

# Vergleich der Emissionen aus der Verbrennung von Scheitholz, Holz-, Rindenholz-, Rinden- und Braunkohlebriketts

im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

## Auftraggeber

Bezeichnung: Bundesamt für Umwelt, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien  
CH - 3003 Bern  
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).  
[www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)

## Auftragnehmer

Bezeichnung: Prüfstelle für Holzfeuerungen  
Adresse: Klosterzelgstrasse 2, CH-5210 Windisch  
Verantwortlicher: Tom Strebel  
Telefon: +41 56 202 79 16  
E-Mail: [holzfeuerungen.technik@fhnw.ch](mailto:holzfeuerungen.technik@fhnw.ch)  
Interne Referenz: MP-20213

BAFU Projektleiter: Jürg Kurmann (juerg.kurmann@bafu.admin.ch)  
BAFU Vertragsnummer: 00.5082.PZ / DE500FD01

Autoren: Tom Strebel  
Erich Wildhaber  
Nemo Lohberger  
Hans Peter Knöpfel

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

<b>VERWENDETE ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>3</b>
<b>1 AUFTRAGSUMFANG</b> .....	<b>4</b>
1.1 Messgrundlagen.....	4
1.2 Messort.....	4
1.3 Vor Ort beteiligte Personen.....	4
1.4 Weitere beteiligte Stellen .....	4
<b>2 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>5</b>
<b>3 RÉSUMÉ DES RÉSULTATS</b> .....	<b>6</b>
<b>4 MESSGERÄTE</b> .....	<b>8</b>
4.1 Gasförmige Emissionen.....	8
4.2 Staub- und Partikelmessung.....	8
4.3 Temperaturmessung .....	9
4.4 Druckmessung .....	9
4.5 Gewichtsmessung.....	10
4.6 Umgebungsbedingung.....	10
<b>5 TESTAUFBAU</b> .....	<b>11</b>
5.1 Teststand .....	11
5.2 Messstrecke .....	12
<b>6 BRENNSTOFFE</b> .....	<b>12</b>
<b>7 TESTDURCHFÜHRUNG</b> .....	<b>14</b>
7.1 Testprozedur .....	14
7.2 Luftzufuhr Einstellung.....	16
<b>8 ERGEBNISSE</b> .....	<b>16</b>
8.1 Vergleich Standardabbrände (Abbrand 2 und 3).....	16
8.1.1 Gemittelte Abgastemperaturen von Abbrand 3.....	17
8.1.2 CO Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz) .....	18
8.1.3 NO <sub>x</sub> Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz) .....	19
8.1.4 OGC Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz).....	19
8.1.5 Staub Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz) .....	20
8.1.6 Abbranddauer Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz).....	22
8.2 Vergleich Standardabbrände relativ zu Holzbriketts.....	23
8.3 Vergleich Ausbrände.....	24
8.3.1 CO-Emissionen während des Ausbrands .....	25
8.3.2 NO <sub>x</sub> -Emissionen während des Ausbrands .....	25
8.3.3 OGC Emissionen während des Ausbrands.....	26
8.3.4 Staub-Emissionen während des Ausbrands .....	26
8.3.5 Vergleich Ausbranddauer .....	28
8.3.6 Relative gasförmige Emissionsfracht beim Ausbrand .....	28
8.4 Verbleibende Rückstände nach den Abbränden .....	29
<b>9 DISKUSSION DER RESULTATE</b> .....	<b>30</b>
9.1 Diskussion Ergebnisse der Standardabbrände .....	30
9.2 Diskussion Ergebnisse des Ausbrands.....	31
9.3 Diskussion der Emissionsfrachten .....	33
9.4 Beobachtungen während der Durchführung der Abbrände .....	34
9.4.1 Einflussnahme durch den Betreiber .....	36
9.5 Streuung der Messergebnisse .....	37
<b>10 ANHANG</b> .....	<b>38</b>
10.1 Verläufe der Abbrände und Ausbrände .....	38
10.1.1 Rindenholzbriketts (Charge: 200714-2) .....	38
10.1.2 Holzbriketts (Charge: 200714-1) .....	39

10.1.3	Scheitholz (Charge: 190823).....	40
10.1.4	Rindenbriketts (Charge: 200714-3) .....	41
10.1.5	Rindenbriketts (Charge: 200714-4) .....	42
10.1.6	Braunkohlebriketts (Charge: 200714-6) .....	43
10.1.7	Braunkohlebriketts (Charge: 200714-5) .....	44
10.2	Bilder der Abbrände der getesteten Brennstoffe .....	45

## Verwendete Abkürzungen

#/Nm <sup>3</sup>	Teile pro Normkubikmeter
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
g	Gramm
hh:mm	Zeitdauer in Stunden und Minuten
K	Kelvin
kg	Kilogramm
LDSA	Lung-Deposited Surface Area
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
m-%	Massenprozent
mg	Milligramm
min	Minute
MJ	Megajoule
nm	Nanometer
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
OGC	Organic Gaseous Carbon
Pa	Pascal
ppm	Parts per million
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
SOA	Sekundäre Organische Aerosole
t	Zeit
TIR 401:10	Abgastemperatur dividiert durch 10
v. EW	vom Endwert
v. MW	vom Messwert

## 1 Auftragsumfang

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) sind im September und Oktober 2020 Vergleichsmessungen von Stückholz mit verschiedenen festen Brennstoffen in Form von Briketts an der Prüfstelle für Holzfeuerungen durchgeführt worden. Die zu testenden Brennstoffe sind vorab zusammen mit dem BAFU festgelegt worden. Die Vergleichsmessungen wurden in einem Raumheizer durchgeführt und erfolgten nach EN 16510-1.

Charge	Beschreibung	Lieferant
190823	Scheitholz (Referenzmessung)	Forstamt Brugg
200714-1	Holzbriketts	Landi
200714-2	Rindenholzbriketts	Bauhaus
200714-3	Rindenbriketts	Lehmann Holzbau AG
200714-4		Coop Bau & Hobby
200714-5	Braunkohlebriketts	Hornbach
200714-6		Bauhaus

**Tabelle 1: Auftragsumfang**

### 1.1 Messgrundlagen

EN 16510-1:2018 Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren

EN 13240:2001 Raumheizer

### 1.2 Messort

Die Messungen wurden am Prüfstand der Prüfstelle für Holzfeuerungen STS 0396 an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Windisch durchgeführt.

### 1.3 Vor Ort beteiligte Personen

Tom Strebel (Prüfstelle für Holzfeuerungen)  
Erich Wildhaber (Prüfstelle für Holzfeuerungen)  
Nemo Lohberger (Prüfstelle für Holzfeuerungen)  
Hans Peter Knöpfel (Prüfstelle für Holzfeuerungen)

### 1.4 Weitere beteiligte Stellen

Intertek (Schweiz) AG, 8852 Schlieren, STS 0452 (Brennstoffanalyse)

## 2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Projekts wurden die Emissionen bei Abbränden in einer nach EN 13240 zugelassenen Feuerstätte von fünf verschiedenen Brennstofftypen verglichen:

- Scheitholz (als Referenz)
- Holzbriketts
- Rindenholzbriketts
- Rindenbriketts (je von 2 verschiedenen Lieferanten)
- Braunkohlebriketts (je von 2 verschiedenen Lieferanten)

### **Brennstoffzusammensetzung**

Die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) stellt in Anhang 5 Qualitätsanforderungen an Holz- und Kohlebrennstoffe. Briketts aus naturbelassenem Holz müssen demnach die Eigenschaftsklassen A1 oder A2 der Norm SN EN ISO 17225-3 erfüllen. So zeigten vorgängige Analysen, dass die verwendeten Holzbriketts die Anforderungen der Klasse A2 bis auf einen leicht erhöhten Stickstoffgehalt erfüllten. Rindenholz- und Rindenbriketts liessen sich bezüglich der Elementarzusammensetzung nicht unterscheiden. Die Messungen haben gezeigt, dass auch das Abbrandverhalten ähnlich ist, was vermuten lässt, dass Rindenholzbriketts ähnlich hohe Rindenanteile aufweisen wie Rindenbriketts. In der weiteren Zusammenfassung wird deshalb nicht zwischen den zwei Bezeichnungen unterschieden und es ist nur von Rindenbriketts die Rede.

Diese können die Anforderungen an den Aschegehalt und den Stickstoffgehalt aufgrund ihres erhöhten Rindengehalts in der Regel nicht erfüllen, was die Analysen bestätigten. Die Rindenbriketts des einen Lieferanten erfüllten ausserdem die Anforderung an den Schwefelgehalt nicht.

Die Braunkohlebriketts entsprachen den Anforderungen der LRV.

### **Abbrand**

Abgesehen von den erhöhten Stickoxidemissionen zeigen Holzbriketts ein ähnliches Abbrandverhalten mit vergleichbaren Schadstoffemissionen wie der Referenzbrennstoff Scheitholz. Die hohen Stickoxidemissionen sind durch den zu hohen brennstoffgebundenen Stickstoffanteil in den Holzbriketts begründet.

Die Rinden- und Braunkohlebriketts brannten mit kleinerer Flamme und weniger turbulenter Strömung gegenüber Scheitholz, was in tieferen Staubemissionsfrachten resultierte (trotz grösserer Partikelanzahl, da der durchschnittliche Durchmesser des Staubs kleiner war). Aufgrund der erhöhten Emissionen der anderen gemessenen Schadstoffe sind Rinden- und Braunkohlebriketts bezüglich des Abbrandverhaltens allerdings als deutlich schlechter einzuschätzen als der Referenzbrennstoff Scheitholz.

### **Ausbrand**

Die Ausbrände erfolgten bei einem reduzierten Kaminzug von 6 Pa und geschlossener Luftzufuhr, um Gluterhaltungsbetrieb zu simulieren. Die Ausbranddauer von Rinden- und Braunkohlebriketts war um ca. einen Faktor 4 länger als bei Scheitholz. Rindenbriketts wiesen während des Ausbrands eine höhere gravimetrische Staubkonzentration auf als Scheitholz. Durch die lange Dauer des Ausbrands und die hohen CO- und OGC-Emissionen ergibt sich eine deutlich höhere Emissionsfracht für Rinden- und Braunkohlebriketts verglichen mit Scheitholz und Holzbriketts.

### **Fazit**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl beim Abbrand wie auch beim Ausbrand von Rindenbriketts deutlich höhere gasförmige Emissionen (CO, OGC, NO<sub>x</sub>) als bei Scheitholz auftraten. Während die Staubemissionen von Scheitholz und Holzbriketts im Abbrand höher war, fallen sie bei den übrigen Brennstoffen beim Ausbrand deutlich höher aus gegenüber Scheitholz und Holzbriketts.

Braunkohlebriketts benötigen hohe Temperaturen für eine Verbrennung. Auf ein Abfallen der Temperaturen reagieren sie sehr empfindlich mit erhöhten CO-Emissionen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Verbrennen von Rinden- und Braunkohlebriketts zu deutlich erhöhten gasförmigen Emissionen im Vergleich zu Scheitholz und Holzbriketts führt und nicht empfohlen werden kann.

### 3 Résumé des résultats

Dans le cadre de ce projet, les émissions de cinq types de combustibles différents ont été comparées lors de feux dans une cheminée homologuée selon la norme EN 13240:

- Bûches (comme référence)
- Briquettes de bois
- Briquettes de bois et d'écorce
- Briquettes d'écorce (provenant de 2 fournisseurs différents)
- Briquettes de lignite (provenant de 2 fournisseurs différents)

#### Composition du combustible

L'annexe 5 de l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) fixe les exigences de qualité pour les combustibles à base de bois et de charbon. En conséquence, les briquettes fabriquées à partir de bois non traité doivent répondre à la classe de propriété A1 ou A2 de la norme SN EN ISO 17225-3. Des analyses antérieures ont montré que les briquettes de bois utilisées répondaient aux exigences de la classe A2, à l'exception d'une teneur en azote légèrement accrue. Les briquettes composées de bois et d'écorce, ainsi que les briquettes d'écorce uniquement ne pouvaient pas être distinguées en terme de composition élémentaire. Les mesures ont montré que le comportement lors de la combustion était également similaire, ce qui suggère que les briquettes de bois d'écorce ont une teneur en écorce aussi élevée que les briquettes d'écorce. Par conséquent, le résumé ne fait aucune distinction entre les deux désignations de briquettes et ne fait référence qu'aux briquettes d'écorce.

Celles-ci ne peuvent généralement pas satisfaire les exigences en matière de teneur en cendres et en azote en raison de leur teneur accrue en écorce. Cela a été confirmé par les analyses. Les briquettes d'écorce d'un fournisseur ne répondaient pas non plus aux exigences en matière de teneur en soufre. Les briquettes de lignite répondaient aux exigences du LRV.

#### Combustion

Hormis l'augmentation des émissions d'oxyde d'azote, les briquettes de bois présentent un comportement de combustion similaire à celui des bûches de référence, avec des émissions polluantes comparables. Les émissions élevées d'oxyde d'azote sont dues à la teneur élevée en azote lié au combustible dans les briquettes de bois.

Les briquettes d'écorce et de lignite ont brûlé avec une flamme plus petite et un flux moins turbulent que les bûches, ce qui a permis de réduire les charges d'émission de poussière (malgré un plus grand nombre de particules, puisque le diamètre moyen de la poussière était plus petit). Cependant, en raison de l'augmentation des émissions des autres polluants mesurés, les briquettes d'écorce et de lignite doivent être considérées comme étant nettement moins bonnes que le combustible de référence, les bûches, en termes de comportement de combustion.

#### Après disparition des flammes

Les combustions totales ont été effectuées avec un tirage de la cheminée réduit de 6 Pa et une alimentation en air fermée afin de simuler l'opération de maintenance des braises après disparition des flammes. Le temps de combustion totale des briquettes d'écorce et de lignite était environ 4 fois plus long que celui des bûches. Les briquettes d'écorce ont montré une concentration de poussière gravimétrique plus élevée que les bûches pendant la combustion. La longue durée de combustion et les émissions élevées de monoxyde de carbone CO et de composés organiques volatils COV se traduisent par une charge d'émission sensiblement plus élevée pour les briquettes d'écorce et de lignite que pour les bûches et les briquettes de bois.

#### Conclusion

Les études ont montré que les émissions gazeuses (CO, COV, NO<sub>x</sub>) tant lors de la combustion que de la combustion totale des briquettes d'écorce étaient nettement plus élevées par rapport à celles des bûches. Alors que les émissions de poussières étaient significativement plus élevées pendant la combustion des bûches et des briquettes de bois, elles étaient nettement plus élevées pour les autres combustibles après la disparition des flammes, par rapport aux bûches et aux briquettes de bois.

Les briquettes de lignite nécessitent des températures élevées pour être brûlées. Elles réagissent de manière très sensible à une baisse de température avec une augmentation des émissions de CO.

Dans l'ensemble, on peut affirmer que la combustion de briquettes d'écorce et de lignite entraîne une augmentation significative des émissions gazeuses par rapport aux bûches et aux briquettes de bois et ne peut pas être recommandée.

## 4 Messgeräte

### 4.1 Gasförmige Emissionen

Die Emissionen wurden gemessen gemäss Vorgaben der EN 16510-1: 2018, A.2.3.

Messgrösse	Messgerät Typ	Messunsicherheit	Messunsicherheit nach Norm
Gasanalytoren		95 % Confidence Level	
CO	Emerson MLT4 Analysemodul	± 3 % v. MW	± 10 % v. MW oder 10 ppm
CO <sub>2</sub>	Emerson MLT4 Analysemodul	± 3 % v. MW	± 5 % v. MW oder 0.4 Vol-%
O <sub>2</sub>	Emerson MLT4 Analysemodul	± 3 % v. MW	± 5 % v. MW oder 0.4 Vol-%
NO <sub>x</sub>	Emerson NO2-NO Konverter	± 3 % v. MW	± 5 % v. MW oder 15 ppm
OGC	Emerson NGA2000 TFID Analysemodul	± 3 % v. MW	± 10 % v. MW oder 5 ppm

**Tabelle 2: Emerson Daten (v. MW = vom Messwert)**

### 4.2 Staub- und Partikelmessung

Gravimetrische Staubbmessung:

- Staubabsaugeinrichtung: GOTHE
  - Gasuhr Nr. 23444397
- Inventarnummer: 81-621
- Staubentnahmesonde: 10 mm Düse
- Inventarnummer: 91-543
- Durchflussmessung: Schwebekörper 3 – 25 l/min
- Inventarnummer: 81-621-2
- Absaugvolumenstrom: 10 l/min

Verwendete Staubfilter:

für Abbrände mit Scheitholz, Holz-, Rindenholz- und Rindenbriketts

- Glasfaser-Planfilter: Paul Gothe, Ø 45 mm

für Abbrände mit Braunkohlebriketts

- Quarzglas-Planfilter: Paul Gothe, Ø 45 mm

Partikelmessung (Anzahl und Durchmesser):

Messmethode 1: DiEM

- Online-Partikeloberflächenmessung (liefert LDSA, Anzahl und mittlerer geometrischer Durchmesser): DiSCmini (miniature Diffusion Size Classifier)
- Normierung auf die Referenzverdünnung: CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>O- (Licor 840A) und CO-Messung (MRU Optima 7)

Messmethode 2: Partector

- Online-Partikeloberflächenmessung (liefert LDSA, Anzahl und mittlerer geometrischer Durchmesser: Naneos Partector (miniature Diffusion Size Classifier, Nachfolgemodell von DiSCmini)
- Normierung auf die Referenzverdünnung: Rotationsverdünner (Matter Aerosole) mit einstellbarem Verdünnungsfaktor und insitu O<sub>2</sub>-Messung (Emerson MLT4 Analysemodul)

Messunsicherheit für beide Messmethoden:  $\pm 30\%$  v. MW.

### 4.3 Temperaturmessung

Sämtliche Temperatur-Messsensoren wurden vorgängig im Ölbad mittels eines kalibrierten Referenztemperatursensors kalibriert, gemäss dem Qualitätssicherungssystem der Prüfstelle.

Verwendetes Gerät:

- Ölbad: Haake F3
- Inventarnummer: 99-531
- Referenztemperatur: Kelvimat Typ 4323
- Inventarnummer: 82-583
- Messunsicherheit:  $\pm 0.01$  K

Folgende Temperatursensoren wurden verwendet:

Abgastemperatur: Mantelthermoelement, Typ K (Ø 3 mm)  
Umgebungstemperatur: PT100, Vierleiter, Klasse A (Ø 4 mm)

### 4.4 Druckmessung

Der Kaminzug wurde in der Messstrecke gemessen.

- Typenbezeichnung: LPX 1012
- Inventarnummer: 82-575/82-657
- Messunsicherheit: 0.74 Pa

## 4.5 Gewichtsmessung

Gewichtsmessung des gesamten Aufbaus inklusive aufgelegter Brennstoffe

- Typenbezeichnung: Pesa 600
- Inventarnummer: 82-577
- Messunsicherheit: 0.15 %

Gewichtsmessung Brennstoffe

- Typenbezeichnung: Mettler ICS445k
- Inventarnummer: 82-667
- Messunsicherheit: 0.004 %

Gewichtsmessung Staubfilter

- Typenbezeichnung: Mettler AT 261 Delta Range
- Inventarnummer: 81-650
- Messunsicherheit: 0.017% (0 – 60 g)

## 4.6 Umgebungsbedingung

Umgebungsdruck:

- Typenbezeichnung: Comet T7511
- Inventarnummer: 82-664
- Messunsicherheit: 0.3 % v. MW

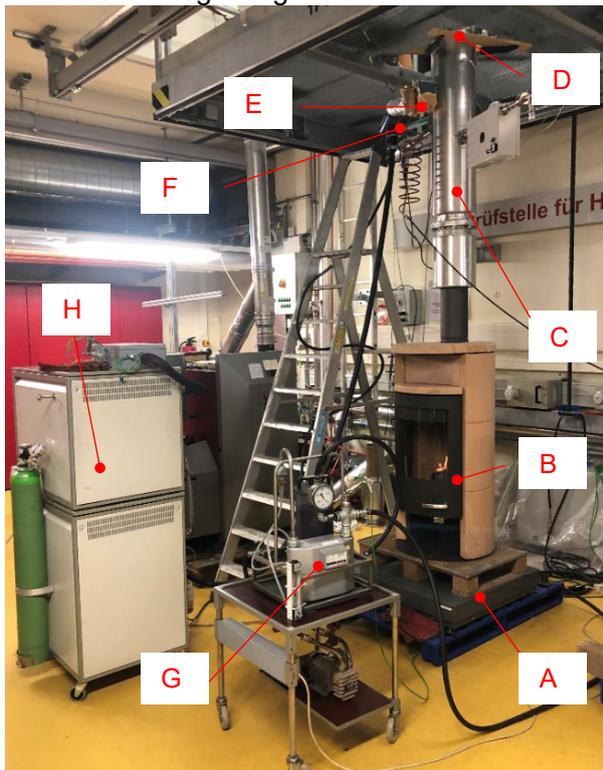
Querströmung

- Typenbezeichnung: ThermoAir 6/64
- Inventarnummer: 82-661
- Messunsicherheit: 1.5 % v. MW + 0.5% v. EW

## 5 Testaufbau

### 5.1 Teststand

Als Testfeuerung diente ein Raumheizer mit 6 kW thermischer Leistung der Firma Skantherm vom Typ BEO Sandstein Tobacco (B), zugelassen zur Verfeuerung von Scheitholz, Holz- und Braunkohlebricketts. Dieser Raumheizer wurde auf einer Waage Pesa 600 (A) platziert. Die Abführung des Rauchgases erfolgte senkrecht über eine Messstrecke (C) nach EN 16510-1 (Ø 150 mm). Am Ende der Messstrecke (Kamin) befand sich die DIEM-Messeinrichtung (D) für die Partikelanzahlmessung. Ca. 1 m stromaufwärts befindet sich die Entnahmestelle für die gasförmigen Emissionen (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, OGC), die mit der Emissionsanlage Emerson-MLT4-Analysenmodul (H) gemessen wurden. An derselben Entnahmestelle wurde auch das Probegas für die zweite Partikelanzahlmessung mittels Partector (F) entnommen. Die Entnahme für die gravimetrische Staubmessung mit einer Gothe-Sonde erfolgte am Punkt E und wurde mit der Absaugvorrichtung (G) mit einem konstanten Volumenstrom von 10 l/min abgesaugt.



**Figur 1: Teststandaufbau**

Rubrik	Beschreibung
A	Waage (Pesa 600)
B	Raumheizer BEO Sandstein Tobacco
C	Kamin mit Messstrecke nach EN 16510-1 (Ø 150 mm)
D	Partikelanzahl und Partikeldurchmesser (DIEM)
E	Entnahmestelle gravimetrische Staubmessung (Gothe)
F	Entnahmestelle gasförmige Emissionen und Partikelanzahl und Partikeldurchmesser (Partector) mit Rotationsverdünnung
G	Absaugvorrichtung für gravimetrische Staubmessung (Gothe)
H	Gasanalysator (Emerson MLT4) für CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> und OGC

**Tabelle 3: Teststand Elemente**

## 5.2 Messstrecke

Die eingesetzte Messstrecke erfüllt die Anforderungen der Normen EN 13240 und EN 16510-1

Allgemeine Vorgaben	EN 13240, A.2.1 und EN 16510-1: 2018, A.2.1
Messstrecke	EN 16510-1: 2018, A.2.3 Durchmesser der Messstrecke: 150 mm
Verbindung Feuerstätte-Messstrecke	EN 13240, A.2.4 und EN 16510-1: 2018, A.2.4

**Tabelle 4: Messstrecke Normen**

## 6 Brennstoffe

Die LRV verlangt im Anhang 5 Ziffer 32 als Mindestanforderung für Holzbriketts die Einhaltung der Klasse A2 der Norm SN EN ISO 17225-3. In der Tabelle 5 dieses Berichts sind die Analysewerte für alle getesteten Brennstoffe aufgezeigt.

Rinden- und Rindenholzbriketts haben etwa die gleichen Massenanteile der Hauptelemente C, O und H und somit auch einen ähnlichen Heiz- respektive Brennwert wie Scheitholz.

Rinden- und Rindenholzbriketts lassen sich bezüglich der Elementarzusammensetzung nicht unterscheiden. Daher ist zu vermuten, dass in den Rindenholzbriketts ein sehr hoher Rindenanteil enthalten ist und sich diese wie Rindenbriketts verhalten. Diese Vermutung wurde in den durchgeführten Messungen bestätigt.

Rinden- und Rindenholzbriketts erfüllen die Anforderungen der von der LRV geforderten Norm SN EN ISO 17225-3 bezüglich des Aschegehalts und des Stickstoffgehalts nicht. Die Rindenbriketts 2 erfüllen zusätzlich die Anforderungen an den Schwefelgehalt nicht.

Braunkohlebriketts haben einen deutlich höheren Kohlenstoffgehalt sowie einen tieferen Sauerstoffgehalt als Scheitholz. Dies führt beides zu einem höheren Heiz- und Brennwert. Wie bei Rindenholz- und Rindenbriketts liegen der Asche- und Schwefelgehalt bei Braunkohle über demjenigen von Scheitholz.

Die Holzbriketts erfüllen mit einem Stickstoffanteil von 0.55 m-% die Anforderungen der Norm SN EN ISO 17225-3 an die Klasse A2 nicht und dürften deshalb gemäss der Anforderung der LRV Anhang 5 Ziffer 32 nicht verkauft werden.

	Landi	Bauhaus	Lehmann Holzbau AG	Coop Bau & Hobby	Hornbach	Bauhaus	
	Holz	Holzbriketts	Rindenholzbriketts	Rindenbriketts 1	Rindenbriketts 2	Braunkohle 1	Braunkohle 2
Charge	190823	200714-1	200714-2	200714-3	200714-4	200714-5	200714-6
Hu trocken [MJ/kg]	18.16	18.81	18.31	18.59	18.83	23.59	23.65
Hu feucht [MJ/kg]	15.90	16.64	16.15	16.80	16.26	21.47	21.55
Br trocken [MJ/kg]	19.53	20.31	19.67	19.97	20.20	24.75	24.77
Br feucht [MJ/kg]	17.39	18.23	17.63	18.27	17.55	22.74	22.67
Wassergehalt [m-%]	11.00	10.30	10.40	8.50	12.10	8.10	8.50
Aschegehalt [m-%]*	0.50	1.10	6.36	7.31	5.44	6.21	6.05
Kohlenstoff [m-%]*	48.90	50.70	50.30	50.40	51.20	61.70	62.50
Wasserstoff [m-%]*	6.30	6.90	6.25	6.31	6.29	5.34	5.14
Stickstoff [m-%]*	0.17	0.55	0.56	0.60	0.53	0.68	0.70
Schwefel [m-%]*		0.005	0.02	0.014	0.041	0.79	0.91
Chlor [m-%]*		0.010	0.010	0.012	0.011	0.02	0.02
Sauerstoff [m-%]*	44.63	41.84	42.86	42.66	41.93	31.47	30.73

\* Massenprozent wasserfrei

**Tabelle 5: Brennstoffanalyse; orange hinterlegt: Überschreitung der Norm SN EN ISO 17225-3**

Anmerkung zu Tabelle 5: Feucht entspricht wie verfeuert



**Figur 2: Holzbriketts\_200714-01**



**Figur 3: Rindenholzbriketts\_200714-02**



**Figur 4: Rindenbriketts\_200714-03**



**Figur 5: Rindenbriketts\_200714-04**



**Figur 6: Braunkohlebriketts\_200714-05**



**Figur 7: Braunkohlebriketts\_200714-06**

## 7 Testdurchführung

### 7.1 Testprozedur

Bei allen Messungen wurde immer dieselbe Testprozedur angewendet:

#### Kaltstart, Anfeuern (Abbrand 1)

Das Anfeuermodul (Figur 8) bestand aus 2 Stück Fichte der Länge 20 cm, 3 Stück Fichte der Länge 15 cm, 3 Stück Scheitholz (Buche) der Länge 25 cm sowie 2 Stück Holzwolle. Das Gesamtgewicht des Anfeuermoduls betrug 1.82 – 1.94 kg (Tabelle 6). Die Platzierung des Anfeuermoduls im Brennraum ist bildlich in Figur 8 festgehalten.



**Figur 8: Anfeuermodul**

#### Abbrände

Der Abbrand 2 (Phase B) ist immer mit 2 Scheitholz der Länge 25 cm durchgeführt worden. Für den dritten Abbrand (Phase C) verwendete man entweder 2 Stück Scheitholz (Figur 9) oder 2 Stück Briketts. Bei den Abbränden 2 und 3 (Phasen B und C) betrug das Auflegegewicht 1.2 kg +/- 7 g.

#### Nachlegkriterien

Als Nachlegkriterien wurden folgende Bedingungen gewählt:

#### Abbrände 2 und 3 (Phasen B & C)

- Gelbe Flammen aus
- CO<sub>2</sub> Gehalt im Abgas 2.5%
- Staubfilter gewechselt



**Figur 9: Nachlegemodul**

Ausbrand

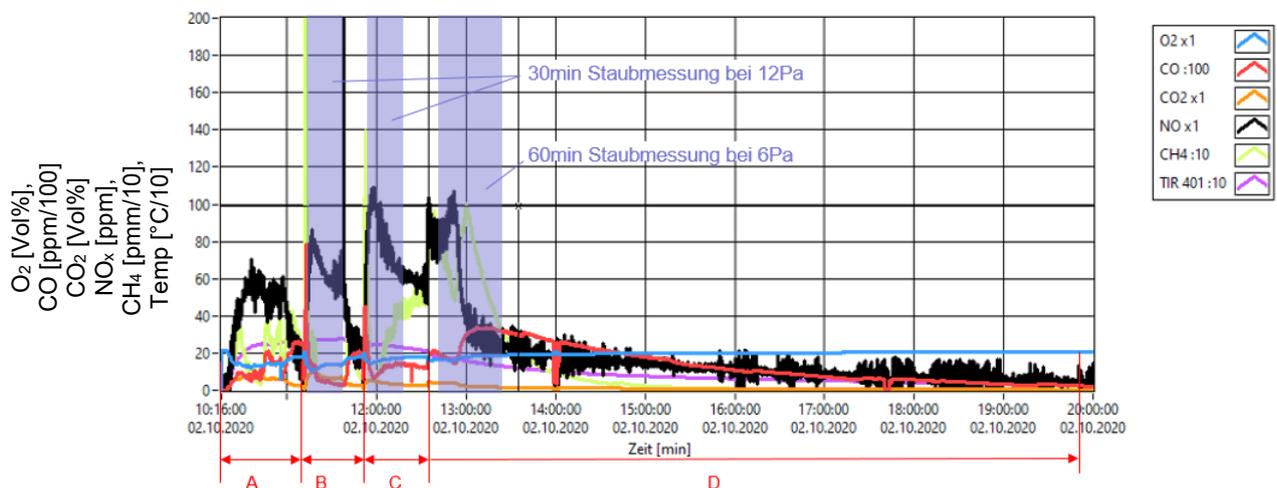
Der Ausbrand folgte immer auf Abbrand 3 nach Erreichen der Nachlegekriterien wie oben beschrieben. Nach Erreichen dieser Nachlegekriterien wurde der Kaminzug auf 6 Pa abgesenkt und die Luftzufuhr durch Schliessen des Luftestellschiebers gedrosselt. Für die Auswertung des Ausbrands wurde als Startzeitpunkt das Erreichen von 6 Pa Kaminzug bei geschlossenem Schieber festgelegt. Der Endzeitpunkt für die Auswertung wurde durch das Erreichen einer CO-Konzentration im Abgas von 10 ppm definiert. Diese Einstellung wurde gewählt, weil dadurch gemäss Briketthersteller die Ausbrandzeit und somit die Gluthaltung verlängert wird.

Auflegegewichte

Charge [-]	Anfeuern Buche [kg]	Abbrand 2 Buche [kg]	Abbrand 3 Briketts/Buche [kg]
200902	1.820	1.200	1.204
200714-1	1.887	1.203	1.204
200714-1	1.901	1.204	1.201
200714-2	1.939	1.200	1.200
200714-3	1.935	1.206	1.207
200714-4	1.933	1.203	1.203
200714-5	1.896	1.199	1.205
200714-6	1.936	1.195	1.205

**Tabelle 6: Brennstoff Auflegegewichte**

Bei den Abbränden 2 und 3 (Phasen B und C) wurde jeweils eine gravimetrische Staubmessung mit einer Absaugdauer von 30 Minuten durchgeführt. Diese begann jeweils 3 Minuten nach dem Nachlegen des Brennstoffes. Während des Ausbrands (Phase D) wurde nach der Reduktion des Kaminzugs auf 6 Pa eine gravimetrische Staubmessung mit einer Absaugdauer von 60 Minuten durchgeführt.



**Figur 10: Übersicht der Testprozedur**

Phase	Beschreibung
A	Kaltstart Anfeuern mit Scheitholz Buche, 12 Pa Kaminzug (Abbrand 1)
B	Abbrand 2 mit Scheitholz Buche, inkl. Staubmessung 30 min, bei 12 Pa Kaminzug
C	Abbrand 3 mit Scheitholz Buche oder Briketts, inkl. Staubmessung 30 min, bei 12 Pa Kaminzug
D	Ausbrand mit Brennstoff aus Phase C, inkl. Staubmessung 60 min, bei 6 Pa Kaminzug bis 10 ppm CO erreicht wurde

**Tabelle 7: Phasenbeschreibung Testprozedur**

**7.2 Luftzufuhr Einstellung**

Der Raumheizer BEO Sandstein Tobacco besitzt eine Primärluftzuführung (eingestellt durch den Schieber des Drehtellers von unten durch den Rüttelrost) und eine Sekundärluftzuführung (eingestellt durch den Luftschieber, tritt in die Brennkammer ein als Scheibenspülluft).  
 Beim Anfeuern war die Primärluftzuführung immer offen (Schieber ganz gezogen) und die Sekundärluftzuführung in der Position kleine Flamme. Nach genügendem Anfachen des Feuers wurde die Primärluftzuführung geschlossen (Schieber ganz hineingestossen).  
 Beim Nachlegen für die Abbrände mit Scheitholz, Holz-, Rindenholz- und Rindenbriketts blieb die Primärluftzuführung geschlossen. Die Sekundärluftzuführung belies man in der Position kleine Flamme. Bei den Abbränden mit Braunkohlebriketts blieb, gemäss Bedienungsanleitung der Feuerstätte, die Primärluftzuführung während des ganzen Abbrands geöffnet (Schieber ganz gezogen) und die Sekundärluftzuführung (Luftschieber) wurde in die Position Brikettmodus gestellt.  
 Für den Ausbrand (6 Pa Kaminzug) wurden die Primär- und die Sekundärluftzuführung geschlossen.



Figur 11: Primär- und Sekundärluftzuführung und Schieberstellungen

**8 Ergebnisse**

**8.1 Vergleich Standardabbrände (Abbrand 2 und 3)**

Zum Vergleich der unterschiedlichen Brennstofftypen werden in Tabelle 8 die Emissions- und Staubwerte sowie die Abbranddauer als relatives Verhältnis von Abbrand 3 (Testbrennstoff) zum jeweils vorhergehenden Abbrand 2 (Scheitholz) dargestellt. Die Abbrände wurden mit einem konstanten Kaminzug von 12 Pa bei Nennwärmeleistung durchgeführt.

Brennstoffe		3. Abbrand, Verhältnis Wert <sub>3. Abbrand</sub> zu Wert <sub>2. Abbrand</sub> , Emissionen @ 13% O <sub>2</sub>					
		CO	OGC	NOx	Staub <sub>Gravim</sub> @30'	Staub <sub>Anzahl</sub> @30'	Staub <sub>Durchm</sub> @30'
Abbrand 2	Abbrand 3	[Faktor]	[Faktor]	[Faktor]	[Faktor]	[Faktor]	[Faktor]
Scheitholz	Scheitholz	0.86	0.67	1.04	0.95	0.91	0.90
Scheitholz	Holz briketts 200714-1	0.60	0.39	1.92	0.74	1.13	0.88
Scheitholz	Rindenholz briketts 200714-2	2.66	4.56	2.29	0.52	2.75	0.47
Scheitholz	Rindenbrikett 200714-3	1.49	2.82	2.35	0.51	1.67	0.75
Scheitholz	Rindenbrikett 200714-4	1.83	2.94	2.24	0.23	2.41	0.29
Scheitholz	Braunkohlebriketts 200714-5	2.01	3.15	2.13	0.10	2.15	0.25
Scheitholz	Braunkohlebriketts 200714-6	1.49	4.34	2.27	0.24	1.21	0.40

Tabelle 8: Übersichtstabelle der Abbrände relativ zu Scheitholz bei 12 Pa Kaminzug

Farbkodierung Tabelle 8:

Emissionen Abbrand 2 (Scheitholz) x Faktor = Emissionen Abbrand 3 (Testbrennstoff)

Faktor	0 - 1	
Faktor	1 - 2	
Faktor	2 - 3	
Faktor	> 3	

Brennstoffe	3. Abbrand, Emissionen @ 13% O <sub>2</sub>					
	CO	OGC	NOx	Staub <sub>Gravim</sub> @30'	Staub <sub>Anzahl</sub> @30'	Staub <sub>Durchm</sub> @30'
	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[#/Ncm <sup>3</sup> ]	[nm]
Scheitholz	1'493	67	128	104	5.E+07	70
Holzbricketts 200714-1	1'083	58	232	98	5.E+07	77
Rindenholzbricketts 200714-2	4'913	774	275	66	1.E+08	41
Rindenbrickett 200714-3	2'651	233	287	50	4.E+07	58
Rindenbrickett 200714-4	3'353	397	290	20	9.E+07	25
Braunkohlebricketts 200714-5	3'015	310	242	16	6.E+07	24
Braunkohlebricketts 200714-6	2'897	265	257	27	7.E+07	30

Tabelle 9: Übersichtstabelle gemessene Emissionen bei 12 Pa Kaminzug

Die Abbranddauer t in Tabelle 10 bezieht sich auf die Abbrandzeit des vorangegangenen 2. Abbrandes mit Scheitholz desselben Versuches.

Brennstoffe		3. Abbrand		
		t <sub>Abbrand</sub>	Abgastemp <sub>Max</sub>	Abgastemp <sub>Mittel</sub>
Abbrand 2	Abbrand 3	[Faktor]	[°C]	[°C]
Scheitholz	Scheitholz	1.05	275	261
Scheitholz	Holzbricketts 200714-1	1.03	285	273
Scheitholz	Rindenholzbricketts 200714-2	1.00	247	230
Scheitholz	Rindenbrickett 200714-3	0.90	251	240
Scheitholz	Rindenbrickett 200714-4	1.08	247	231
Scheitholz	Braunkohlebricketts 200714-5	1.15	263	245
Scheitholz	Braunkohlebricketts 200714-6	1.06	265	247

Tabelle 10: Übersichtstabelle Abgastemperaturen und Abbranddauer bei 12 Pa Kaminzug

	Emissionsfracht 3. Abbrand relativ zu 3. Abbrand Scheitholz				
	CO	OGC	NOx	Staub	t <sub>3. Abbrand</sub>
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Scheitholz	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Holzbricketts 200714-1	0.81	0.96	2.02	0.94	1.11
Rindenholzbricketts 200714-2	3.57	12.51	2.33	0.63	1.09
Rindenbrickett 200714-3	1.93	3.77	2.43	0.48	1.09
Rindenbrickett 200714-4	2.70	7.09	2.72	0.19	1.20
Braunkohlebricketts 200714-5	2.48	5.67	2.33	0.16	1.23
Braunkohlebricketts 200714-6	2.50	5.07	2.58	0.26	1.29

Tabelle 11: Übersichtstabelle Emissionsfracht relativ zu Scheitholz bei 12 Pa Kaminzug

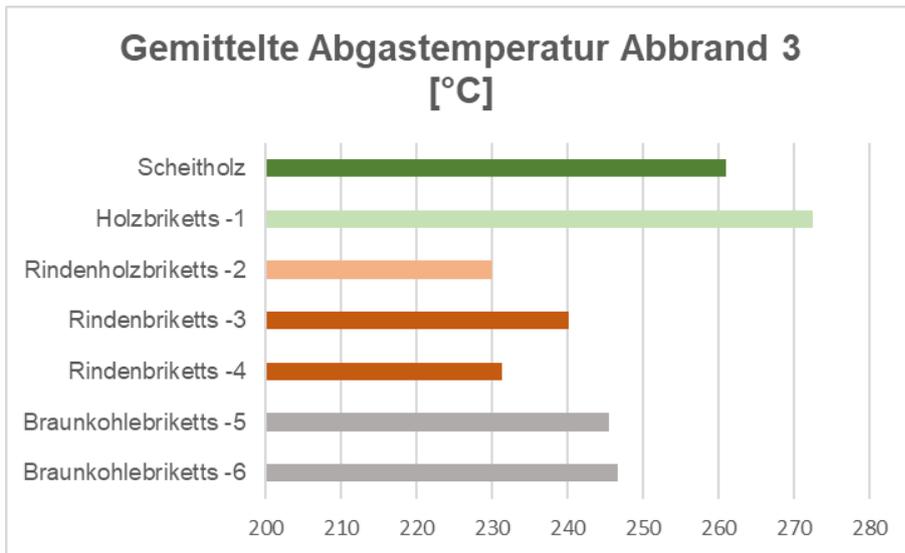
Farbkodierung Tabelle 11:

Faktor	0 - 1	
Faktor	1 - 2	
Faktor	2 - 3	
Faktor	> 3	

In den Diagrammen der nachfolgenden Kapitel bezeichnet die Ziffer am Ende der Brennstoffe die Charge z. B. Rindenbricketts -3 bedeutet Rindenbricketts der Charge 200714-3 (vgl. dazu Tabelle 8)

### 8.1.1 Gemittelte Abgastemperaturen von Abbrand 3

Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebricketts haben eine tiefere Abbrandrate. Dies führt zu niedrigeren Abgastemperaturen.

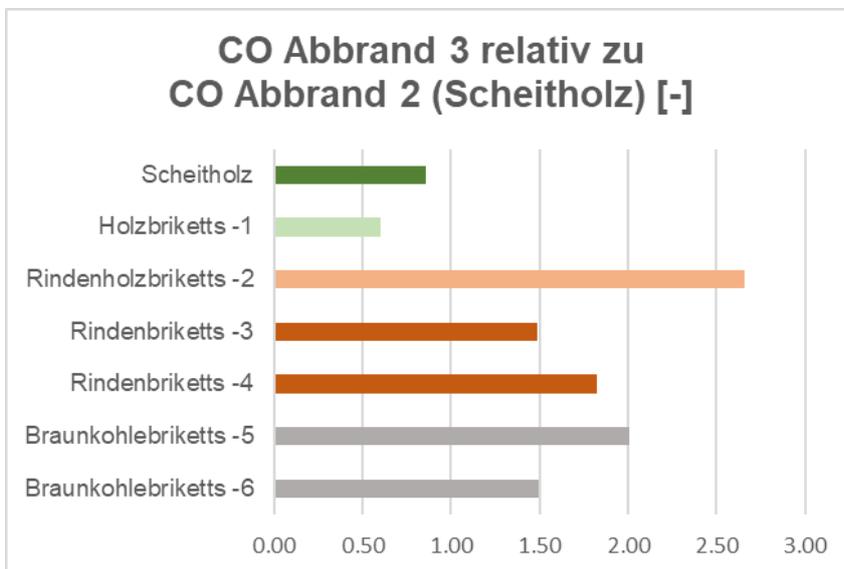


Figur 12: Gemittelte Abgastemperatur Abbrand 3

### 8.1.2 CO Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)

Durch die niedrigeren Abgastemperaturen haben Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebriketts höhere CO-Emissionen. Holzbriketts und Scheitholz zeigen ein ähnliches Abbrandverhalten und entsprechend ähnliche CO-Emissionen.

Der Vergleichswert <1 für Scheitholz (Abbrand 3) verglichen mit Scheitholz (Abbrand 2) ist zu begründen mit den höheren Feuerraumtemperaturen bei Abbrand 3 infolge der stärkeren Aufheizung der Feuerstätte durch die vorangegangenen Abbrände. Dies führt zu einer Verringerung der Emissionen zwischen Abbrand 3 und Abbrand 2.

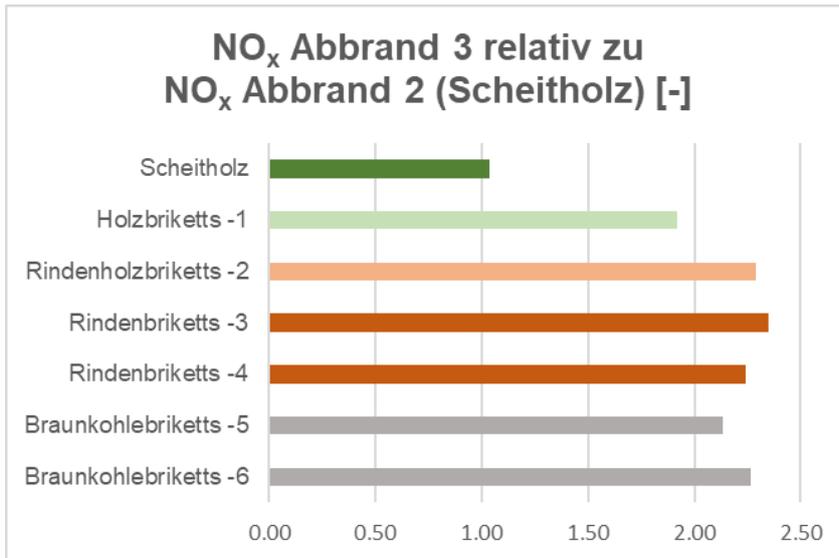


Figur 13: Vergleich CO relativ zu Scheitholz

### 8.1.3 NO<sub>x</sub> Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)

Beim Standardabbrand erzeugen alle getesteten Briketts deutlich höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen verglichen mit Scheitholz. Dies erklärt sich durch den höheren brennstoffgebundenen Stickstoffgehalt der getesteten Briketts gegenüber Scheitholz (Tabelle 5). Wobei die resultierenden NO<sub>x</sub>-Emissionen nicht nur durch den Stickstoffgehalt des Brennstoffs erklärbar sind. Ein weiterer Faktor ist der Wassergehalt des Brennstoffes. Über daraus resultierende OH-Radikale (bei Luftüberschuss) wird die Stickstoffoxidation unterstützt und verstärkt. Durch den höheren Anteil an brennstoffgebundenen Stickstoff bei Braunkohlebriketts würde man auch höhere NO<sub>x</sub>-Werte erwarten. Der Wassergehalt bei Braunkohlebriketts ist jedoch geringer. Daher ist auch der Beitrag zu der NO<sub>x</sub>-Bildung über die OH-Radikale kleiner.

Weitere wichtige Parameter sind lokale Temperaturen und Sauerstoffgehalte<sup>1</sup>. Diesbezüglich sind Aussagen mit den vorliegenden Daten jedoch nicht möglich.



Figur 14: Vergleich NO<sub>x</sub> relativ zu Scheitholz

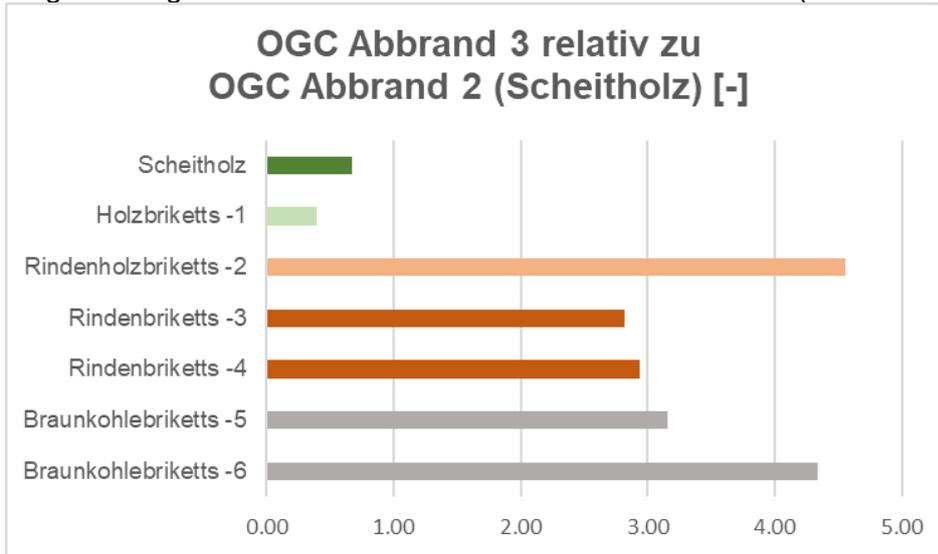
### 8.1.4 OGC Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)

Die niedrigeren Abgastemperaturen bei Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebriketts führen zu höheren OGC-Emissionen. Holzbriketts und Scheitholz haben ein ähnliches Abbrandverhalten und deutlich tiefere OGC-Emissionen.

Der Vergleichswert <1 für Scheitholz (Abbrand 3) verglichen mit Scheitholz (Abbrand 2) ist zu begründen mit den höheren Feuerraumtemperaturen bei Abbrand 3 infolge der stärkeren Aufheizung der

<sup>1</sup> Energie aus Biomasse, M. Kaltschmitt, 3. Auflage 2016

Feuerstätte durch die vorangegangenen Abbrände. Dies führt grundsätzlich zu einer leichten Verzerrung des Vergleiches zum Vorteil der untersuchten Brennstoffe (Abbrand 3).

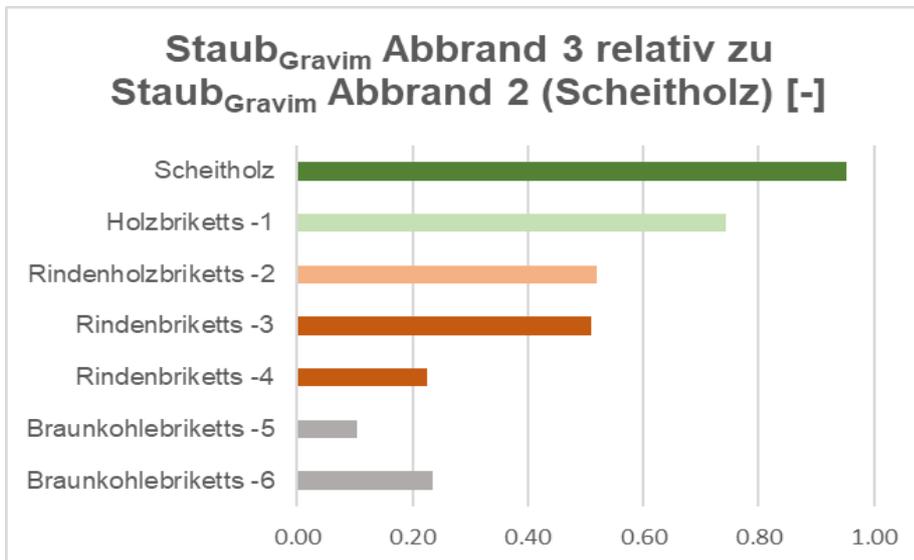


**Figur 15: Vergleich OGC relativ zu Scheitholz**

### 8.1.5 Staub Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)

#### 8.1.5.1 Staub gravimetrisch relativ zu Scheitholz

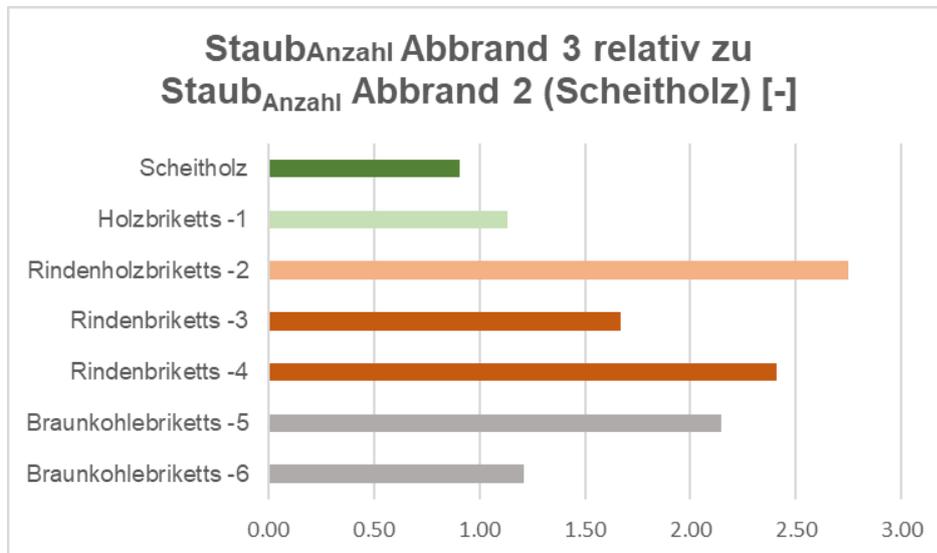
Die gravimetrischen Staubmessungen mit der Gothe-Absaugvorrichtung ergeben die höchsten Staubemissionen für Scheitholz beim Standardabbrand. Dies kann durch die höhere Abbrandrate des Brennstoffs und der damit einhergehenden höheren Turbulenz der Flamme erklärt werden.



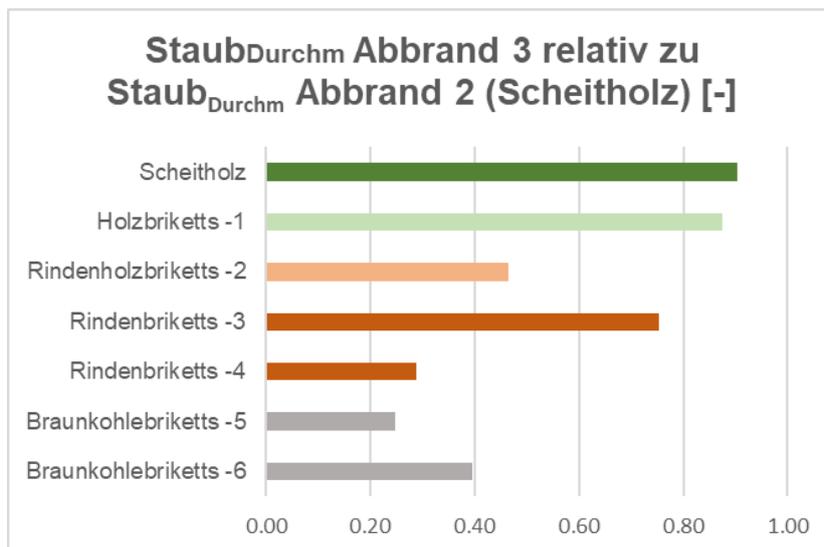
**Figur 16: Vergleich gravimetrische Staubmessung Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)**

### 8.1.5.2 Partikelanzahl und Partikeldurchmesser relativ zu Scheitholz

Obwohl Scheitholz und Holzbriketts gravimetrisch gemessen die höchsten Staubemissionen aufweisen, emittieren sie die geringste Anzahl an Partikeln. Dies ist durch die Koagulation (Zusammenballen von Partikel) zu erklären. Bei höheren Staubemissionen bilden sich daher auch über die Zeit grössere Partikel. Wodurch die Anzahl der Partikel abnimmt.



Figur 17: Vergleich Partikelanzahl Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)

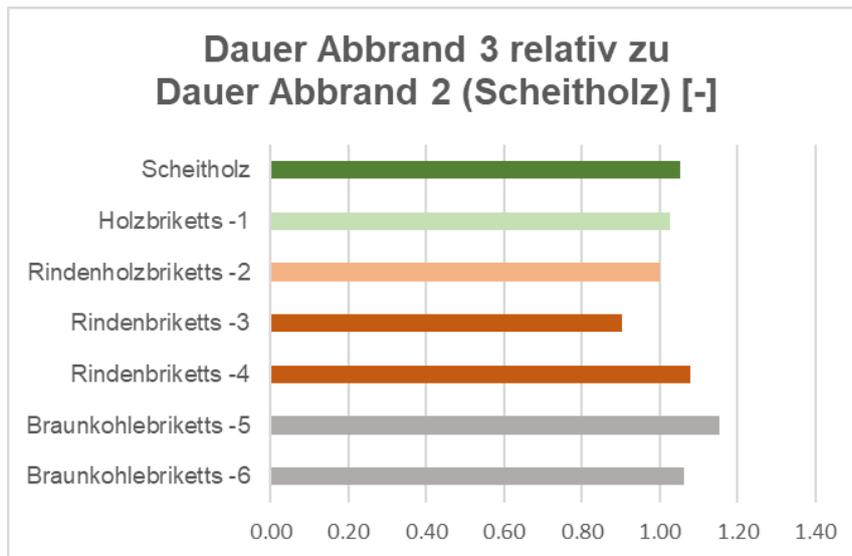


Figur 18: Vergleich mittlerer geometrischer Partikeldurchmesser Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)

### 8.1.6 Abbranddauer Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)

Rindenholzbriketts und Rindenbriketts zeigten eine tiefere Abbrandrate, was zu einem flachen CO<sub>2</sub> Verlauf mit generell tieferen CO<sub>2</sub> Werten führte während des gesamten Abbrands gegenüber Holz. Braunkohle hat einen höheren Kohlenstoffanteil in der Brennstoffzusammensetzung, was zu höheren CO<sub>2</sub> Emissionen führte.

Das Nachlegekriterium wurde für alle Brennstoffe gleich gehandhabt und bezog sich auf den CO<sub>2</sub> Gehalt im Abgas (gemäss EN 16510-1) und das Löschen der gelben Flammen. Die Zeitdauer bis zum Erreichen dieser Kriterien unterscheidet sich wenig zwischen den Brennstoffen (Variation von +/- 10%). Die Unterschiede zeigen sich in der deutlich längeren Ausbrandzeiten von Rindenholzbriketts, Rindenbriketts und Braunkohlebriketts, siehe hierzu Kapitel 8.3.5.



Figur 19: Vergleich Abbranddauer Abbrand 3 relativ zu Abbrand 2 (Scheitholz)

## 8.2 Vergleich Standardabbrände relativ zu Holzbriketts

Holzbriketts verhalten sich sehr ähnlich wie Scheitholz. Deutliche Abweichungen sind nur in den NO<sub>x</sub>-Emissionen erkennbar. Diese sind mit dem im Vergleich zu Scheitholz hohen brennstoffgebundenen Stickstoffanteil (siehe Analysewerte Tabelle 5) zu erklären. Für die anderen Emissionen gelten die Feststellungen aus Kapitel 8.1.

Brennstoffe		Vergleich des 3. Abbrands mit <b>Holzbriketts</b>					
		Verhältnis Wert <sub>3. Abbrand</sub> zu Wert <sub>3. Abbrand Holzbriketts</sub>			Emissionen @ 13% O <sub>2</sub>		
		CO	OGC	NOx	Staub <sub>Gravim</sub> @30'	Staub <sub>Anzahl</sub> @30'	Staub <sub>Durchm</sub> @30'
		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Scheitholz	Scheitholz	1.38	1.16	0.55	1.06	1.06	0.90
Scheitholz	Holzbriketts 200714-1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Scheitholz	Rindenholzbriketts 200714-2	4.54	13.37	1.18	0.67	2.43	0.53
Scheitholz	Rindenbrikett 200714-3	2.45	4.03	1.23	0.51	0.88	0.75
Scheitholz	Rindenbrikett 200714-4	3.10	6.86	1.25	0.20	2.09	0.32
Scheitholz	Braunkohlebrikett 200714-5	2.79	5.36	1.04	0.17	1.28	0.31
Scheitholz	Braunkohlebrikett 200714-6	2.68	4.58	1.10	0.28	1.48	0.38

**Tabelle 12: Übersichtstabelle der Abbrände relativ zu Holzbriketts bei 12 Pa Kaminzug**  
Emissionen Abbrand 3 (Holzbriketts) x Faktor = Emissionen Abbrand 3 (Testbrennstoff)

Brennstoffe		Vergleich des 3. Abbrands mit <b>Holzbriketts</b>		
		Verhältnis Wert <sub>3. Abbrand</sub> zu Wert <sub>3. Abbrand Holzbriketts</sub>		
		t <sub>Abbrand</sub>	Abgastemp <sub>Max</sub>	Abgastemp <sub>Mittel</sub>
		[-]	[-]	[-]
Scheitholz	Scheitholz	1.05	0.97	0.96
Scheitholz	Holzbriketts 200714-1	1.00	1.00	1.00
Scheitholz	Rindenholzbriketts 200714-2	0.97	0.87	0.84
Scheitholz	Rindenbrikett 200714-3	0.95	0.88	0.88
Scheitholz	Rindenbrikett 200714-4	1.08	0.87	0.85
Scheitholz	Braunkohlebrikett 200714-5	1.15	0.92	0.90
Scheitholz	Braunkohlebrikett 200714-6	1.10	0.93	0.91

**Tabelle 13: Übersichtstabelle Zeit und Abgastemperatur relativ zu Holzbriketts bei 12 Pa Kaminzug**

Farbkodierung Tabelle 12 und Tabelle 13:

Faktor	0 - 1	
Faktor	1 - 2	
Faktor	2 - 3	
Faktor	> 3	

### 8.3 Vergleich Ausbrände

Die Ausbrände erfolgten bei vermindertem Kaminzug von 6 Pa und geschlossener Luftzufuhr, um Gluterhaltungsbetrieb zu simulieren (siehe in Kapitel 7.1 Testprozedur). Eine Normierung auf 13 % Restsauerstoff würde zu grossen Korrekturen der Emissionswerte bei hohem Restsauerstoffgehalt führen. Aus diesem Grund wurden die nicht normierten gemessenen Emissionsmesswerte für die Vergleiche verwendet. Einzige Ausnahme sind die gravimetrischen Staubmessungen (Dauer 60 min), die auf 13 % Restsauerstoffgehalt normiert worden sind (Tabelle 14).

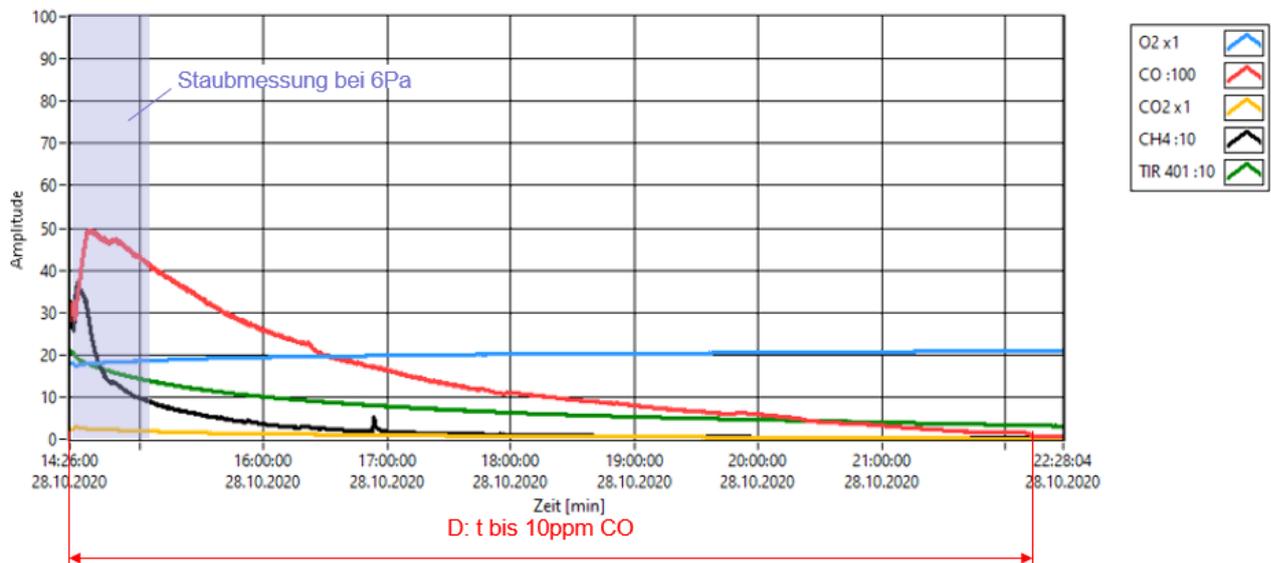
Bei den in der Tabelle 14 aufgelisteten Namen z. B. Holzbriketts 200714-1 beziehen sich die Zahlen auf die Nummern der Brennstoffanalysen.

	Absolutwerte während des Ausbrands mit 6 Pa Zug und geschlossenem Luftschieber						
	Emissionen @ gemessenem O <sub>2</sub>			Emissionen @ 13% O <sub>2</sub>			t bis 10ppm CO
	CO	OGC	NO <sub>x</sub>	Staub <sub>Gravim</sub> @60'	Staub <sub>Anzahl</sub> @60'	Staub <sub>Durchm</sub> @60'	
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[#/Ncm <sup>3</sup> ]	[nm]	[hh:mm]
Scheitholz	2'318	5	17	3	2.100E+07	20.0	02:24
Holzbriketts 200714-1	1'118	5	17	14	3.450E+07	36.0	02:45
Rindenholz briketts 200714-2	2'771	84	56	37	4.850E+07	30.1	08:38
Rindenbrikett 200714-3	2'320	80	54	23	2.650E+07	43.0	08:49
Rindenbrikett 200714-4	2'280	114	47	29	2.550E+07	38.1	09:25
Braunkohlebriketts 200714-5	2'789	27	26	< 2	5.516E+06	10.6	08:21
Braunkohlebriketts 200714-6	2'464	13	21	< 2	5.320E+06	10.0	09:21

**Tabelle 14: Vergleichstabelle Ausbrände bei 6 Pa Kaminzug**

Die Ausbranddauer ist hier definiert als der Zeitabschnitt angefangen von der Reduzierung des Kaminzugs auf 6 Pa bis zum Erreichen von 10 ppm CO im Abgas. Figur 20 zeigt einen typischen Verlauf eines solchen Ausbrands.

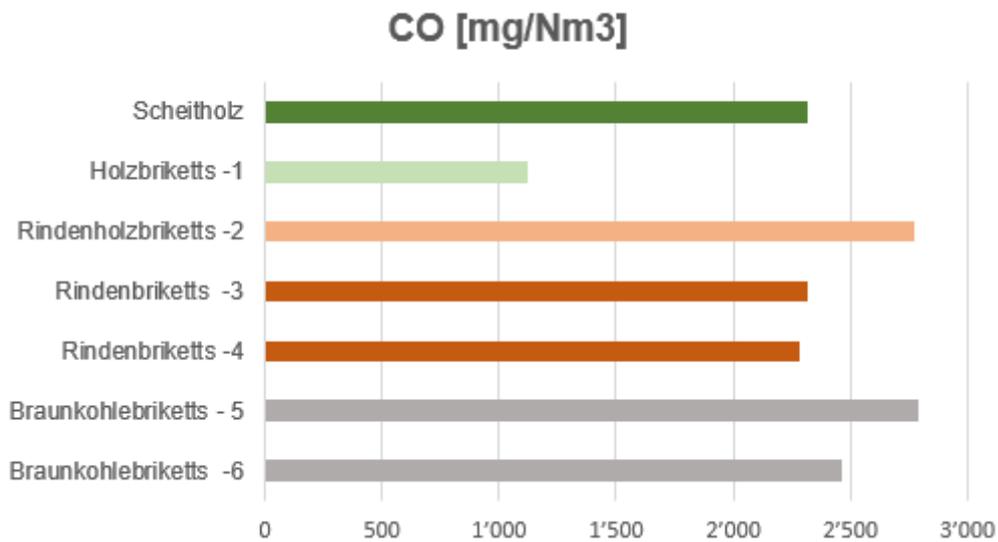
3 Minuten nach Beginn des Ausbrands wurde eine Staubmessung mit einer Dauer von 60 Minuten gestartet (blau markierter Bereich in Figur 20). Über diesen Zeitraum sind auch Anzahl und Durchmesser der Staubpartikel mittels DIEM und Partector erfasst worden.



**Figur 20: Betrachtetes Zeitfenster beim Ausbrand**

### 8.3.1 CO-Emissionen während des Ausbrands

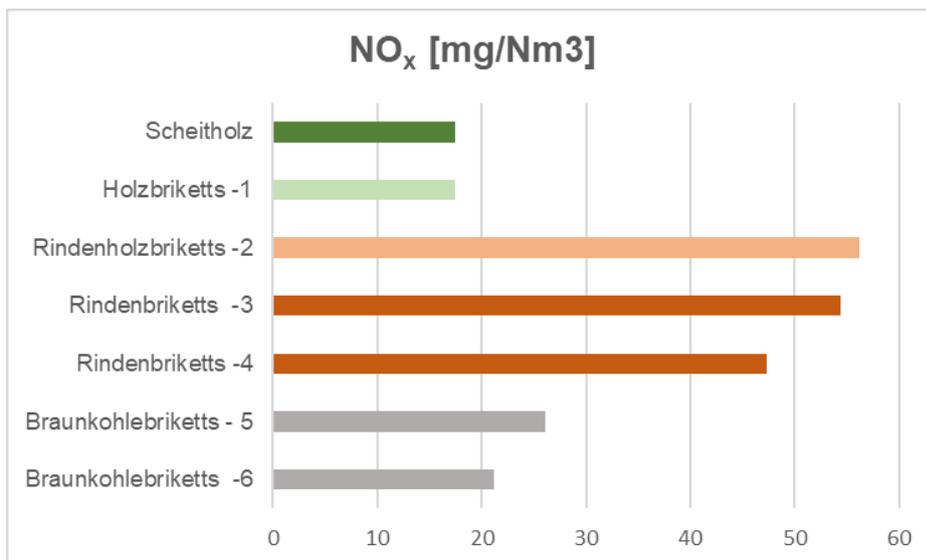
Gemittelt über die gesamte Ausbranddauer zeigen alle Brennstoffe ausser Holzbriketts ähnliche CO-Emissionswerte. Zu beachten ist die unterschiedliche Dauer der jeweiligen Ausbrände, dies ist berücksichtigt in der Ausweisung der relativen Emissionsfrachten in Kapitel 8.3.6



Figur 21: CO-Emissionen während des Ausbrands

### 8.3.2 NO<sub>x</sub>-Emissionen während des Ausbrands

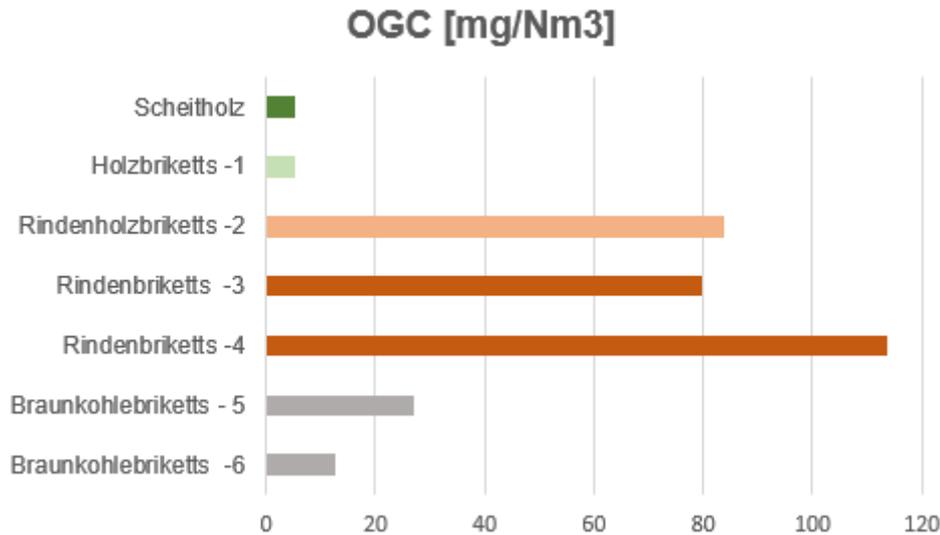
Aufgrund der tiefen Temperaturen während des Ausbrands kommt nur brennstoffgebundener Stickstoff als Quelle für die Stickoxid-Emissionen in Frage. Obwohl Rinden- und Braunkohlebriketts hohe Stickstoffanteile im ursprünglichen Brennstoff aufweisen, scheint dieser in der Glut von Braunkohlebriketts nicht mehr vorhanden zu sein. Die Rindenbriketts hingegen zeigen auch in der Glutphase erhöhte NO<sub>x</sub>-Emissionen, was darauf hindeutet, dass der Stickstoff-Anteil in der Glut erhöht ist. Das Niveau der NO<sub>x</sub> Emissionen ist innerhalb der Brennstoffkategorien Rindenbriketts, holzartig (Scheitholz, Holzbriketts) und Braunkohle vergleichbar.



Figur 22: NO<sub>x</sub>-Emissionen während des Ausbrands

### 8.3.3 OGC Emissionen während des Ausbrands

Rindenbriketts zeigen deutlich erhöhte OGC-Emissionen während des Ausbrands, obwohl die CO-Emissionen aller Brennstoffe vergleichbar sind. Die Ursache dieses Verhaltens muss in der Zusammensetzung der Rinde liegen, kann jedoch auf der Grundlage der vorhandenen Messdaten und Brennstoffanalysen nicht genauer begründet werden.

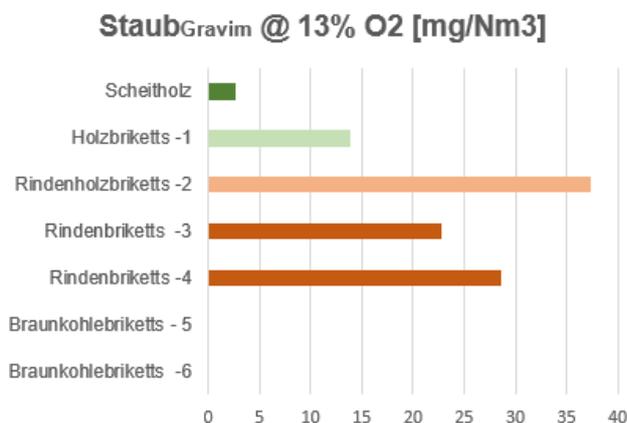


Figur 23: OGC-Emissionen während des Ausbrands

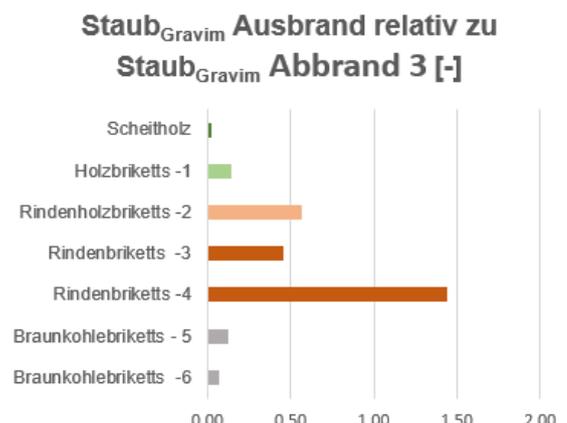
### 8.3.4 Staub-Emissionen während des Ausbrands

#### 8.3.4.1 Staub-Emissionen gravimetrisch gemessen

Für die gravimetrische Staubmessung ist ein konstanter Volumenstrom von 10 l/min während 60 Minuten entnommen worden. Gestartet wurde die Staubmessung unmittelbar nach dem Schliessen der Sekundärluftzuführung. Die Staubmessung während des Ausbrands hat gezeigt, dass die Staubemissionen während des Ausbrands tiefer liegen, verglichen mit der Staubmessung des Abbrands 3 (Ausnahme Rindenbrikett -4). Die Reduktion der Staubemissionen bei Scheitholz, Holz- und Braunkohlebriketts war deutlich ausgeprägter als bei Rindenbriketts. Die Staubwerte für Braunkohle lagen unterhalb der Nachweisgrenze für das gravimetrische Staubmessverfahren.



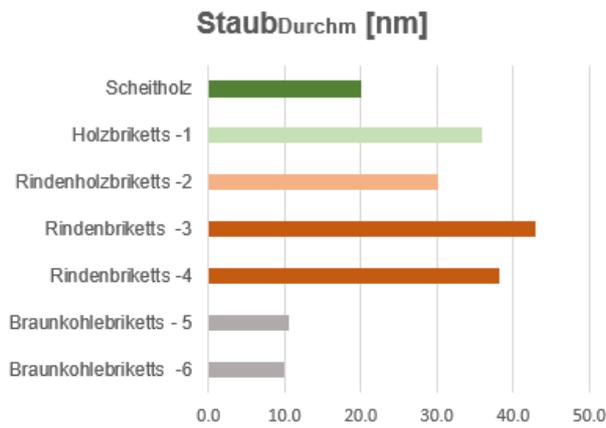
Figur 24: Gravimetrisch gemessenen Staub-Emissionen während des Ausbrands



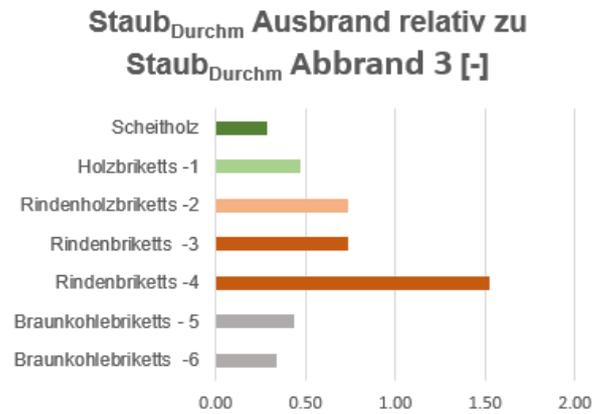
Figur 25: Vergleich der gravimetrisch gemessenen Staubemissionen zwischen Ausbrand und Abbrand 3

**8.3.4.2 Staub Partikelanzahl und Partikeldurchmesser**

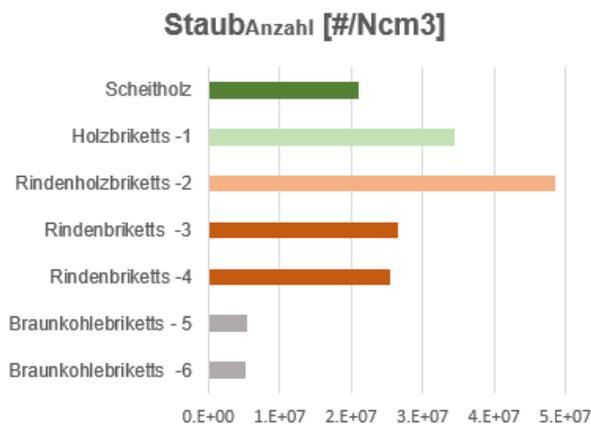
Beim Ausbrand sind bei allen Brennstoffen die Partikel erwartungsgemäss kleiner als während der Abbrände. Die geringere Abnahme der Partikeldurchmesser bei Rinden- und Rindenholzbriketts lässt sich durch die hohen gravimetrischen Staubwerte und der dadurch bedingten Koagulation erklären (für Rindenbriketts-4 wurde sogar eine Zunahme beobachtet).



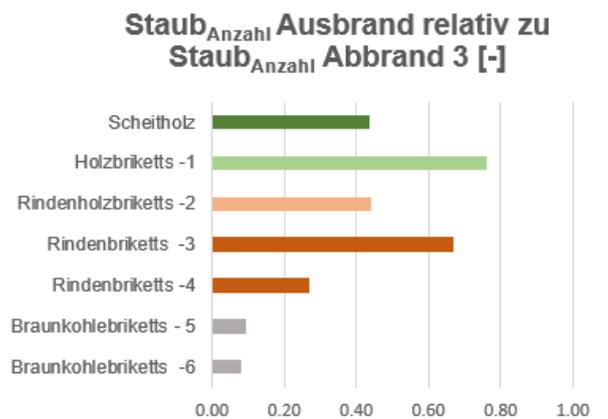
**Figur 26: Staubpartikeldurchmesser während des Ausbrands**



**Figur 27: Vergleich der Staubpartikeldurchmesser zwischen Ausbrand und Abbrand 3**



**Figur 28: Staubpartikelanzahl während des Ausbrands**

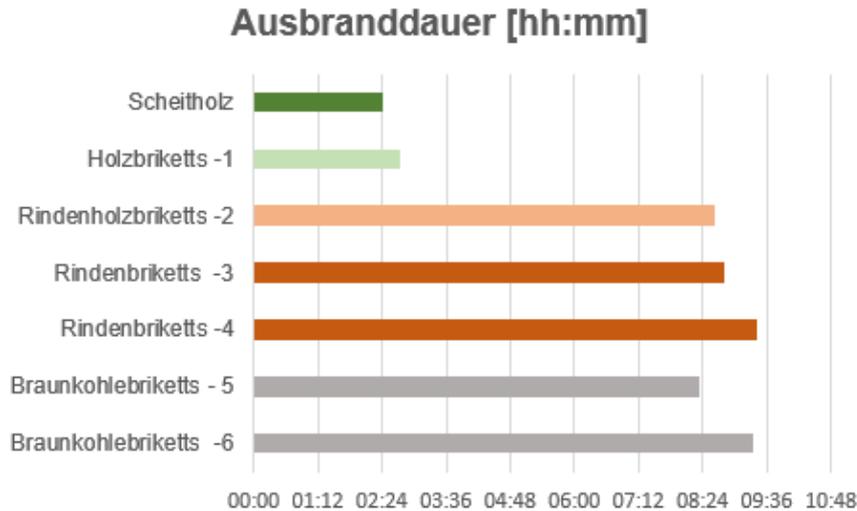


**Figur 29: Vergleich der Staubpartikelanzahl zwischen Ausbrand und Abbrand 3**

### 8.3.5 Vergleich Ausbranddauer

Die in Figur 30 dargestellten Ausbranddauern zeigen die Zeitdauer zwischen dem Schliessen des Luftschiebers (Sekundärluftzufuhr) sowie der Reduktion des Kaminzugs bis zum Erreichen von 10 ppm CO-Emissionen.

Die Ausbranddauer von Braunkohlebriketts und Briketts mit Rindenanteil sind deutlich verlängert im Vergleich zu Scheitholz und Holzbriketts. Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebriketts haben eine tiefere Abbrandrate des Brennstoffs während des Abbrands und somit verbleibt nach dem Abbrand ein höherer Brennstoffanteil in der Brennkammer der langsam weiterreagiert. Aus diesem Grund werden solche Brennstoffe im Verkauf als "gluthaltend" beworben.



Figur 30: Ausbranddauer bis zum Zeitpunkt der CO-Abgaskonzentration von 10 ppm

### 8.3.6 Relative gasförmige Emissionsfracht beim Ausbrand

Tabelle 15 zeigt die gasförmige Emissionsfracht der Ausbrände für die verschiedenen getesteten Brennstoffe relativ zu Scheitholz. Die gasförmigen Emissionsfrachten wurden mittels Ausbranddauer und gemittelter Emissionskonzentrationen berechnet. Dieser Wert wurde ins Verhältnis zu Scheitholz gesetzt, welcher auf dieselbe Art und Weise berechnet worden ist. So konnten relative Emissionsfrachten bestimmt werden, ohne den Abgasvolumenstrom gemessen zu haben.

Die Emissionsfrachten der Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebriketts erhöhen sich durch die entsprechend längere Ausbrandzeit. Auffallend sind die überproportional erhöhten Emissionsfrachten für OGC.

	Emissionsfracht Start des Ausbrands bis 10 ppm CO erreicht wurden				
	CO [-]	OGC [-]	NOx [-]	Staub [-]	t <sub>Ausbrand</sub> [-]
Scheitholz	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Holzbriketts 200714-1	0.55	1.13	1.15	5.58	1.15
Rindenholzbriketts 200714-2	4.30	56.42	11.60	46.51	3.60
Rindenbrikett 200714-3	3.68	54.95	11.48	28.97	3.67
Rindenbrikett 200714-4	3.86	83.58	10.67	38.90	3.92
Braunkohlebriketts 200714-5	4.19	17.64	5.21	1.22	3.48
Braunkohlebriketts 200714-6	4.14	9.26	4.73	1.37	3.90

Tabelle 15: Übersichtstabelle der Emissionsfracht relativ zu Scheitholz bei 6 Pa Kaminzug

Emissionsfracht Testbrennstoff = Emissionsfracht Scheitholz x Faktor

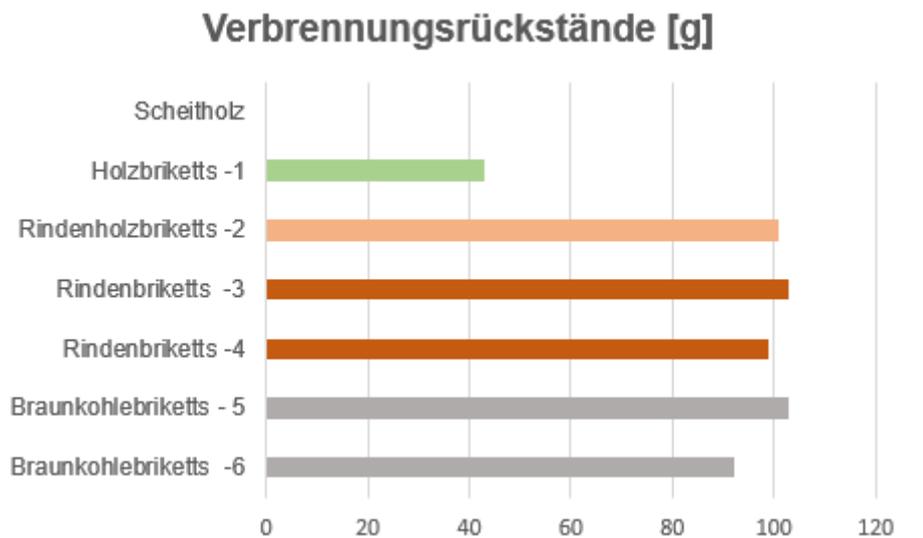
Farbkodierung Tabelle 15:

Faktor	0 - 1	
Faktor	1 - 2	
Faktor	2 - 3	
Faktor	> 3	

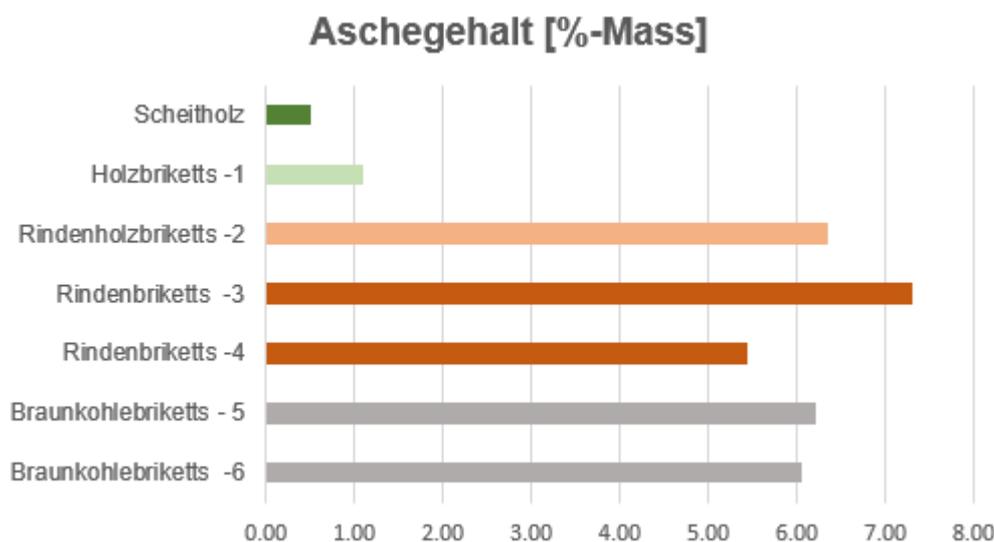
### 8.4 Verbleibende Rückstände nach den Abbränden

Die Figur 31 gezeigten Werte beinhalten die gesamten Rückstände von Asche und nicht verbranntem Brennstoff aus dem Brennraum und dem Aschekasten nach der Versuchsreihe eines Messtages (kalt, bei Raumtemperatur gewogen). Diese Rückstände bildeten sich aus dem aufgelegten Brennstoff der Abbrände 1 bis 3, wovon die ersten beiden Abbrände immer mit Scheitholz gemacht wurden und der dritte Abbrand jeweils mit Briketts oder Scheitholz erfolgte.

Der Rückstand für Scheitholz wurde nicht gemessen. Daher fehlt dieser Wert in Figur 31. Vergleicht man jedoch die Rückstände des Messtages mit Holzbriketts, so ist ersichtlich, dass Abbrände mit Briketts mit Rindenanteil oder Braunkohlebriketts gewichtsmässig mehr Rückstände aufweisen entsprechend dem höheren Aschegehalt dieser Brennstoffe (siehe Figur 32).



Figur 31: Gewogene Rückstände aus Brennraum und Aschekasten eines Messtages



Figur 32: Aschegehalt der Brennstoffe

## 9 Diskussion der Resultate

### 9.1 Diskussion Ergebnisse der Standardabbrände

Brennstoffe		3. Abbrand, Verhältnis Wert <sub>3. Abbrand</sub> zu Wert <sub>2. Abbrand</sub> : Emissionen @ 13% O <sub>2</sub>					
		CO	OGC	NOx	Staub <sub>Gravim @30'</sub>	Staub <sub>Anzahl @30'</sub>	Staub <sub>Durchm @30'</sub>
Abbrand 2	Abbrand 3	[Faktor]	[Faktor]	[Faktor]	[Faktor]	[Faktor]	[Faktor]
Scheitholz	Scheitholz	0.86	0.67	1.04	0.95	0.91	0.90
Scheitholz	Holzbricketts 200714-1	0.60	0.39	1.92	0.74	1.13	0.88
Scheitholz	Rindenholzbricketts 200714-2	2.66	4.56	2.29	0.52	2.75	0.47
Scheitholz	Rindenbrickett 200714-3	1.49	2.82	2.35	0.51	1.67	0.75
Scheitholz	Rindenbrickett 200714-4	1.83	2.94	2.24	0.23	2.41	0.29
Scheitholz	Braunkohlebricketts 200714-5	2.01	3.15	2.13	0.10	2.15	0.25
Scheitholz	Braunkohlebricketts 200714-6	1.49	4.34	2.27	0.24	1.21	0.40

**Tabelle 16: Übersichtstabelle der Abbrände relativ zu Scheitholz bei 12 Pa Kaminzug (entspricht der Tabelle 8).**

Emissionen Abbrand 2 (Scheitholz) x Faktor = Emissionen Abbrand 3 (Testbrennstoff)

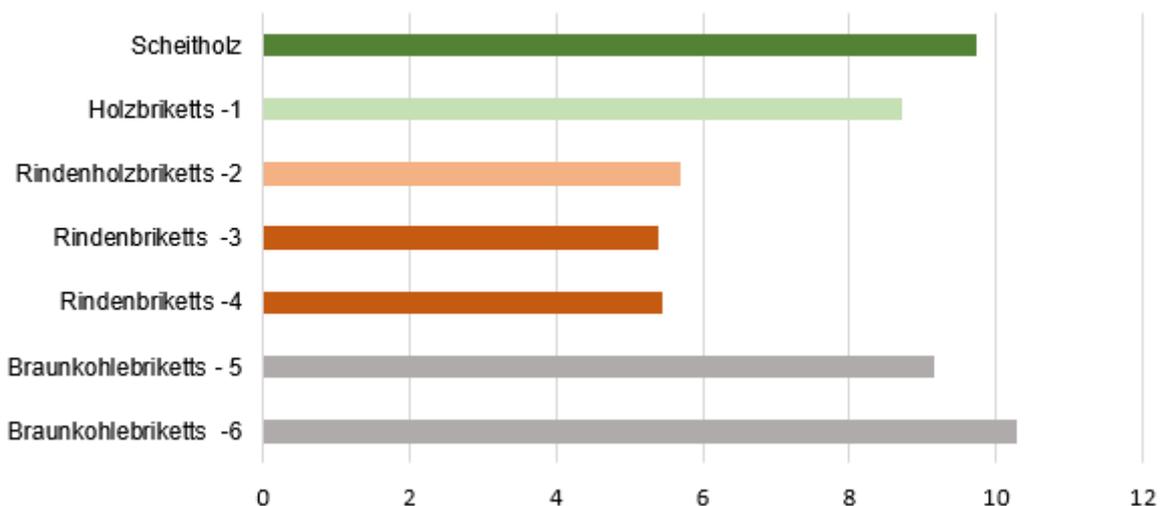
Farbkodierung Tabelle 16:

Faktor	0 - 1	
Faktor	1 - 2	
Faktor	2 - 3	
Faktor	> 3	

Wie aufgrund der hohen Stickstoffkonzentrationen in der Brennstoffanalyse (Kapitel 6) anzunehmen war, wiesen die Rinden- und die Braunkohlebricketts um mehr als einen Faktor 2 erhöhte NO<sub>x</sub>-Emissionen gegenüber Scheitholz auf. Die Holzbricketts erfüllten die Anforderungen der in der LRV geforderten Norm bezüglich Stickstoffgehalt im Brennstoff nicht. Dies macht sich auch in den Messungen bemerkbar, mit um den Faktor 1.9 erhöhten NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Die CO- und OGC-Emissionen sind mit Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebricketts deutlich höher als mit Scheitholz oder Holzbricketts. Dies ist auf die geringeren Abbrandraten und die daraus resultierenden tieferen Brennraumtemperaturen zurückzuführen. Die geringere Abbrandrate zeigt sich auch in tiefen maximalen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas bei den Abbränden mit Rinden- und Rindenholzbricketts verglichen mit Scheitholz. Siehe hierzu Figur 33. Die Braunkohleabbrände können nicht direkt mit den Abbränden von Holz und holzartigen Brennstoffen (Rinden-, Rindenholz- und Holzbricketts) verglichen werden, da die Brennstoffzusammensetzung erheblich abweicht und die Luftpfeinstellung eine andere war.

#### Maximaler CO<sub>2</sub> Wert während Abbrand 3 [Vol%]



**Figur 33: Maximaler CO<sub>2</sub> Wert während Abbrand 3**

Die gravimetrisch gemessenen Staubemissionen bei Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebriketts sind deutlich tiefer, obwohl die Anzahl der Partikel höher ist. Durch die geringeren Durchmesser der Partikel fallen diese bei der gravimetrischen Messung weniger stark ins Gewicht. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich durch die hohen OGC-Emissionen in atmosphärischen Prozessen sekundärer Feinstaub bildet (sog. sekundäre organische Aerosole; SOA).

Trotz der reduzierten Staubemissionen sind die Brennstoffe Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebriketts bezüglich des Abbrandverhaltens als deutlich schlechter einzuschätzen als der Referenzbrennstoff Scheitholz.

Rinden- und Rindenholzbriketts erfüllen die Anforderungen der in der LRV geforderten Norm (SN EN ISO 17225-3 Klasse A1 oder A2) an die Brennstoffqualität nicht.

Bei der Betrachtung der Werte ist zu beachten, dass die Staub- und die CO-Messungen nicht gemäss Messempfehlungen des BAFU<sup>2</sup> durchgeführt wurden. Da der Brennstoff und nicht die Feuerung untersucht wurde, ist ein Vergleich mit den Grenzwerten der LRV nicht sinnvoll und wird nicht angestrebt. Abgesehen von den zu hohen Stickoxidemissionen zeigen Holzbriketts ein ähnliches Abbrandverhalten mit vergleichbaren Schadstoffemissionen wie der Referenzbrennstoff Scheitholz.

## 9.2 Diskussion Ergebnisse des Ausbrands

	Absolutwerte während des Ausbrands mit 6 Pa Zug und geschlossenem Luftschieber						
	Emissionen @ gemessenem O <sub>2</sub>			Emissionen @ 13% O <sub>2</sub>			
	CO	OGC	NOx	Staub <sub>gravim</sub> @60'	Staub <sub>Anzahl</sub> @60'	Staub <sub>Durchm</sub> @60'	t bis 10ppm CO
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[#/Ncm <sup>3</sup> ]	[nm]	[hh:mm]
Scheitholz	2'318	5	17	3	2.100E+07	20.0	02:24
Holzbriketts 200714-1	1'118	5	17	14	3.450E+07	36.0	02:45
Rindenholzbriketts 200714-2	2'771	84	56	37	4.850E+07	30.1	08:38
Rindenbrikett 200714-3	2'320	80	54	23	2.650E+07	43.0	08:49
Rindenbrikett 200714-4	2'280	114	47	29	2.550E+07	38.1	09:25
Braunkohlebriketts 200714-5	2'789	27	26	< 2	5.516E+06	10.6	08:21
Braunkohlebriketts 200714-6	2'464	13	21	< 2	5.320E+06	10.0	09:21

**Tabelle 17: Vergleichstabelle Ausbrände bei 6 Pa Kaminzug**

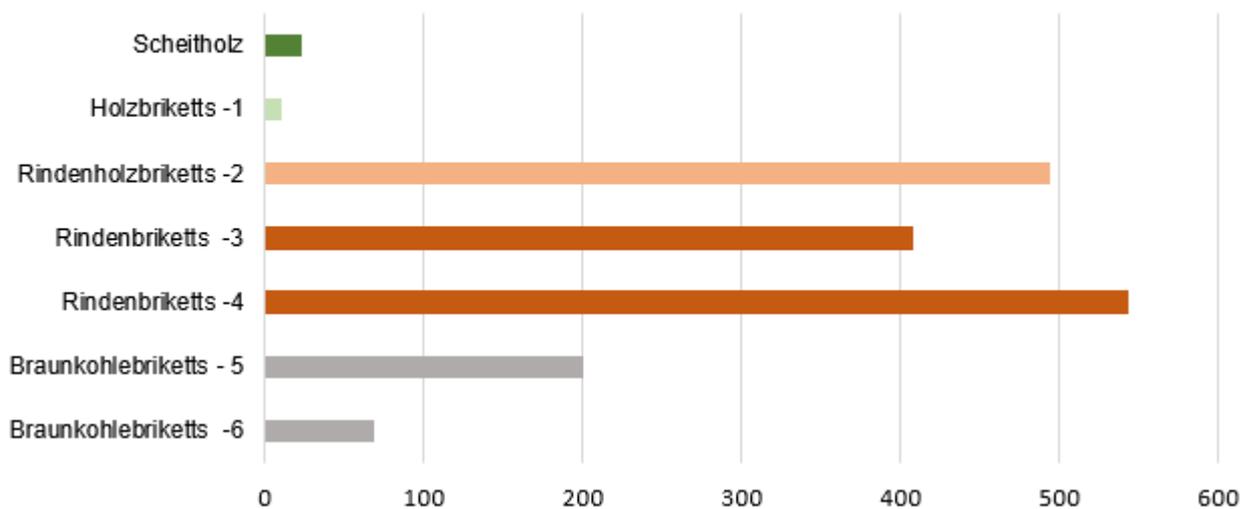
Ein Wert von 10 ppm CO im Abgas wurde als Ende des Ausbrands definiert.

Die Rinden-, Rindenholz- und Braunkohlebriketts weisen eine um den Faktor 4 längere Ausbrandzeit gegenüber Scheitholz auf. Die lange Ausbrandzeit führt zu einer längeren Dauer der Wärmeabgabe durch die Briketts. Diese Eigenschaft wird als Verkaufsargument in den Beschreibungen für diese Produkte verwendet.

Während des Ausbrands sind die Bedingungen für eine vollständige Verbrennung nicht gegeben. Auffallend sind die erhöhten OGC-Emissionen von Rinden-, Rindenholz- sowie Braunkohlebriketts. Werden anstelle der Mittelwerte die maximalen OGC-Konzentrationen während des Ausbrands betrachtet, ergibt sich ein noch klareres Bild (siehe hierzu Figur 34). Es ist zu erwarten, dass diese OGC zur Bildung von sekundären Aerosolen in der Atmosphäre beitragen.

<sup>2</sup> Emissionsmessung bei Feuerungen für Öl, Gas und Holz, BAFU, 2018

### Maximaler OGC Wert während des Ausbrands [mg/Nm<sup>3</sup>]



Figur 34: Maximale OGC-Konzentrationen während des Ausbrands

	Staubmessung					
	Gravimetrisch		Anzahl		Durchmesser	
	Abbrand 3 [mg/m <sup>3</sup> ]	Ausbrand [mg/m <sup>3</sup> ]	Abbrand 3 [#/Ncm <sup>3</sup> ]	Ausbrand [#/Ncm <sup>3</sup> ]	Abbrand 3 [nm]	Ausbrand [nm]
Scheitholz	104	3	5.E+07	2.E+07	69.7	20.0
Holzbriketts 200714-1	98	14	5.E+07	3.E+07	77.0	36.0
Rindenholzbriketts 200714-2	66	37	1.E+08	5.E+07	41.0	30.1
Rindenbrikett 200714-3	50	23	4.E+07	3.E+07	58.0	43.0
Rindenbrikett 200714-4	20	29	9.E+07	3.E+07	25.0	38.1
Braunkohlebriketts 200714-5	16	2	6.E+07	6.E+06	24.0	10.6
Braunkohlebriketts 200714-6	27	2	7.E+07	5.E+06	29.5	10.0

Tabelle 18: Staubemissionen bei Abbrand 3 und Ausbrand

Die gravimetrisch gemessenen Staubemissionen des Ausbrands sind tiefer als während des Abbrands 3 (Ausnahme Rindenbrikett 200714-4). Besonders ausgeprägt ist dieser Rückgang für Scheitholz und Holzbriketts. Rinden- und Rindenholzbriketts zeigen nur einen geringen oder gar keinen Rückgang. Diese Brennstoffe weisen während des Ausbrands höhere Staubemissionen auf als der Referenzbrennstoff Scheitholz (gerade umgekehrt wie bei den Abbränden).

Die Anzahl der Partikel reduziert sich für alle Brennstoffe beim Ausbrand. Mit Ausnahme der Rindenbriketts 200714-4 reduziert sich dabei auch der Durchmesser der Staubpartikel. Die Vergrößerung des Durchmessers der Partikel des Brennstoffs Rindenbrikett 200714-4 erklärt sich durch die sogenannte Koagulation (Zusammenballen von Partikel über die Zeit).

Durch die längere Ausbranddauer, die erhöhten OGC- und Staubemissionen ergeben sich deutlich höhere Emissionsfrachten von Briketts gegenüber Scheitholz (Tabelle 15).

Der hohe Aschegehalt aus der Brennstoffanalyse für Rindenholz-, Rinden- und Braunkohlebriketts zeigt sich auch in einem höheren Gewicht der Abbrandrückstände, gemessen jeweils am Ende eines Messtages (3 Abbrände inklusive Ausbrand).

### 9.3 Diskussion der Emissionsfrachten

Bei den CO, OGC und NOx Emissionen ergeben sich deutlich höhere Emissionsfrachten bei Briketts Brennstoffen mit Rindenanteilen oder basierend auf Braunkohle. Dies gilt sowohl für Standardabbrände (Tabelle 19) wie auch Ausbrände (Tabelle 20).

	Emissionsfracht 3. Abbrand relativ zu 3. Abbrand Scheitholz			
	CO [-]	OGC [-]	NOx [-]	Staub [-]
Scheitholz	1.00	1.00	1.00	1.00
Holzbriketts 200714-1	0.81	0.96	2.02	0.94
Rindenholzbriketts 200714-2	3.57	12.51	2.33	0.63
Rindenbrikett 200714-3	1.93	3.77	2.43	0.48
Rindenbrikett 200714-4	2.70	7.09	2.72	0.19
Braunkohlebriketts 200714-5	2.48	5.67	2.33	0.16
Braunkohlebriketts 200714-6	2.50	5.07	2.58	0.26

**Tabelle 19: Standardabbrände Emissionsfrachten relativ zu Scheitholz**

Wie bereits in Kapitel 8.3.6 dargestellt, erhöhen sich die gasförmigen Emissionsfrachten bei Rindenholz-, Rinden- oder Braunkohlebriketts durch die längeren Ausbrandzeiten deutlich gegenüber Scheitholz oder Holzbriketts.

	Emissionsfracht Start des Ausbrands bis 10 ppm CO erreicht wurden			
	CO [-]	OGC [-]	NOx [-]	Staub [-]
Scheitholz	1.00	1.00	1.00	1.00
Holzbriketts 200714-1	0.55	1.13	1.15	5.58
Rindenholzbriketts 200714-2	4.30	56.42	11.60	46.51
Rindenbrikett 200714-3	3.68	54.95	11.48	28.97
Rindenbrikett 200714-4	3.86	83.58	10.67	38.90
Braunkohlebriketts 200714-5	4.19	17.64	5.21	1.22
Braunkohlebriketts 200714-6	4.14	9.26	4.73	1.37

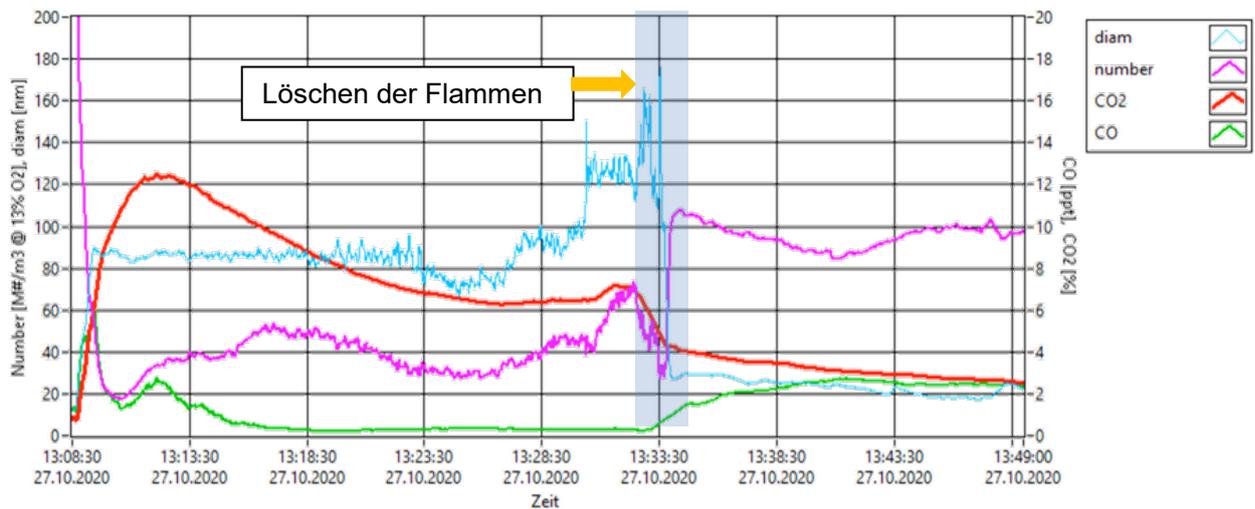
**Tabelle 20: Ausbrände Emissionsfrachten relativ zu Scheitholz**

Farbkodierung Tabelle 19 und Tabelle 20:

Faktor	0 - 1	
Faktor	1 - 2	
Faktor	2 - 3	
Faktor	> 3	

## 9.4 Beobachtungen während der Durchführung der Abbrände

Ein typischer Abbrand von Scheitholz zeigt den Einfluss vom Löschen der Flamme auf die Staubpartikel (Figur 35). Während der Abbrandphase entstehen eher grosse Partikel (ca. 80 nm). In der Ausbrandphase, beim Löschen der Flamme (erkennbar am Anstieg von CO und Abfall von CO<sub>2</sub>), steigt die Anzahl kurzzeitig stark und der mittlere geometrische Durchmesser sinkt stark auf 20 nm. Im weiteren Verlauf des Ausbrands sinkt die Anzahl wieder, bei gleichbleibendem Durchmesser. Dieser Unterschied der Brandphasen ist typisch und wurde in vielen früheren Projekten und Messungen festgestellt. In der Glutphase, wenn die Flammen ganz ausgelöscht sind, werden praktisch keine grossen organischen Partikel (Russ) emittiert und der Staub besteht in erster Linie aus kleinen Partikeln mit hauptsächlich mineralischen Bestandteilen.



**Figur 35: Partikelemissionen des 3. Abbrands Scheitholz (Messtag 200925)**

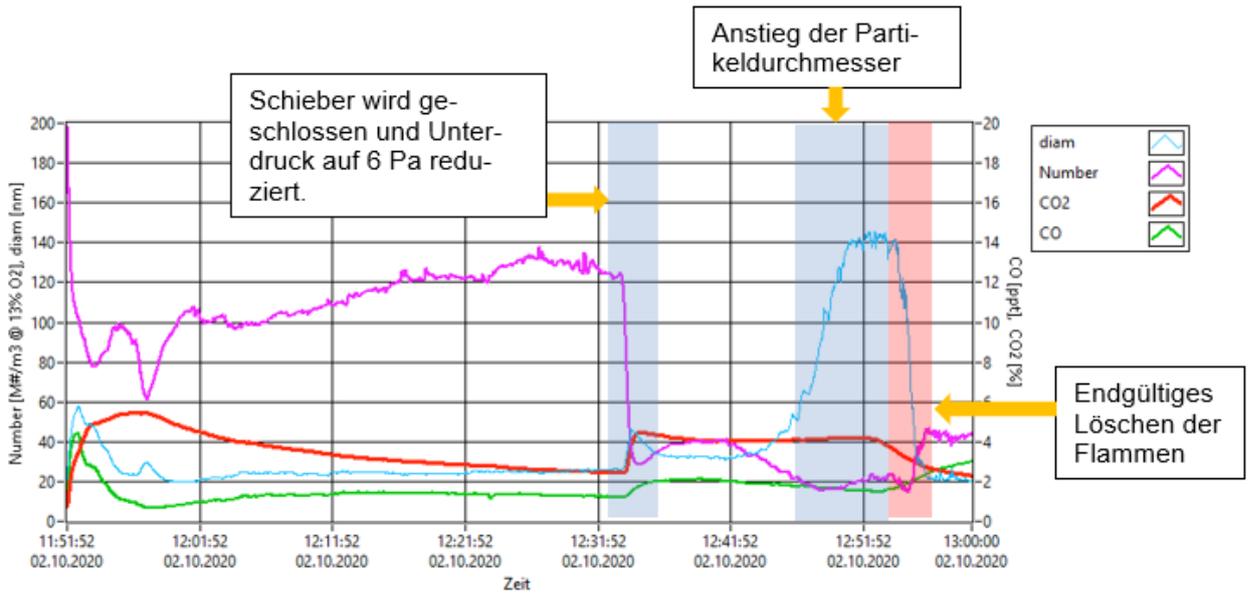


**Figur 36: Scheitholz Brandphase**



**Figur 37: Scheitholz Glutphase**

Während des Abbrands ist der Durchmesser der Partikel bei Rinden- und Rindenholzbriketts kleiner als bei Scheitholz, dafür ist die Anzahl der Partikel höher. Durch das Schliessen des Luftschiebers und die Reduktion des Unterdrucks sinkt die Verdünnung, was zu einem Anstieg von CO<sub>2</sub> und CO führt. Dass die Anzahl absinkt und der Durchmesser der Partikel ansteigt könnte ein Hinweis auf lokale Rauchbildung sein. Beim Löschen der Flamme wurde derselbe Effekt wie bei Scheitholz beobachtet, jedoch weniger stark ausgeprägt. Vor dem Ausgehen der Flamme stieg der Partikeldurchmesser deutlich an, was auf eine Russbildung hindeutet. Nach dem Löschen der Flamme in der Glutphase sinkt der Durchmesser der Partikel wieder.



**Figur 38: Partikelemissionen Rindenbriketts (201002)**



**Figur 39: Rindenbriketts 201002, 12:01:07**



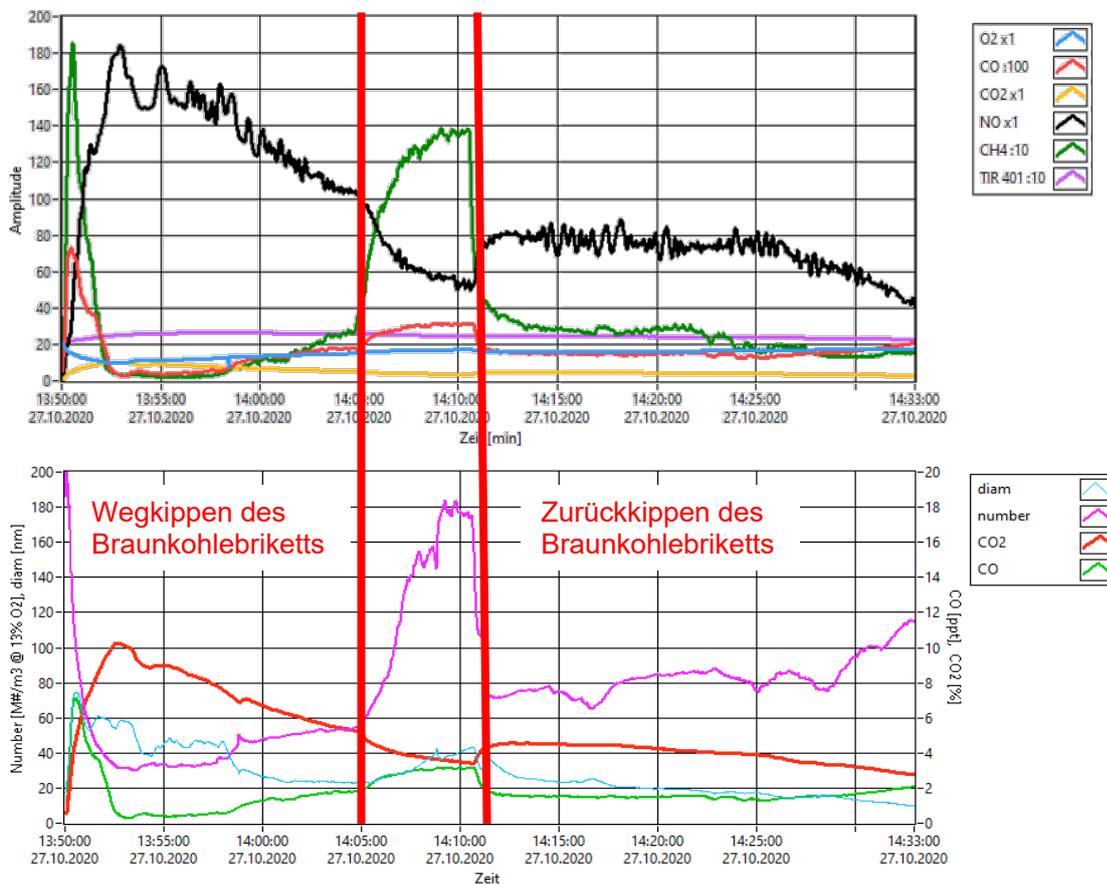
**Figur 40: Rindenbriketts 201002, 12:46:09**

### 9.4.1 Einflussnahme durch den Betreiber

Die Platzierung und Orientierung des Brennstoffes im Brennraum hat einen grossen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Somit können die Emissionen auch durch den Betreiber eines Raumheizers beeinflusst werden. Wird beispielsweise der Abstand zwischen den Brennstoffstücken zu gross gewählt, besteht die Gefahr, dass die Flammen früh ausgehen, weil sich die Brennstoffstücke nicht genügend gegenseitig erwärmen können.

Es kann auch während des Abbrands - ohne Eingriff des Betreibers - zu einer Änderung der Position der Brennstoffstücke kommen durch Zerfall von Glutstücken aufgrund des Verbrennungsprozesses. Im Nachfolgenden wird ein Vorgang beschrieben, der ohne Einwirkung des Betreibers, mit Braunkohlebriketts aufgetreten ist:

Das dem Türfenster näherliegende Braunkohlebrikett kippte in Richtung Türe weg. Durch die nun grössere Distanz zwischen den Braunkohlebriketts ging die Flamme aus und die Briketts glühten nur noch (Figur 42). Dies führte zu einem Anstieg der CO- und OGC-Emissionen. Nach einiger Zeit kippte dieses Brikett (ohne Ausseneinwirkung) wieder in die Ursprungsposition zurück. Durch die Reduktion des Abstands zwischen den Braunkohlebriketts entfachte sich die Flamme wieder von neuem (Figur 43). Dadurch sanken die CO- und OGC-Emissionen wieder auf das ursprüngliche Niveau ab.



**Figur 41: Einfluss gegenseitige Brikett- Scheitholzposition auf Emissionen**



**Figur 42: Weggekipptes Braunkohlebrikett**



**Figur 43: Zurückgekipptes Braunkohlebrikett**

## 9.5 Streuung der Messergebnisse

Die in der Tabelle 21 aufgeführten Streuungen der Messergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf Scheitholz Abbrand 2, weil dafür die meisten Daten vorliegen.

Datum	CO	OGC	NOx	Staub <sub>Gravim</sub>	Staub <sub>Anzahl</sub>	Staub <sub>Durchm</sub>
[-]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	[#/Ncm <sup>3</sup> ]	[nm]
200923	1'849	170	120	128	5.E+07	-
200924	1'804	147	121	132	-	-
200925	1'741	100	123	109	5.E+07	77
200928	1'781	83	122	99	2.E+07	77
201002	1'836	135	130	88	4.E+07	87
201027	1'944	61	113	115	6.E+07	75
201028	1'503	98	114	155	3.E+07	97
<b>Mittelwert</b>	<b>1'780</b>	<b>113</b>	<b>121</b>	<b>118</b>	<b>4.E+07</b>	<b>82</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>138</b>	<b>38</b>	<b>6</b>	<b>22</b>	<b>1.E+07</b>	<b>9</b>
<b>Standardabweichung %</b>	<b>+/- 8</b>	<b>+/- 34</b>	<b>+/- 5</b>	<b>+/- 19</b>	<b>+/- 30</b>	<b>+/- 30</b>

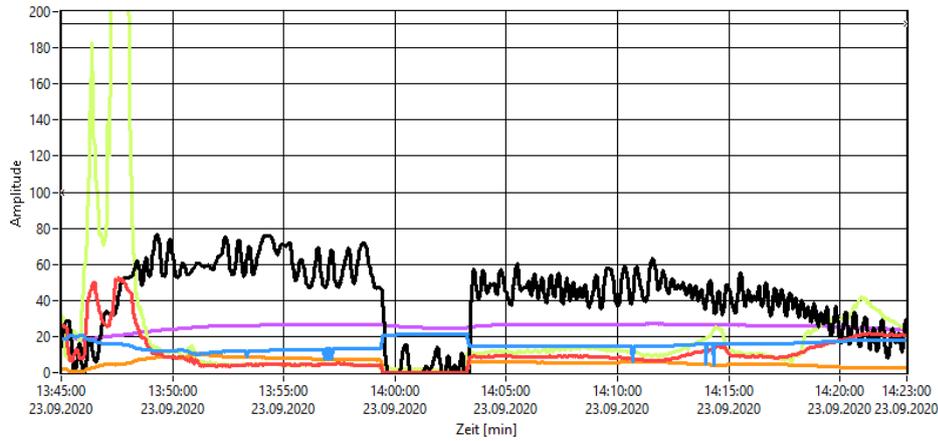
Tabelle 21: Streuung der Messungen

Die Streuung der CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen in einem Bereich von +/- 8 % respektive +/- 5 %. Die Unsicherheit der Messungen für Partikeldurchmesser und deren Anzahl entspricht der Messunsicherheit der DIEM- resp. Partector-Messtechnologie (Kapitel 4.2). Die in Tabelle 21 ausgewiesenen Streuungen von unterschiedlichen Abbränden desselben Brennstoffes (Scheitholz Abbrand 2) sind deutlich kleiner als die gemessenen Unterschiede zwischen Scheitholz und den unterschiedlichen Briketttypen. Somit sind die ausgewiesenen Unterschiede signifikant.

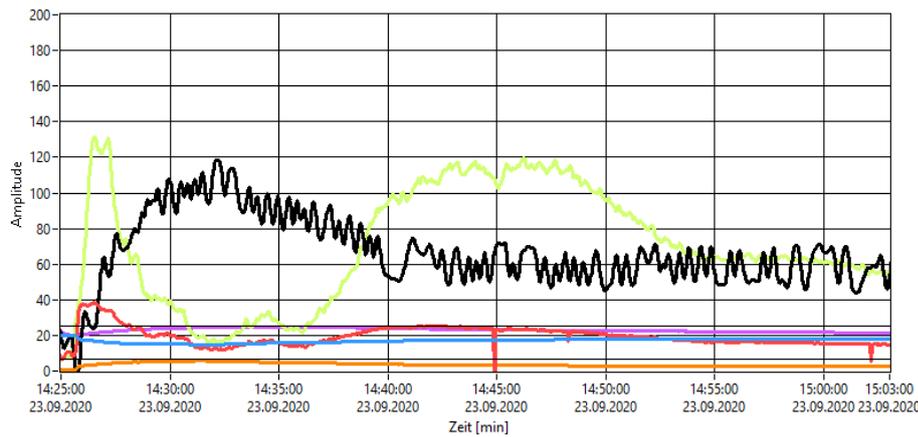
## 10 Anhang

### 10.1 Verläufe der Abbrände und Ausbrände

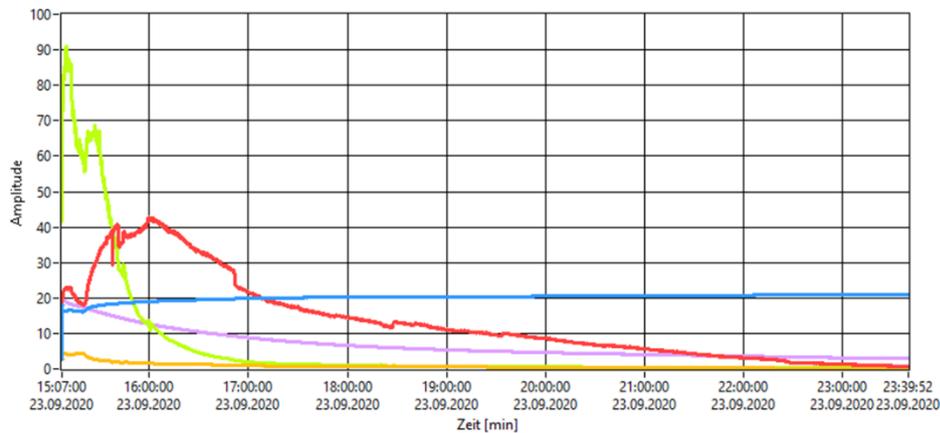
#### 10.1.1 Rindenholzbriketts (Charge: 200714-2)



Figur 44: Abbrand 2, Scheitholz 200923

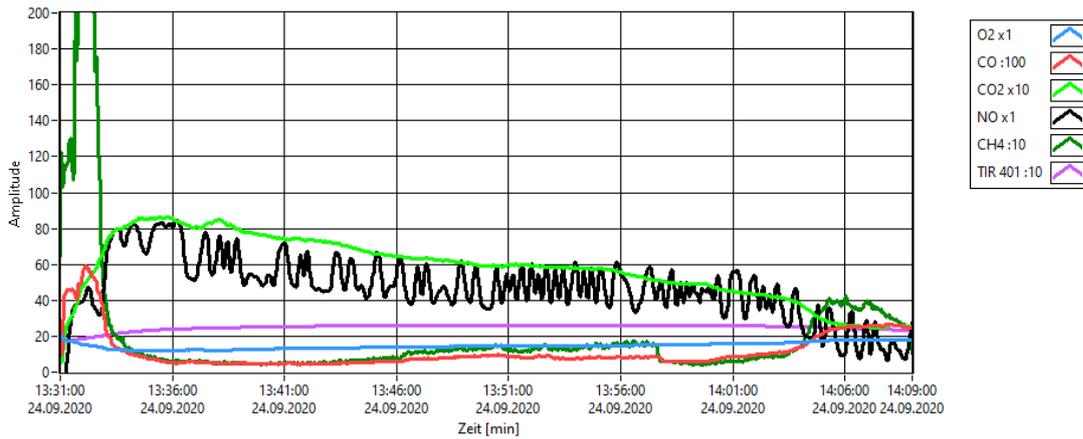


Figur 45: Abbrand 3, Rindenholzbriketts 200923

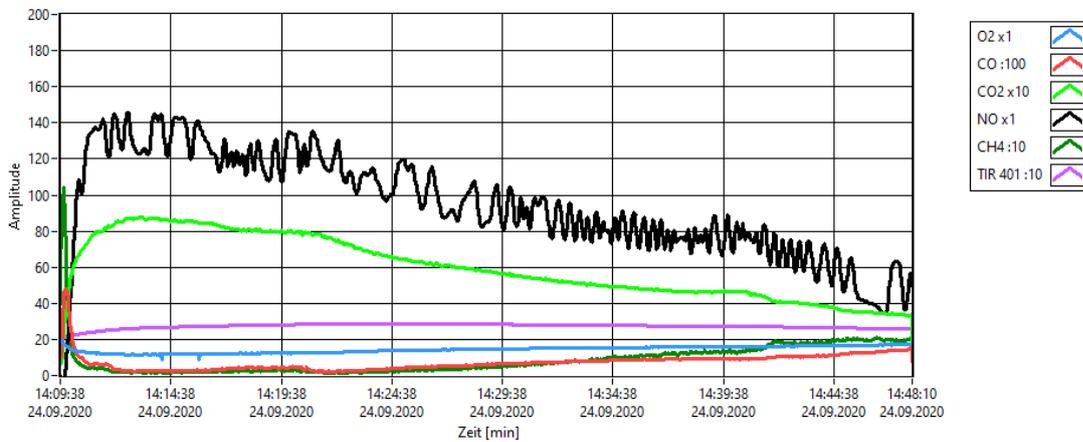


Figur 46: Ausbrand Rindenholzbriketts 200923

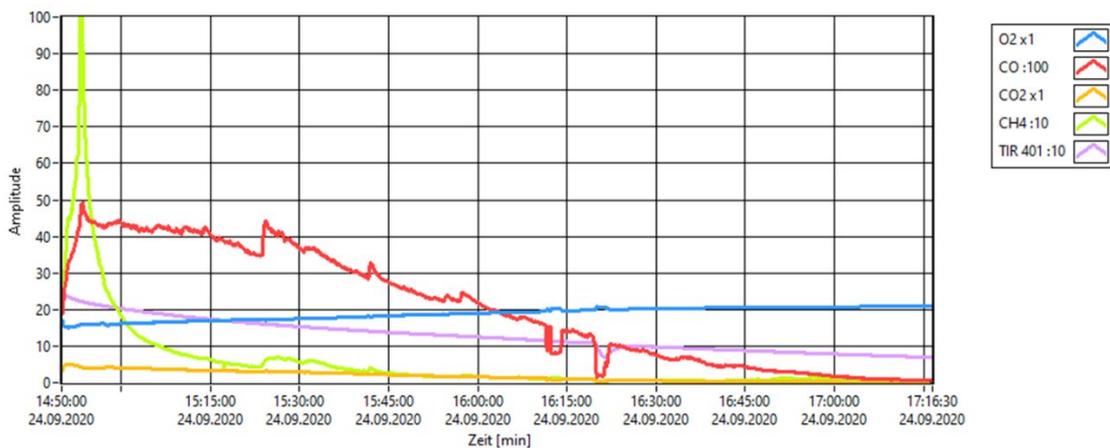
**10.1.2 Holzbriketts (Charge: 200714-1)**



**Figur 47: Abbrand 2, Scheitholz 200924**

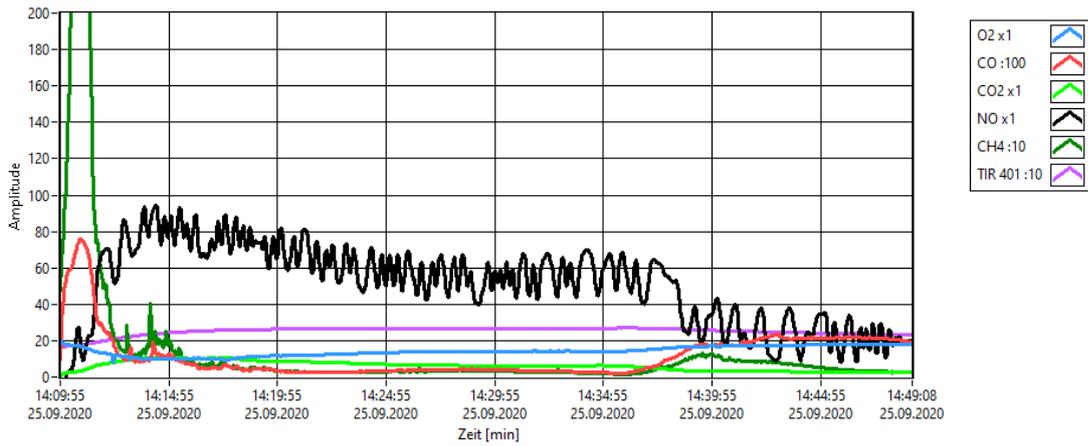


**Figur 48: Abbrand 3, Holzbriketts 200924**

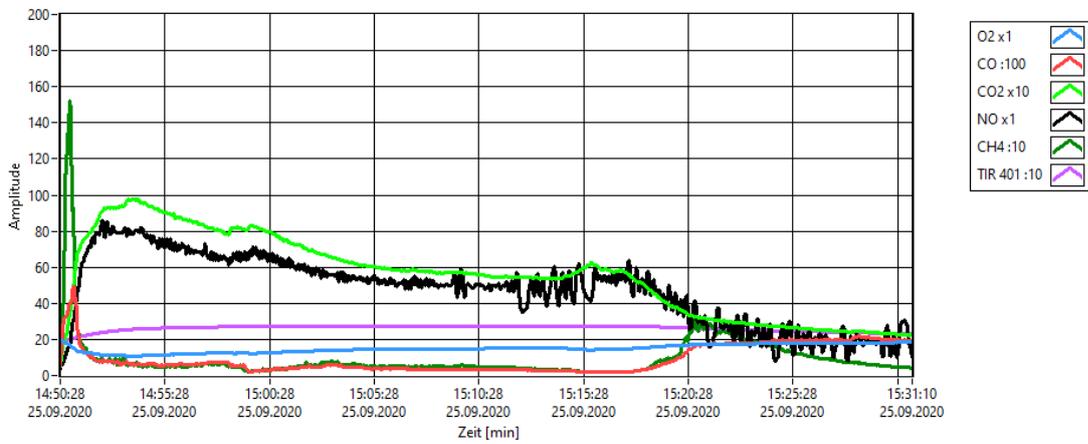


**Figur 49: Ausbrand Holzbriketts 200924**

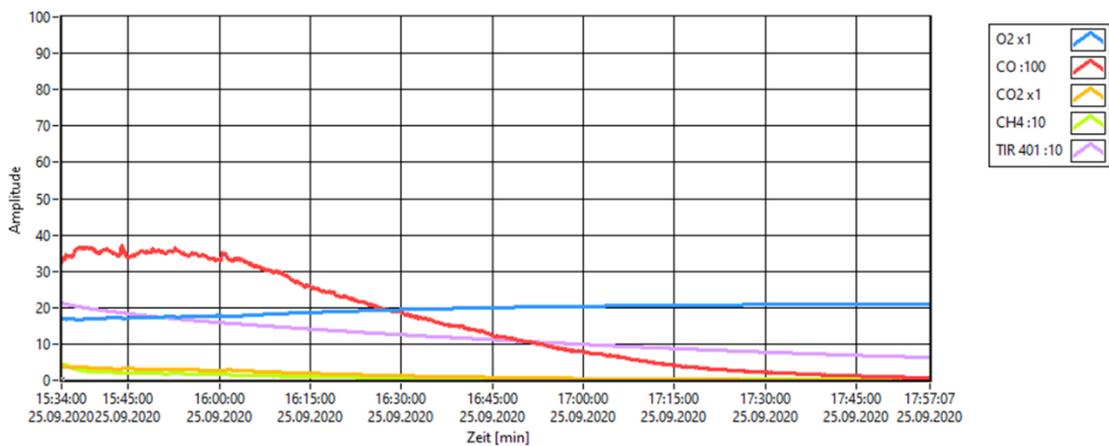
**10.1.3 Scheitholz (Charge: 190823)**



**Figur 50: Abbrand 2, Scheitholz 200925**

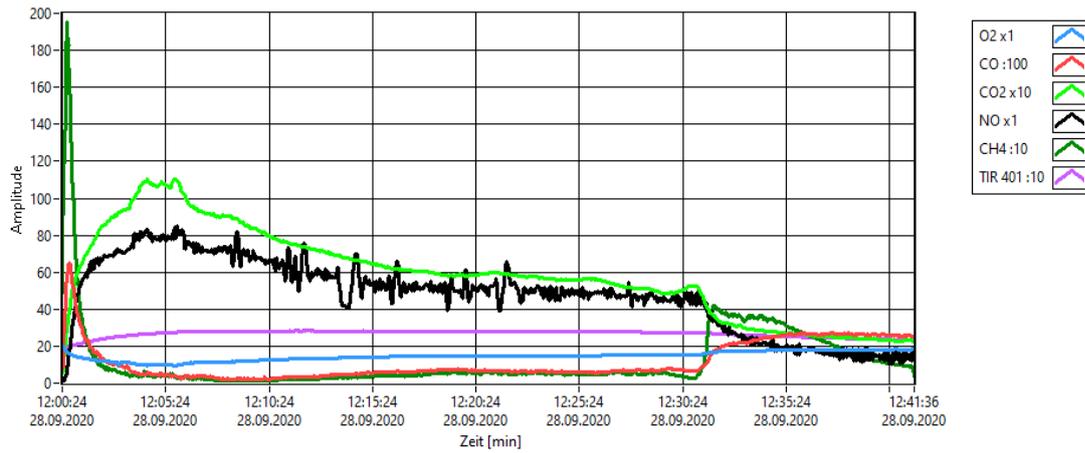


**Figur 51: Abbrand 3, Scheitholz 200925**

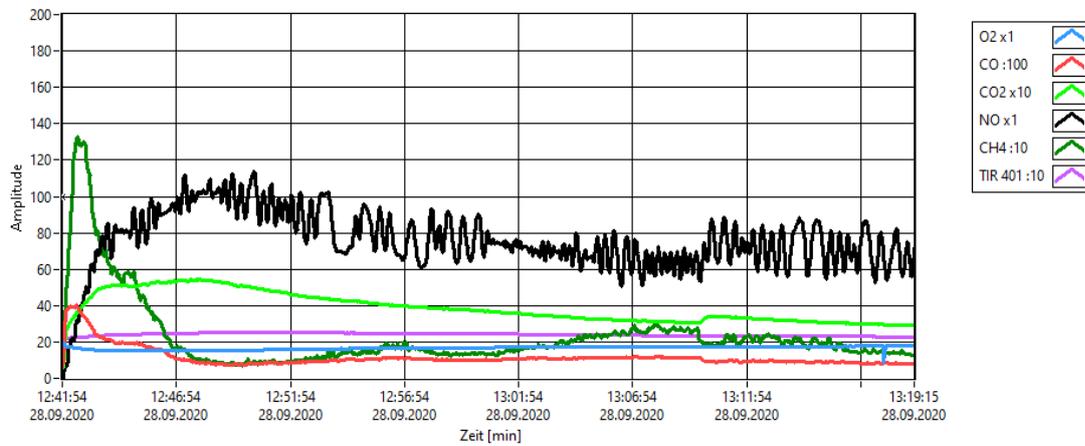


**Figur 52: Ausbrand Scheitholz 200925**

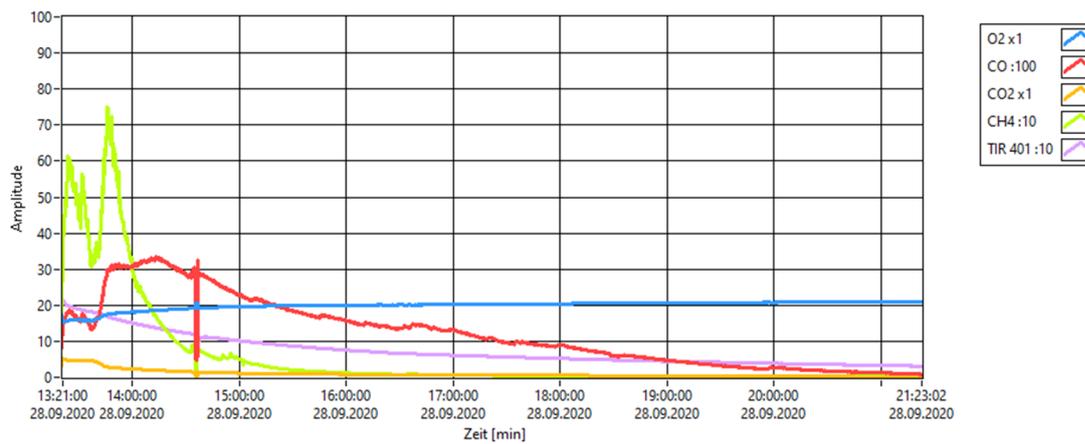
10.1.4 Rindenbriketts (Charge: 200714-3)



Figur 53: Abbrand 2, Scheitholz 200928

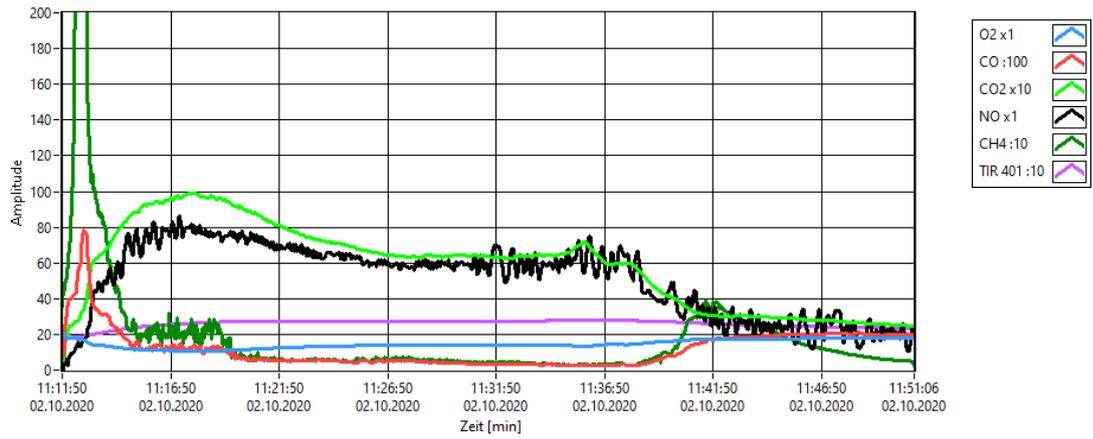


Figur 54: Abbrand 3, Rindenbriketts 200928

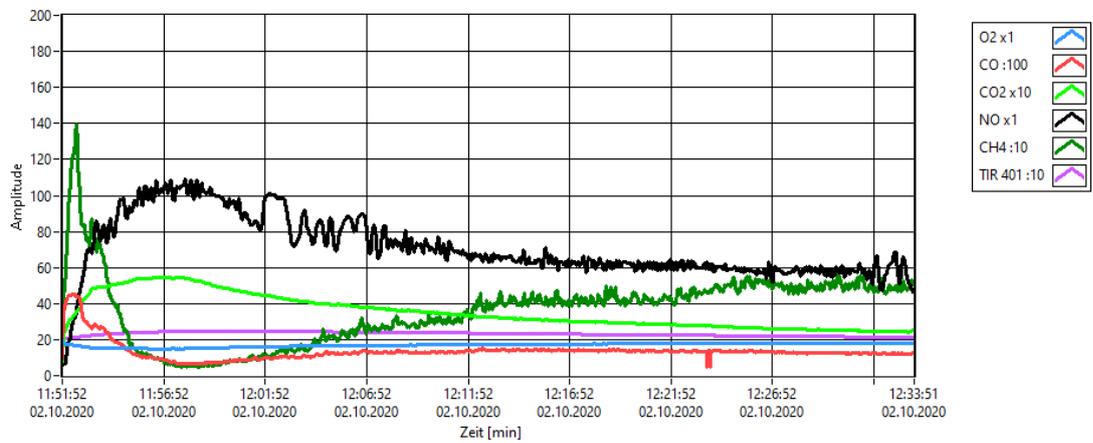


Figur 55: Ausbrand Rindenbriketts 200928

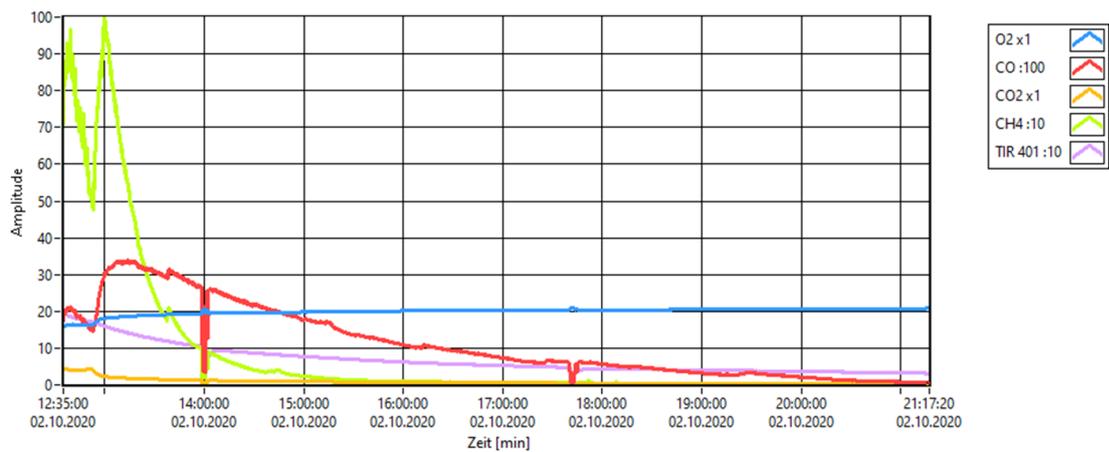
**10.1.5 Rindenbriketts (Charge: 200714-4)**



**Figur 56: Abbrand 2, Scheitholz 201002**

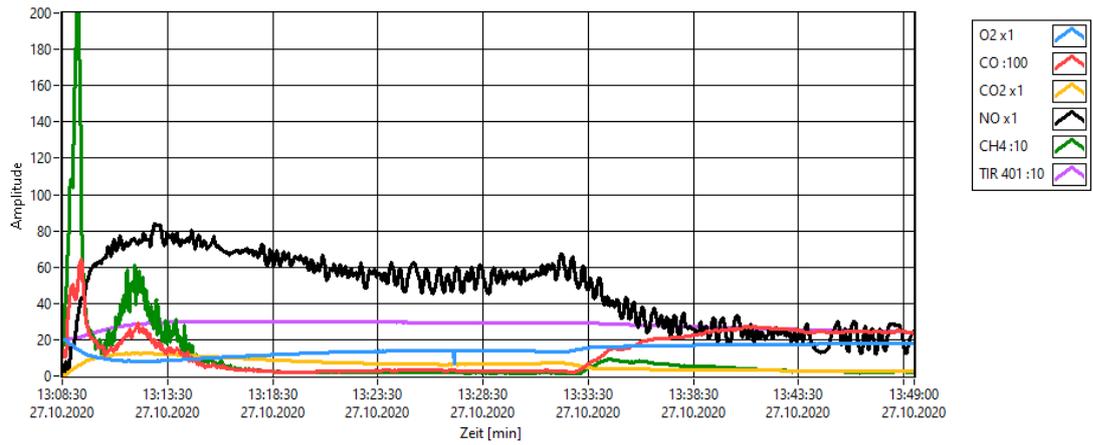


**Figur 57: Abbrand 3, Rindenbriketts 201002**

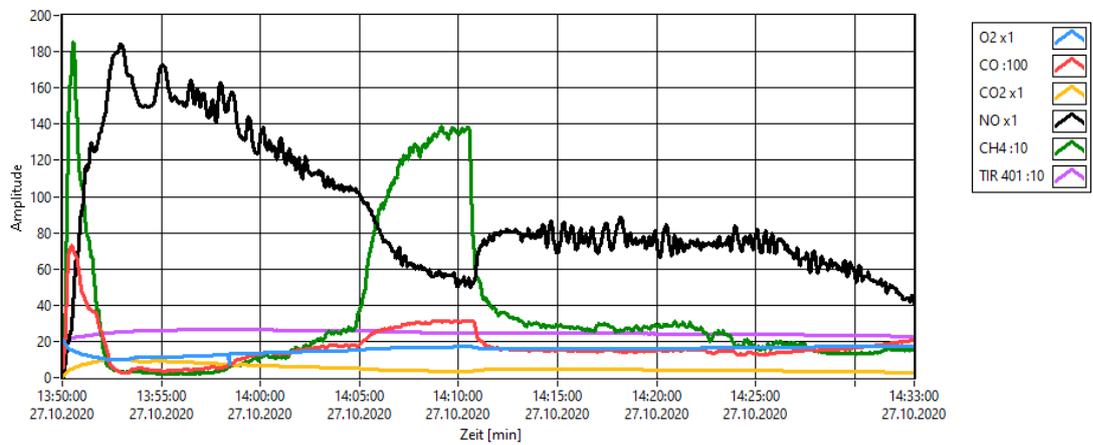


**Figur 58: Ausbrand Rindenbriketts 201002**

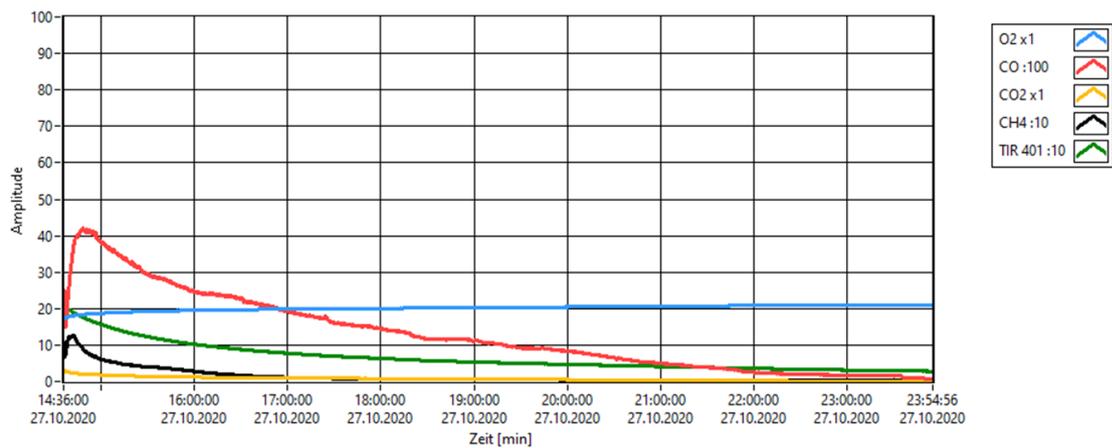
### 10.1.6 Braunkohlebriketts (Charge: 200714-6)



**Figur 59: Abbrand 2, Scheitholz 201027**

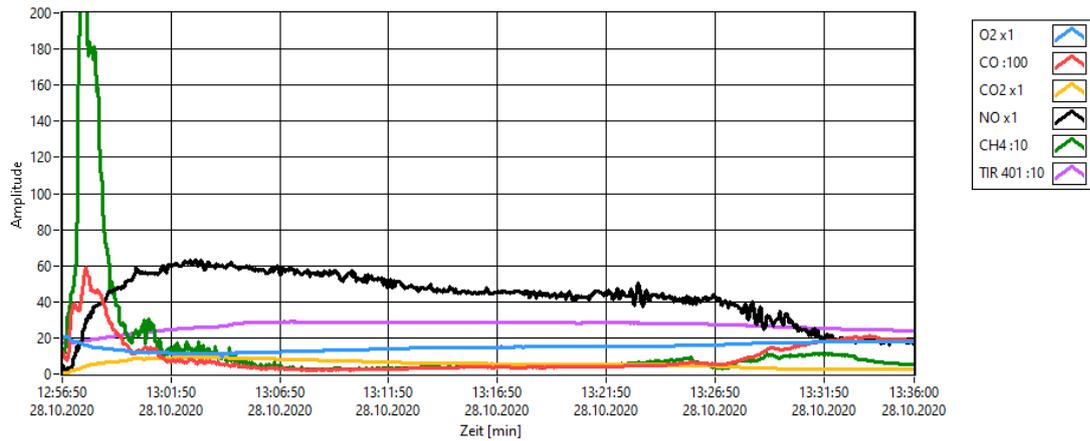


**Figur 60: Abbrand 3, Braunkohlebriketts 201027**

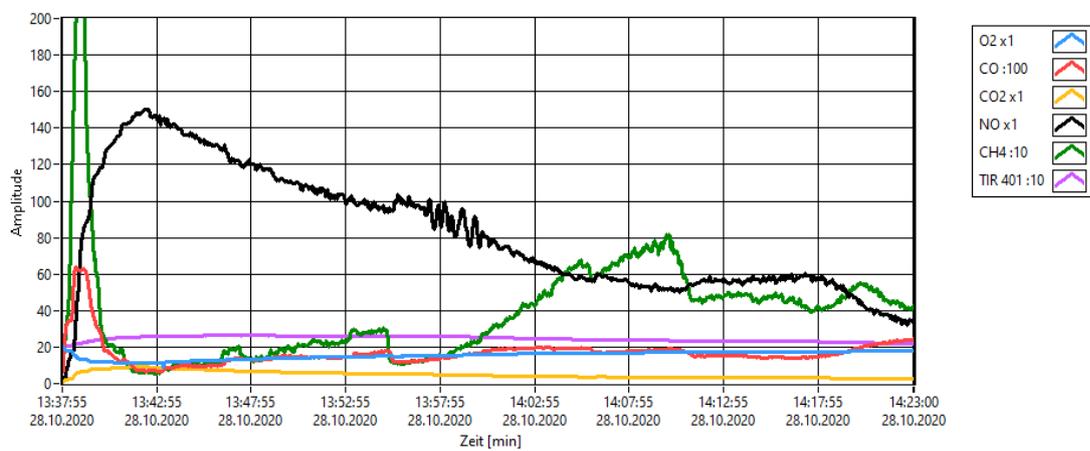


**Figur 61: Ausbrand Braunkohlebriketts 201027**

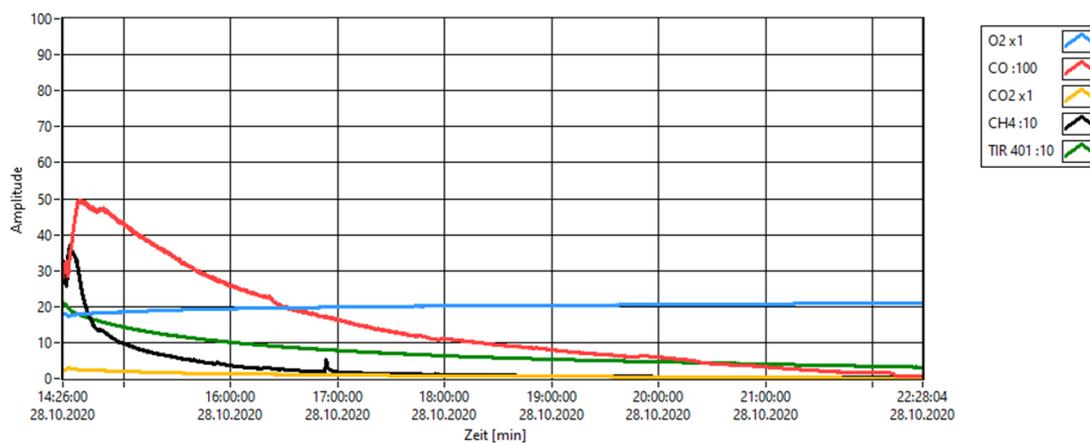
### 10.1.7 Braunkohlebriketts (Charge: 200714-5)



**Figur 62: Abbrand 2, Scheitholz 201028**



**Figur 63: Abbrand 3, Braunkohlebriketts 201028**



**Figur 64: Ausbrand Braunkohlebriketts 201028**

## 10.2 Bilder der Abbrände der getesteten Brennstoffe

Die Zeitangabe bezieht sich auf den Start von Abbrand 3

	Abbrand 3 (12 Pa Kaminzug)			Ausbrand (6 Pa Kaminzug)			
	+5min	+15min	+29min	+44min	+59min	+74min	+89min
Scheitholz							
Holzbricketts 200714-1							
Rindenholz- bricketts 200714-2							
Rindenbricketts 200714-3							
Rindenbricketts 200714-4							
Braunkohle- bricketts 200714-5							
Braunkohle- bricketts 200714-6							

**Tabelle 22: Übersichtstabelle Flammenbilder zu vergleichbaren Zeitpunkten**