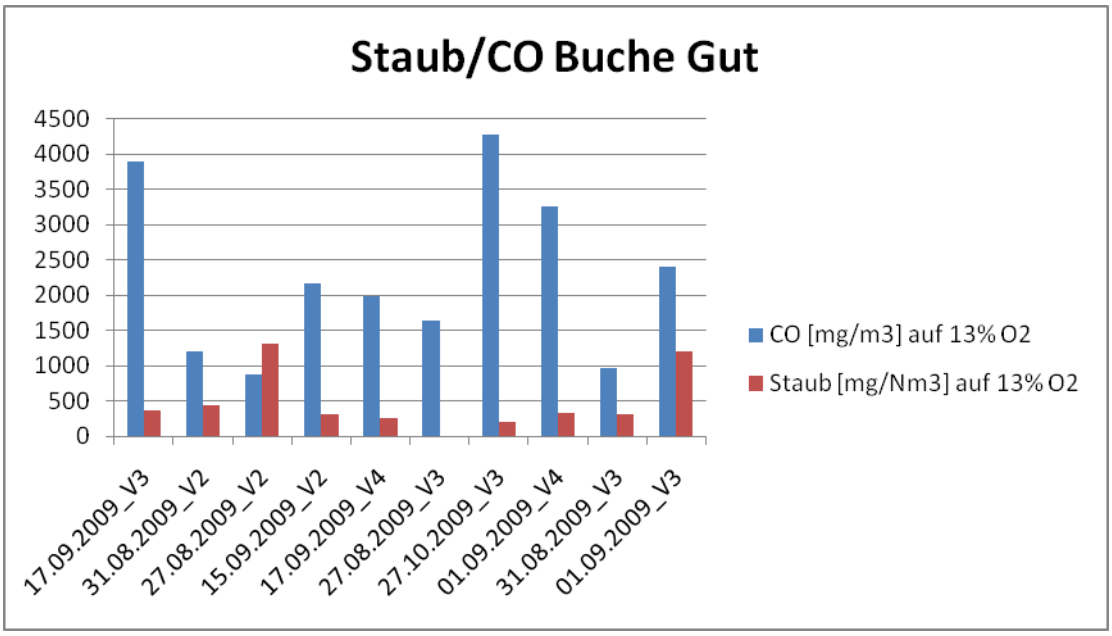


Diagramm 4.2.8.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Buche Gut*

Mittelwert: **53 [mg/Nm3] Staub auf 13% O2**

4.2.2.2 Buche Schlecht

CO - Gehalt

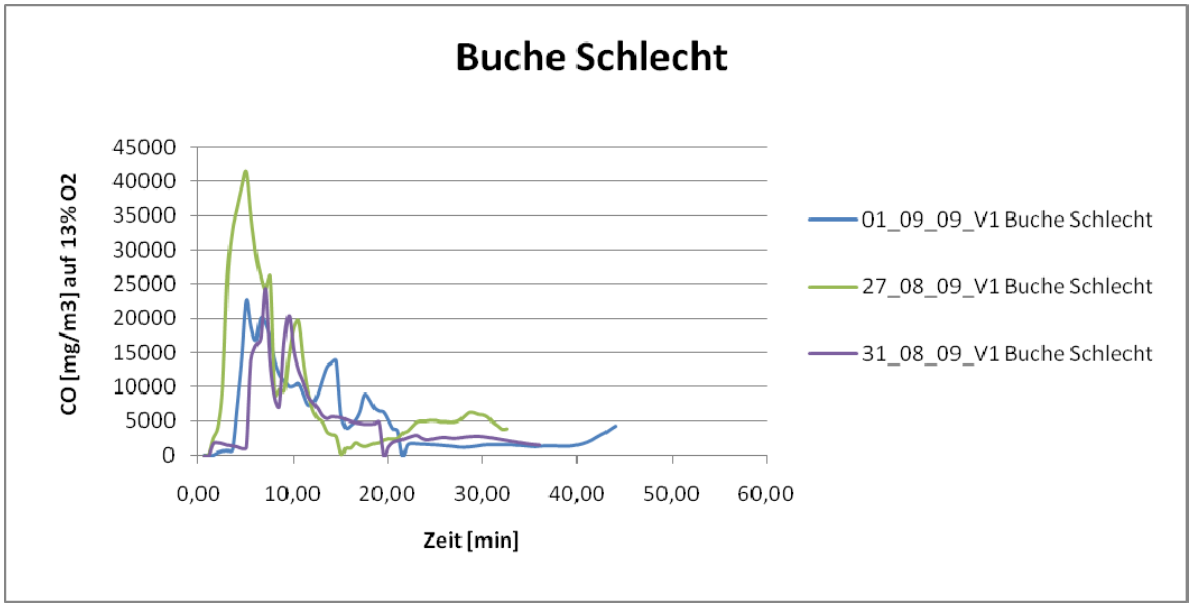


Diagramm 4.2.9.: *CO - Verlauf; Buche Schlecht*

Hier haben wir insgesamt ein etwas schlechteres Bild als bei "Fichte Schlecht". Jedoch sind alle schlechten Abbrände mit Buche in etwa gleich bis auf den Versuch am 27_08_09, welcher einen sehr hohen Peak zeigt, der wiederum auf einen schlechten Zug zurückzuführen ist.

Ansonsten ergeben sich Spitzenwerte bis zu 25.000 mg/m³ CO, welche schließlich in den Bereich einer guten Verbrennung zurück gehen.

Mittelwert: **4916 [mg/m3] CO auf 13% O2**

Staubwerte:

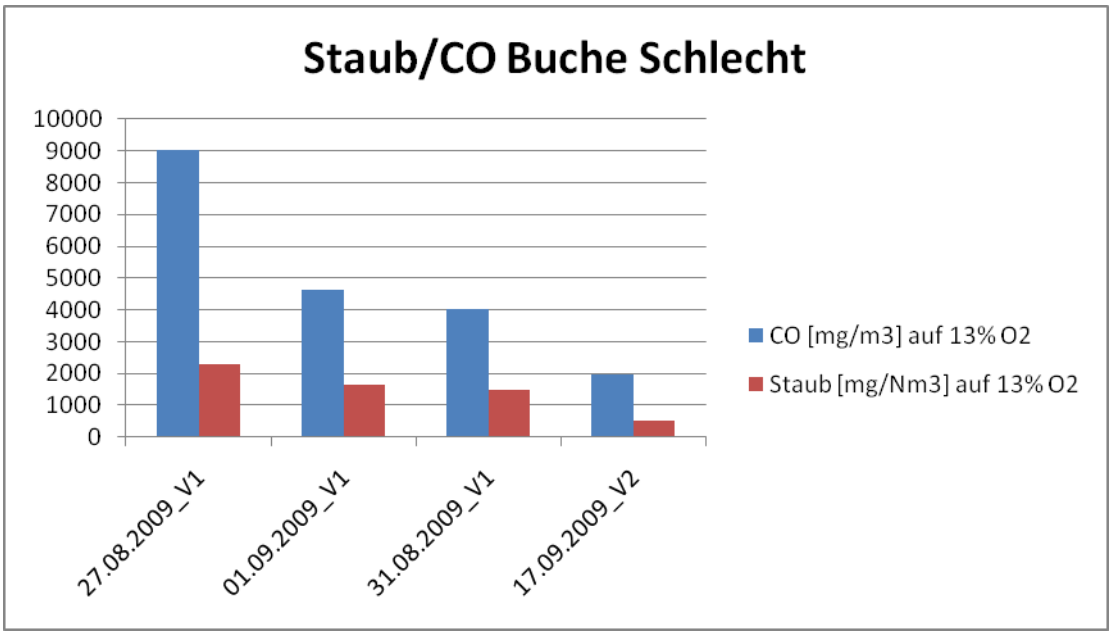


Diagramm 4.2.10.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Buche Schlecht*

Mittelwert: **147 [mg/Nm3] Staub auf 13% O2**

4.2.2.3 Buche Überladen

CO - Gehalt

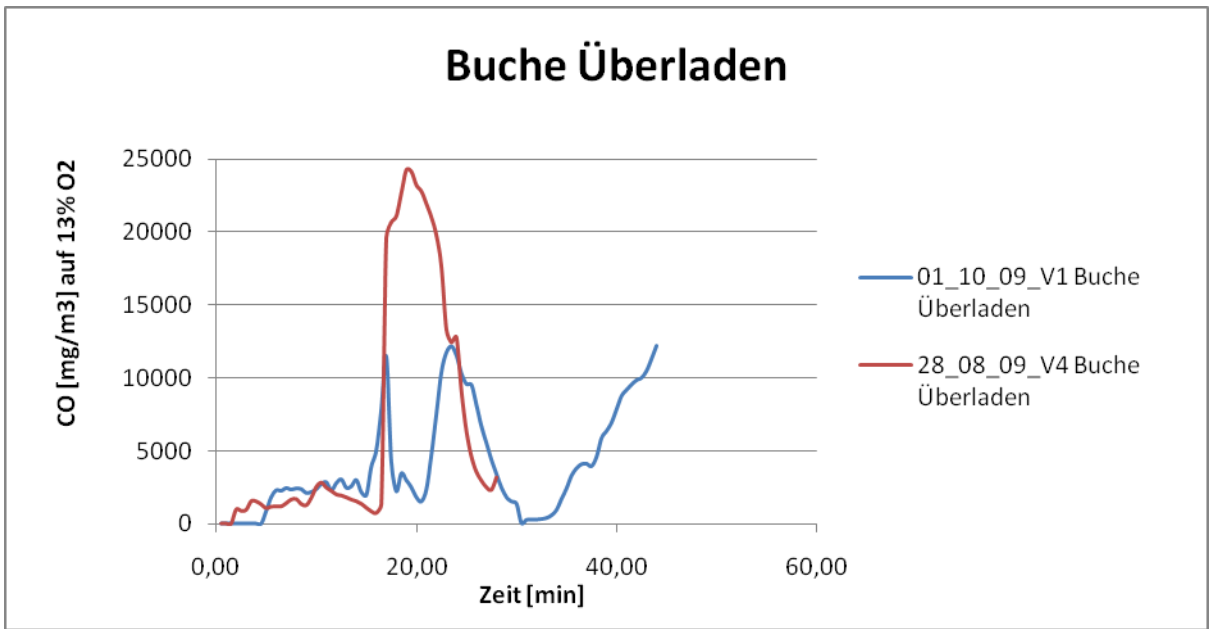


Diagramm 4.2.11.: *CO Verlauf; Buche Überladen*

Bei Versuch 01_10_09 sieht man einen plötzliches Absacken des CO - Wertes, obwohl dies nicht der Realität entspricht. Diese Schwankung ist so zu erklären, dass durch den rasanten Abfall an Sauerstoff die Umrechnung auf 13% O_2 Bezugsbasis das Ergebnis verfälscht.

Dies sieht man aus dem Verlauf des O_2 – Gehaltes und im Vergleich mit dem gemessenen CO - Gehalt ohne O_2 Bezug.

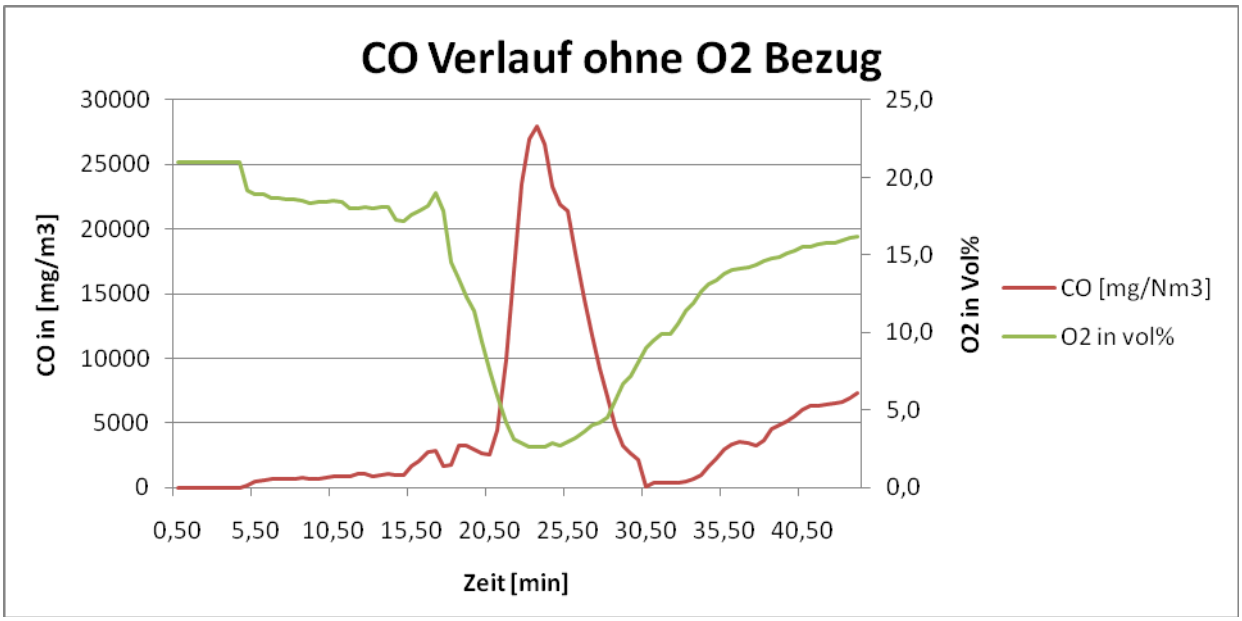


***Diagramm 4.2.12.*:** CO – Gehalt ohne O_2 Bezug und zugehörige O_2 - Konzentration

Mittelwert: **7145 [mg/m3] CO auf 13% O2**

Staubwerte

Hier wurde beim Versuch 01_10_09 der Korrekturfaktor von +20%, wie bereits bei Fichte Überladen beschrieben, verwendet.

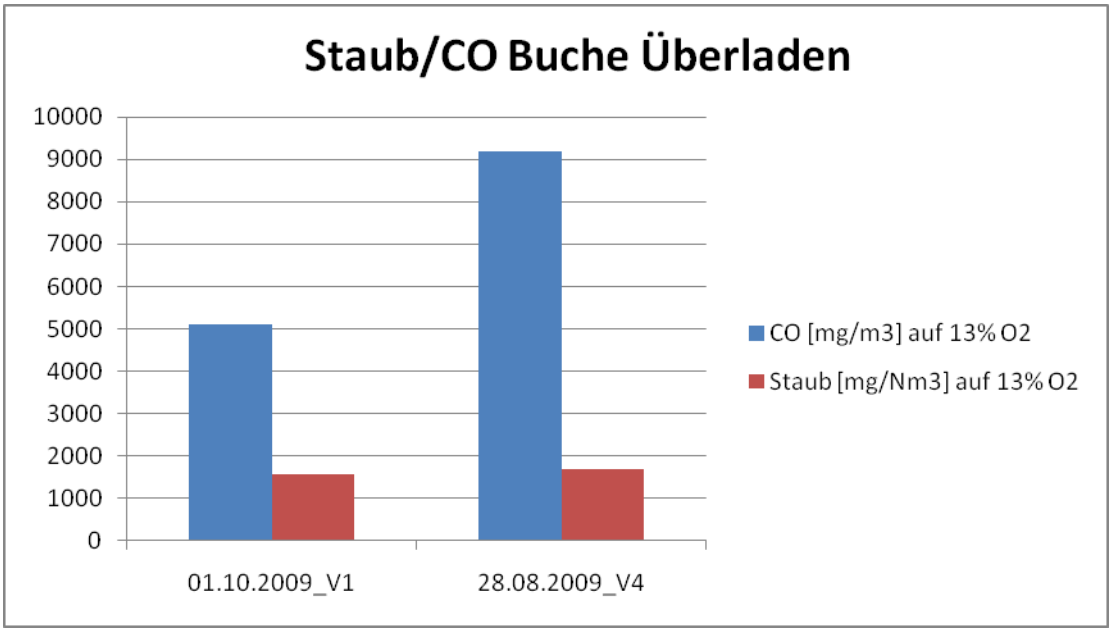


***Diagramm 4.2.13.:** mittlerer Gehalt von Staub und CO, Buche Überladen*

Mittelwert: **162 [mg/Nm3] Staub auf 13% O2**

4.2.3 Brikett

CO - Gehalt

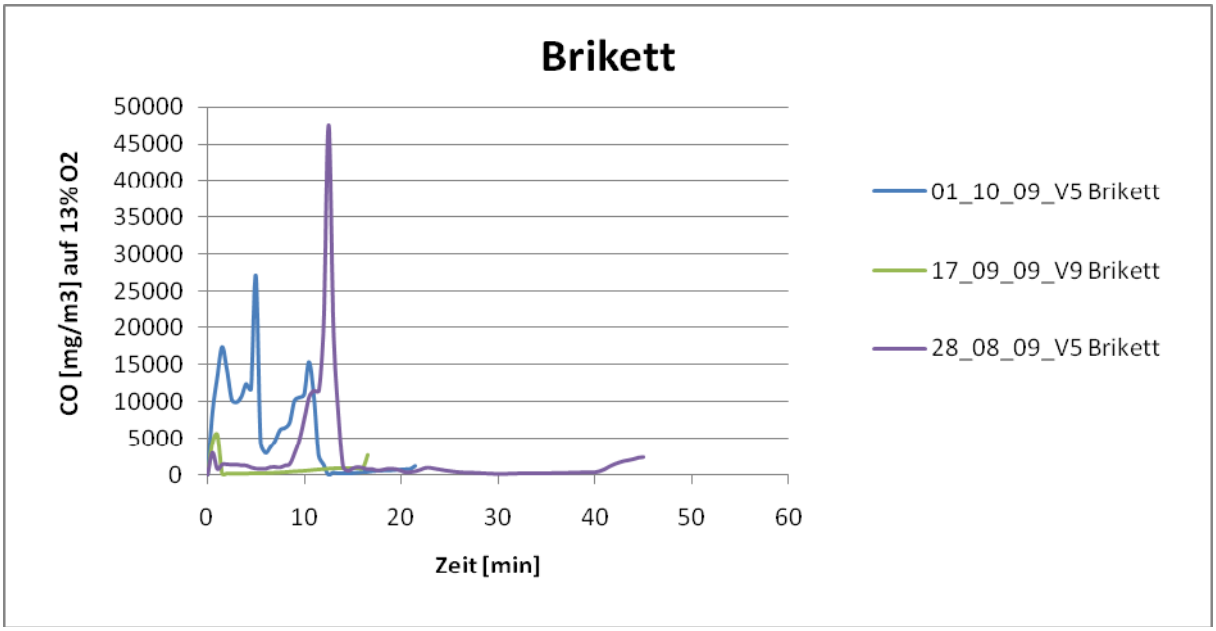


Diagramm 4.2.14.: *CO - Verlauf; Brikett*

Der Brennstoff Holzbrikett zeigt auf den ersten Blick einen Verlauf ähnlich eines schlechten Versuchs. Ein Brikett anzuzünden ist nicht dasselbe, wie Stückholz zu verbrennen, weil dieses nicht sehr gut ankommt. Wenn ein solches Brikett jedoch einmal brennt, sind die Abgaswerte optimal wie man bei Versuch 28_08_09 ab Minute 15 sehr gut sehen kann. Das CO wird fast vollständig umgesetzt und das Brikett brennt mit heißer, schöner Flamme.

Am Günstigsten ist es in diesem Fall das Brikett entweder zum Nachlegen zu verwenden, oder zuerst mit etwas Fichtenholz eine Glut zu erzeugen und dann das Brikett in Bruchstücken darauf zu legen.

Mittelwert: **838 [mg/m3] CO auf 13% O2**

Staubwerte

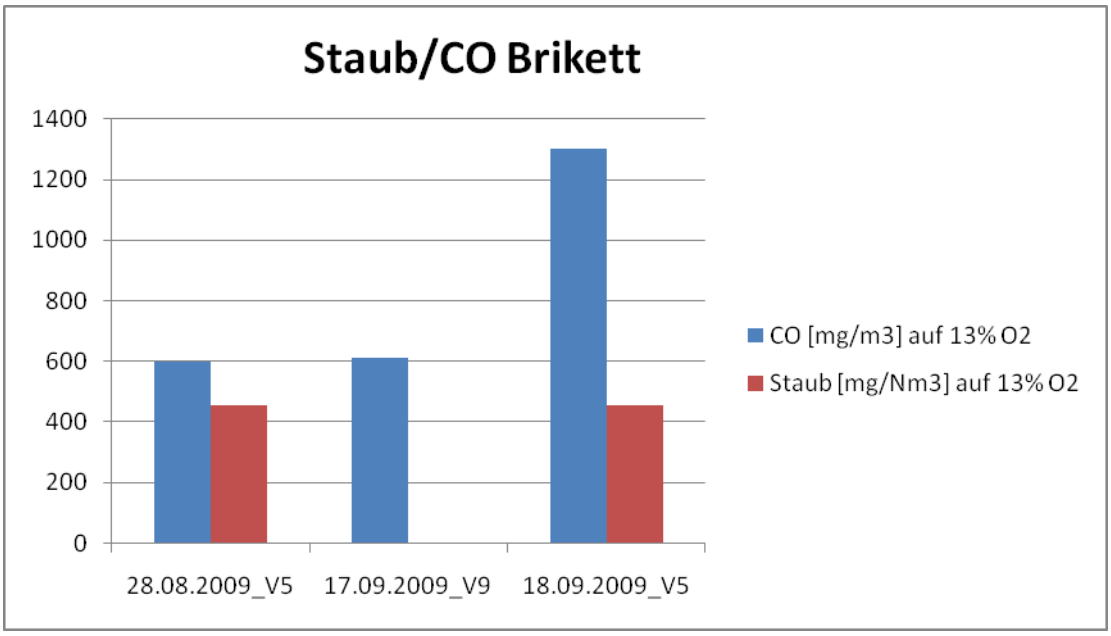


Diagramm 4.2.15.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Brikett*

Mittelwert: **45 [mg/Nm3] Staub auf 13% O2**

4.2.3 Zusatzversuche

Neben den Abbrandversuchen mit trockenem Stückholz von Buche und Fichte, mit der Messung von Staub und CO als Routineparameter wurden auch noch Einzelversuche mit anderen Brennmaterialen oder mit zusätzlichen Messparametern bzw. Auswertemethoden durchgeführt.

4.2.3.1 Nasses Holz (Kiefer)

Getestet wurde in einem Einzelversuch, welche Auswirkungen zu nasses Holz hat. Jedoch wurde hierzu zu frisch geschlagenes Holz aus dem Thüringer Wald mit einem Wassergehalt von fast 47% verwendet. Dieses Holz ohne zusätzliches trockenes Holz zu verbrennen, ist fast nicht möglich und die Messergebnisse waren somit wenig aussagekräftig.

4.2.3.2 Chemische Energieverlustberechnung

Wie im Diagramm 4.2.16 klar erkennbar ist, zeigen die Versuchstypen eine sehr unterschiedliche Beladung. „Fichte Gut“ hat mit Abstand das beste Ergebnis, aber auch „Buche Gut“ erzielte ein gutes Ergebnis, was zusammenfassend wiederum die Auswirkungen von falschem Heizen für Luftqualität aufzeigt.

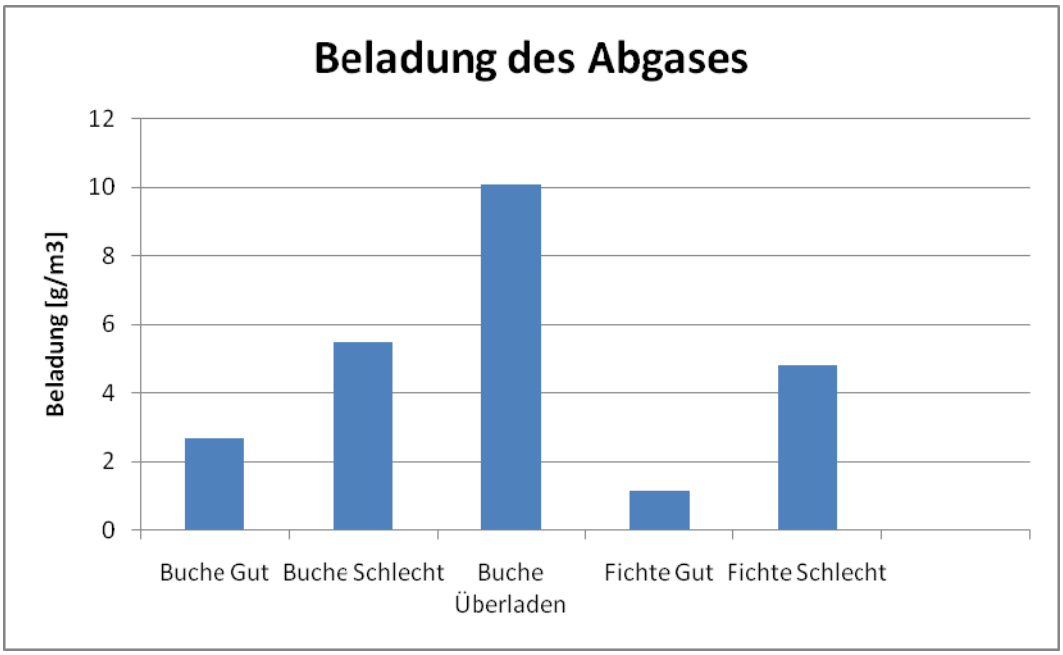


Diagramm 4.2.16.: *Berechnete Beladung des Abgases mit CO [g/m^3]*

Der zusätzlich berechnete Wirkungsgradverlust durch Kohlenmonoxidemissionen zeigt klar, dass „Fichte Gut“ auch hier die geringsten Verluste aufweist.

Man sieht, dass bei „Fichte Überladen“ und „Buche Überladen“ bereits um 10% des verwendeten Brennstoffs verloren geht! Im Vergleich zeigt das Holzbrickett wieder ein optimales Verhalten mit den geringsten Verlusten.

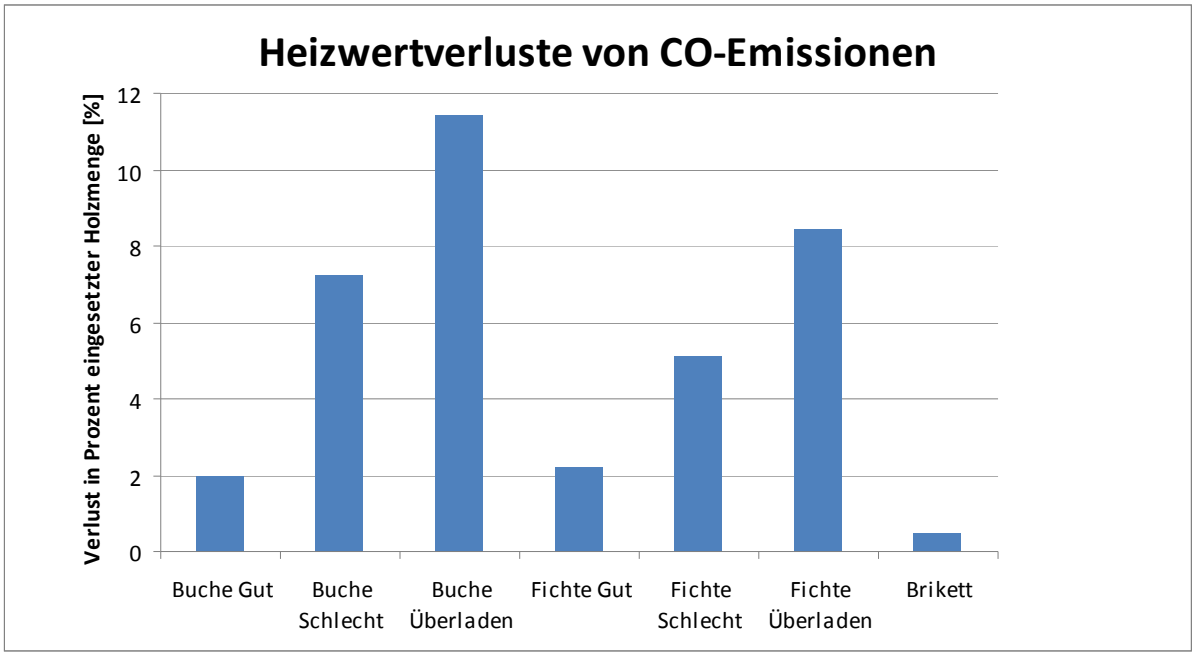


Diagramm 4.2.17.: *Chemisch bedingter Holzverlust durch CO*

Ein ähnliches Bild ergibt sich für Heizwertverluste durch die Emissionen von partikulärem Kohlenstoff und durch unverbrannte Kohlenwasserstoffe (OGC), für einen Vergleich siehe in Kapitel 5.

4.2.3.3 Wassergehaltsverteilung in Scheitholz

Da trockenes Holz und gute Brennholzlagerung für einen Abbrand wichtig ist, ist es auch interessant zu wissen, wie das Wasser innerhalb des Scheitholzes verteilt ist, um das Trocknungsverhalten verstehen zu können. Weiters sollten die Versuche helfen, das wenig wirksame Anfeuchtungsergebnis des Brennholzes bei den Abbrandversuchen mit feuchter Buche / feuchter Fichte zu verstehen.

Durchführung eines Tests zur Feuchteverteilung in einem Scheitholz:

Nach Auswählen eines geeigneten, dreieckigen Holzscheites, wird dieses in vier von außen nach innen konzentrisch liegende Bereiche eingeteilt.

Die Scheite werden befeuchtet und für die Dauer von zwei Wochen auf Rasen unter freiem Himmel gelagert. Während dem Aufenthalt der Scheite im Freien waren die Temperaturen meistens unter 0°C, daher waren sie auch gefroren. Für die Auswertung sind dies schlechte Voraussetzungen, da das Wasser nach der Befeuchtung möglicherweise schon gefroren ist, bevor es sich regelmäßig verteilen und in das Holz eindringen kann.

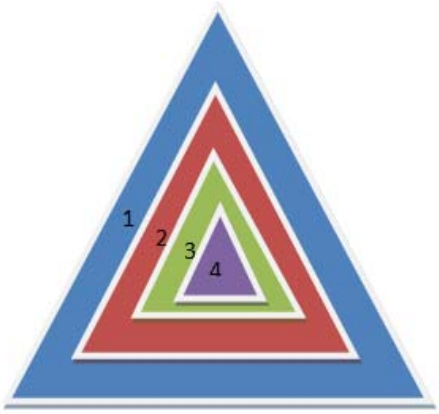


Abb.4.2.1.: *Zerteilung eines Holzscheits bei Testversuchen zur Feuchteverteilung in Scheitholz*

Nach der Lagerphase erfolgt die Zerteilung nach obigem Schema. Bei der praktischen Durchführung gingen die Rinden verloren. Die Scheitteile werden nun gewogen, für zwei Tage im Trockenschrank bei 105°C getrocknet und wieder gewogen. Bis zur vollen Gewichtskonstanz werden sie weitere drei bzw. vier Tage bei gleicher Temperatur weitergetrocknet. Die Versuche werden jeweils für Buche und Fichte durchgeführt.

Nach der Trocknung bis zur Gewichtskonstanz ergeben sich folgende Wassergehalte:

Holz / Bereich	Wassergehalt [%]: Nach der Trocknung		Wassergehalt [%]: Nach der Gewichtskonstanz	
	Buche	Fichte	Buche	Fichte
1	52,6%	35,8%	53,8%	37,6%
2	26,7%	27,2%	27,4%	28,4%
3	20,7%	24,0%	21,5%	25,4%
4	20,0%	26,4%	21,8%	28,7%

Die Verteilung der Holzfeuchte nach Erreichen der Gewichtskonstanz graphisch dargestellt ergibt folgendes Verteilungsmuster des Wassers im Holzscheit:

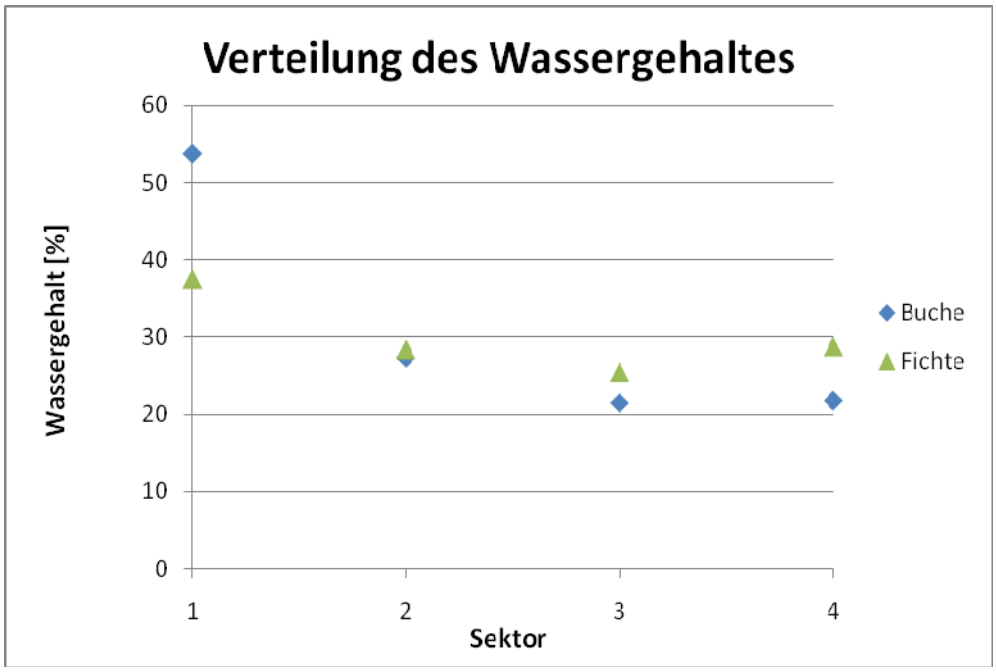


Diagramm 4.2.18.: *Verteilung des Wassergehalts in vier Sektoren von Scheitholz aus Buche und Fichte*

Der Wassergehalt nimmt im feuchten Scheitholz außen zunächst stark ab (bei Buche um – 50%) und dann bis in die dritte Schicht stetig ab. In den innersten zwei Schichten schwankt der Wassergehalt um einen einheitlichen Wert. Auch zu erkennen ist, dass die Feuchtigkeit in Fichtenholz gleichmäßiger verteilt ist und dass bei Buchenholz die Mitte des Scheitholzes am wenigsten durch Wasser von außen beeinflusst wird. Die Feuchteverteilung lässt erwarten, dass ein Trocknen des angefeuchteten Holzscheits rasch verlaufen sollte. Dies kann auch die wenig wirksamen Anfeuchtversuche von trockenem Brennholz erklären.

Bei den durchgeführten Abbrandversuchen hatte das eingesetzte Scheitholz im Mittel einen Wassergehalt von 12% (Buche/Fichte trocken) bzw. 13% (Buche feucht) und 12% (Fichte feucht). Das eingesetzte feuchte Brennholz Fichte/Buche war demnach nur geringfügig angefeuchtet und der Wassergehalt des Brennholzes Buche/Fichte war insgesamt äußerst gering. Die Verbrennungsversuche von „nassem“ Kiefernholz haben nicht funktioniert, da die aufgebrachte Aktivierungsenergie durch den Anzünder für die enthaltene Holzfeuchtigkeit (Wassergehalt 47%) nicht ausreichte.

4.2.3.4 Organisch gebundener Kohlenstoff

Bei den Feldversuchsmessungen des organisch gebundenen Kohlenstoffs (OGC) hat sich gezeigt warum gerade Spanplatten nicht verbrannt werden dürfen. Ein guter Heizversuch mit Fichte emittierte eine mittlere Konzentration von OGC von 58 mg/m³ organisch gebundener Kohlenstoff (zur Referenz: Fichte schlecht: 956 mg/m³), wohingegen die Spanplatte mit OGC = 2560 mg/m³ wohl außer Konkurrenz liegt. Für Abbrandversuche gut/schlecht mit Buche als Brennholz ergeben sich OGC-Abgasbelastungen weniger eindeutig als gute oder schlechte Ergebnisse. Hier wären umfangreichere Vergleichsversuche notwendig um eine klare Aussage machen zu können.

Ein Vergleich aller Abbrandversuche gut und schlecht für alle Versuche mit Fichte und Buche ergibt Mittelwerte für OGC(gut) = 126 mg/m³ und OGC(schlecht) = 549 mg/m³, dh bei gutem Abbrand eine Emissionsminderung von OGC um den Faktor 4 im Vergleich zum schlechten Abbrand.

Für gewerbliche Holzfeuerungsanlagen mit einer Leistung unter 0,1 MW gilt der Grenzwert für OGC von 50 mg/Nm³ C (bezogen auf 13% Sauerstoff). Dieser relativ strenge Grenzwert wird bei allen Messungen überschritten, besonders stark bei schlechten Abbrandbedingungen.

Hier ist die Verteilung der OGC-Konzentrationen der verschiedenen Abbrandversuche graphisch dargestellt.

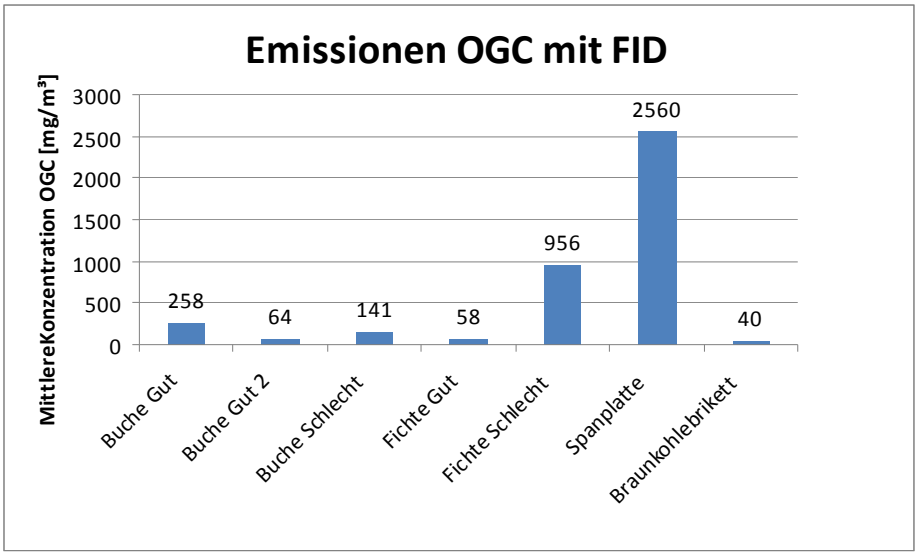


Diagramm 4.2.19.: *Emissionen für OGC gemessen mit FID.*

5. Interpretation

5.1 Auswertung der Abgaskonzentrationen

Wenn man Emissionswerte nun untereinander vergleicht, sieht man die deutlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Anheizmöglichkeiten.

Hier sind noch einmal alle mittleren Abgasgehalte für CO und Staub aus der Zusammenfassung übersichtlich aufgelistet:

Fichte

Anheiztechnik	CO [mg/m3] auf 13% O2	Staub [mg/Nm3]
Gut	2517	65
Schlecht	6044	184
Überladen	10718	336

Buche

Anheiztechnik	CO [mg/m3] auf 13% O2	Staub [mg/Nm3]
Gut	2263	53
Schlecht	4916	147
Überladen	7145	162

Brikett

Anheiztechnik	CO [mg/m3] auf 13% O2	Staub [mg/Nm3]
Verschieden	838	45

Wenn man diese Werte nun in ein Verhältnis setzt, kann man sehen, welcher Emissionsfaktor zwischen den einzelnen Methoden liegt.

Fichte

	CO - Gehalt	Staub
Gut/Schlecht	2,18	2,81
Gut/Überladen	3,87	5,13

Buche

	CO - Gehalt	Staub
Gut/Schlecht	2,17	2,80
Gut/Überladen	3,16	3,07

Zusammengefasst (Mittel aus Buche und Fichte)

	CO - Gehalt	Staub
Gut/Schlecht	2,18	2,81
Gut/Überladen	3,55	4,21

Das Brikett schneidet im Vergleich zu den Stückholzsorten am besten ab. Mit fast optimalen Emissionswerten für CO und Staub für einen Schwedenofen.

5.2 Auswertung des partikulären Kohlenstoffs im Staub

Der Kohlenstoffgehalt im Feinstaub des Abgases wurde für alle Versuchsarten bestimmt (siehe Kapitel 4.1.3). Graphisch verbildlicht ergibt sich folgende Beziehung zwischen Kohlenstoffgehalt des Staubs und dem Staubgehalt im Abgas bei verschiedenen Versuchsbedingungen.

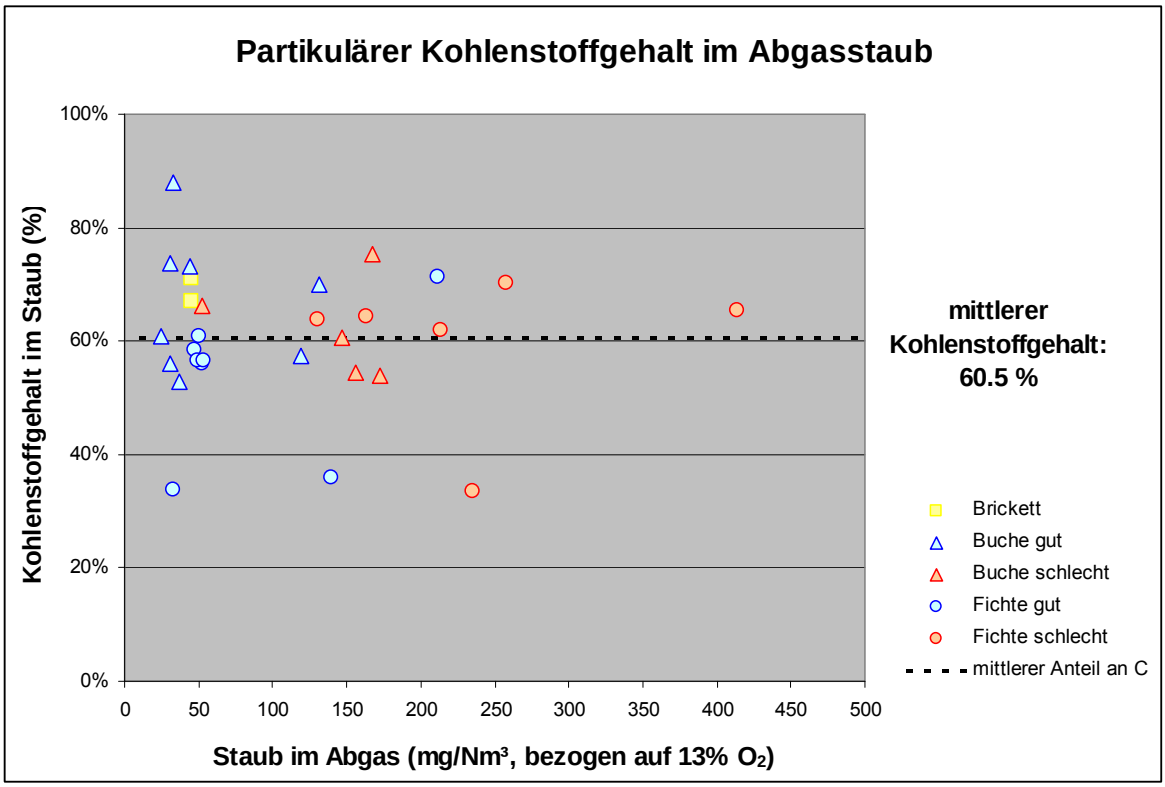


Diagramm 5.2.1.: Variation des Kohlenstoffgehaltes im Staub des Abgases

Hieraus wird ersichtlich, dass die Werte für Anteile von C im Staub um den Mittelwert 60% streuen. Da Kohlenstoff im Staub immer aus schlechter Verbrennung des Brennstoffes stammt, ist der Kohlenstoffanteil im Staub durch gute Verbrennung weitgehend vermeidbar. Somit zeigt der Wert, dass Feinstaub im Abgas im Mittel um 60% allein durch gute Oxidationsbedingungen des Brennholzes reduziert werden kann. Eine darüber hinausgehende Feinstaubreduktion betrifft dann den nicht-organischen Anteil und müsste somit auf separaten Reduktionsstrategien aufbauen.

Man kann sagen, dass Gutversuche grundsätzlich weniger Staub emittieren als Schlechtversuche, eine recht klare Trennlinie gut/schlecht hinsichtlich Abgasgehalt von Staub verläuft bei rund 170 mg/Nm³. Diese klare Trennung ist mit dem darin enthaltenen Kohlenstoffanteil wegen der großen Bandbreite der Gehalte nicht möglich. Buche Gut hat einen durchschnittlichen Gehalt von 67% C im Staub, während Buche Schlecht auf geringere 62% kommt. Fichte Gut liegt mit 51% aber, wie zu erwarten, leicht unter dem Schlechtwert von 59%.

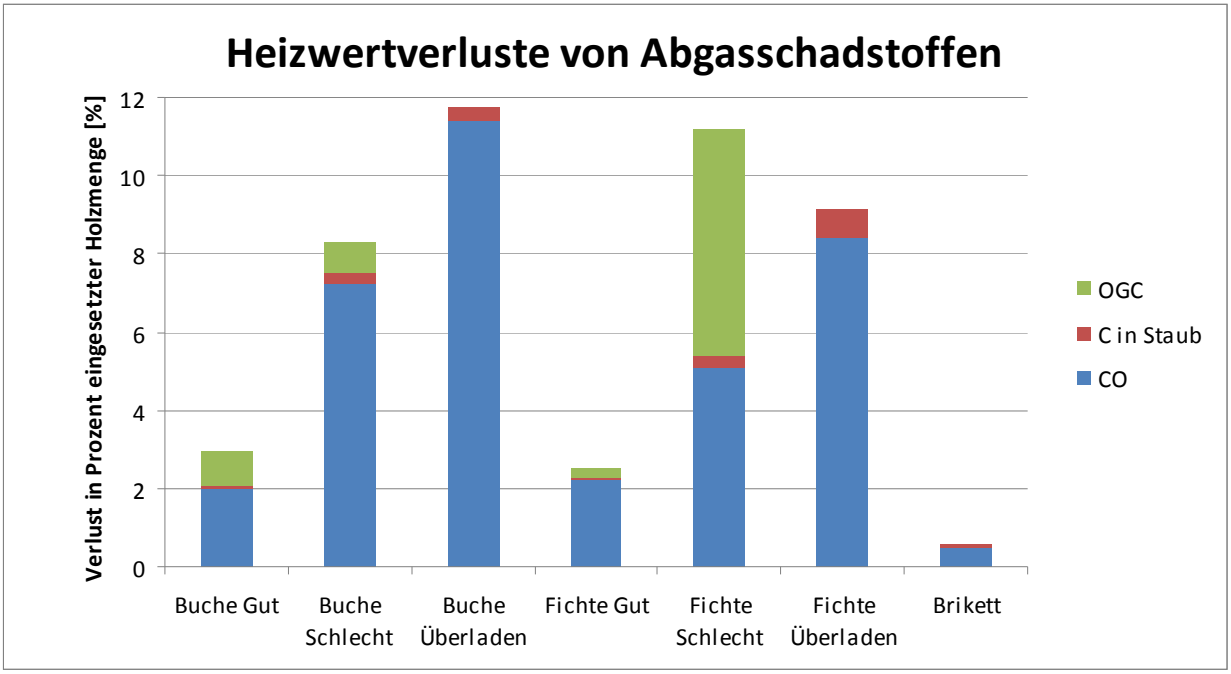
Der Prozentanteil von C im Staub ist bei Fichte niedriger gegenüber der Buche, jedoch werden in Fichte höhere Konzentrationen an partikulärem C emittiert (zusammen mit höheren Gesamtstaubkonzentrationen bei Fichte.).

Die insgesamt beobachtbare Streuung der Kohlenstoffgehalte im Staub lassen jedoch vermuten, dass die Zusammensetzung von Feinstaub von den Anheizbedingungen weitgehend unabhängig ist.

Betrachtet man jedoch die Emissionen an partikulärem C im Abgas, so ergibt sich das gleiche Bild, wie es schon für Staub beobachtet wird: die guten Versuche haben deutlich niedrigere Werte als schlechte Abbrände. Buche Schlecht (gemittelt: 82 mg/Nm³) ist um Faktor 2,2 höher als Buche Gut (37 mg/Nm³), Fichte Schlecht (116 mg/Nm³) ist das 2,8-fache von Fichte Gut (41 mg/Nm³).

5.3 Auswertung „chemischer“ Gesamtenergieverluste

Die einzelnen prozentuellen Energieverluste durch nicht vollständig oxidierte Kohlenstoffquellen im Abgasstrom (Kohlenmonoxid, partikulärer Kohlenstoff / Ruß und unverbrannte Kohlenwasserstoffe) können zu einem Gesamtverlust an Heizenergie durch „chemische“ Emissionen aufsummiert werden. Auch für diesen Summenwert von prozentuellen Heizwertverlusten zeigt sich, dass die „Gutversuche“ deutlich effizienter ablaufen als schlechte Versuche.



OGC Verlustanteil organisch gebundener Kohlenstoff

C in Staub Verlustanteil partikulärer Kohlenstoff im Staub

CO Verlustanteil Kohlenmonoxid

Diagramm 5.3.1.: *Gegenüberstellung der Heizwertverluste pro Versuchsart.*

Aus diesem Diagramm kann man deutlich erkennen, dass die Hauptbeiträge zum Energieverlust von den CO- und OGC-Emissionen stammen (bei überladenen Versuchen wurden keine OGC-Messungen durchgeführt). Die Verluste durch Kohlenmonoxid und Kohlenstoff im Staub nehmen von Gutversuchen über Schlechtversuche zu Überladenversuchen bei Buche und Fichte stetig zu. Das Brikett erleidet die geringsten Verluste durch diese Emissionen. Bezieht man die Verluste von Versuchen auf Gut = 1, so ergeben sich folgende Faktoren für prozentuelle Heizwertverluste:

Heizwertverlustfaktoren (Gutversuche = 1)					
Versuchstyp	**CO**	**C in Staub**	**OGC**	**Gesamt**	**Gesamt (ohne OGC)**
Buche Gut	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Buche Schlecht	3,64	2,71	0,91	2,80	3,59
Buche Überladen	5,77	2,89	nv.	3,96	5,62
Brikett	0,24	0,70	nv.	0,19	0,27
Fichte Gut	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fichte Schlecht	2,29	3,92	24,16	4,40	2,34
Fichte Überladen	3,77	10,55	nv.	3,60	3,98
Brikett	0,22	1,15	nv.	0,22	0,24

nv. Keine Messung dieser Art durchgeführt

Tabelle 5.3.1: *Faktoren für Heizwertverluste*

Nimmt man den Gesamtverlust im Wirkungsgrad aus Kohlenmonoxid und partikulärem Kohlenstoff (ohne OGC), so geht bei einem Versuch Buche Schlecht 3,6-mal mehr Holz ungenutzt durch das Kamin als im Versuch Buche Gut, ein Versuch Fichte Schlecht lässt 2,3-mal mehr Holz ungenutzt durch das Kamin entweichen als der Versuch Fichte Gut. Diese Verlustfaktoren sind von vergleichbarer Größe, wie sie sich schon als gut/schlecht-Faktoren für verschiedene Abgasemissionen in Kapitel 5.1 ergeben hatten.

5.4 Abgasemissionen bezogen auf Brennstoffenergien

Am Prüfstand wurden unter optimalen Bedingungen für den Ofen Emissionswerte für Abgasschadstoffe ermittelt, welche in der Form Schadstoffmasse pro Megajoule (mg/MJ) im Prüfzertifikat des Ofens für die Schadstoffe CO, OGC, Staub und NOx aufscheinen (siehe Kapitel 2.2.1).

Ermittelt man für das in den Feldversuchen verwendete Brennholz und dessen Feuchtegehalt die Heizwerte über das Diagramm 2.1.1 (etwa 15 MJ/kg), so lassen sich aus den mittleren Abgaskonzentrationen der Schadstoffe (unbezogene Messwerte) und den theoretisch ermittelten Abgasvolumen die energiebezogenen Abgasemissionen ableiten.

Diese Werte lassen sich mit den Prüfstandergebnissen des Ofens und mit Grenzwerten für Stückholz – Kleinfeuerungsanlagen vergleichen.

Abgasschadstoff	Grenzwert [mg/MJ]	Prüfstandergebnis für Ofen Typ Bari [mg/MJ]	Mittlere Emission bei gutem Abbrand [mg/MJ]	Mittlere Emission bei schlechtem / überladenem Abbrand [mg/MJ]
Kohlenmonoxid	1100	673	2404	4994
Staub	60	37	112	257
Kohlenwasser-stoffe (OGC)	80	36	56	503

Es zeigt sich, dass die aus den Messdaten abgeleiteten energiebezogenen Emissionen für CO, Staub und Kohlenwasserstoffe (OGC) die Prüfstandswerte für alle Abbrandversuchsarten überschreiten. Die Prüfstandswerte geben somit kaum reale Abbrandbedingungen wieder. Bei schlechten Abbrandbedingungen überschreiten die Abgaswerte die Prüfstandswerte um eine ganze Größenordnung.

Bezieht man die Messwerte auf Grenzwerte für Stückholzkleinfeuerungen, welche für den Schwedenofen als Richtwert herangezogen werden können, liegen diese für CO und Staub bei allen Abbrandbedingungen über dem Grenzwert. Bei OGC – Emissionen können gute Versuche den Grenzwert einhalten, während schlechte Versuche wiederum deutliche Grenzwertüberschreitung ergeben.

5.5 Grenzwerte für Abgasemissionen

Die Grenzwerte für Abgasinhaltsstoffe sind in anderer Art berechnet, als die sonstigen Ergebnisse. Bei allen vorigen CO-Werten wurde der Mittelwert ab einem Sauerstoffgehalt von 18% O2 genommen.

Bei einem Grenzwert nimmt man diesen Mittelwert jedoch erst ab 15% O2. Somit wird nur die relevante Hauptbrandphase gemittelt und durch Fehlen der CO-Belastung aus der Anzündphase wird der so gemittelte CO - Wert kleiner.

Anheiztechnik	CO [mg/m3] auf 13% O2	Staub [mg/Nm3]
Gut	1477	59
Schlecht	2386	167
Überladen	8791	249
Brikett	517	45

Der Grenzwert für Stückholz-Kleinfeuerungsanlagen liegt für CO bei 1000 [mg/Nm3], 13% O2 (Toleranz 1500 [mg/Nm3], 13% O2). Diese Werte können als Richtwerte zur Beurteilung herangezogen werden. Für die einzelnen Messungen bedeutet dies, dass bei den guten Versuchen dieser Grenzwert nur knapp unterschritten wird. Beim Brennstoff Brikett hingegen, liegt der Wert weit unter der vorgeschriebenen Norm. Somit kann gesagt werden, dass bereits mit einer kleinen Veränderung im Abbrandverhalten eine massive Grenzwertüberschreitung im Schwedenofen stattfindet.

Bei Staub sieht die Situation ähnlich aus. Der Grenzwert bei Stückholz-Kleinfeuerungsanlagen liegt für Staub Emissionen bei 150 [mg/Nm3] bei 13% O_2 Bezug. Für unsere Messwerte bedeutet dies, dass bei den "Schlechten" und "Überladen“ Versuchen der Grenzwert überschritten wird, jedoch bei "Guten“ Versuchen und Brikettfeuerung nicht.

Somit kann gesagt werden, dass bei den Ergebnissen der Grenzwert als Richtwert im Bereich CO fast überschritten wird, durch einen kleinen Störfaktor erfolgt umgehend eine Grenzwertübertretung. Beim Staub kann mittels guter Anfeurungstechnik der Grenzwert gut eingehalten werden.

6. Öffentlichkeitsarbeit

Wir haben schon von vielen Diplomarbeiten gehört, die nach Vollendung direkt in die Schublade gewandert sind und in Vergessenheit geraten sind. Da wir aber bereits unzählige Stunden in unser Projekt investiert haben und es für eine sehr sinnvolle Tätigkeit halten, sind wir der Meinung, dass unser Projekt der breiten Öffentlichkeit gezeigt werden soll.

Wir haben uns auch bereit erklärt, über die Diplomarbeitspräsentation hinaus an unserem Projekt zu arbeiten und es weiter zu entwickeln.

Um unsere Arbeit der Bevölkerung zu zeigen, haben wir uns entschlossen, einen nicht kleinen Teil der Arbeitszeit in den Bereich der Öffentlichkeitsarbeit zu investieren.

Hier sind die Tätigkeiten aufgelistet und genauer erklärt, die bis jetzt geplant, und teilweise schon umgesetzt wurden und unser Projekt nach Abschluss der Matura am Leben halten sollen.

6.1 Tag der offenen Türe der HTL

Wir wurden gebeten, unsere Diplomarbeit beim Tag der offenen Tür der HTL Dornbirn im November 2009 vorzustellen und einige Versuche vorzuführen. Außerdem sollten wir grobe Ergebnisse präsentieren.
Dazu kreierten wir zwei Plakate zur Demonstration unserer Diplomarbeit und der bereits vorhandenen Ergebnisse. Sehr hilfreich war, dass wir jeden Versuch und alle Geräte fotografisch dokumentiert hatten und so die Plakate durch Fotos aufgelockert werden konnten.
Neben den Plakaten hatten wir noch weiteres Material zur Veranschaulichung vom Land Vorarlberg zur Verfügung gestellt bekommen.
Der Tag der offenen Tür wurde für uns zu einem großen Erfolg, da wir einerseits einige Interessenten über unsere Arbeit informieren konnten, aber auch die Präsentation der Diplomarbeitsinhalte selber üben konnten.

6.2 Vol.at

Eines schönen Tages, am 17. September 2009 kam ein Kamerateam von Vorarlberg Online uns besuchen. Zuerst waren wir der gesamten Aktion gegenüber etwas negativ eingestellt, da keiner von uns die Nähe von Kameras suchte.

Joachim erklärte sich aber bereit ein Interview zu geben und meisterte es mit Bravour.

Bereits einen Tag später konnten wir das Interview und weiteres Filmmaterial auf vol.at begutachten, wo es bis heute der Öffentlichkeit unter nachstehender Adresse zur Verfügung steht.

(vol.at → Google Suche unter Videos → Heizen wie die Schweden)

6.3 EESA –Award / IUSES –Projekt

Der EESA –Award (Europäische Energiespar- Award) findet dieses Jahr in Form des IUSES- Projekt statt.

Die Teilnahme am EESA ist für alle Oberstufenschulen und Schüler der folgenden Länder möglich: Österreich, Bulgarien, der Tschechischen Republik, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Lettland, den Niederlanden, Rumänien, Slowenien, Spanien, Deutschland oder Großbritannien.

Der EESA ist in zwei Teilschritte unterteilt. Der Nationale Award und der Europäische Award.

Der Award prämiert Ideen und Erfolge, Tätigkeiten und Pläne für Verbesserungen auf dem Energiesektor mit Schwerpunkt auf die Minimierung des Energieverbrauchs.

Wir werden im Sommer mit unserer Diplomarbeit an der Ausscheidung teilnehmen.

6.4 Umweltwoche Dornbirn

Wir wurden informiert, dass Anfang Juni in Vorarlberg die Umweltwoche stattfindet und von der Stadt Dornbirn angefragt, ob wir nicht Lust bzw. Zeit hätten unser Projekt ein weiteres Mal zu präsentieren.

Da der Termin genau in die Lernferien fällt, die bei uns eh schon sehr knapp bemessen sind, waren wir uns am Anfang nicht so einig, ob wir Zeit haben für diese Aktion. Als uns jedoch gesagt wurde, unser Arbeitsaufwand würde sich nur auf einen einzigen Samstag begrenzen, erklärten wir uns zum Mitmachen bereit. Nun wird unser Versuchsaufbau auf dem Marktplatz in Dornbirn aufgebaut und präsentiert, was für uns eine weitere Chance ist, die Bevölkerung über unser Werken zu informieren.

6.5 Gemeinde Lustenau

Ein weiterer Punkt in der Öffentlichkeitsarbeit ist unser Projekt mit der Marktgemeinde Lustenau. Wir haben im Jänner Kontakt mit der Gemeinde Lustenau, genauer mit Herr Thomas Mittelberger, aufgenommen und über unsere Diplomarbeit informiert. Wir stellten die Frage, ob es hier vielleicht die Möglichkeit gäbe, ein gemeinsames Projekt zu starten.

Prompt kam die Antwort, in der wir zu einer gemeinsamen Besprechung eingeladen wurden. Nach einer sehr interessanten Besprechung kamen wir zu dem Entschluss, dass wir nach Beendigen der Diplomarbeit unserer Ergebnisse der Gemeinde zu Verfügung stellen und einerseits die Kaminkehrer mit Fakten und Zahlen ausgestattet werden, andererseits auch die Bevölkerung mit Hilfe von Inseraten und Werbeschaltungen direkt angesprochen wird,. Ein weiterer Vorschlag kam von Seiten der Gemeinde, man könne der Bevölkerung einen finanziellen Anreiz bieten, der die Leute dazu bringen soll einen Termin mit dem Kaminkehrer auszumachen, bei dem richtiges Heizen geschult werden soll.

8. Anhang

8.1 Zeitplan/Arbeitsaufwand

Zum Schluss möchten wir noch zeigen, wie viel Zeit jeder Einzelne von uns in diese Arbeit gesteckt hat. Wenn man dieses umfangreiche Projekt in Händen hält, sieht man leider nicht die unzähligen Stunden, welche wir für diese Diplomarbeit gearbeitet haben: deshalb nachstehend eine kleine Aufstellung unseres Arbeitseinsatzes und ein Zeitplan des Projektes.

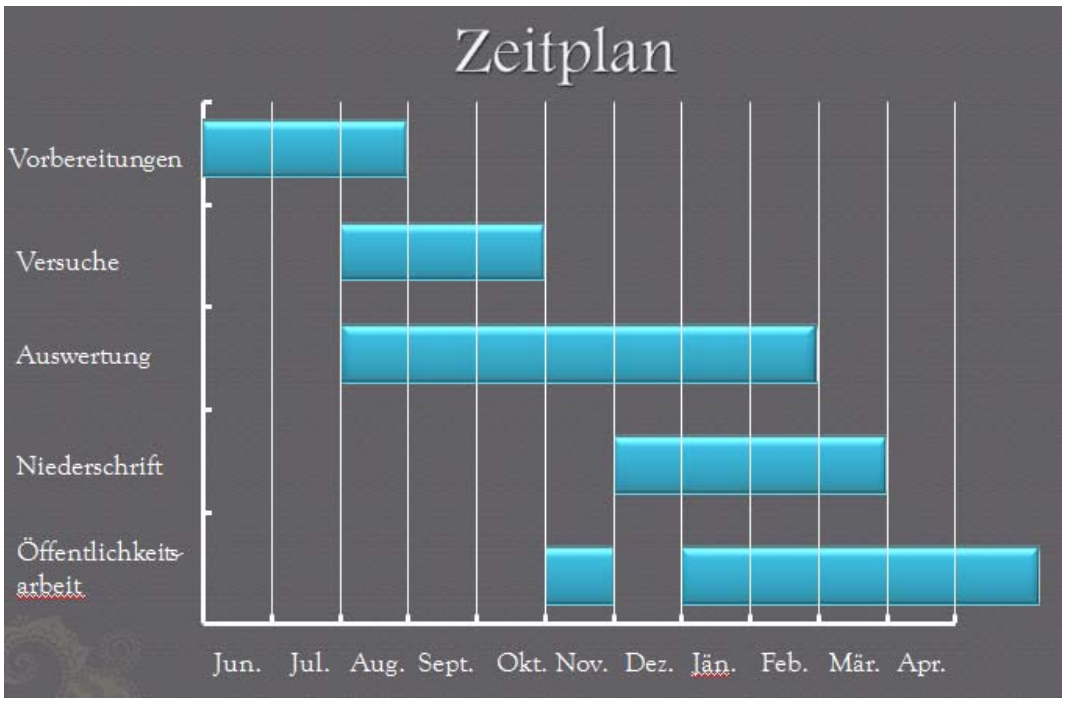


Abb. 8.1.1.: Zeitplan

Auflistung der gearbeiteten Stunden:

	Pfister	Spöttl	Fitz
Vorbereitung	44	7,5	39,5
Versuche	78,5	60,5	61,5
Auswertung	73,5	3	82
Ausformulierung	55	10	65
Präsentation	46,5	21	43,5
Summe	315,5	128,5	291,5

Insgesamt wurden somit zumindest **705 Stunden** von uns für die Diplomarbeit investiert.

8.2 Quellenangaben

[1] http://www.videncenter.dk/groenne%20trae%20haefte/Groen_Tysk/trae-DE06.pdf

[2] http://de.wikipedia.org/wiki/Holzkohle

[3]http://de.wikipedia.org/wiki/Verbrennung_%28Chemie%29

[4] http://de.wikipedia.org/wiki/Holz#Thermische_Eigenschaften

[5] http://de.wikipedia.org/wiki/Brennwert

[6] http://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert

[7] http://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert_%28Dulong%29

[8] http://www.ievb.tu-clausthal.de/fileadmin/Alte_Seiten/bt1/docs/KA03-Eigenschaften%20fester%20Brennstoffe-0907.pdf

[9] http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlendioxid#Vorkommen_in_der_Atmosph.C3.A4re

[10] http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffmonoxid#Toxizit.C3.A4t

[11] http://de.wikipedia.org/wiki/Feinstaub

[12] http://de.wikipedia.org/wiki/Stickoxide

[13] http://de.wikipedia.org/wiki/Boudouard-Gleichgewicht [1]

[14] Feuerungsanlagen-Verordnung, BGBI. II Nr. 331/1997

[15] „Luftreinhalteverordnung“, LGBl. Nr. 82/1994 idgF

[16] „Kleinfeuerungsanlagenverordnung“, LGBl. Nr. 56/1998 idgF

[17] http://www.koebschaefer.com/kuss_tree/powerslave,id,107.html

[18] http://www.welte-oefen.de/PDF/Hase/BARI_Bedienungsanlei_Nov2008.pdf

[19] http://www.durchfluss.info/

[20] http://www.ibmarquardt.de/Druckfibel.pdf

[21] http://www.intl-lighttech.com/applications/light-source-apps/ndir-gas-sensor/ndir-gas-sensor-index

[22] http://www.iavg.org/iavg198.pdf

[23] http://www.ivb.tu-bs.de/seiten/ausstattung/abgasmesstechnik.htm

[24] http://www.motorlexikon.de/?l=12

[25] http://www.bios-bioenergy.at/de/taetigkeitsfeld/messungen-analysen/messungen.html

[26]http://de.wikipedia.org/wiki/Gasz%C3%A4hler

[27] Betriebshandbuch für das TOC-Gerät CN-2000 (FP-2000), LECO® Corporation

[28] http://www.rbr-kleinschmidt.de/cms/files/File/Bedienungsanleitungen/bda-j2kn-d%282%29.pdf

[29] http://www.motorlexikon.de/?l=10

[30] http://de.wikipedia.org/wiki/Flammenionisationsdetektor

[31] http://www.draegermsi.de/de/download/category/3-betriebsanleitungen?download=30%3Adrger-msi-variox-2-co2

[32] Praxis Fibel Heizungs-Messtechnik, testo AG, Deutschland (www.testo.de)

[32] http://www.rbr-kleinschmidt.de/cms/files/File/Bedienungsanleitungen/bda-j2kn-d%282%29.pdf

[33] http://www.geizteile-shop.de/fachinformation_Auspuff-Lambdasonde.php

[34] Umweltinstitut Bregenz, Ergebnisdaten der FID-Messungen bei Feldversuchen zur Holzverbrennung der HTL Dornbirn

8.3 Abbildungsverzeichnis

Kapitel 2

Abb.2.1.1: *Holzkohle;* http://www.grillueli.ch/media/Bild~Holzkohle.JPG

Abb.2.1.2: *Verbrennungsdreieck;* http://www.chemie-schule.de/chemieWiki/images/thumb/3/32/Verbrennungsdreieck.png/350px-Verbrennungsdreieck.png

Abb. 2.2.1.: *Bari Schwedenofen*

Abb. 2.3.1.: *Funktionsschema eines NDIR-Sensors.*

Abb. 2.3.2: *Staubmessgerät;* http://www.koneth.ch/bilder.html

Abb. 2.3.3.: *Aufbau eines FID.* http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/3/anc/croma/gc/detektoren/flamme/fid_prinzip1m751200.jpg

Kapitel 3

Abb. 3.1.1.: *Versuchsaufbau*

Abb. 3.2.1.: *Scheitholzgröße*

Abb. 3.2.2: *Scheitholz Fichte/Buche*

Abb. 3.2.3.: *Brikett*

Abb. 3.2.4.: *Luftschieber Primär- (I) und Sekundärluft (II) und Ascheabscheider*

Abb. 3.2.5.: *Holz im Blockhaus gestapelt; „Gut“*

Abb. 3.2.6.: *Holz dicht gepackt; „Schlecht“*

Abb. 3.2.7.: *Übermenge an Holz im Blockhaus; „Überladen“*

Abb. 3.2.8.: *Wetterstation (links); Strahlungsintensität Messgerät (rechts)*

Abb.3.2.9: *Strahlungsmessgerät Positionierung im Innenhof*

Abb.3.3.1: *Schlauchanschlüsse*

Abb. 3.3.2.: *CO_2/Strömung/Temperatur - Messtechnik*

Abb.3.3.3: *Datenlogger mit Datenkabel*

Abb.3.3.4: *J2KN Multimessgerät für Abgase*

Abb. 3.3.5: *Anzündphase*

Abb.3.3.6: *Anheizphase*

Abb.3.3.7: *Hauptbrandphase*

Abb.3.3.8: *Ausbrandphase*

Abb.3.3.9: *Schlechtversuch (links) führt zu verrauchtem Ofenraum (rechts)*

Abb.3.3.10: *Rauchfahne von Schlechtem Anheizen*

Abb.3.3.11: *Überladener Versuch mit Ascheklappe geöffnet (links) und schwarzer Rauchfahne (rechts)*

Kapitel 4

Abb.4.2.1.: *Zerteilung eines Holzscheits bei Testversuchen zur Feuchteverteilung in Scheitholz*

Kapitel 8

Abb. 8.1.1.: Zeitplan

8.4. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1.1.: *Temperaturabhängigkeit des Boudouard-Gleichgewichtes (nach Wikipedia)*

Tabelle 5.3.1: *Faktoren für Heizwertverluste*

8.5 Diagrammverzeichnis

Kapitel 2

Diagramm 2.1.1: *Heizwertverminderung durch Holzwasser.*

Kapitel 4

Diagramm 4.1.1.: *Abgasverhalten während eines schlechten Abbrandes mit Buche* (Versuch 15.09.09_V2, *blau = CO unbezogen; rot = auf 13% O_2 bezogen und grün = O_2 in Vol%)*

Diagramm 4.1.2.: *Satz von Abgasparameter mit Zeitpunkten besonderer Vorkommnisse beim schlechten Abbrand von Buche*

Diagramm 4.1.3.: *Diverse Abgaskonzentrationen beim schlechten Abbrand von Buche*

Diagramm 4.1.4.: *Abgasbeladung mit partikulärem Kohlenstoff und Gesamtstaub für alle guten und schlechte Abbrandversuche mit Buche und Fichte*

Diagramm 4.1.5.: *Verlauf des organisch gebundenen Kohlenstoffs bei schlechtem Abbrandversuch mit Buche*

Diagramm 4.2.1.: *CO - Verlauf, Fichte Gut*

Diagramm 4.2.2.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Fichte Gut*

Diagramm 4.2.3.: *CO - Verlauf; Fichte Schlecht*

Diagramm 4.2.4.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Fichte Schlecht*

Diagramm 4.2.5.: *CO - Verlauf; Fichte Überladen*

Diagramm 4.2.6.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Fichte Überladen*

Diagramm 4.2.7.: *CO - Verlauf, Buche Gut*

Diagramm 4.2.8.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Buche Gut*

Diagramm 4.2.9.: *CO - Verlauf; Buche Schlecht*

Diagramm 4.2.10.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Buche Schlecht*

Diagramm 4.2.11.: *CO - Verlauf; Buche Überladen*

***Diagramm 4.2.12.*:** CO – Gehalt ohne O_2 Bezug und zugehörige O_2 - Konzentration

Diagramm 4.2.13.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO, Buche Überladen*

Diagramm 4.2.14.: *CO - Verlauf; Brikett*

Diagramm 4.2.15.: *mittlerer Gehalt von Staub und CO; Brikett*

Diagramm 4.2.16.: *Berechnete Beladung des Abgases mit CO [g/m^3]*

Diagramm 4.2.17.: *Chemische bedingter Holzverlust durch CO*

Diagramm 4.2.18.: *Verteilung des Wassergehalts in vier Sektoren von Scheitholz aus Buche und Fichte*

Diagramm 4.2.19.: *Emissionen für OGC gemessen mit FID.*

Kapitel 5

Diagramm 5.2.1.: Variation des Kohlenstoffgehaltes im Staub des Abgases

Diagramm 5.3.1.: *Gegenüberstellung der Heizwertverluste pro Versuchsart.*

Kapitel 8

Diagramm 8.1.: *Heizwert bezogen auf Holzmenge;* Köb & Schäfer - Verbrennung von Holz und die Einflüsse auf den Heizwert!; http://www.koebholzfeuerungen.com/kus_tree/kus_content/ powerslave; (Zugriff: 03.01.2010) „Bearbeitung durch den Verfasser“

8.6 Berechnungen

8.6.1 Abgasgeschwindigkeit/ Abgaszusammensetzung

Mit Hilfe dieser Berechnung konnten wir vorab schon alleine mit der Brennstoffmenge und -art eine Prognose geben über die Abgasgeschwindigkeit, das Abgasvolumen und auch die Abgaszusammensetzung. Weiters wurde die Berechnung der Abgasvolumen für Einzelversuche mit diesem Rechengang durchgeführt.

In der Berechnungstabelle wurde mittels grundchemischer Reaktionen, idealer Gasgleichung und der Enthalpien die einzelnen Komponenten erstellt.

Die Produktfeuchtigkeit im Holz ist in diesem Rechengang der Einfachheit halber wegelassen. Bei der Berechnung der theoretischen Volumen wurde der Wasseranteil des Holzes zum Gesamtabgasvolumen jedoch hinzugerechnet.

Berechnung der Abgasmenge bei einer Holzfeuerungsanlage:

Sauerstoff- bzw. Luftbedarf (Holz)

Komponenten	Gew%	n	O2	CO2, O2, H2O, NO	O2
		[mol/kgHolz]	[kg/kgHolz]	[kg/kgHolz]	[Nm³/kgHolz]
C	50	41,63	1,33	1,83	0,93
O	43,4	-27,14	-0,43	-0,43	-0,30
H	6,1	60,40	0,48	0,54	0,34
N	0,2	0,14	0,00	0,00	0,00
O2 gesamt			1,38		0,97
Luft gesamt			6,58		4,61

Abgasberechnung Holz

Abgas ohne O2-Überschuss			Abgas mit O2-Überschuss (lamda = 2)		
Abgas	[kg/kgHolz]	[Nm³/kgHolz]	Abgas	[kg/kgHolz]	[Nm³/kgHolz]
CO2	1,83	0,93	CO2	1,83	0,93
H2O	0,54	0,68	H2O	0,54	0,68
N2	5,20	4,16	N2	10,40	8,33
NO	0,00	0,00	NO	0,00	0,00
O2	0,00	0,00	O2	1,38	0,97
Summe feucht	7,58	5,78		14,16	10,91

Wasserdampfanteil g(H2O)=	3,84

Abschätzung der Verbrennungstemperatur:

Hu = 340.C + 1016.H + 63.N - 98.O-25*H2O

Hu 18861,01 kJ/kg

Abgas	[kg/kgHolz]	cp [kJ/kgK]
CO2	1,83	1,14
H2O	0,54	2,2
N2	10,40	1,14
NO	0,00	1,09
O2	1,38	1,04

für ca. 600 °C

$\Delta T=\Delta H/((\Delta cp)$

ΔT =	1137,23	K	
T_{EIN}=	298	K	
T_{AUS}=	1435,23	K	
Δ_{AUS}=	1162,23	°C	Verbrennungstemperatur

Nehmen wir folgende Daten an:

Masse Holz:		3	kg
Luftüberschusszahl		2	
Abgastemp. Kaminaustritt		250	°C

Abgasvolumen in Betriebskubikmeter:

V	**62,68**	**m³**	40 min

Volumenstrom für Abbrenndauer: 40 Minuten

V	**0,03**	**m³/s**

Strömungsgeschwindigkeit bei Rohrdurchmesser 15 cm

v	**1,48**	**m/s**

8.6.2 Berechnung der Staubmenge

Die hierfür benötigten Daten zur Berechnung konnten größtenteils am Staubmessgerät selbst abgelesen werden. Umgebungsdruckdaten sind von einer Messstation in Dornbirn täglich ermittelt worden und in unserer Berechnung berücksichtigt.

Die tatsächliche Staubmenge wurde, wie im Kapitel Versuchsparameter beschrieben, ausgewogen.

Staubmenge

Filter (leer)	27,9752	[g]
Filter (beladen)	28,0056	[g]
Differenz	0,0304	[g]

Abgesaugte Menge Luft

Gasuhr (Anfang)	446,003	[m3]
Gasuhr (Ende)	446,651	[m3]
Temp. Gasuhr	27	[°C]

Gemessener Unterdruck [bar]
-0,08
-0,16
-0,18
-0,2

-0,155	Unterdruck [bar]

Betriebsdruck

Pu	1,016	Umbebungsdruck [bar]
Pg	-0,155	Unterdruck [bar]
Pges	0,861	[bar]

Normkubikmeter

Pn	1,013	Normaldruck [bar]
Tn	273,15	Normaltemp. [K]
Pges	0,861	Druck [bar]
V(B,tr)	0,648	Gasuhr [m3]
Tg	300,15	Temp. Gasuhr [K]

$$V(N,trocken) = \frac{Pges * V(B,tr)}{Tg} * \frac{Tn}{Pn}$$

V(N,trocken)	0,501	Normkubikmeter [Nm3]

$$Cst = \frac{Staubmenge\ (Differenz)}{V(N,trocken)}$$

Staubkonzentration

Cst	0,061	Staubkonzentration [g/Nm3]

Staubkonzentraion auf 13% O2

O2 in vol%	10,67	Durchschnittlicher O2 gehalt

$$Cst(13\%) = Cst * \frac{(21-13)}{(21-O2)}$$

Cst (13%)	0,047	Staubkonzentration auf 13% O2 in [g/Nm3]
Cst (13%)	46,99	Staubkonzentration auf 13% O2 in [mg/Nm3]

8.7 Diagramm Wassergehalt

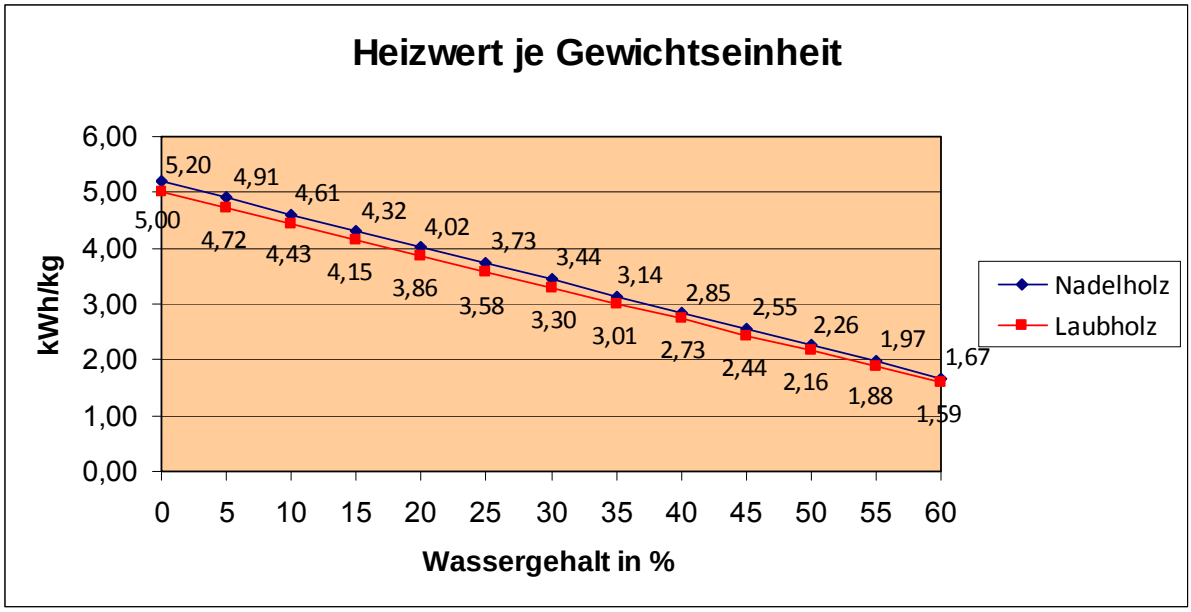


Diagramm 8.1.: *Heizwert bezogen auf Holzmenge*

8.8 Plakate vom Tag der offenen Türe

Plakat 1

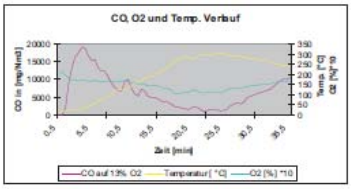
HEIZEN WIE DIE SCHWEDEN

WIE HEIZE ICH RICHTIG - UND SCHONE DAMIT DIE UMWELT UND MEINE GELDBÖRSE

HTL DORNBIRN

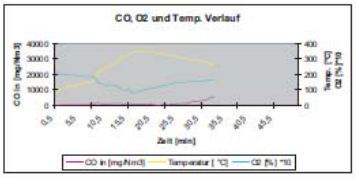
FALSCH

Was kann ich falsch machen?
- nasses oder frisches Holz verwenden
- zu viel Holz verwenden (4kW = 1kg Holz)
- falsches Brennmaterial (Spanplatten etc.)
- falsche Anzünder (künstliche Anzünder, Brandbeschleuniger, etc.)



RICHTIG

Wie mache ich es richtig?
- trockenes Holz verwenden
- von oben anzünden
- luftig stapeln
- nicht zu große Scheite
- Luftzufuhr nach Gebrauchsanleitung



VORGANGSWEISE BEIM RICHTIGEN HEIZEN

1.

1. Der Brennraum und der Ascheabscheider sollten vor Gebrauch entleer werden damit es zu weniger Ascheflug kommt.

2.

2. Vorgegebene Menge an Holz vorbereiten und den Ofen damit richtig, d.h. im Blockhausstil befüllen.

3.

3. Das Holz mit einem Anzünder von oben anzünden und sicherstellen das die Luftversorgung richtig eingestellt ist. Den Ofen während der Verbrennung nicht öffnen um Holz nachzulegen!

4.

4. Abwarten bis die Verbrennung beendet ist und erst dann neues Holz nachlegen, da ansonsten die Luftzufuhr verändert wird.

ALLGEMEINES

Durch richtiges Heizen kann nicht nur die Umwelt geschont werden, sondern auch Energiekosten eingespart werden!
Mit effizientem Heizen verringert man die Feinstaubemission um den Faktor 5 im Gegensatz zu falschem Heizen. Aber auch die CO-Emission sinkt um ein vielfaches!
Es hat sich als besonders Umweltschonend erwiesen, wenn der Heizvorgang mit Fichtenholz gestartet wird und sobald die erste Ladung abgebrannt ist, mit Holzbricketts fortgesetzt wird.
Zum Anzünden verwendeten wir einen rein biologischen Anzünder. Ein Fehler der von Vielen begangen wird, ist mit Papier oder künstliche Anzünder, die Brandbeschleuniger enthalten können, an zu feuern.

Plakat 2

HEIZEN WIE DIE SCHWEDEN

WIE HEIZE ICH RICHTIG - UND SCHONE DAMIT DIE UMWELT UND MEINE GELDBÖRSE

HTL DORNBIRN

PHASEN EINER VERBRENNUNG

1. Trocknung:

Ab einer bestimmten Temperatur beginnt das Wasser an der Oberfläche des Holzes zu verdampfen. Diese Phase benötigt jedoch Energie und so trägt sie nicht zum Erwärmen der Umgebung bei. Um diese Phase daher so kurz wie möglich zu halten, sollte das Holz bereits einen bestimmten Grad der Feuchtigkeit unterschritten haben (< 20%). Dies erreicht man durch eine mindestens zwei Jahre dauernde Lagerung des Holzes.

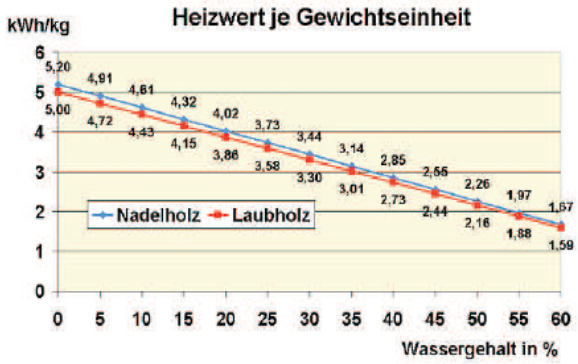
2. Entgasung und Verbrennung:

In dieser Phase der Verbrennung beginnt das Holz zu entgasen - auch Pyrolyse genannt. Diese Gase entweichen aus dem Holz und werden verbrannt, dadurch wird die Temperatur weiter.
Durch die erhöhte Temperatur wird auch noch die restliche Feuchtigkeit aus dem Holz verdampft.
Wenn das Heizgut vollständig entgast und getrocknet ist, ist Koks entstanden.

3. Ausbrennen des Kokses:

Das entstandene Koks wird nun mit dem zugeführten Sauerstoff umgesetzt und vollständig in Asche umgewandelt.
Wenn zu viel Sauerstoff zugeführt wird, entsteht Kohlendioxid, ist jedoch zu wenig vorhanden, wird das Koks zu Kohlenmonoxid umgesetzt. Daher ist wichtig das der Sauerstoffgehalt während der Verbrennung hoch genug ist, jedoch nicht zu hoch, da die Verbrennung dadurch beschleunigt wird und mehr Holz benötigt wird.

Einfluss der Feuchtigkeit auf den Brennwert



Auf dieser Grafik erkennt man, welche immensen Einfluss die Feuchtigkeit von Holz auf den Brennwert hat!

Vorarlberg
unser Land

Kamin Ofen Studio Beuchert
Kaminöfen & Accessoires
Marktstraße 30 · A-6850 Dornbirn · Tel. 05572 51133
Fax 05572 51133-4 · Email: office@schwedenofen.at