

Untersuchungen zur Emission von Luftschadstoffen aus Kleinfeuerungsanlagen bei der Verbrennung von Getreide, Stroh und ähnlichen pflanzlichen Stoffen



SACHSEN-ANHALT

Landesamt für Umweltschutz



SACHSEN-ANHALT

Landesanstalt für
Landwirtschaft, Forsten
und Gartenbau

**Untersuchungen zur Emission
von Luftschadstoffen aus
Kleinfeuerungsanlagen bei der
Verbrennung von Getreide,
Stroh und ähnlichen
pflanzlichen Stoffen**

Berichte des
Landesamtes für Umweltschutz
Sachsen-Anhalt

2013 – Heft 11

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Aufgabenstellung	8
3	Versuchstand	9
3.1	Beschreibung der Feuerungsanlagen am Standort Bernburg.....	9
3.1.1	Biomassekessel Biokompakt - AWK 45	9
3.1.2	Biomassekessel IHT GE 30	10
3.2	Beschreibung des Messplatzes.....	13
4	Versuchsprogramm	14
4.1	Versuchsbrennstoffe.....	15
4.2	Versuchsbetrieb der Feuerungsanlagen	16
4.3	Ermittelte Messkomponenten	17
5	Beschreibung der Messgeräte und –verfahren	19
5.1	Abgasrandbedingungen.....	19
5.2	Kontinuierliche Messverfahren	20
5.3	Diskontinuierliche Messverfahren.....	21
5.4	Isokinetische Probenahme	22
5.5	Qualitätssicherung	23
6	Messergebnisse	23
6.1	Brennstoff- und Ascheinhaltsstoffe.....	23
6.1.1	Kohlenstoff.....	23
6.1.2	Schwefel	24
6.1.3	Chlor	24
6.1.4	Calcium.....	24
6.1.5	Kalium.....	25
6.2	Emissionen von Luftschadstoffen.....	25
6.2.1	Kohlenmonoxid (CO)	25
6.2.2	Staub	27
6.2.3	Stickstoffoxide (NO _x angegeben als NO ₂)	29
6.2.4	Schwefeldioxid (SO ₂)	31
6.2.5	Gesamtkohlenstoff (C _{ges}).....	33
6.2.6	Chlorwasserstoff (HCl)	34
6.2.7	Korngrößenverteilung des Staubes.....	37
6.2.8	Quecksilber und Schwermetalle als partikelgebundene und filtergängige Staubanteile	38
6.2.9	Wasserlösliche ionische Staubinhaltsstoffe	38
6.2.10	Aromatische Kohlenwasserstoffe (BTX).....	38
6.2.11	Dioxine/Furane (PCDD/F), Polychlorierte Biphenyle (PCB).....	39
6.2.12	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH).....	41
6.3	Abgasrandbedingungen, Betriebsparameter und Kesselbedienug während der Messungen	43
7	Fazit	46
7.1	Bewertung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf Schadstoffemissionen.....	46
7.2	Bewertung der Versuchsergebnisse unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten.....	50
8	Verzeichnisse	52
8.1	Abbildungen.....	52
8.2	Bildquellen	53
8.3	Tabellen	53
9	Literatur	54
10	Abkürzungen	55
11	Anhang A	56
11.1	Schadstoffkonzentrationen und -gehalte, Betriebsparameter, Abgasrandbedingungen.....	56
11.1.1	Kohlenmonoxid.....	56
11.1.2	Stickstoffoxide	58
11.1.3	Schwefeldioxid.....	60
11.1.4	Gesamtkohlenstoff.....	62
11.1.5	Sauerstoff	64
11.1.6	Kohlendioxid	66
11.1.7	Temperatur	68

12 Anhang B	71
12.1 Brennstoff- und Ascheparameter.....	71
13 Anhang C	87
13.1 Einzelmesswerte von Schadstoffkonzentrationen und Abgasrandparametern.....	87

1 Einleitung

Ein wichtiges Ziel des Klimaschutzes beinhaltet die erhebliche Verminderung der Treibhausgasemissionen. Die energetische Nutzung von Holz und anderen biogenen Brennstoffen kann einen wichtigen Beitrag dazu leisten. Entsprechend der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie soll der Biomasseanteil am Primärenergieverbrauch mittelfristig deutlich ausgeweitet werden. Dabei sollen die pflanzlichen Rohstoffe für Bioenergie ökologisch verträglich und in ausreichender Menge angebaut werden, ohne in Konkurrenz zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion zu treten. Weiterhin soll die energetische Nutzung der Biomasse zu keinen höheren oder anderen Emissionen führen als bei Verwendung konventioneller Brennstoffe.

Kleine und mittlere Festbrennstoffe Feuerungsanlagen tragen in erheblichem Maße zur Gesamtemission besonders gesundheitsgefährdender Stoffe wie Feinstaub oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe bei. Während der Anteil an den Feinstaubemissionen aus mit Kohle gefeuerten Kleinf Feuerungsanlagen seit den 1990-er Jahren infolge sinkenden Anlagenbestandes stark rückläufig ist, kommt dem Anteil der Feinstaubemissionen aus mit Holz befeuerten Kleinf Feuerungsanlagen immer mehr Bedeutung zu. So betragen die Feinstaubemissionen aus Holzfeuerungsanlagen im Jahr 2003 mit ca. 24 kg PM₁₀ ca. 13 % der Gesamtemissionen an PM₁₀. Holzheizungen emittierten etwa die gleiche Menge von Feinstaub (PM₁₀) wie der Straßenverkehr (verbrennungsbedingt) /1/.

Aufgrund des angestrebten Ausbaus der energetischen Nutzung von Holz und anderen biogenen Brennstoffen ist weiterhin mit einem Emissionsanstieg zu rechnen. Zukünftig dringend notwendige Emissionsreduzierungen sind durch den Einsatz moderner Feuerungs- und Anlagentechnik zur umweltverträglichen energetischen Nutzung von Biomasse erreichbar und erfordern strenge Umweltauflagen an den Betrieb der Anlagen für eine effiziente und emissionsarme Verbrennung der Brennstoffe.

Mit Novellierung der Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV) vom 26.01.2010 werden die Emissionsbegrenzungen für diese Anlagen zum Teil erheblich verschärft. Die neuen Emissionsgrenzwerte stellen auch eine Herausforderung an die Hersteller von Kleinf Feuerungsanlagen dar, da die Einhaltung der Grenzwerte allein mit primärseitigen feuerungstechnischen Maßnahmen nicht zu lösen sein wird.

Im Rahmen der Novellierung wurden auch die zulässigen Regelbrennstoffe um „nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide wie Getreidekörner und Getreidebruchkörner, Getreideganzpflanzen, Getreideausputz, Getreidespelzen und Getreidehalmreste sowie Pellets aus den vorgenannten Brennstoffen“ erweitert. Eine weitere Option wurde für "sonstige nachwachsende Rohstoffe" geschaffen.

Im Rahmen eines Untersuchungsprogramms wurden durch das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) und der Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (LLFG) seit dem Jahre 2005 in einzelnen Messkampagnen während der Heizperioden die Emissionen an zwei Kleinf Feuerungsanlagen bei Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen ermittelt. Ausgangspunkt des Programms war in den Jahren 2005 und 2006 ein Projekt des Forschungs- und Beratungszentrums für Maschinen- und Energiesysteme e. V. Merseburg unter Beteiligung des LAU und der LLFG /2/.

Das Forschungsprojekt wurde im Rahmen eines umfangreichen Forschungsprogramms der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) zum Thema „Energetische Nutzung von festen Bioenergieträgern, insbesondere von Getreide, Stroh und anderen nachwachsenden Rohstoffen außer Holz sowie Felduntersuchungen zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeherzeugungsanlagen < 1 MW_{th}“ durch die FNR gefördert.

Seit 2008 wurden die Messungen dann in alleiniger Kooperation zwischen LAU und LLFG fortgeführt. 2009 begannen dann die Untersuchungen an einem weiteren Kessel. Die Schwerpunkte der Untersuchungen lagen in der Erforschung der zur energetischen Nutzung geeigneten Pflanzenarten, den Möglichkeiten der pflanzenbaulichen Beeinflussung ihrer Stoffeigenschaften und die messtechnische Ermittlung der Emissionen von Luftschadstoffen bei ihrer Verbrennung.

Mit der Fortsetzung der Untersuchungen ab 2008 wurde der Untersuchungsschwerpunkt, thematisch vom Heizen mit Getreidekorn auf den Bereich der Energiepflanzen, Stroh und strohähnliche Reststoffe verlagert /3/.

Aus der Literatur sind Untersuchungsergebnisse zur Emission von Luftschadstoffen bei der Verbrennung biogener Einsatzstoffe bekannt /4//5//6/.

Vielfach wird über erhebliche Probleme hinsichtlich des niedrigen Ascheerweichungspunktes und der damit verbundenen Neigung zur Verschlackung sowie des hohen Ascheanfalls bei Einsatz dieser oder ähnlicher Brennstoffe berichtet.

Die hier vorgestellten Untersuchungen erfolgten mit dem Ziel die Datenbasis zur Emission von Luftschadstoffen für einige Brennstoffsorten bei Verbrennung an zwei ausgewählten Kesseln zu erweitern. Die Fortsetzung des Programms mit weiteren Brennstoffen ist vorgesehen.

2 Aufgabenstellung

Das Ziel der vom Landesamt für Umweltschutz und der Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbaudurchgeführten Untersuchungen bestand in der messtechnischen Ermittlung der Emissionen relevanter Luftschadstoffe in Felduntersuchungen an beispielhaften Feuerungsanlagen bei der Verfeuerung von biogenen Brennstoffen wie Getreide, Stroh und ähnlichen pflanzlichen Stoffen.

Die Beschaffung, Aufarbeitung und Bereitstellung der biogenen Brennstoffe erfolgte durch die LLFG unter Berücksichtigung landwirtschaftlicher (pflanzenbaulicher), ökologischer, ökonomischer und feuerungstechnischer Aspekte. Insbesondere sollten die Versuche die Eignung der untersuchten festen Bioenergieträger (z.B. Wintergerste, Winterweizen, Roggen, Miscanthus, Switchgras, Stroh, Spreu) als Brennstoff bei gleichzeitiger Erfüllung immissionschutzrechtlicher Anforderungen nachweisen.

Die beiden untersuchten Feuerungsanlagen (Biomassekessel Biokompakt - AWK 45 und Biomassekessel IHT GE 30) wurden durch die LLFG beschafft, aufgestellt und betrieben. Die Aufstellung der Kessel erfolgte im Heizungsraum des Verwaltungsgebäudes des Lehr- und Versuchsgutes der LLFG in Bernburg.

Das LAU führte die Emissionsmessungen unter Anwendung von standardisierten Emissionsmessverfahren durch. Die Ermittlungsergebnisse sollten vergleichbar sein und die Untersuchungen sollten unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt werden.

Die messtechnische Ermittlung der Emissionen erfordert aufgrund der Vielzahl relevanter Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen und den schadstoffspezifisch in den standardisierten Messverfahren geforderten, zum Teil sehr langen Probenahmezeiten einen Kesselbetrieb über mehrere Versuchstage im Nennlastbereich. Da die dafür benötigten Brennstoffmengen nicht für alle Brennstoffe bereitgestellt werden konnten, erfolgte in diesen Fällen eine Beschränkung auf die messtechnische Ermittlung von Komponenten, die mit kontinuierlich arbeitenden Messeinrichtungen erfasst werden können (Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Gesamtkohlenstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid) sowie auf Komponenten, die mit einer Probenahmedauer von 30 Minuten messbar sind und bekanntermaßen bei der Verbrennung biogener Brennstoffe eine kritische Rolle spielen können (z.B. Gesamtstaub, Feinstaubgehalt, Chlorwasserstoff).

Die Emissionen folgender Schadstoffe/Schadstoffgruppen wurden messtechnisch ermittelt (Umfang bzw. Versuchstiefe je nach Brennstoff):

- Gesamtstaub
- Feinstaub PM_x
- Staubinhaltsstoffe: Arsen, Blei, Cadmium, Vanadium, Nickel, Mangan, Cobalt, Chrom, Palladium, Tellur, Selen, Thallium, Kupfer, Zinn, Zink, Eisen
- Staubinhaltsstoffe: wasserlösliche Ionen
- Quecksilber
- Kohlenmonoxid,
- Kohlendioxid,
- Stickstoffoxide,
- Schwefeldioxid,
- Gesamtkohlenstoff,
- Chlorwasserstoff,
- Benzol, Toluol, Xylol (BTX)
- Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)
- Polychlorierte Biphenyle (PCB)
- Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und -Furane (PCDD/F).

Im jeweiligen Messzeitraum wurden Parameter, die das Betriebs- und Emissionsverhalten des Ofens beschreiben und die für die Aufstellung von Massenbilanzen sowie für die regelgerechte Probenahme bestimmter Schadstoffe erforderlich sind, messtechnisch erfasst. Letzteres trifft insbesondere auf die Einhaltung isokinetischer Bedingungen für die Teilstromentnahme zur Staubprobenahme und zur Probenahme aller partikelgebundenen Schadstoffe zu. Hier sind die genaue Kenntnis der Abgasgeschwindigkeit und deren zeitlicher Verlauf während des Abbrandzyklus erforderlich.

Messtechnisch erfasst wurden auch die Abgasrand-, Brennstoff- und Ascheparameter (siehe Tab. 5).

3 Versuchstand

3.1 Beschreibung der Feuerungsanlagen am Standort Bernburg

Die Messungen erfolgten im Versuchsstand des Verwaltungsgebäudes des Lehr- und Versuchsgutes der LLFG in Bernburg. In den Jahren 2005, 2006 und 2008 erfolgten die Untersuchungen am Biomassekessel Biokompakt - AWK 45 der Firma Gerlinger. In den Jahren 2009 und 2010 wurden die Messungen am Biomassekessel IHT GE 30 der Firma Innovative Heiztechnik GmbH durchgeführt.

3.1.1 Biomassekessel Biokompakt - AWK 45

Der Biomassekessel AWK 45 ist für die Verbrennung von Biomasse (z.B. Getreide und Holzpellets) konzipiert. Die für den jeweiligen Brennstoff erforderlichen Einstellungen des Kessels (Pausenzeit, Schubzeiten, etc.) können manuell eingestellt werden. Eine Speicherung brennstoffspezifischer Betriebsparameter in der integrierten Steuerung des Kessels ist möglich.

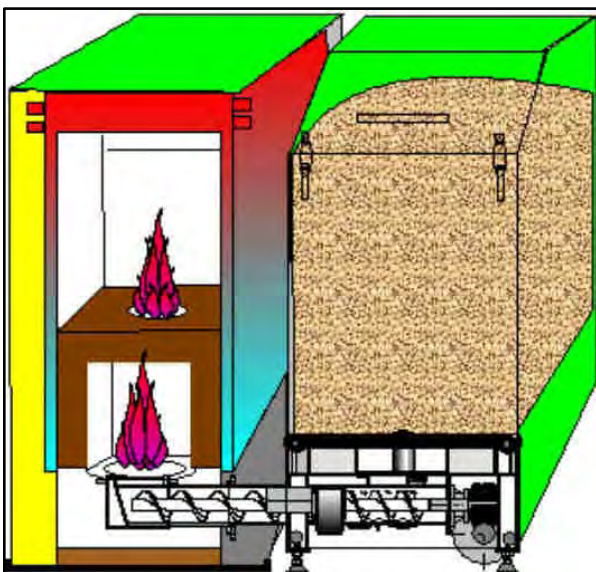


Abbildung 1: schematische Darstellung des AWK 45



Abbildung 2: Kessel AWK 45 mit Vorratsbehälter

Der Brennstoff wird dem Kessel über eine Brennstoffschnecke aus dem Vorratsbehälter (Wochenbehälter) zugeführt. Er gelangt in die heiße Brennkammer und verbrennt (verschwelt) dort. Ein geregelter Primärlüfter bläst durch Bohrungen in der Schamotteauskleidung vorgewärmte Verbrennungsluft in die Brennkammer. Oberhalb der Brennkammer befindet sich die Wirbelbrennkammer, in die vorgewärmte Verbrennungsluft über den geregelten Sekundärlüfter zur besseren Verbrennung der Schwelgase eingeblasen wird. Über die nachgeschalteten, stehenden Heiztaschen wird die Wärme an das Heizungswasser übertragen.

Am Ende des Kessels befindet sich ein geregelter Abgaslüfter, der das Abgas in den Kamin fördert. Zur Regelung der Verbrennungsluftzufuhr ist der Kessel mit einer Lambdasonde ausgerüstet. Die Asche wird periodisch über eine Schnecke aus der Brennkammer in einen Aschebehälter ausgetragen.

Reinigung: Die Heiztaschen können durch eine zwischen den Heizflächen angeordnete Reinigungseinrichtung gereinigt werden. Im Abstand von ca. 4 Wochen, abhängig von der Beanspruchung des Kessels, ist eine gründliche Reinigung des Kessels erforderlich.

Der Kessel muss dazu außer Betrieb genommen werden und abgekühlt sein. Die Heiztaschen werden mit einer Reinigungsbürste manuell gereinigt. Die in der Ascheabsetzkammer (unterhalb der Heiztaschen) abgesetzte Flugasche muss entfernt werden. Der Feuer- und Kesselinnenraum wird mit einem Industriestaubsauger gereinigt.

Hersteller:	Fa. Gerlinger Biokompakt®-Heiztechnik
Typ:	AWK 45
Baujahr:	2005
Nennwärmeleistung:	45 kW
Leistungsbereich:	12 – 45 kW
Wasserinhalt:	145 l
zulässiger Betriebsdruck:	3 bar
max. zulässige Betriebstemperatur:	95 °C

Beschreibung der Emissionsquellen:

Emissionsquelle:	Edelstahlkamin
Höhe über Grund:	ca. 5,8 m
Austrittsfläche:	0,02 m ²
Rechtswert/Hochwert:	4480240/5743765
Bauausführung:	Edelstahl

Das Abgasrohr des Kessels bindet waagrecht in den Abgaskamin ein.

Abgasventilator肯daten:

Hersteller:	Fa. Hanning Elektro-Werke GmbH
Typ Lüfterrad:	833-0090
Volumenstrom:	ca. 550 m ³ /h
Drehzahl:	2800 min ⁻¹

Der Ventilator wird über die Kesselsteuerung mit einer Drehzahl von 10 bis 100 % betrieben (Frequenzregelung).

3.1.2 Biomassekessel IHT GE 30

Der Biomassekessel IHT GE 30 ist für die Verbrennung von Biomasse (z.B. Getreide und Holzpellets) konzipiert und besteht aus einem Ober- und Unterteil. Im Oberteil befinden sich u. a. das Flammrohr sowie der Ringspaltwärmetauscher während im unteren Teil des Kessels die 2- stufige Verbrennung und der untere Wärmetauscher angeordnet sind. Die für den jeweiligen Brennstoff erforderlichen Einstellungen des Kessels (Gebläseleistungen, Brennstoffmenge, Dreh- und Pausenzeiten für Asche- und Brennstab, etc.) können manuell eingestellt werden. Eine Speicherung brennstoffspezifischer Betriebsparameter in der integrierten Steuerung des Kessels ist möglich.

Der Brennstoff in Form von Pellets wird manuell im Vorratsbehälter vorgelegt und über eine Förderschnecke zur Verbrennung herausgefördert. Der Brennstoff fällt über einen Fallschacht in die eigentliche Brennstoffschnecke (Stokerschnecke), die bei Störung durch eine Brandschutzklappe (BSKL) abgeriegelt wird. Mittels Unterschubtechnik wird der Brennstoff von unten auf den Brennerteller aus Siliziumcarbid befördert.

Oberhalb des Brennertellers befindet sich ein Brennstab, der sich periodisch um den Brennerteller dreht und den Brennstoff auf dem Brennerteller verteilt und nach außen schiebt. Die Zündung erfolgt automatisch durch eine installierte Heißluftpistole, welche Temperaturen von 400 – 600 °C erzeugt und den Brennstoff bis zur Selbstentzündung erhitzt. Über dem Brennerteller befindet sich die ringförmig angebrachte Verbrennungsluftzufuhr. Die Verbrennungsluft wird einmal in Richtung Brennerteller (Primärluft) und einmal in Richtung Flammrohr (Sekundärluft) eingedüst. Die Verbrennungsluft (Primär- und Sekundärluft) wird durch ein geregeltes Gebläse erzeugt.

Das Brenngut fällt vom Brennerteller in den unteren Brennraum und brennt dort vollständig aus. Im unteren Brennraum wird über ein zweites geregeltes Gebläse weitere Verbrennungsluft eingeblasen.

Das Unterteil des Kessels ist mit einem Wassermantel als Wärmetauscher ausgestattet. Dadurch wird die entstehende Wärme des Brennraumes abtransportiert und durch Kühlung des Brenngutes die Ascheschmelze und damit die Schlackebildung vermindert. Im unteren Brennraum befindet sich ein Brennstab, der sich alternierend dreht und die Asche zur Ascheaustragsschnecke befördert. Die Asche wird dann über die Ascheaustragsschnecke in einen nebenstehenden Aschebehälter transportiert.

Die Verbrennungsgase werden oberhalb des Brennertellers in ein Flammrohr aus Siliziumcarbid geleitet. Auf dem Weg vom zentrisch angeordneten Flammrohr in die Ausbrandglocke und von dort in den Ringspaltwärmetauscher werden die Verbrennungsgase dreifach umgelenkt. Durch die lange Ausbrandstrecke soll eine gute Verbrennung der gas- und partikelförmigen brennbaren Stoffe sowie ein guter Wärmeaustausch erreicht werden. Die Abgase werden dann über ein geregeltes Abluftgebläse in den Kamin geleitet.

Der Staub aus dem oberen Wärmetauscher (Ringspaltwärmetauscher) wird über eine Schnecke in einen separaten Staubbehälter befördert, um die Asche frei von in der Flugasche befindlichen Schadstoffen zu halten.



Abbildung 3: Kessel IHT GE 30

Zusammenfassend kann die 2- stufige Verbrennung folgendermaßen beschrieben werden:

1. Stufe: Trocknung und Entgasung des biogenen Brennstoffs

Hier werden die flüchtigen, brennbaren Bestandteile entgast und verbrannt. Diese Gasphasenreaktion verläuft bei hohen Reaktionsgeschwindigkeiten.

2. Stufe: Verbrennung des Kohlenstoffgerüsts

Das nach der Verbrennung verbleibende Kohlenstoffgerüst fällt in einen gesonderten Verbrennungsraum und wird mit dem Luftsauerstoff in einer langsam verlaufenden Reaktion verbrannt. Die erforderliche Verweilzeit in dieser Verbrennungsstufe ist um ein vielfaches höher als bei der Entgasungsstufe. Diese Nachverbrennung der Kohlenstoffgerüste findet bei Temperaturen um 700°C statt. Das Brennstoffbett wird ständig in Bewegung gehalten, damit in der Nachverbrennung eine Ascheschmelze (Schlackebildung) verhindert werden kann.

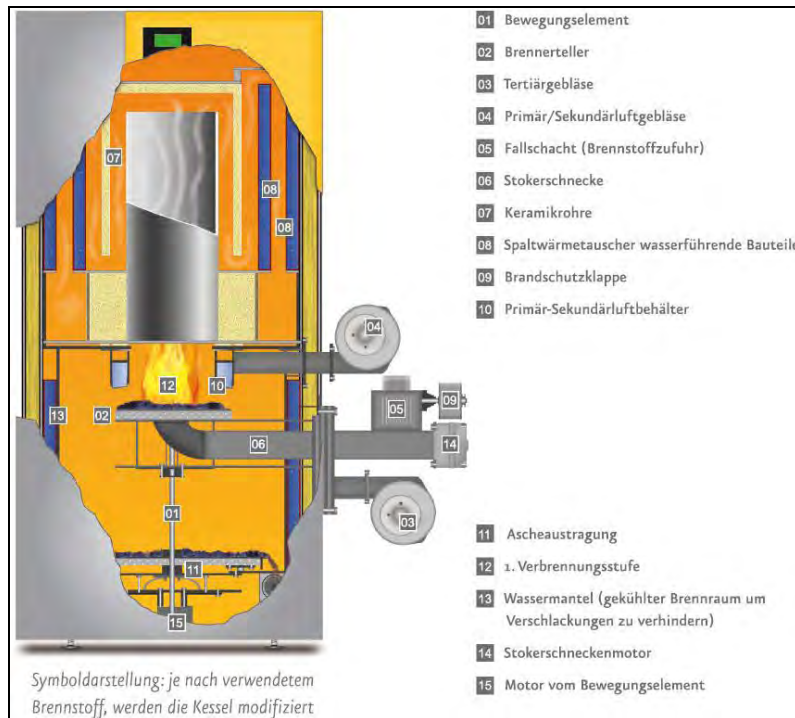


Abbildung 4: Schnittdarstellung des IHT GE 30

Reinigung:

Im Abstand von ca. 4 Wochen, abhängig von der Beanspruchung des Kessels, ist eine gründliche Reinigung des Kessels erforderlich. Der Kessel muss dazu außer Betrieb genommen werden und abgekühlt sein. Bei der Reinigung müssen Asche und Verbrennungsrückstände im Kessel (Ringspaltwärmetauscher, Flammrohr, Brennraum) entfernt werden. Die Reinigung sollte mit Reinigungsbürsten und einem Industriestaubsauger erfolgen.

Hersteller: Innovative Heiztechnik IHT GmbH
 Typ: IHT GE 30
 Baujahr: 2008
 Nennwärmeleistung: abhängig vom Brennstoff, für Stroh-Pellets und Getreide 25 - 30 kW
 Wasserinhalt: 110 l
 zulässiger Betriebsdruck: 2,5 bar
 max. zulässige Betriebstemperatur: 90 °C

Beschreibung der Emissionsquellen:

Emissionsquelle: Edelstahlkamin
 Höhe über Grund: ca. 5,7 m
 Austrittsfläche: 0,02 m²
 Rechtswert/Hochwert: 4480240/5743765
 Bauausführung: Edelstahl
 Das Abgasrohr des Kessels bindet waagrecht in den Abgaskamin ein.

Abgasventilator肯daten:

Hersteller: Fa. EBM-Papst Mulfingen GmbH
 Typ: ebm R2E150-AN91-10
 Volumenstrom: 145 m³/h
 Gesamtdruck: 280 Pa
 Drehzahl: 2400 min⁻¹
 Leistung: 32 W
 Der Ventilator wird über die Kesselsteuerung mit veränderlicher Drehzahl betrieben (Frequenzregelung).

3.2 Beschreibung des Messplatzes

Der Versuchsstand einschließlich des Messplatzes für die Emissionsprobenahme befindet sich im Heizungsraum des Verwaltungsgebäudes des Lehr- und Versuchsgutes der LLFG in Bernburg. In der unmittelbar nach dem Kessel installierten waagerechten Einbindung der Abgase in den Abgaskamin erfolgte die Probenahme für die kontinuierliche Gasanalyse mit automatisch arbeitenden Messeinrichtungen über eine installierte 2"-Muffe.

Die Probenahme der anderen untersuchten Abgasbestandteile und die Messung der Abgastemperatur erfolgten im senkrechten Abgaskamin innerhalb des Heizungsraumes. Der Abgaskamin war dazu mit Messöffnungen (eine 3"-Muffe, zwei 2"-Muffen und eine 1/2"-Muffe (Temperaturmessung)) ausgestattet worden. Ende 2008 wurde der Kessel AWK 45 durch den Kessel IHT GE 30 ersetzt.

Beim Austausch der Kessel mussten die Probenahmestellen im Kamin nur geringfügig verändert werden. Nachfolgend ist der Messplatz für die Emissionsprobenahmen in den Abbildungen 5 und 6 bildlich dargestellt. Die Längen der ungestörten Ein- und Auslaufstrecken sind den Tabelle 1 und 2 zu entnehmen. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten konnten nicht an allen Probenahmestellen die Anforderungen der DIN EN 15259 „Luftbeschaffenheit - Messung von Emissionen aus stationären Quellen - Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht, Deutsche Fassung EN 15259:2007“ hinsichtlich der Längen ungestörter Ein- und Auslaufstrecken erfüllt werden.



Abbildung 5: Versuchsstand

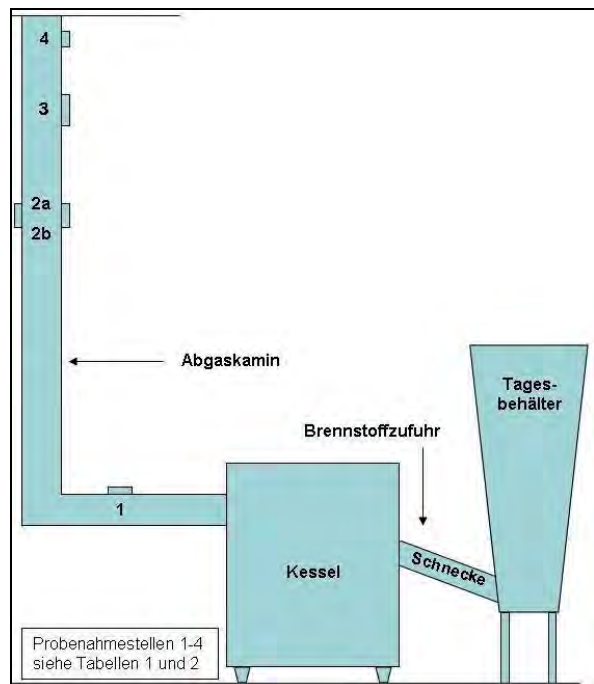


Abbildung 6: vereinfachte Darstellung des Versuchsstandes

Tabelle 1: Probenahmestellen bei Emissionsmessung am AWK-Kessel

AWK 45				
Stutzen	1	2 a/2 b	3	4
Probenahme/ Messung von	kont. Gas- analyse	Abgasgeschw., diskont. Probenahmen	diskont. Probe- nahmen	Temperatur
Lage im Abgasweg	waagrecht	senkrecht	senkrecht	senkrecht
Stutzen	2"-Muffe	2 x 2"-Muffe zueinander um 90° versetzt	3"-Muffe	½"-Muffe
Durchmesser Mess- querschnitt	160 mm	160 mm	160 mm	160 mm
Einlaufstrecke	170 mm	480 mm	860 mm	950 mm
Auslaufstrecke	350 mm	ca. 3,4 m	ca. 3,0 m	ca. 2,9 m
Einlaufstrecke nach EN 15259	nein	nein	ja	ja
Auslaufstrecke nach EN 15259	nein	ja	ja	ja

Tabelle 2: Probenahmestellen bei Emissionsmessung am IHT-Kessel

IHT GE 30				
Stutzen	1	2 a/2 b	3	4
Probenahme/ Messung von	kont. Gasanalyse	Abgasgeschw., diskont. Probenahmen	diskont. Probe- nahmen	Temperatur
Lage im Abgasweg	waagrecht	senkrecht	senkrecht	senkrecht
Stutzen	2"-Muffe	2 x 2"-Muffe zueinander um 90° versetzt	3"-Muffe	½"-Muffe
Durchmesser Mess- querschnitt	160 mm	160 mm	160 mm	160 mm
Einlaufstrecke	200 mm	980 mm	1360 mm	1450 mm
Auslaufstrecke	250 mm	ca. 2,8 m	ca. 2,4 m	ca. 2,3 m
Einlaufstrecke nach EN 15259	nein	ja	ja	ja
Auslaufstrecke nach EN 15259	nein	ja	ja	ja

Zur Erfassung der abgegebenen Wärme wurde der Vor- und Rücklauf der Versuchskessel mit einem Wärmemengenzähler ausgerüstet. Der Heizkreislauf der Versuchskessel bindet in einen Speicher (Schichtenspeicher) ein. Vom Speicher erfolgte die Beheizung des Gebäudes über eine separate Pumpe. Um für die Messungen eine konstante Fahrweise bzw. Wärmeabnahme zu ermöglichen, konnten bei Bedarf ein wassergekühlter Plattenwärmetauscher (max. Heizleistung: 40 kW) und/oder ein Heizregister mit einem zweistufigen Gebläse zugeschaltet werden.

4 Versuchsprogramm

Im Rahmen eines Untersuchungsprogramms wurden durch das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) seit dem Jahre 2005 die Emissionen an zwei Kleinf Feuerungsanlagen bei Verbrennung von nachwachsenden Rohstoffen ermittelt. Die Messungen erfolgten in Form von Messkampagnen in der kalten Jahreszeit in Zusammenarbeit mit der LLFG in Bernburg. Zu Beginn des Untersuchungsprogramms wurden die Messkampagnen in den Jahren 2005 und 2006 im Rahmen eines Forschungsprojektes des Forschungs- und Beratungszentrums für Maschinen- und Energiesysteme e. V. Merseburg durchgeführt. Die Zusammenarbeit erfolgte auf Grundlage eines öffentlich-rechtlichen Vertrages (Austauschvertrag) über die Durchführung eines Messprogramms zur Ermittlung des Emissionsverhaltens an einem Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45 zwischen dem FBZ und dem LAU.

Das Forschungsprojekt mit dem FBZ wurde im Rahmen eines umfangreichen Forschungsprogramms der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) zum Thema „Energetische Nutzung von festen Bio-

energieträgern, insbesondere von Getreide, Stroh und anderen nachwachsenden Rohstoffen außer Holz sowie Felduntersuchungen zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmezeugungsanlagen < 1 MWth“ durch die FNR gefördert.

Bei den Untersuchungen in den Jahren 2005 und 2006 wurden als Brennstoffe verschiedene Getreidesorten und zum Vergleich Holzpellets eingesetzt. Seit 2008 wurden die Messungen in alleiniger Kooperation von LAU und LLFG ohne Beteiligung des FBZ fortgeführt. 2008 wurden die Messungen mit den biogenen Brennstoffen Miscanthus und Switchgras am ersten Kessel abgeschlossen. 2009 und 2010 wurden die Messungen an einem neuen zweiten Kessel bei Verbrennung von Pellets aus Stroh, Switchgras, Igniscum, Spreu und Holz fortgeführt.

4.1 Versuchsbrennstoffe

Die Versuchsbrennstoffe der 2006 für das FNR - Projekt zu bearbeitenden Aufgabenstellung wurden durch diese vorgegeben und als Referenzbrennstoffe auch allen beteiligten Partnern zum Vergleich der verschiedenen Typen von Biomassekesseln aus einer einheitlichen Charge bereitgestellt. Dabei handelte es sich um typische Anbauprodukte wie Winterweizen und Wintergerste (WG II). Für einen Vergleich wurden Holzpellets bei einem regionalen Händler selbst beschafft. Diese Holzpellets wurden bei den Untersuchungen in den Jahren 2005 und 2006 verwendet. Alle sonstigen Brennstoffe wurden durch die LLFG beschafft.

Die Getreidekörner wurden handelsüblich gereinigt und enthielten keine Abprodukte wie Bruchkorn und ähnliches. Dies simulierte praktisch die Entnahme des landwirtschaftlichen Betriebes aus der eigenen Ernte, die mengenmäßig im Bereich kleinerer Kessel unter 100 kW gegenüber der Gesamterntemenge durchschnittlicher Betriebe auch vertretbar erschien. Dennoch haben die Diskussionen um den auch ideellen Wert des Getreidekorns und die allgemeine Preisentwicklung zum Entschluss geführt, die Untersuchungen mit dem Schwerpunkt Energiepflanzen, Stroh und strohähnliche Reststoffe fortzusetzen. Auch in dem Wissen, das es sich emissionsseitig um erheblich kritischere Stoffe handelt, deren Handling wegen des notwendigen Pelletierens auch kostenintensiver ist.

Bei den Versuchen am Kessel AWK 45 wurde den Brennstoffen Wintergerste I und II, Winterweizen sowie Roggen ca. 2 Masse-% Kalk zugesetzt. Die Kalkzugabe erfolgte, um eine Schlackebildung im Feuer-/Ascheraum des Kessels zu vermindern. Um Unterschiede bei der Schlackebildung bei der Verbrennung von Strohpellets am IHT GE 30 zu untersuchen, wurden Strohpellets ohne und mit Kalkzusatz (Strohpellets und Strohpellets K) eingesetzt. Da in der erst zeitgleich zu den Messungen angelegten Parzellenanlage der LLFG die Bestände noch nicht vollständig etabliert waren, mussten die meisten biogenen Brennstoffe von bekannten Partnern beschafft und pelletiert werden.

Tabelle 3: Übersicht der eingesetzten Brennstoffe und ihre Herkunft

Kessel	Brennstoff	Bezugsquelle, Herkunft, Pelletierung
AWK 45	Wintergerste I	Bezug durch Magdeburger Getreide-Gesellschaft, Lager Staßfurt, regionale Partie aus Ernte 2004, Qualität E 04 Futtergetreide mit mäßigem N-Gehalt, Zugabe von ca. 2 Mass.-% Kalk
AWK 45	Holz	Bezug durch Fa. Strobel GbR, Quellendorf, 8 mm, Hersteller „ENPAL“ aus Kostryzyn/Oder, Prüfzeugnis des Institutes für Holztechnologie Poznan nach DIN und ÖNORM
AWK 45	Winterweizen	Referenzbrennstoff des FNR-Projektes, aus Anbauprogramm der TLL, Ernte 2005, Zugabe von ca. 2 Mass.-% Kalk
AWK 45	Wintergerste II	Referenzbrennstoff des FNR-Projektes, aus Anbauprogramm der TLL, Ernte 2005, Zugabe von ca. 2 Mass.-% Kalk
AWK 45	Roggen	Winterroggen Sorte Quadriga, ökologischer Anbau, Agrarbetrieb Schloss Storkau, Zugabe von ca. 2 Mass.-% Kalk
AWK 45	Miscanthus	C4-Pflanze von einer Versuchsanlage am Standort Bernburg, Herkunft China und asiatischer Raum, verwendete Sorte Gigantheus, gilt als klassische thermisch verwertbare Pflanze mit hohem Trockenmasseertrag, pelletiert durch die Fa. Trockenwerk Grimma GmbH
AWK 45	Switchgras	Herkunft Betrieb Treseler, 31312 Lübbecke-Stockhausen, pelletiert durch die PTG GmbH Apolda, Gemisch aus den Sorten Blackwell / Cave-in-Rock / Trailblazer
AWK 45	Winterroggen geröstet	Winterroggen geröstet, Versuch zur Ermittlung des Einflusses thermischer Vorbehandlung, Herstellung mit Unterstützung der Fa. Röstfein Kaffee GmbH Magdeburg, Winterroggen: Sorte Quadriga, ökologischer Anbau, Agrarbetrieb Schloss Storkau
IHT GE 30	Stroh	Winterweizenstroh aus 06255 Schafstädt, unbehandelt und von der Fa. Agrarhandel & Transport GmbH in Schafstädt pelletiert
IHT GE 30	Stroh K	Winterweizenstroh aus dem Betrieb Lange & Meyer GbR, 27318 Hilgermissen, durch den Betrieb unter Zugabe von 2 Mass.-% Kalk pelletiert, Wegen der erheblichen Bodenunterschiede der Anbauregionen Schafstädt und Hilgermissen führte allerdings die Kalkzugabe bei den Strohpellets K zu keinem relevanten Unterschied bezüglich des Kalkgehalts der Strohpellets.
IHT GE 30	Switchgras A1	C4-Pflanze aus dem Betrieb Treseler in 32312 Lübbecke-Stockhausen, pelletiert durch die PTG GmbH Apolda, Switchgras ist ein mehrjähriges Präriegras, das in Nordamerika vielfältig energetisch genutzt wird und zu Sortenzüchtungen führte, die für hiesige Klima- und Bodenbedingungen sehr gut geeignet sind. Die Pflanze wurde u. a. an der Universität Bonn umfassend wissenschaftlich untersucht und erwies sich auch bei schwierigen Bedingungen als recht ertragreich.
IHT GE 30	Igniscum	bereitgestellt von der Fa. CONPOWER Rohstoff GmbH & Co. KG, 82166 Gräfling, pelletiert durch die Fa. Agrarhandel & Transport GmbH in Schafstädt, Sie wird als Neuzüchtung einer Knöterich-Hybride unter dem Markenzusatz Basic speziell für die thermische Nutzung vertrieben. Verwertet wird der überwinterte, abgetrocknete hohle Stängel, der als holzartig beschrieben werden kann.
IHT GE 30	Switchgras A2	A2 (identisch mit A1): Aufgrund der vergleichsweise günstigen Emissionswerte und Brennstoffeigenschaften wurden Switchgraspellets A1, die im Jahr 2009 bereits vermessen wurden, im Jahr 2010 als Switchgraspellets A2 noch einmal messtechnisch untersucht. Das Ziel war, eine breitere Datenbasis zur sichereren Bewertung dieses Brennstoffes zu erhalten.
IHT GE 30	Switchgras B	aus dem Versuchsanbau der LLFG (Ernte 2010), Sorte Shawnee, pelletiert durch die PTG GmbH Apolda
IHT GE 30	Spreu	Winterweizenspreu von einer Anbaufläche Winterweizen am Standort Bernburg, pelletiert durch die PTG GmbH Apolda
IHT GE 30	Holz DINplus	nach DINplus zertifiziertes Material des Herstellers „german pellets“, Marke Woodox der Fa. Pelletproduktion Sachsen GmbH / Löbau

4.2 Versuchsbetrieb der Feuerungsanlagen

Der jeweilige Kessel wurde vor Beginn der einzelnen Messkampagnen und bei Brennstoffwechsel gereinigt. Die Asche- und Staubbehälter wurden entleert. Der Abgaskamin wurde durch den Schornsteinfeger gekehrt. Ascheablagerungen im Kessel und im Kamin wurden, soweit es möglich war, entfernt.

Vor Beginn der Emissionsmessungen wurde der Kessel über mindestens einen Tag mit dem zu untersuchenden Brennstoff betrieben. Damit sollte der Forderung entsprochen werden, dass der Kessel incl.

Abgasleitung und Kamin über eine gewisse Betriebsdauer mit dem jeweiligen Brennstoff eingefahren wird.

Im Rahmen dieses „Einfahrens“ wurden die Kesselparameter (z. B. Brennstoffverbrauch, Leistung der Saugzuggebläse) an den Betrieb mit dem jeweiligen Brennstoff und die zu untersuchende Laststufe angepasst (Vorversuche). Während der Messungen wurden die in den Vorversuchen ermittelten Kesselparameter nicht mehr verändert. Im Messzeitraum war aufgrund dieser Bedingungen unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung mit maximalen Emissionen zu rechnen.

Eine Ausnahme bildeten die ersten Versuche am AWK 45 mit den Brennstoffen Holzpellets und Wintergerste I. Hier erfolgten Veränderungen der Kesselparameter noch nach Beginn der jeweiligen Messkampagne, so dass in den ersten Abbrandversuchen kein durchgängig optimaler Kesselbetrieb vorlag.

Während jeder Messreihe wurden die Betriebsbedingungen regelmäßig protokolliert. Dabei wurden unter anderem die eingestellten Kesselparameter, die Kesselleistung, die Rauchgastemperatur und die Parameter des Wärmemengenzählers erfasst.

Die Untersuchungen am AWK 45 erfolgten bei Voll- und Halblastfahrweise. Am IHT GE 30 erfolgten die Messungen nur im Vollastbetrieb. Während der Untersuchungen am AWK 45 wurden bei Verbrennung von Wintergerste und Winterweizen dem Getreide ca. 2 Masse-% Kalk zugesetzt, um den Ascheschmelzpunkt zu erhöhen und Verschlackungen zu vermeiden.

Die Bestimmung der Brennstoffmenge erfolgte durch Differenzwägung der im Brennstoffvorratsbehälter vorgelegten und nach dem jeweiligen Probenahmezeitraum (täglich) noch vorhandenen Brennstoffmenge. Die bei der Verbrennung angefallene Asche wurde beim AWK 45 bei den Versuchen in den Jahren 2005 und 2006 täglich entnommen und gewogen. Bei den Versuchen im Jahr 2008 (AWK 45) und beim Einsatz des IHT GE 30 wurde die Asche erst nach Abschluss der jeweiligen Messreihe aus dem unteren Brennraum bzw. dem Aschebehälter entnommen und gewogen. Dadurch erfolgte ein besserer Ausbrand der Asche und die Ascheentnahme entsprach mehr den realen Betriebsbedingungen.

4.3 Ermittelte Messkomponenten

Die folgende Tabelle 4 stellt die bei den Emissionsmessungen ermittelten Komponenten und die jeweilige Probenanzahl dar. Die Probenanzahl bezüglich der mit automatischen Messeinrichtungen kontinuierlich ermittelten Komponenten umfasst jeweils alle gültigen und in die Auswertung einbezogenen Halbstundenmittelwerte.

Tabelle 4: Anzahl der Emissionsprobenahmen

Messprogramm	Kessel AWK 45								Kessel IHT GE 30								
	Getreidekorn					Pellets			Pellets								
Brennstoff	Wintergerste I	Winterweizen	Wintergerste II	Roggen	Winterroggen, geröstet	Holz	Holz, Nachmessung 2006	Miscanthus	Switchgras	Igniscum	Switchgras A1	Stroh	Stroh k	Switchgras A2	Switchgras B	Spreu	Holz (DINplus)
Landesamt für Umweltschutz Messbericht-Nr.	01-2005	02-2006	03-2006	04-2006	03-2008	02-2005	05-2006	01-2008	02-2008	04-2009	03-2009	01-2009	02-2009	04-2010	03-2010	05-2010	06-2010
Emissionskomponente	Anzahl der Ermittlungen Halbstundenwerte bzw. Probenahmen																
Schwefeldioxid	78	69	73	6	8	65	24	42	11	12	27	35	5	8	13	16	6
Stickstoffoxid	78	69	73	6	8	65	24	42	11	12	27	35	5	8	13	16	6
Gesamtkohlenstoff	78	69	73	6	8	65	24	42	11	12	27	35	5	8	13	16	6
Kohlenmonoxid	78	69	73	6	8	65	24	42	11	12	27	35	5	8	13	16	6
Kohlendioxid	78	69	73	6	8	65	24	42	11	12	27	35	5	8	13	16	6
Sauerstoff	78	69	73	6	8	65	24	42	11	12	27	35	5	8	13	16	6
Chlorwasserstoff	3	3	10	-	-	3	-	3	-	3	3	3	-	3	3	3	3
Gesamtstaub	6	6	6	3	4	3	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Staubinhaltsstoffe																	
Metalle, Halbmetalle	3	3	3	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quecksilber	3	3	3	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasserlösliche Ionen	-	-	-	-	4	-	-	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3
Korngrößenverteilung des Staubes (PM _x)	3	3	3	-	-	3	-	3	3	1	1	3	-	1	3	-	-
Benzol, Toluol, Xylol (BTX)	3	2	3	-	-	3	3	3	-	-	3	3	-	-	-	3	-
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)	4	1	3	-	-	3	3	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-
Dioxine/Furane (PCDD/F)	2	3	3	-	-	-	2	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	3	3	3	-	-	3	3	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Aschenanalyse	x	x	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Brennstoffanalyse	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Im jeweiligen Messzeitraum wurden die Parameter, die das Betriebs- und Emissionsverhalten des Kessels beschreiben und für die Aufstellung von Massenbilanzen sowie für die normengerechte Probenahme bestimmter Schadstoffe erforderlich sind, messtechnisch erfasst. Letzteres trifft insbesondere auf die Einhaltung isokinetischer Bedingungen für die Staubprobenahme und die Probenahme aller partikelgebundenen Schadstoffe (PCDD/F, PAH und PCB) zu. Hier ist die genaue Kenntnis der Abgasgeschwindigkeit und ihres zeitlichen Verlaufes während des Abbrandzyklus erforderlich. Die messtechnisch ermittelten Abgasrandparameter sowie die bestimmten Parameter zur Brennstoff- und Aschecharakterisierung sind in der nachfolgenden Tabelle 5 aufgelistet (der Analysenumfang kann je nach Brennstoff bzw. Asche variieren).

Tabelle 5: Ermittelte Abgasrandparameter sowie Parameter zur Brennstoff- und Aschecharakterisierung

Abgasrandbedingungen	Brennstoffparameter	Ascheparameter
Abgastemperatur	oberer und unterer Heizwert	Gesamtwasser
statischer Druck (Zugstärke)	Gesamtwasser	Gesamtkohlenstoff
Abgasgeschwindigkeit	Asche	Schwefel
Brennstoffmenge	Gesamtkohlenstoff	Stickstoff
Aschemenge (Rostasche)	Gesamtwasserstoff	Phosphor
Feuchte Rauchgas	Schwefel	Silizium
Luftdruck	Ascheschwefel	Chlor
	Stickstoff	Aluminium
	Phosphor	Arsen
	Silizium	Blei
	Chlor	Cadmium
	Brom	Chrom
	Lignin	Eisen
	Aluminium	Kupfer
	Arsen	Nickel
	Blei	Quecksilber
	Cadmium	Strontium
	Chrom	Thallium
	Eisen	Mangan
	Kupfer	Vanadium
	Nickel	Zink
	Quecksilber	Natrium
	Strontium	Kalium
	Thallium	Kalzium
	Mangan	Magnesium
	Vanadium	
	Zink	
	Natrium	
	Kalium	
	Kalzium	
	Magnesium	

5 Beschreibung der Messgeräte und –verfahren

Die verwendeten Emissionsmessverfahren und -messeinrichtungen entsprachen dem Stand der Emissionsmesstechnik. Die Emissionsmessungen erfolgten unter Beachtung der in der aktualisierten Fassung des Anhang 6 der TA Luft aufgeführten Richtlinien und Normen des VDI/DIN-Handbuches "Reinhaltung der Luft" /7/. Die Probenahme entsprach den Anforderungen der Norm DIN EN 15259.

5.1 Abgasrandbedingungen

Die Abgasrandbedingungen (Abgasgeschwindigkeit, Abgastemperatur, Abgasfeuchte, statischer Druck im Abgas und Luftdruck) wurden zu Beginn des Messtages, jeweils nach Erreichen eines stabilen Lastzustandes messtechnisch ermittelt. Beide untersuchten Kessel arbeiten quasi-kontinuierlich, so dass bei stabilem Lastzustand innerhalb des Probenahmezeitraumes nur von geringen Schwankungen der Abgasrandbedingungen auszugehen ist. Dies wurde durch die Messungen der Abgasrandparameter bestätigt.

Tabelle 6: Messgeräte zur Ermittlung der Abgasrandparameter

Abgasparameter	Messgerät/Messverfahren
Abgasgeschwindigkeit	Flügelradanemometer in Verbindung mit elektronischem Anzeigegerät Hersteller: Fa. Höntzsch (DIN EN ISO 16911)
Statischer Druck	Prandtl'sches Staurohr in Verbindung mit elektronischem Mikromanometer Hersteller: Airflow Lufttechnik GmbH (DIN EN ISO 16911)
Luftdruck	Dosenbarometer Hersteller: VEB Feingerätebau Drebach (Erzg.) (VDI 3786)
Abgastemperatur	Widerstandsthermometer, Pt 100 Hersteller: Dr. Pötzschke AUT GmbH (VDI/VDE 3511)
Feuchtegehalt im Abgas	Adsorption an Molekularsieb (0,3 nm) der Fa. Merck und nachfolgende gravimetrische Bestimmung (DIN EN 14790).

5.2 Kontinuierliche Messverfahren

Die kontinuierliche Emissionsmessung der Komponenten CO, SO₂, Cges, O₂, CO₂, NO/NO_x erfolgte mit den in der nachstehenden Tabelle 7 genannten eignungsgeprüften Messeinrichtungen (siehe auch Abb. 7). Die Messwerterfassung erfolgte mit der Software „Easycomp“ der Firma Breitfuss.

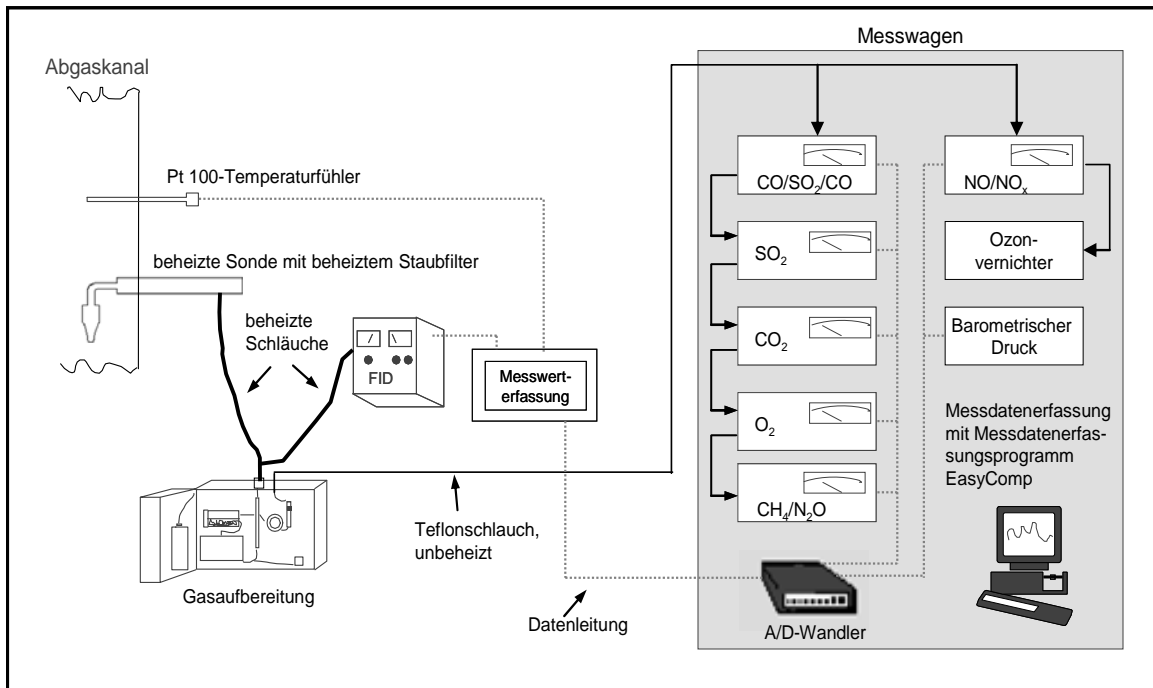


Abbildung 7: Schema der kontinuierlichen Gasanalyse und Messwerterfassung

Tabelle 7: Messeinrichtungen zur kontinuierlichen Gasanalyse

Messobjekt:	CO	CO	SO ₂ Messungen 2006	SO ₂	Cges
Messverfahren:	NDIR	NDIR	NDIR	NDIR	FID
VDI-Richtlinie:	DIN EN 15058, VDI 2459 Bl. 6	DIN EN 15058, VDI 2459 Bl. 6	VDI 2462 Bl. 4 zurückgezogen	VDI 2462 Bl. 4 zurückgezogen	DIN EN 12619, DIN EN 13526
Hersteller:	H&B	H&B	Siemens	H&B	Testa
Typ:	Advance Optima URAS 14	Advance Optima URAS 14	Ultramat 5E	Advance Optima URAS 14	FID 2010 T
kleinster Messbereich:	0 - 75 mg/m ³	0- 5.000 mg/m ³	0-100 mg/m ³	0 – 1.000 mg/m ³	0 - 10 ppm (C ₃ H ₈)
größter Messbereich:	0 - 750 mg/m ³	0- 50.000 mg/m ³	0-1.000 mg/m ³	0 – 7.000 mg/m ³	0 – 100.000 ppm (C ₃ H ₈)
Gerätetyp eignungsgeprüft:	ja	ja	ja	ja	ja
kleinster eignungsgeprüfter Messbereich:	0 - 75 mg/m ³	0 - 75 mg/m ³	0-100 mg/m ³	0 - 75 mg/m ³	0 - 25 mg/m ³ Cges
Messobjekt:	O ₂ Messungen 2005/2006	O ₂ Messungen ab 2008	CO ₂ Messungen 2005/2006	CO ₂ Messungen ab 2008	NO/NO _x
Messverfahren:	Magnetomechanisch	Magnetomechanisch	NDIR	IR (Gasfilterkorrelation)	Chemilumineszenz mit internem NO ₂ /NO-Konverter
VDI-Richtlinie:	DIN EN 14789	DIN EN 14789	---	---	DIN EN 14792
Hersteller:	H&B	Servomex	H&B URAS 3G	Servomex	Eco Physics AG
Typ:	Magnos 6G	XENTRA 4900	XENTRA 4900	XENTRA 4900	CLD 700 EL
kleinster Messbereich:	0-1 Vol.-%	0 - 10 Vol.-%	0 - 16 Vol.-%	0 - 25 Vol.-%	0 – 10 ppm
größter Messbereich:	0 - 25 Vol.-%	0 - 25 Vol.-%	0 - 40 Vol.-%		0 – 10.000 ppm
Gerätetyp eignungsgeprüft:	ja	ja	entfällt	entfällt	ja
kleinster eignungsgeprüfter Messbereich:	0-10 Vol.-%	0 - 5 Vol.-%	entfällt	entfällt	0 – 100 ppm

5.3 Diskontinuierliche Messverfahren

Die diskontinuierlichen Messverfahren erfolgten nach den in der folgenden Tabelle dargestellten technischen Regeln und Normen.

Tabelle 8: Übersicht der angewendeten Verfahren der diskontinuierlichen Emissionsmessung

Emissionen	Messkomponente	Norm (Probenahme- und Analyseverfahren)
gas- und dampfförmige Emissionen	HCl	DIN EN 1911 2 Waschflaschen mit destilliertem Wasser, Analyse durch Ionenchromatografie
	BTX	DIN EN 13649 und VDI 2457 Bl. 3 vorgeschalteter Kühler, Adsorption an Aktivkohle
partikelförmige Emissionen	Gesamtstaub	DIN EN 13284-1 und VDI 2066 Bl. 1 (instack, quarzwatte-gestopfte Titanhülse mit dahinterliegendem Planfilter)
	Partikelgebundenes und filtergängiges Quecksilber	DIN EN 13284-1 und DIN EN 13211 Staubprobenahme und nachgeschaltet 2 Waschflaschen mit Absorptionslösung 1 nach DIN EN 13211
	Partikelgebundene und filtergängige Metalle und Halbmetalle (As, Ca, (As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, V, Zn)	DIN EN 13284-1 und DIN EN 14385 Staubprobenahme und nachgeschaltet 3 Waschflaschen mit Absorptionslösung nach DIN EN 14385
	Staubinhaltsstoffe (wasserlösliche Ionen)	DIN EN 13284-1 und VDI 2066 Bl. 1 Analyse der wasserlöslichen Ionen durch Ionenchromatografie
	Korngrößenverteilung des Staubes	VDI 2066 Bl. 5 und Bl. 10 (6-stufiger Kaskadenimpaktor)
besonders hochtoxische Abgasinhaltsstoffe	PCDD/DF	DIN EN 1948 Bl.1-3 Probenahme mit wassergekühltem Absaugrohr; Adsorptionsstufe: 2 XAD-Kartuschen mit zwischengeschaltetem Planfilter
	PAH	2005/2006 erfolgte die Probenahme gleichzeitig mit den PCDD/F ab 2008: separate Probenahme nach VDI 3874 mit wassergekühltem Absaugrohr
	PCB	DIN EN 1948 Bl.1-3 gleichzeitige Probenahme mit PCDD/F

Für die Ermittlung der Korngrößenverteilung wurde ein sechsstufiger Kaskadenimpaktor des Typs STF 1 der Firma Ströhlein verwendet (Abbildung 8).



Abbildung 8: 6-stufiger Impaktor Typ STF 1

5.4 Isokinetische Probenahme

Bei der Emissionsprobenahme von Gesamtstaub und partikelgebundenen Schadstoffen (Dioxine/Furane, PAH und PCB) muss die Entnahme eines Teilgases aus dem Abgas unter isokinetischen Bedingungen erfolgen. Für die Festlegung der Teilgasvolumenströme wurden die Ergebnisse der täglich

ermittelten Abgasrandbedingungen verwendet. Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgten auf 2 Messachsen mit jeweils 3 Messpunkten.

Das Teilgasvolumen wurde mit geregelten Absaugeinrichtungen (thermische Massendurchflussmesser) entnommen. Infolge des geringen KaminDurchmessers von 160 mm erfolgten die Probenahmen jeweils nur auf einem Messpunkt in der Mitte des Kaminquerschnittes.

5.5 Qualitätssicherung

Das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Prüfstelle Emissionsüberwachung, betreibt ein Qualitätsmanagement-System nach DIN EN 17025.

Kontinuierliche Messverfahren:

Im Rahmen der Qualitätssicherung, wurde das gesamte Probenahmesystem incl. der Messgasaufbereitung und Sonde auf Dichtheit geprüft (Aufgabe von Stickstoff, Überprüfung mit Sauerstoffanalysator). Die verwendeten kontinuierlichen Messgeräte sind eignungsgeprüft und wurden messtäglich vor Beginn der Probenahmen am Null- und Referenzpunkt mit zertifizierten Prüfgasen bzw. Nullgas überprüft und gegebenenfalls neu justiert. Dabei erfolgte die Aufgabe der Prüfgase durch das gesamte Probenahmesystem. (incl. Messgasaufbereitung und Sonde). Jährlich erfolgt eine Funktionsprüfung der kontinuierlichen Messgeräte.

Diskontinuierliche Messverfahren:

Zur Gewährleistung der Qualitätssicherung bei der Probenahme wurden neben einer Dichtheitsprüfung der kompletten Probenahmeeinrichtung, entsprechend den Vorgaben der verwendeten Normen für jede Messserie Feldblindwerte bestimmt. Die verwendeten Prüfmittel wurden regelmäßig mit Hilfe rückführbarer Standards geprüft. Darüber hinaus, wird eine Vielzahl weiterer Qualitätssicherungsmaßnahmen sowohl im Einflussbereich der Probenahme als auch im Analytikbereich durchgeführt. Die entsprechenden Maßnahmen können den Originalberichten, siehe Quellenangabe, bzw. dem Qualitätsmanagementhandbuch entnommen werden.

Im Rahmen jedes Messprogramms wurde für den höchsten Messwert (Maximalwert) eines jeden Schadstoffs die erweiterte Messunsicherheit ermittelt.

Von den Mischproben der Brennstoffe und der Asche wurden jeweils Rückstellproben aufbewahrt.

6 Messergebnisse

6.1 Brennstoff- und Ascheinhaltsstoffe

Im Folgenden werden die wichtigsten Brennstoff- und Ascheinhaltsstoffe diskutiert und verglichen. Nachstehend sind diese in der Tabelle B. 1 im Anhang aufgeführt. Alle ermittelten Brennstoff- und Ascheparameter sind in den Tabellen B. 1 bis B. 16 dargestellt. Bei Betrachtung der Stoffgehalte in der Asche sind die jeweiligen Konzentrationen im Verhältnis zur Gesamtmenge der angefallenen Asche zu betrachten.

6.1.1 Kohlenstoff

Brennstoff:

Der Kohlenstoffgehalt bestimmt den Heizwert des Brennstoffes in erheblichem Maße. Der mittlere Kohlenstoffgehalt aller untersuchten Brennstoffe lag bei 44 Masse-%. Wesentliche Abweichungen zeigten sich bei den landwirtschaftlichen Brennstoffen Wintergerste I mit nur 39,5 Masse-% und bei Switchgraspellets B mit 47,7 Masse-% Kohlenstoff. Bei den an beiden Kesseln eingesetzten Holzpelletchargen wurden Kohlenstoffgehalte von 47,9 Masse-% (AWK 45) und 46,8 Masse-% (IHT GE 30) ermittelt.

Asche:

Die in der Asche enthaltenen Kohlenstoffgehalte geben Aufschluss darüber, wie effektiv der Ausbrand beim jeweiligen Brennstoff war. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz sollte der C-Gehalt in der Asche nach Ruckenbauer et al. [1996] 5 Masse-% nicht überschreiten. Bei vollständigem Ausbrand naturbelassener Hölzer liegt der C-Gehalt in der Asche noch darunter /8/. Bei den am Kessel AWK 45 eingesetzten Brennstoffen Holzpellets, geröstetem Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste II wurden in der Asche C-Gehalte zwischen 9,9 und 30,1 Masse-% festgestellt. Den geringsten C-Gehalt zeigte hier Wintergerste I mit 3,4 Masse-%.

Einige der am Kessel IHT GE 30 verwendeten Brennstoffe wiesen in ihrer Asche noch höhere C-Gehalte auf. So wurden hier C-Gehalte von ca. 47 Masse-% bei beiden Strohpelletchargen, 42,6 Masse-% bei der Holzpelletcharge und 12,8 Masse-% bei den Spreupellets gemessen. Demgegenüber wurde in der Asche der Charge Switchgraspellets B 1,4 Masse-% Kohlenstoff festgestellt.

Die auffallend hohen Kohlenstoffgehalte in der Asche weisen auf einen unvollständigen Ausbrand hin. Dieser resultierte aus dem Betriebsregime im Versuchsbetrieb. Die Kessel mussten nach Ende der Emissionsmessung abgeschaltet werden und wurden am nächsten Messtag wieder in Betrieb genommen. Dadurch konnte gerade im IHT-Kessel mit seiner separierten Ausbrandzone kein optimales Ausbrandergebnis erreicht werden.

Die bei den Switchgraspellets festgestellten geringen Kohlenstoffgehalte der Asche sprechen dafür, dass in diesem Fall eine optimale Kesseleinstellung und die guten Brennstoffeigenschaften trotz der negativen Auswirkungen des vorgenannten Betriebsregimes zu einem nahezu vollständigen Ausbrand geführt haben. Ein Zusammenhang zwischen hohen C-Gehalten in der Asche und einer überdurchschnittlichen CO-Konzentration im Abgas konnte nicht festgestellt werden.

6.1.2 Schwefel

Erwartungsgemäß wurden nennenswerte Schwefelgehalte lediglich in den Getreidekörnern gefunden. In Wintergerste I und Winterweizen konnten jeweils 0,23 Masse-%, in der Wintergerste II 0,14 Masse-% und dem gerösteten Winterroggen 0,12 Masse-% Schwefel nachgewiesen werden. Holzpellets wiesen den geringsten Schwefelgehalt mit weniger als 0,05 Masse-% auf. Die mittleren S-Gehalte lagen bei den halmgutartigen Brennstoffpellets bei 0,07 Masse-%.

Asche:

Die mittleren Schwefelgehalte in der Asche der Getreidekörner liegen bei 0,19 Masse-% und bei den halmgutartigen Pellets bei 0,40 Masse-%. Der maximale Wert von 0,66 Masse-% wurde in der Asche der Miscanthuspellets und der niedrigste Wert von 0,05 Masse-% in der Asche der Wintergerste gemessen.

6.1.3 Chlor

Brennstoff:

Die halmgutartigen Brennstoffe wiesen den Literaturdaten entsprechend mit bis zu 3,9 g/kg (Strohpellets K) die höchsten Chlorgehalte auf /5/. Miscanthuspellets mit 1,7 g/kg und die Charge Switchgraspellets am AWK 45 Kessel mit 1,1 g/kg wiesen als halmgutartige Brennstoffe ebenfalls hohe Chlorgehalte auf. Die Switchgraspelletchargen A1/A2 und B wiesen demgegenüber mit 0,3 g Cl/kg und einem Wert unter der Bestimmungsgrenze wesentlich kleinere Chlorgehalte auf. Die mit unter 0,02 g/kg geringsten Chlorgehalte wurden an beiden Holzpelletchargen gemessen.

Asche:

Die Chlorgehalte in der Asche spiegeln annähernd die Cl-Gehalte im Brennstoff wieder. Die höchsten Chlorgehalte wurden in den Strohpelletchargen festgestellt (Strohpellets 8,2 g/kg, Strohpellets K 9,0 g/kg). Geringe Chlorgehalte von unter 1 g/kg wurden in den Aschen von Wintergerste I, der Holzpellets (AWK 45), der Wintergerste II, des gerösteten Winterroggens und der Switchgraspellets A1/A2 gemessen.

6.1.4 Calcium

Brennstoff:

Die Calciumgehalte in den geprüften Brennstoffen liegen im Mittel bei 2,2 g/kg. Der Maximalwert von 6,1 g/kg wurde bei den Igniscumpellets gemessen. Die geringsten Ca-Gehalte zeigten sich beim Winterweizen mit 0,3 g/kg. Die Getreidekörner Wintergerste I und II sowie Roggen wurden zur Reduzierung der Schlackebildungsneigung vor der Verbrennung (nach der Brennstoffanalyse) mit 2 Masse-% Kalk versetzt. Im Gegensatz dazu wurden die Strohpellets K vor der Pelletierung mit 2 Masse-% Kalk versetzt und anschließend analysiert. Ungeachtet dessen wurden in den Strohpellets K (4,96 g/kg) kein deutlich höherer Ca-Gehalt im Vergleich zu den Strohpellets (3,25 g/kg) festgestellt.

Asche:

Die hohen Calciumgehalte in der Asche der Brennstoffe Wintergerste I und II (245,9 g/kg und 284,6 g/kg) und Winterweizen (293,5 g/kg) resultieren aus der Zugabe von 2 Masse-% Kalk. Da die Kalkzugabe erst nach der Brennstoffanalyse erfolgte, ist der Calciumgehalt in den Brennstoffen nicht erhöht.

Da sich der Calciumgehalt durch die Verbrennung nicht wesentlich reduziert, konzentriert sich das Calcium in der Asche auf. Dies wird durch den Calciumgehalt in der Igniscumasche bestätigt, der im Hinblick auf den hohen Gehalt im Brennstoff mit 221,4 g/kg ebenfalls sehr hoch ausfiel.

Der mittlere Asche-Calciumgehalt der Brennstoffe ohne Kalkzugabe liegt bei 77,7 g/kg, während er bei den Brennstoffen mit Kalkzugabe bei 216 g/kg liegt.

6.1.5 Kalium

Brennstoff:

Insbesondere die halmgutartigen Brennstoffe weisen hohe Kaliumgehalte aus. Während der Mittelwert aller getesteten Brennstoffe bei 4,5 g/kg lag, wurden in den Strohpellets 8,5 g/kg und in der Charge Strohpellets K 12,5 g/kg Kalium nachgewiesen. Die niedrigsten Kaliumgehalte wurden in den beiden Holzpelletchargen festgestellt. Sie lagen mit unter 0,5 g/kg noch weit unterhalb des Mittelwertes.

Asche:

Kalium ist neben Calcium ein Hauptbestandteil in der Asche. Der mittlere Kaliumgehalt betrug 93,8 g/kg. Die Maximalwerte wurden in der Asche von geröstetem Winterroggen (213 g/kg) und Miscanthuspellets (192 g/kg) gemessen. Die Aschen der beiden Switchgraspelletchargen A1/A2 und B wiesen mit 40,7 bzw. 41,3 g/kg die geringsten Gehalte an Kalium auf.

6.2 Emissionen von Luftschadstoffen

In der folgenden Auswertung der Messergebnisse werden nur die Vollastmessungen betrachtet. Teillastmessungen erfolgten mit einem geringen Probenumfang nur am Kessel AWK 45 mit den Brennstoffen Holzpellets, Wintergerste I und II sowie Winterweizen. Die Messergebnisse für Teillast-Fahrweise unterscheiden sich bei den meisten Schadstoffen nur minimal von den Messergebnissen im Vollast-Betrieb. Ausnahmen betreffen die ermittelten CO- und Cgesamt-Konzentrationen im Teillastbetrieb, die infolge der schlechteren Ausbrandbedingungen über den bei Vollastbetrieb ermittelten Messergebnissen liegen.

Die Messergebnisse der Teillastversuche sind in den einzelnen Messberichten der jeweiligen Brennstoffe enthalten. Die angewendeten Messverfahren sind Standardreferenzmessverfahren für die Überwachung der Emissionen und in der Regel für eine Probenahmezeit von 30 Minuten validiert. Im Gegensatz dazu fordert die 1. BImSchV für Überwachungsmessungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe eine Probenahmezeit von 15 Minuten (Viertelstundenmittelwert). In der Typprüfung nach Anhang 4 der 1. BImSchV wird eine Probenahmezeit von 30 Minuten gefordert. In der folgenden Auswertung und den Ergebnisdarstellungen werden Halbstundenmittelwerte verwendet und den Anforderungen der 1. BImSchV gegenübergestellt. Ausnahmen betreffen die Komponenten BTX, Feinstaub, Dioxine/Furane, PCB und bis 2006 die PAH, da hier längere Probenahmezeiten erforderlich waren. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf einen Sauerstoffgehalt von 13 Vol.-%.

6.2.1 Kohlenmonoxid (CO)

Laut § 5 Abs. 1 der 1. BImSchV ist die Kohlenmonoxidkonzentration in der Stufe 1 (1,0 g/m³ bis 31.12.2014) und in der Stufe 2 (0,4 g/m³ ab 01.01.2015) begrenzt. Ab 01.01.2015 fordert die Typprüfung die Einhaltung einer Kohlenmonoxidkonzentration von 0,25 g/m³ (Anlage 4, 1. BImSchV).

Den wesentlichsten Parameter hinsichtlich der Qualität des Ausbrandes und damit letztendlich auch für den Wirkungsgrad einer Anlage stellt der Gehalt an Kohlenmonoxid im Rauchgas dar.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen, dass die aktuellen CO-Emissionsgrenzwerte für die Typprüfung mit Brennstoffen nach § 3 Nr. 8 und 13 der 1. BImSchV (Anlage 4 Nr. 2, 0,25 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂) im Mittel an beiden Kesseln (mit einer Ausnahme) bei allen eingesetzten Brennstoffen eingehalten werden.

Bei Verbrennung von Holzpellets, Wintergerste I, Miscanthus (AWK 45) sind zeitweise erhebliche Überschreitungen der Emissionsbegrenzung nach § 5 Abs. 1 der Stufe 1 der 1. BImSchV (1,0 g/m³ bis 31.12.2014) zu verzeichnen. Bei der Verbrennung von Spreupellets, Strohpellets und Switchgraspellets am Kessel IHT GE 30 liegen einzelne Halbstundenmittelwerte geringfügig oberhalb der Emissionsbegrenzung nach § 5 Abs. 1 der Stufe 2 der 1. BImSchV (0,4 g/m³ ab 01.01.2015).

Bezüglich der hohen CO-Konzentrationen am AWK-Kessel ist anzumerken, dass bei Verbrennung der zuerst eingesetzten Brennstoffe Holzpellets und Wintergerste I umfangreiche Optimierungen der Fahrweise, auch mit Unterstützung des Herstellers erforderlich waren. Diese Optimierungen erfolgten teilwei-

se noch nach Beginn der jeweiligen Messkampagne, so dass in den ersten Abbrandversuchen kein durchgängig optimaler Kesselbetrieb vorlag. Das führte dazu, dass selbst beim Einsatz von den ansonsten hinsichtlich ihres Ausbrandes eher unproblematischen Holzpellets und auch bei Wintergerste I zeitweise sehr hohe Kohlenmonoxid- und auch Gesamtkohlenstoffemissionen zu verzeichnen waren. Bei beiden Brennstoffen ist daher von einem temporär sehr schlechten Ausbrand aufgrund einer nicht optimalen Kesselfahrweise auszugehen. Zu hoch eingestellte Verbrennungsluftströme sind in beiden Fällen anhand der hohen Sauerstoffgehalte im Abgas (Holzpellets: 11,1 Vol.-%, Wintergerste I: 13,0 Vol.-%) und den vergleichsweise hohen Abgastemperaturen zu vermuten. Dies führte zu kurzen Verweilzeiten des Abgases im Brennraum. Dadurch konnte kein optimaler Ausbrand der Abgase erfolgen. Erst bei der im Jahr 2006 am AWK-Kessel beginnenden Kampagne mit dem dritten untersuchten Brennstoff Wintergerste II lag eine optimale Kesseleinstellung vor und es waren deutlich geringere CO-Emissionen zu verzeichnen. Die aufwendigen Optimierungsversuche zeigen, dass beim AWK-Kessel eine an wechselnde, nicht genormte Brennstoffe angepasste emissionsarme Betriebsführung nur mit Hilfe langwieriger Abbrandversuche bei gleichzeitig stattfindenden Emissionsmessungen zu realisieren ist.

Bei Verbrennung von Miscanthuspellets im AWK 45 wurde hinsichtlich Kohlenmonoxid das höchste Emissionspotential festgestellt. Die mittlere Kohlenmonoxidkonzentration betrug 353 mg/m^3 bei einem maximalen Halbstundenmittelwert von 1864 mg/m^3 . Für automatisch beschickte Feuerungsanlagen sind die hohen Schwankungsbreiten der CO-Konzentrationen am Kessel AWK 45 untypisch. Rückblickend konnten instabile Betriebszustände, einhergehend mit einem unvollständigen Ausbrand, als Ursache für einzelne sehr hohe Halbstundenmittelwerte identifiziert werden. Neben der Abgasverweilzeit spielen aber auch Entaschungsrhythmus, Verschlackungspotenzial der Brennstoffe sowie deren mechanische Eigenschaften (Abrieb) eine Rolle. Die Versuche zeigten, dass ein verkürzter Entaschungsrhythmus bzw. eine nahezu ständige Bewegung des Glutbettes zu einem stabileren Kesselbetrieb mit reduzierten Kohlenmonoxidkonzentrationen beitragen.

Die Ursache der höheren CO-Konzentrationen bei Verbrennung von Switchgras A2 im Vergleich zum identischen Brennstoff Switchgras A1 im Kessel IHT GE 30 ist die instabile Betriebsweise des Kessels infolge mangelnder Wärmeabnahme während der Messungen mit Switchgras A2.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die Feuerungstechnik an beiden Kesseln die Verbrennung eines breiten Spektrums an Brennstoffen bei niedrigen CO-Emissionen ermöglicht, wobei im Vergleich der beiden untersuchten Kessel am IHT GE 30 begründet in den brennstoffspezifischen Einstellmöglichkeiten zur Optimierung des Kesselbetriebs und zur Abstimmung von Brennstoffeigenschaften und Verbrennungsluftzufuhr niedrigere CO-Emissionen erreicht werden können. Weiterhin erhöhen zusätzliche konstruktive Lösungen die Verweilzeit der Abgase im Brennraum und deren Ausbrand in der Nachverbrennungszone.

Für den AWK 45 kann eingeschätzt werden, dass nach brennstoffspezifischer Anpassung und Optimierung der Fahrweise und bei regelmäßiger Kontrolle des Kesselbetriebs die Einhaltung der CO-Grenzwerte nach Stufe 1 ($1,0 \text{ g/m}^3$ bis 31.12.2014) und nach Stufe 2 ($0,4 \text{ g/m}^3$ ab 01.01.2015) der 1. BImSchV bei Verbrennung der untersuchten Brennstoffe im Dauerbetrieb realisierbar ist. Dabei unberücksichtigt bleiben die Ergebnisse bei Verbrennung von Holzpellets und Wintergerste I wegen nicht optimierter Kesselfahrweise (siehe Erläuterungen dazu weiter oben!) sowie bei Verbrennung von Miscanthus.

Beide Kessel sollten bei Brennstoffen (nach 1. BImSchV § 3 Nr. 8), die in Beschaffenheit und Eigenschaften den untersuchten Brennstoffen ähnlich sind, nach Optimierung der Fahrweise die Anforderungen der 1. BImSchV hinsichtlich der CO-Konzentration im Abgas einhalten.

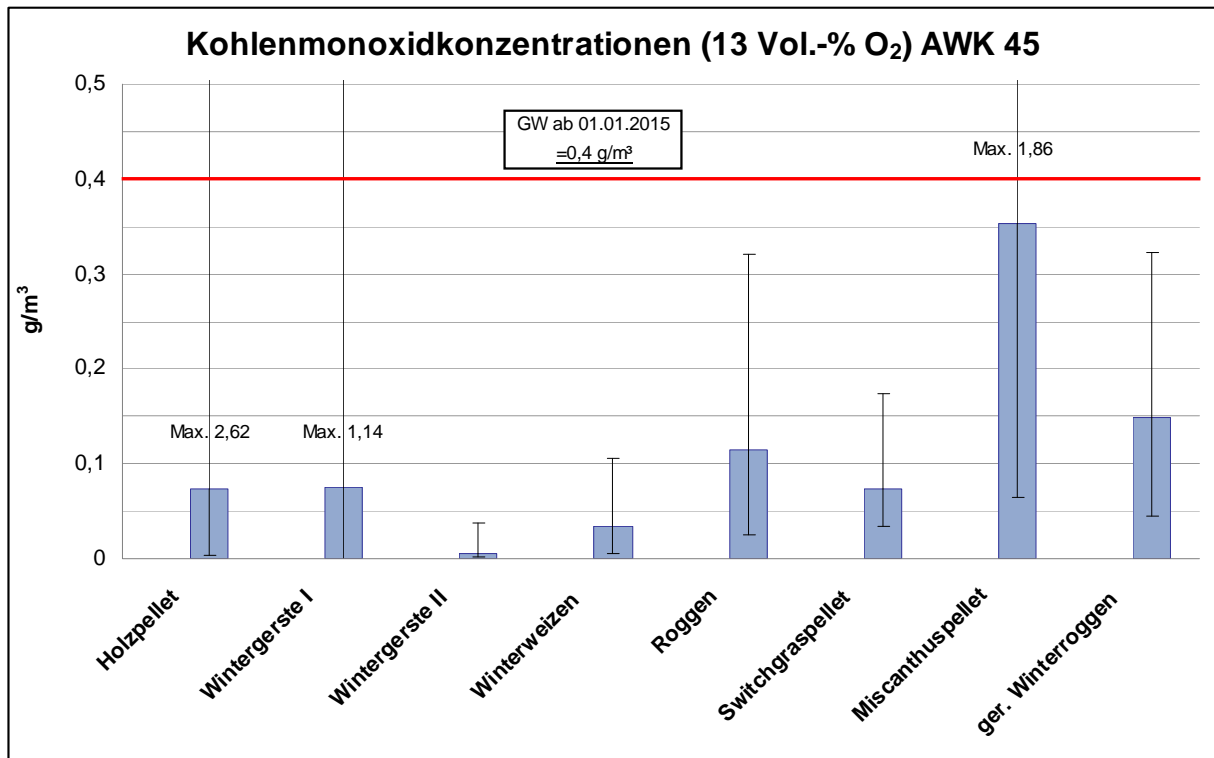


Abbildung 9: Halbstundenmittelwerte Kohlenmonoxidkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) AWK 45

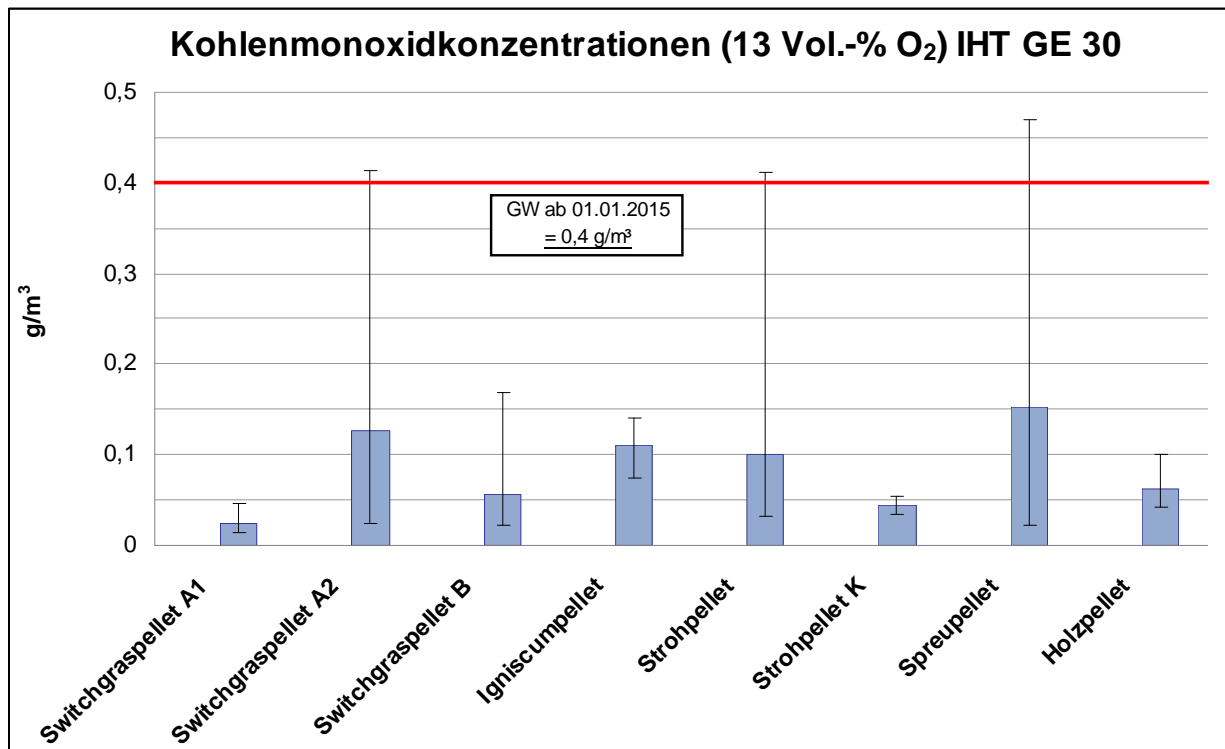


Abbildung 10: Halbstundenmittelwerte Kohlenmonoxidkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) IHT GE 30

6.2.2 Staub

Laut § 5 Abs. 1 der 1. BImSchV ist die Staubkonzentration in der Stufe 1 (0,10 g/m³ bis 31.12.2014) und in der Stufe 2 (0,02 g/m³ ab 01.01.2015) begrenzt. Anforderungen an die Typprüfung liegen nicht vor.

Bei Verbrennung der Brennstoffe Holzpellets (AWK 45) und Switchgraspellets A1 (IHT GE 30) wurden im jeweiligen Versuchszeitraum keine Überschreitungen des ab 2015 geltenden Staubgrenzwertes der 1. BImSchV von 0,02 g/m³ festgestellt. Am IHT GE 30 gab es einzelne geringfügige Überschreitungen dieses Emissionswertes bei den Brennstoffen Switchgras A2 und B, Igniscumpellets, Spreupellets und Holzpellets. Demgegenüber konnten am AWK 45 bei allen Brennstoffen außer Holzpellets sowie am IHT GE 30 bei Strohpellets und Strohpellets K erhebliche Überschreitungen festgestellt werden.

Überschreitungen des bis Ende 2014 geltenden Staubgrenzwertes von 0,10 g/m³ wurden nur am AWK 45 bei Verbrennung von Wintergerste I, Winterweizen, Miscanthus und insbesondere von geröstetem Winterroggen gemessen.

Hohe Staubkonzentrationen sind zum Teil auf die Qualität des Brenngutes zurückzuführen. Dabei spielen am Getreide anhaftende Stäube und der Bruchkornanteil bzw. die Festigkeit der Pellets und der Anteil des Abriebs bei den pelletförmigen Brennstoffen eine Rolle. Wie die Versuchsergebnisse der Brennstoffe Wintergerste II im Vergleich zu Wintergerste I sowie Switchgras A1 im Vergleich zu Switchgras A2 zeigen, führt eine nicht optimierte Kesselfahrweise zu ungünstigen Ausbrandbedingungen mit höheren Staubkonzentrationen.

Die sehr hohe Staubkonzentration beim Einsatz von geröstetem Winterroggen (mittlere Staubkonz.:427 mg/m³) könnte durch eine Verringerung der Kornfestigkeit beim Rösten verursacht worden sein.

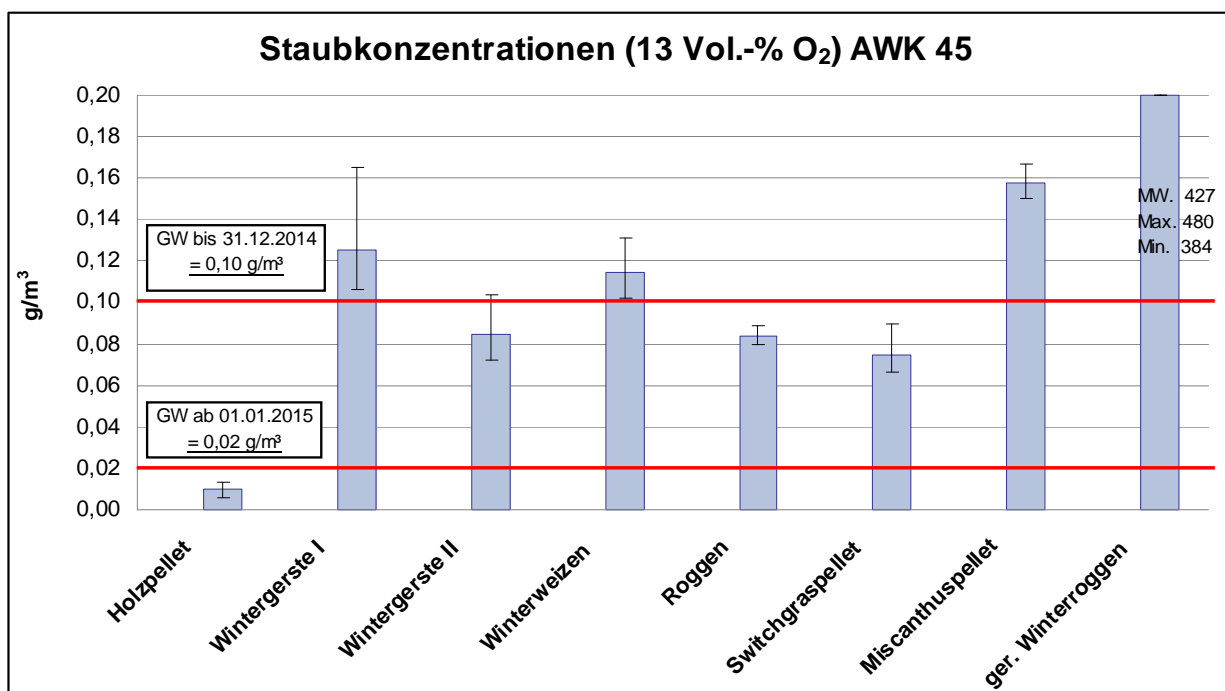


Abbildung 11: Staubkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) AWK 45

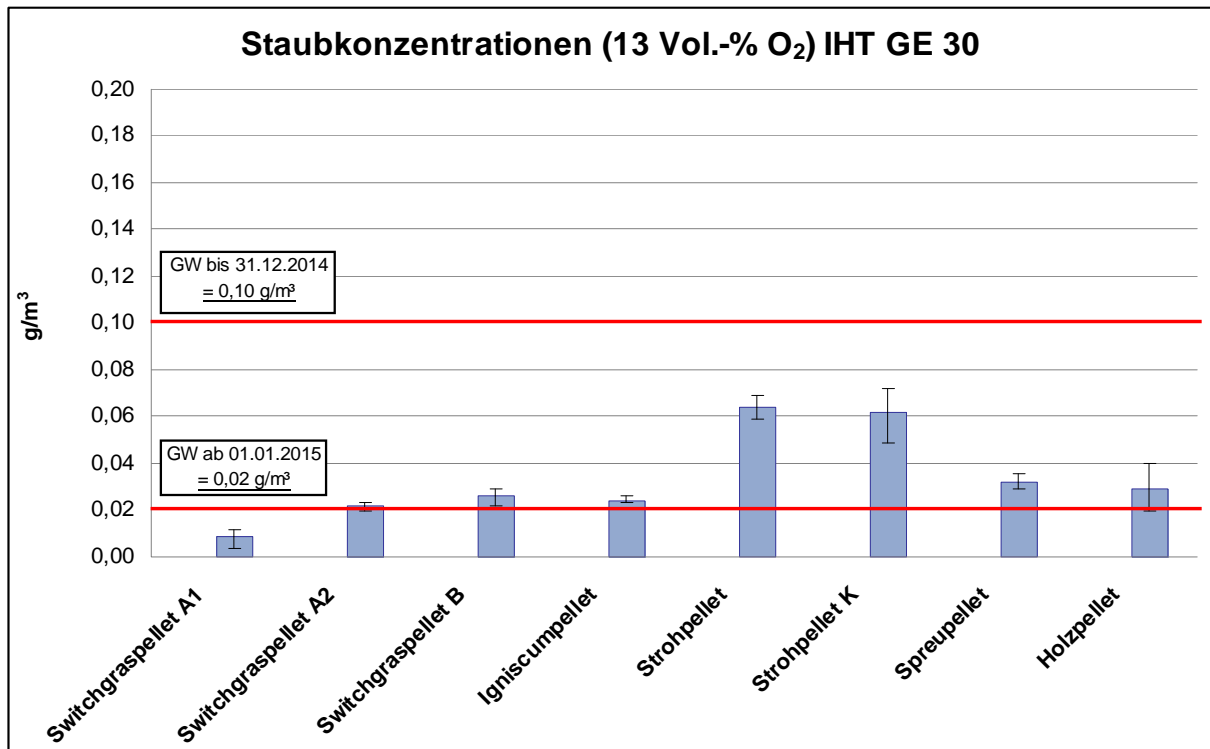


Abbildung 12: Staubkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) IHT GE 30

6.2.3 Stickstoffoxide (NO_x angegeben als NO₂)

Die NO_x-Emission wird überwiegend durch den Stickstoffgehalt des Brennstoffs bestimmt. Die thermische NO_x-Bildung spielt aufgrund der Kesseltemperaturen von ca. 1000°C keine große Rolle. Daher haben auch der Verbrennungsluftvolumenstrom und der sich ergebende Sauerstoffgehalt im Abgas in diesem Fall keinen Einfluss auf die NO_x-Emissionen. Dies wird im Wesentlichen auch durch die Massenstrombilanz bestätigt. Der als NO_x emittierte N-Anteil des Brennstoffes schwankt stark und lag bei den Brennstoffen mit hohen N-Gehalten (Getreide und Switchgraspellets B) zwischen 9 und 13 %, während er bei Brennstoffen mit geringen N-Gehalten (Igniscumpellets und Holzpellets) bei 46 bzw. 80 % lag. Der Anteil des in der Asche eingebundenen Stickstoffs betrug maximal 3 %.

Bei der Verbrennung von Winterweizen und Wintergerste I, die den höchsten N-Anteil (WW 2,2 Masse-%, WGI 1,8 Masse-%) im Brennstoff aufwiesen, wurden auch die höchsten NO_x-Emissionen (ca. 660 mg/m³) gemessen. Die geringsten NO_x-Konzentrationen (177 bzw. 93 mg/m³) wurden an beiden Kesseln bei Verbrennung von Holzpellets, die naturgemäß geringe Stickstoffgehalte aufweisen, ermittelt.

Der Grenzwert für die Typprüfung von Einzelraumfeuerstätten mit Brennstoffen nach § 3 Nummer 8 und 13 in Anlage 4 der 1. BImSchV liegt für Anlagen errichtet ab dem 22.03.2010 bei 0,6 g/m³ und bei Anlagen errichtet ab dem 31.12.2014 bei 0,5 g/m³ (Sauerstoffbezug 13 Vol.-%). Außer bei der Verbrennung von Getreidekörnern werden diese Vorgaben der 1. BImSchV an beiden Kesseln eingehalten.

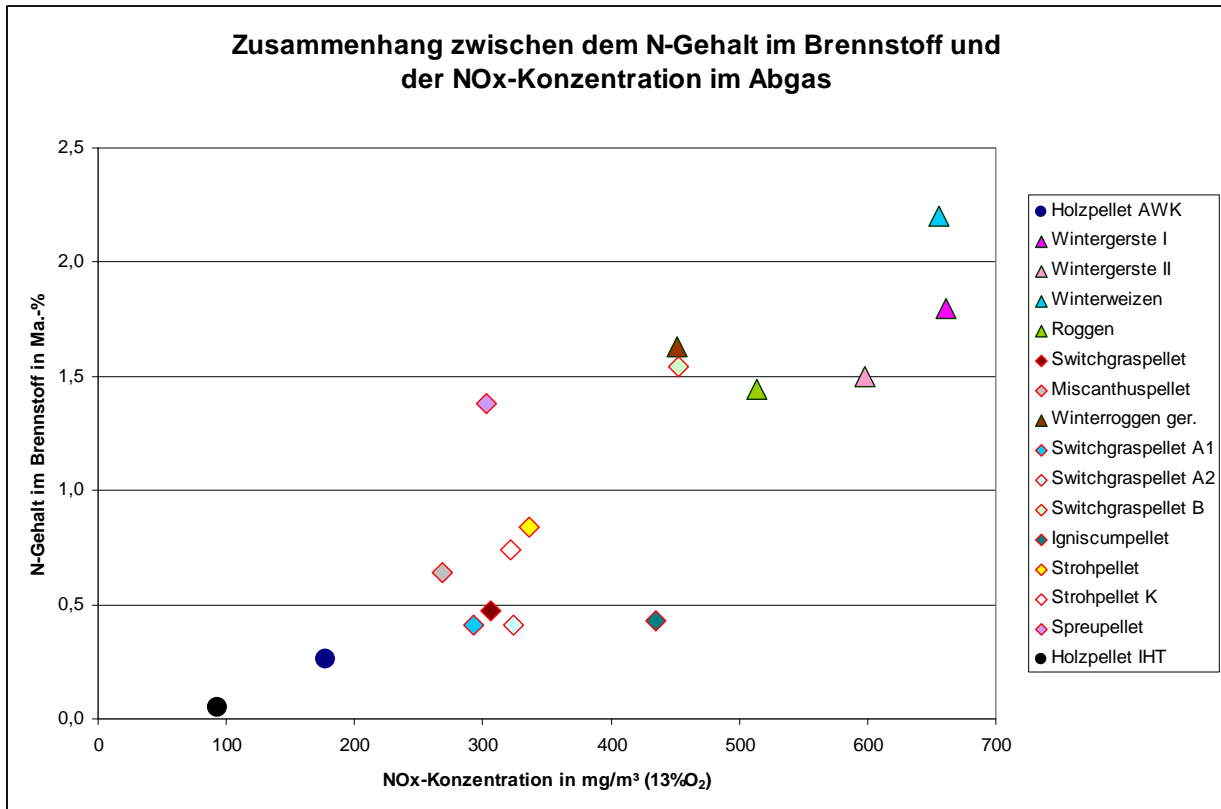


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen dem N-Gehalt des Brennstoffes und der NOx-Konzentration im Abgas

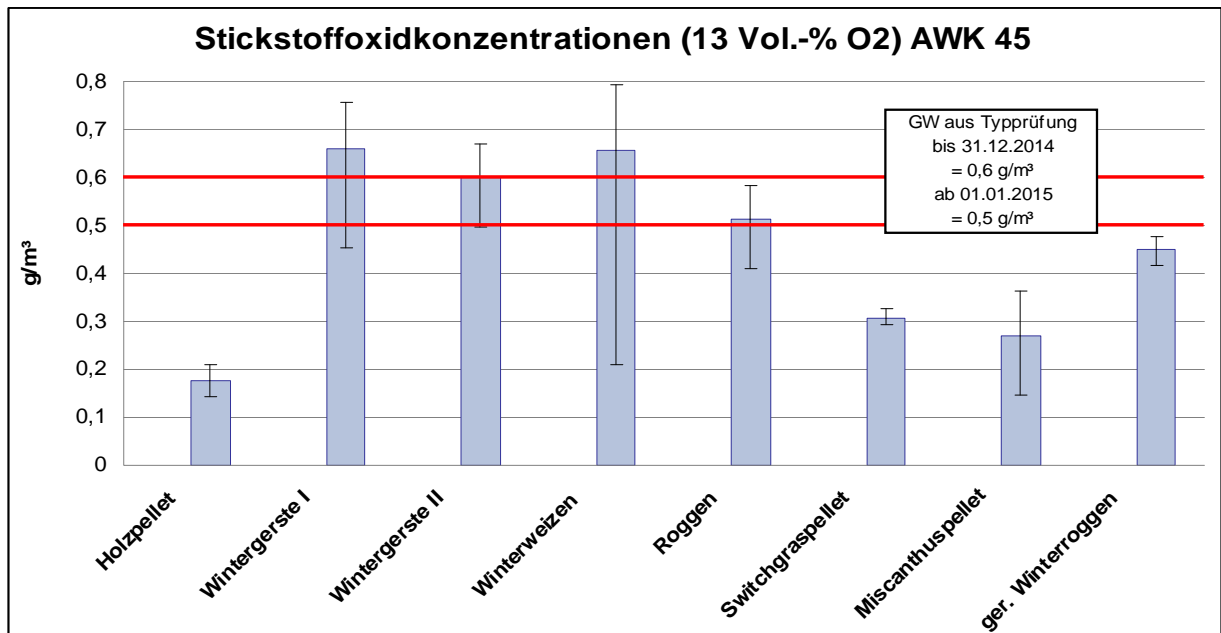


Abbildung 14: Halbstundenmittelwerte Stickstoffoxidkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) AWK 45

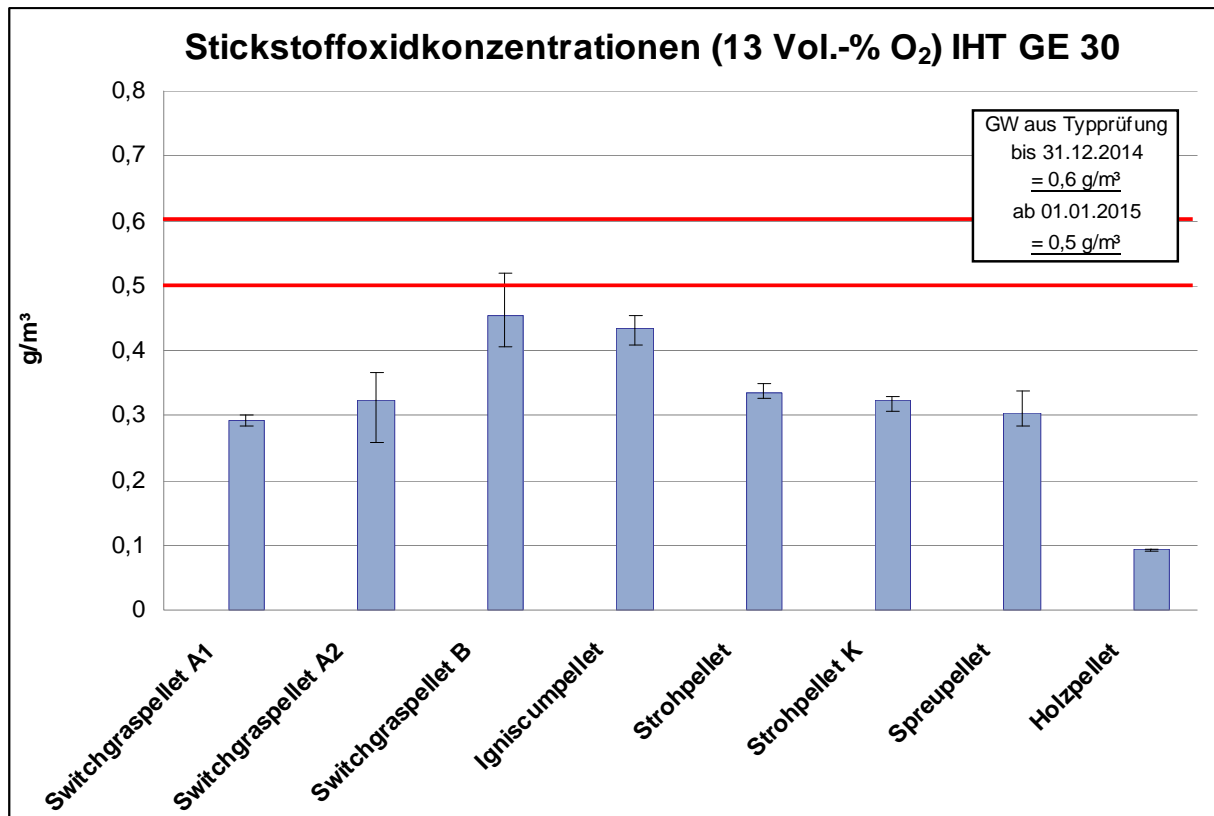


Abbildung 15: Halbstundenmittelwerte Stickstoffdioxidkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) IHT GE 30

6.2.4 Schwefeldioxid (SO₂)

Die 1. BImSchV stellt hinsichtlich der Schwefeldioxidemissionen keine Anforderungen in Form eines Emissionsgrenzwertes. Dafür greifen für Brennstoffe nach § 3 Nummer 1 und 2 (Brennstoffe aus Stein- und Braunkohle) brennstoffspezifische Regelungen zum maximal zulässigen Massegehalt an Schwefel im Brennstoff. Für biogene Brennstoffe mit vergleichsweise geringen Schwefelgehalten sind derartige Regelungen nicht erforderlich. Für eine Beurteilung der ermittelten Konzentrationen wird an dieser Stelle ersatzweise ein Vergleich mit dem Emissionswert für Schwefeldioxid (0,35 g/m³ bei 11 Vol.-% O₂) nach Nr. 5.4.1.2.1 der TA Luft für Verbrennungsanlagen zur Wärmeerzeugung mit einer Feuerungswärmeleistung unter 50 MW bei Einsatz von naturbelassenem Holz vorgenommen. Für den Vergleich mit den Messwerten wurde dieser Emissionswert auf 13 Vol.-% O₂ (0,28 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂) umgerechnet.

Das Emissionsverhalten von Schwefeldioxid ist abhängig vom Schwefelgehalt des Brennstoffes. Hier zeigt sich, dass wie erwartet bei beiden Holzpelletchargen mit S-Gehalten von kleiner 0,05 Masse-% die geringsten Schwefeldioxidkonzentrationen (im Mittel 2,5 bzw. 7, mg/m³) im Abgas gemessen wurden. Auch bei Getreidebrennstoffen, mit naturgemäß hohen S-Gehalten zwischen 0,14 Masse-% (WGII) und 0,23 Masse-% (WG I und WW) sowie den beiden Strohpelletchargen mit 0,09 bzw. 0,1 Masse-% Schwefel lagen die Messwerte unterhalb des Emissionswertes der TA Luft nach Nr. 5.4.1.2.1. Die im Vergleich zu Strohpellets höheren Schwefeldioxidemissionen bei Strohpellets K resultieren aus dem höheren Brennstoffverbrauch und dem höheren Schwefelgehalt in den Strohpellets K. Die SO₂-Konzentrationen bewegten sich in einem Bereich zwischen 2,5 mg/m³ (Holzpellets, IHT Kessel) und 219 mg/m³ (Winterweizen).

Der überwiegende Teil des mit dem Brennstoff eingebrachten Schwefels wird als SO₂ emittiert. Hier wurden Emissionsraten zwischen 41% (WG I) und nahezu 100% erreicht. In der Asche wurden Schwefeleinbindungsrate zwischen 1% (WG I) und ca. 40% (Switchgraspellets) festgestellt. Die Schwefelbilanzen der einzelnen Brennstoffe lagen nahe bei 100 %. Bei 5 Brennstoffen wurden auch Schwefelbilanzen geringfügig über 100 % ermittelt (siehe Abb. 16).

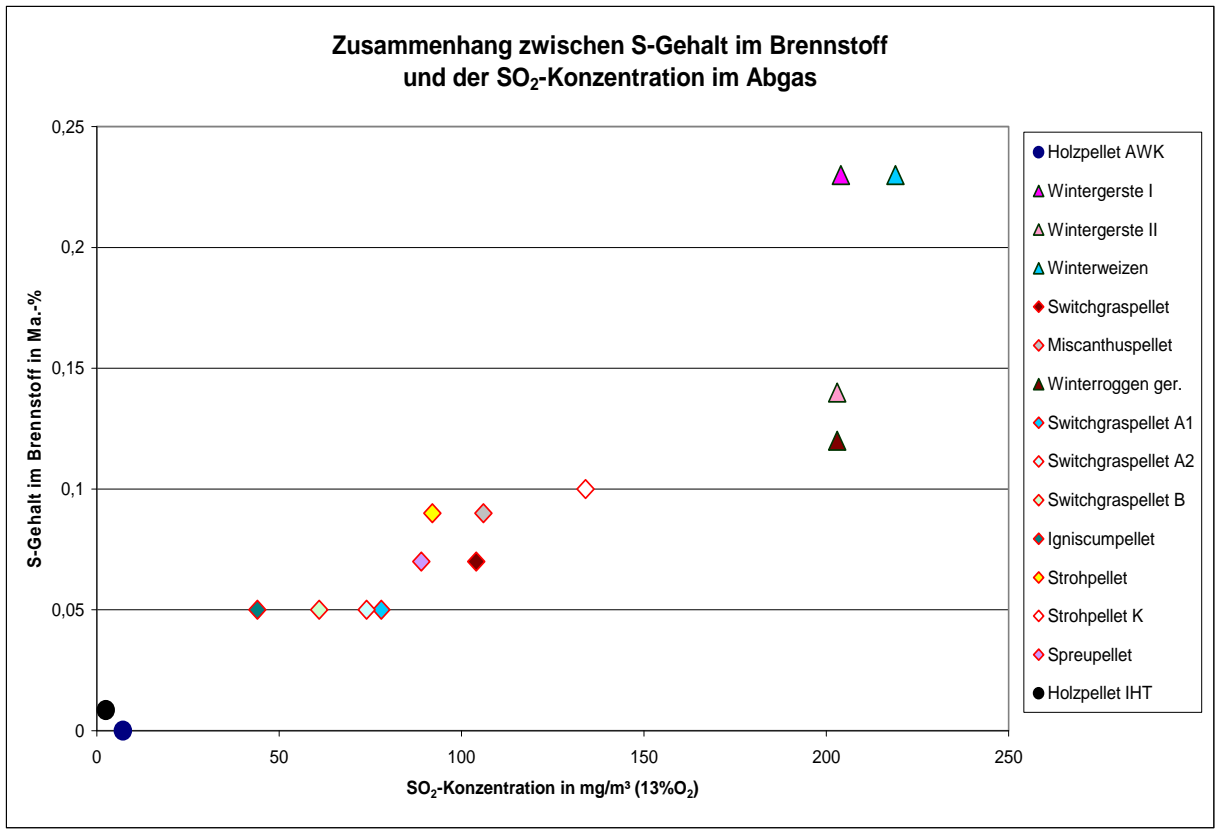


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen dem S-Massenstrom des Brennstoffes, des Abgases und der Asche

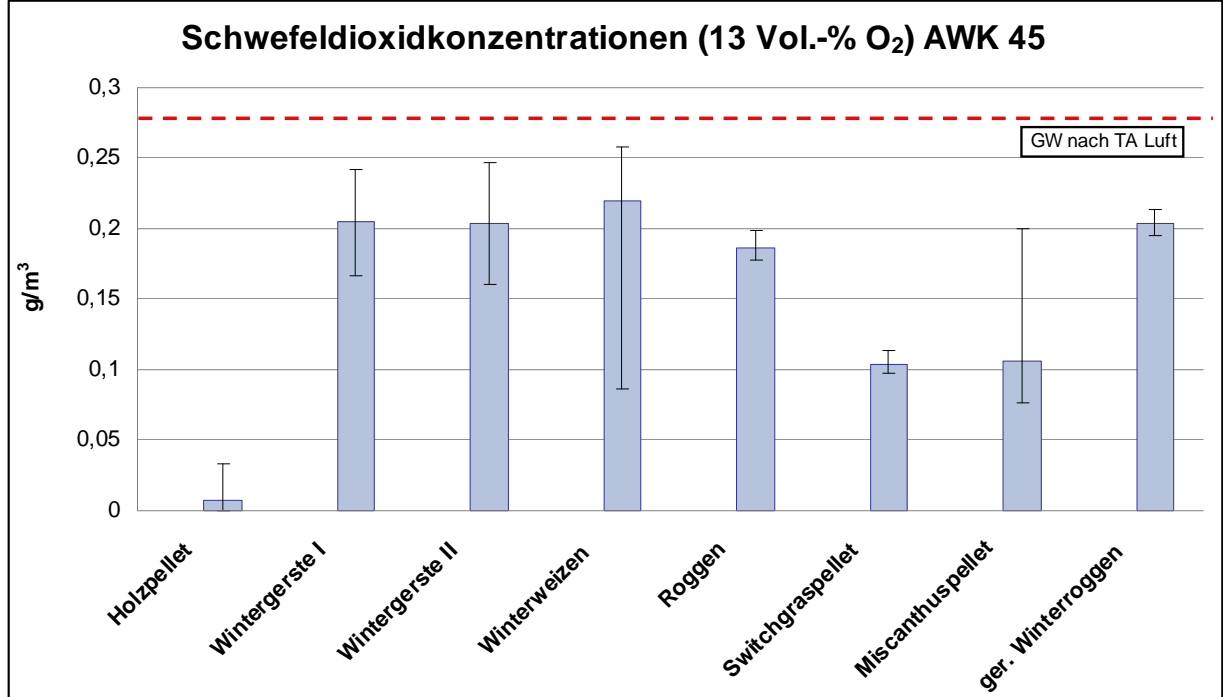


Abbildung 17: Schwefeldioxidkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) AWK 45

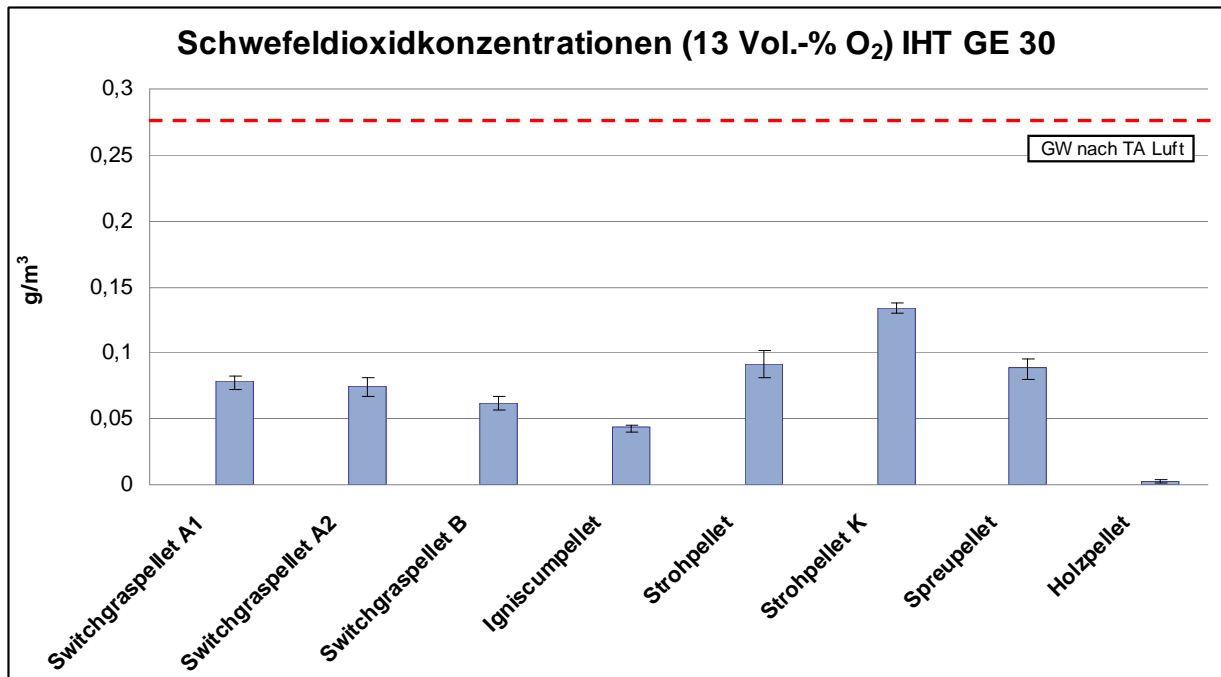


Abbildung 18: Schwefeldioxidkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) IHT GE 30

6.2.5 Gesamtkohlenstoff (C_{ges})

Die 1. BImSchV stellt hinsichtlich der Gesamtkohlenstoffemissionen keine Anforderungen. Für eine Beurteilung der ermittelten Konzentrationen wird an dieser Stelle ersatzweise ein Vergleich mit dem Emissionswert für Gesamtkohlenstoff (10mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂) nach Nr. 5.4.1.2.1 der TA Luft für Verbrennungsanlagen zur Wärmeerzeugung mit einer Feuerungswärmeleistung unter 50 MW bei Einsatz von naturbelassenem Holz vorgenommen. Für den Vergleich mit den Messwerten wurde dieser Emissionswert auf 13 Vol.-% O₂ (8 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂) umgerechnet.

Die ermittelten Gesamtkohlenstoffkonzentrationen weisen ähnlich wie die für die Güte des Ausbrandes verwendete Leitkomponente Kohlenmonoxid je nach Brennstoff und Feuerungstechnik zeitweise hohe Werte auf. Die Mittelwerte der Halbstundenmittelwerte liegen für alle Brennstoffe (außer für Holzpellets am AWK 45) an beiden Feuerungsanlagen unterhalb des TA Luft-Emissionswertes. Die für Holzpellets unüblich hohen Messwerte am AWK-Kessel zeigen, dass die Kesseleinstellung und der Kesselbetrieb des zu diesem Zeitpunkt neuen Kessels nicht den optimalen Bedingungen entsprach.

Es ist bekannt, dass die Verbrennung von Getreidekorn hinsichtlich der Einstellung der Kesselparameter problematisch ist. Wie wirksam eine an den spezifischen Brennstoff angepasste Betriebsführung ist, zeigen die starken Unterschiede zwischen Wintergerste I und II. Die durch eine geänderte Betriebsweise (bei gleichem Brennstoffstrom wurde die Verbrennungsluftzufuhr um etwa 20% reduziert, der Entaschungsrythmus wurde von 26 Minuten auf 20 Sekunden gekürzt) längere Abgasverweilzeit verbesserte den Ausbrand erheblich und die Umstellung auf einen sehr kurzen Entaschungsrythmus sorgte für stabilere Abbrandbedingungen, so dass die Konzentrationen bei CO und C_{ges} bei Wintergerste II im Vergleich zu Wintergerste I deutlich verringert werden konnten.

Auffällig sind einzelne hohe Halbstundenmittelwerte am AWK-Kessel. Sie treten vor allem, oftmals in Analogie zu hohen CO-Werten bei Holzpellets, Wintergerste I, Winterweizen und bei Miscanthuspellets auf. Die Gründe für das Auftreten dieser starken Schwankungsbreiten wurden schon unter 6.2.1 genannt.

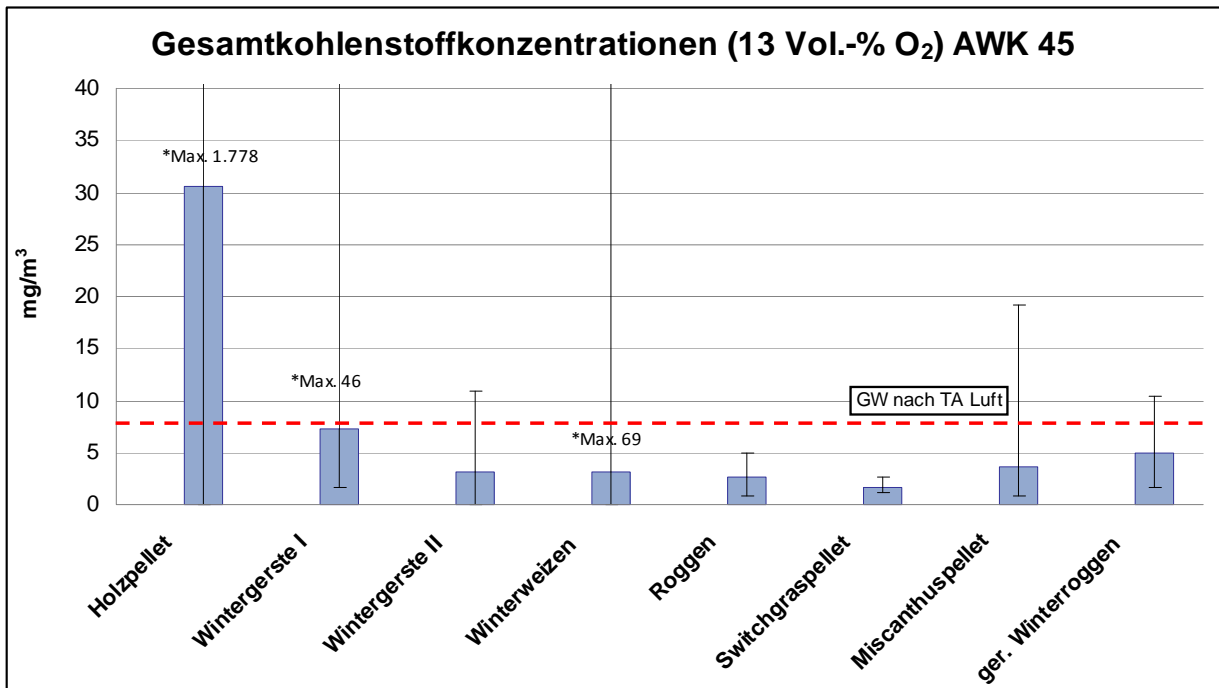


Abbildung 19: Gesamtkohlenstoffkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) AWK 45

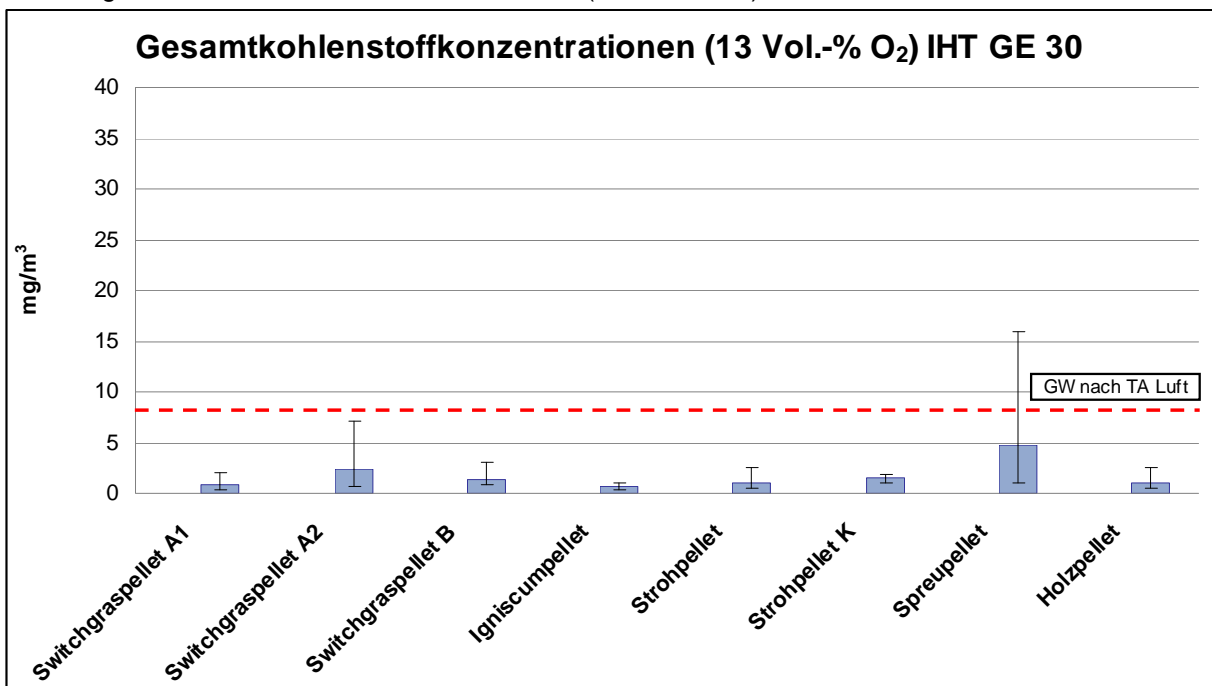


Abbildung 20: Gesamtkohlenstoffkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) IHT GE 30

6.2.6 Chlorwasserstoff (HCl)

Die 1. BImSchV stellt hinsichtlich der Chlorwasserstoffemissionen keine Anforderungen. Für eine Beurteilung der ermittelten Konzentrationen wird an dieser Stelle ersatzweise ein Vergleich mit dem Emissionswert für gasförmige anorganische Stoffe der Klasse III (30mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂) nach Nr. 5.2.4 der TA Luft vorgenommen. Der auf 13 Vol.-% Sauerstoff umgerechnete Emissionswert (24 mg/m³) wird mit den auf 13 Vol.-% Sauerstoff bezogenen Messwerten verglichen.

Bei Verbrennung von Strohpellets wurden die höchsten Chlorwasserstoffemissionen nachgewiesen. Die Menge des im Stroh gebundenen Chlors liegt mit 2,42 g/kg wesentlich höher als in den übrigen Brennstoffen (z.B. Holzpellets: 0,037g/kg, Miscanthuspellets: 1,66 g/kg, Igniscumpellets: 0,13 g/kg). Die

gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen korrelieren mit den Chlorgehalten in den Brennstoffen, demzufolge wurden bei Brennstoffen mit den niedrigsten Chlorgehalten, wie Holzpellets, Igniscumpellets und Switchgraspellets A1/A2 auch die geringsten Chlorwasserstoffkonzentrationen gemessen.

Hohe Chlorwasserstoffkonzentrationen im Abgas führen zu einer verstärkten Korrosion und einem entsprechend höheren Verschleiß des Kessels.

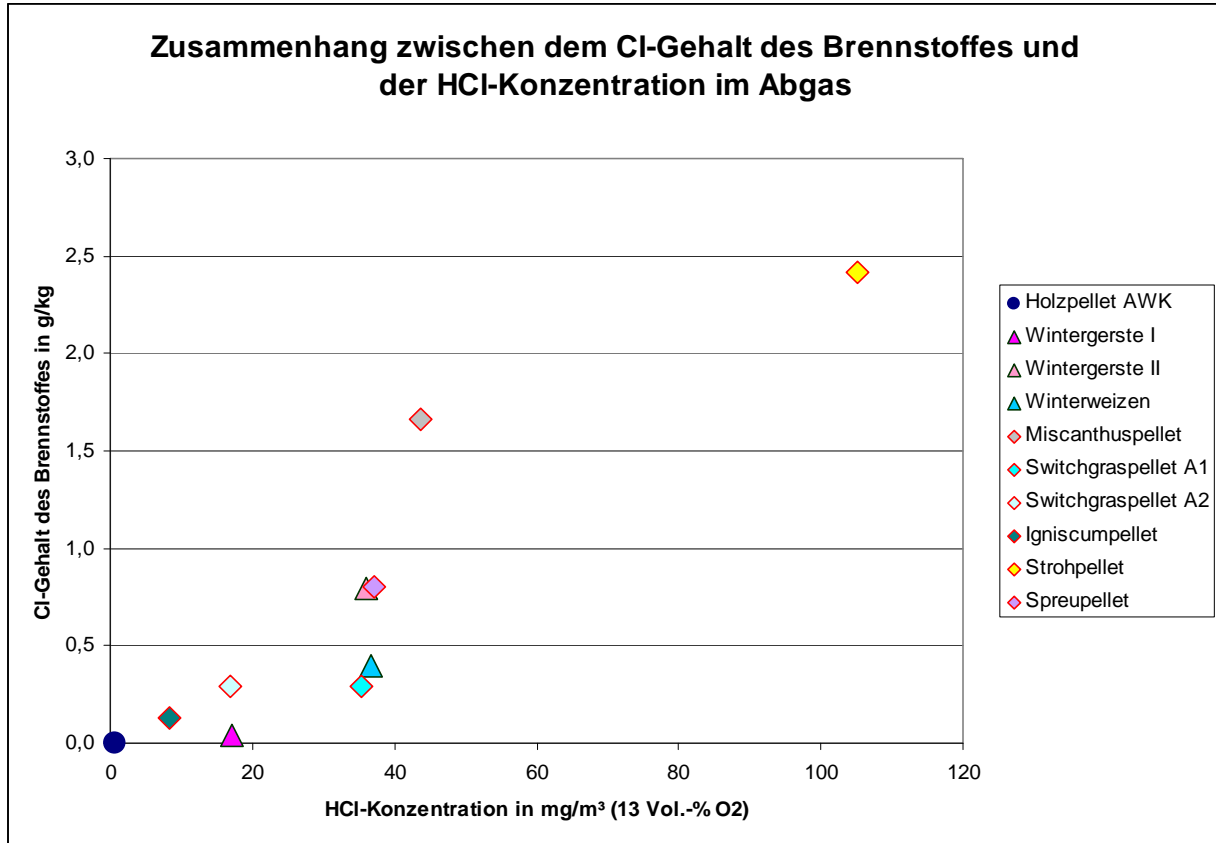


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen dem Cl-Gehalt des Brennstoffes und der HCl-Konzentration im Abgas

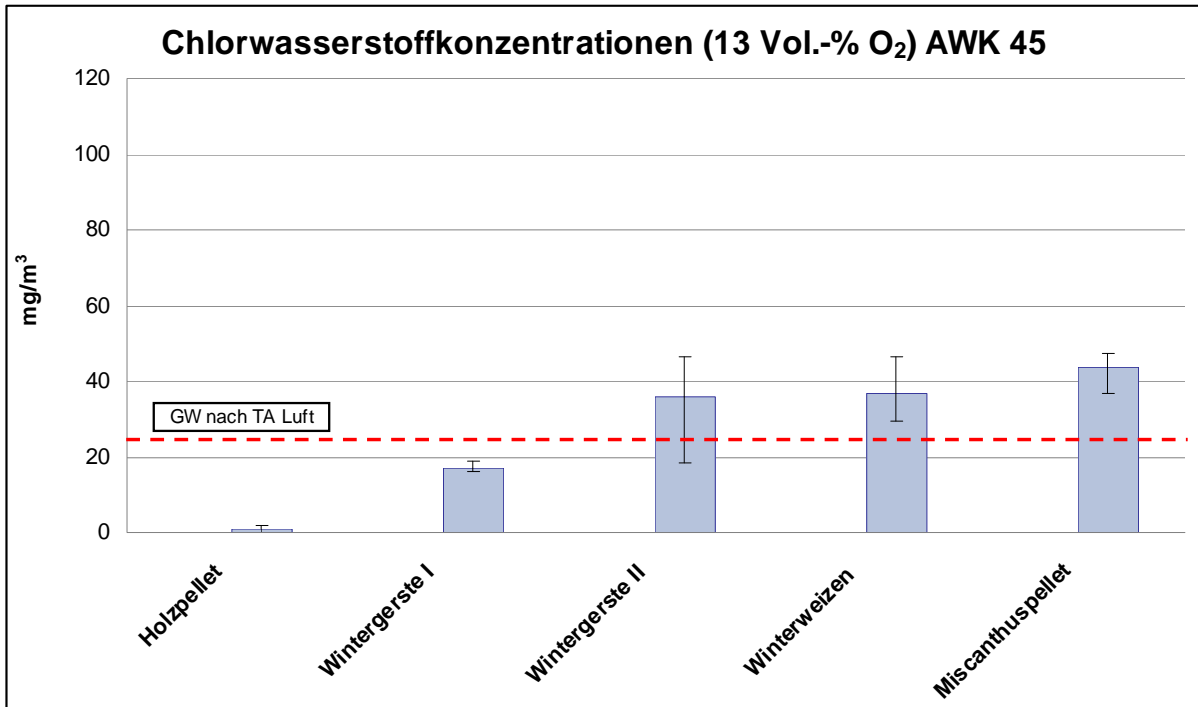


Abbildung 22: Chlorwasserstoffkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) AWK 45

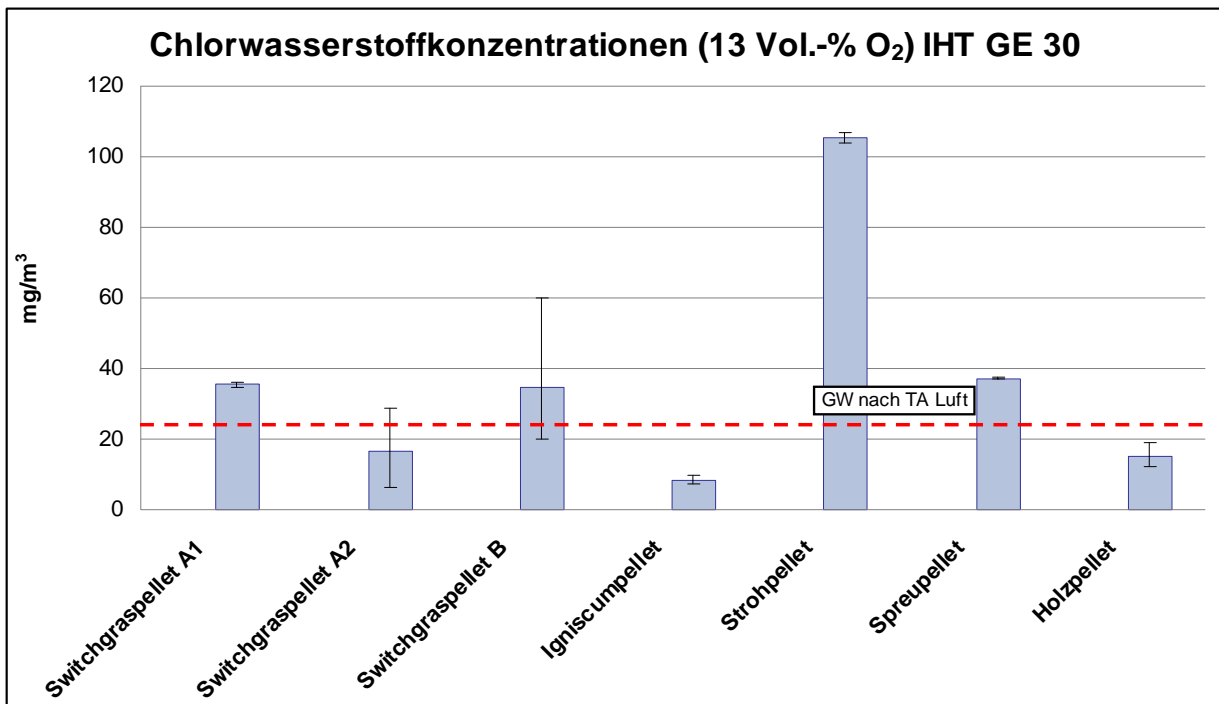


Abbildung 23: Chlorwasserstoffkonzentrationen (13 Vol.-% O₂) IHT GE 30

6.2.7 Korngrößenverteilung des Staubes

Die Korngrößenverteilung wurdenur bei ausgewählten Brennstoffen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass unabhängig vom Kessel und Brennstoff etwa 97 % des Staubes eine Korngröße kleiner 10 µm besitzen (kleiner PM10). Innerhalb der PM10-Fraktion stellen Partikel kleiner 1 µm (PM1,0) mit einem Anteil zwischen 76 % und 81 % die größte Fraktion dar. Damit werden die aus der Literatur bekannten sehr hohen Anteile von Feinstäuben im Abgas von feststoffgefeuerten Kleinfeuerungsanlagen bestätigt.

Eine Ausnahme stellt die Verbrennung von Switchgraspellets A1 am IHT GE 30 dar. Dort lag der PM10-Anteil bei 92 % und der PM1-Anteil innerhalb der PM 10-Fraktion bei 70 %. Diese Werte werden allerdings nur durch eine Einzelprobe repräsentiert.

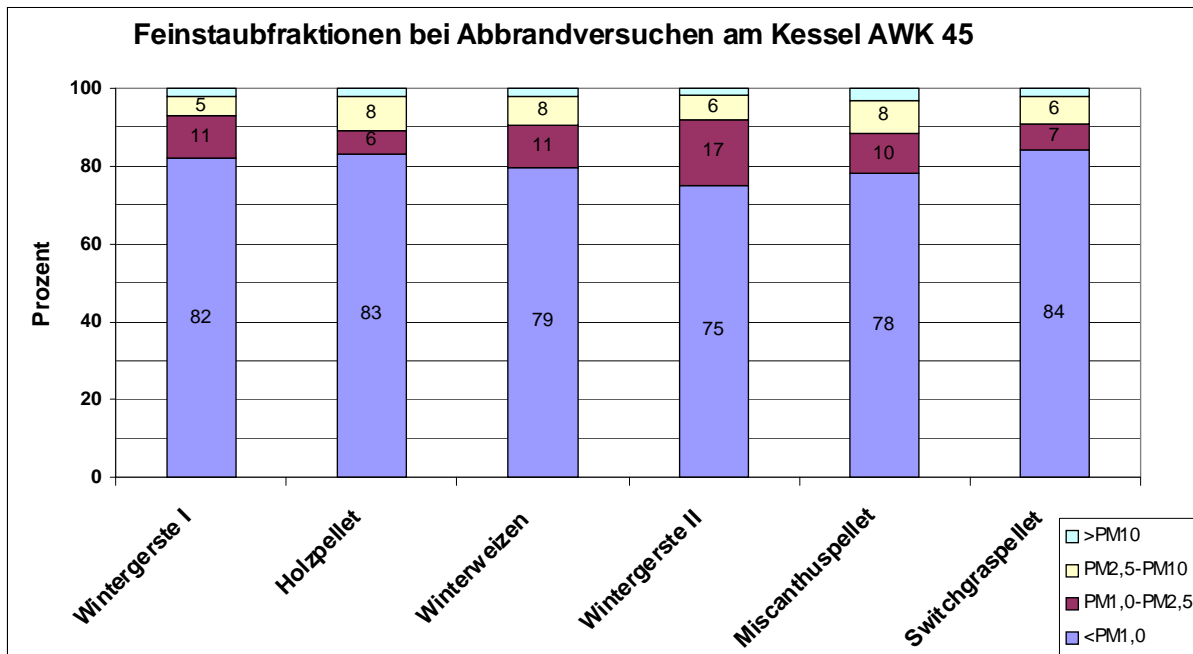


Abbildung 24: Feinstaubfraktionen am AWK 45

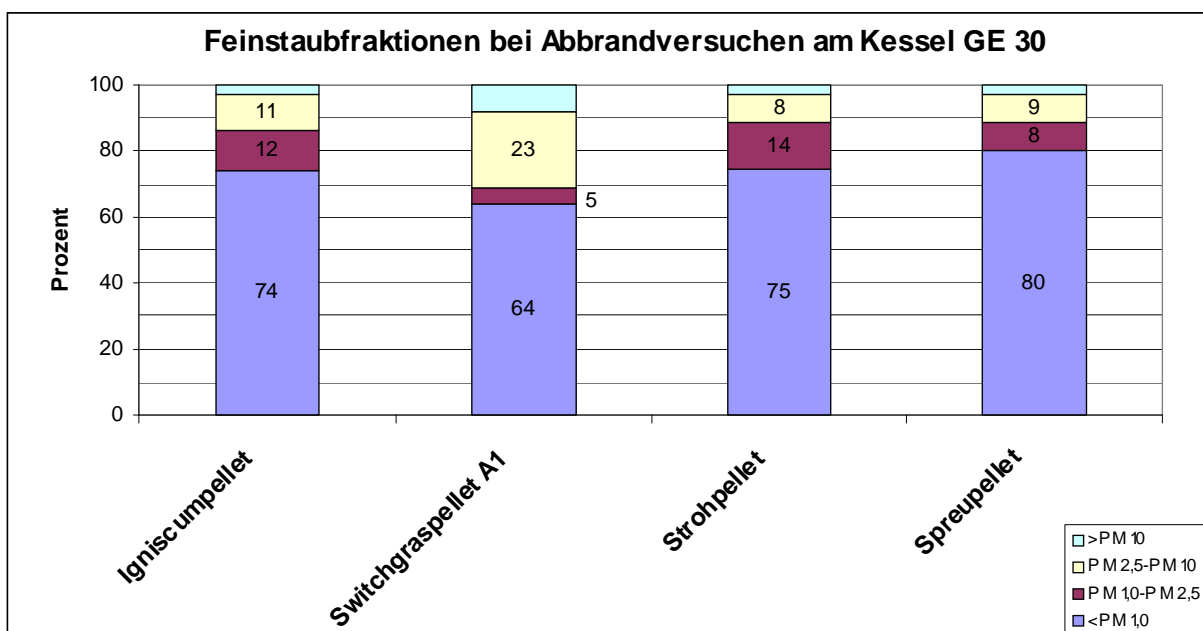


Abbildung 25: Feinstaubfraktionen am IHT GE 30

6.2.8 Quecksilber und Schwermetalle als partikelgebundene und filtergängige Staubanteile

Bei den Untersuchungen der Jahre 2005 und 2006 wurden Quecksilber und Metalle/Halbmatalle (As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, V und Zn) partikelgebunden und filtergänglich im Abgas bestimmt. Die ermittelten Emissionskonzentrationen lagen weit unterhalb der Emissionswerte der TA Luft. Besonders die Quecksilberkonzentrationen lagen fast ausschließlich im Bereich der Blindwertkonzentration. Aufgrund der durchweg geringen Konzentrationen wurden diese Untersuchungen nach 2006 eingestellt. Wegen des allgemeinen Interesses am Thema Quecksilber und Metalle/Halbmatalle werden die Messwerte dennoch nachfolgend dargestellt.

Tabelle 9: Quecksilber- und Bleigehalte/-konzentrationen

		Dim.	Holzpellets	Wintergerste I	Winterweizen	Wintergerste II
Hg im Brennst. tr.		mg/kg	0,18	< 0,05	< 0,07	< 0,07
Hg in Asche tr.		mg/kg	0,37	<0,07	< 0,07	< 0,07
Pb im Brennst. tr.		mg/kg	<1	0,3	<1	<1
Pb in Asche tr.		mg/kg	1	<1	2	<1
Hg im Abgas (11%O ₂)	Probe 1	ng/m ³	633	642	156	430
	Probe 2	ng/m ³	637	330	84	132
	Probe 3	ng/m ³	558	485	68	154
	MW	ng/m ³	609	485	103	239
Pb im Abgas (11%O ₂)	Probe 1	µg/m ³	23,0	23,2	9,4	12,2
	Probe 2	µg/m ³	26,8	22,3	9,3	*
	Probe 3	µg/m ³	25,1	23,7	8,2	9,5
	MW	µg/m ³	25,0	23,1	9,0	10,8

* Ausreißerwert entfernt

6.2.9 Wasserlösliche ionische Staubinhaltsstoffe

In den Staubproben wurden zusätzlich die Gehalte der wasserlöslichen Ionen (K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻) bestimmt. Hauptbestandteile sind K⁺ bei den Kationen und Cl⁻ und SO₄²⁻ bei den Anionen. In Abhängigkeit vom Gehalt an Unverbranntem im Staub, betrug der Anteil der analysierten wasserlöslichen Ionen zwischen 10 und 99 % des emittierten Staubes. Bei nahezu vollständigem Ausbrand lag der Anteil der analysierten wasserlöslichen Ionen bei über 90 % des emittierten Staubes. Auf eine nachfolgende Darstellung der Messwerte wird verzichtet. Die Messwerte sind den einzelnen Messberichten zu entnehmen /2//3/.

6.2.10 Aromatische Kohlenwasserstoffe (BTX)

Die BTX-Konzentration stellt den Summenwert der einzeln bestimmten Aromaten (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, m+p-Xylol, o-Xylol, 4-Ethyltoluol und 1, 2, 4-Trimethylbenzol) sowie Cyclohexan dar. Ab dem Jahre 2008 wurde Cyclohexan nicht mehr bestimmt. Die BTX-Emission wurdenur bei ausgewählten Brennstoffen untersucht.

Die 1. BImSchV stellt hinsichtlich der BTX-Emissionen keine Anforderungen. Für eine Beurteilung der ermittelten Konzentrationen wird an dieser Stelle ersatzweise ein Vergleich mit dem Emissionswert für Benzol (1mg/m³) nachNr. 5.2.7.1.1 Klasse III der TA Luft vorgenommen. Dieser Emissionswert wird mit den auf 13 Vol.-% Sauerstoff bezogenen Messwerten verglichen.

Die BTX- und Benzolkonzentrationen korrelieren sehr stark miteinander, wobei Benzol und Toluol den größten Anteil an der BTX-Konzentration darstellen. Der Benzolanteil lag zwischen 10 % bis 95 % (im Mittel 59 %).

Bei den Messungen Holzpellets, Wintergerste I und Winterweizen lag die Benzolkonzentration zum Teil deutlich oberhalb des Emissionswertes der TA Luft (Nr. 5.2.7.1.1 Klasse III) von 1 mg/m³. Bei der Auswertung der Messungen wurde die für eine unvollständige Verbrennung häufig nachgewiesene Korrelation zwischen dem Auftreten von hohen CO-Minutenwerten und hohen BTX-Konzentrationen im BTX-Probenahmezeitraum festgestellt.

Bei den Messungen Holzpellets 2005 traten während aller BTX-Probenahmen keine hohen CO-Minutenwerte auf. Die BTX-Konzentration lag im Mittel bei $0,021 \text{ mg/m}^3$. Bei den Messungen Holzpellets 2006 traten während jeder BTX-Probenahme zeitweise CO-Minutenwerte über 1000 mg/m^3 auf. Der mittlere Halbstundenmittelwert der BTX-Konzentration lag bei $4,7 \text{ mg/m}^3$. Die Auswertung der anderen BTX-Messungen bestätigte den Einfluss der Verbrennungsbedingungen auf die BTX-Bildung. Entscheidend für die BTX-Emission scheint dabei nicht die mittlere CO-Konzentration, sondern die Anzahl von höheren CO-Spitzen zu sein. Die Kesselparameter sollten deshalb so eingestellt werden, dass möglichst ein gleichmäßiger Ausbrand ohne CO-Spitzen stattfindet.

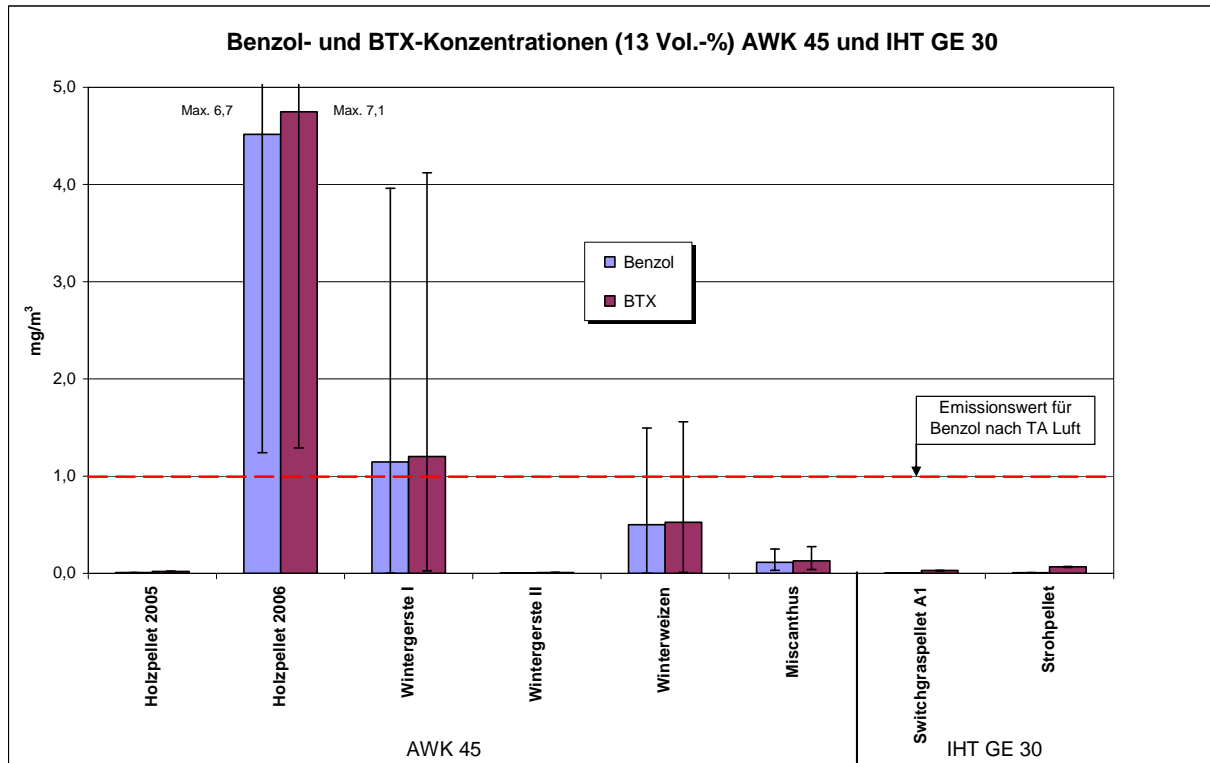


Abbildung 26: Benzol- und BTX-Konzentrationen (13 Vol.-%) AWK 45 und IHT GE 30

6.2.11 Dioxine/Furane (PCDD/F), Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Die 1. BImSchV stellt hinsichtlich der PCDD/F-Emissionen für Brennstoffe nach § 3 Nr. 8 und 13 Anforderungen an die Typprüfung. Dabei wird die Einhaltung eines Grenzwertes von $0,1 \text{ ngI-TEQ/m}^3$ (Anlage 4, 1. BImSchV) gefordert. Für Holzpellets gibt es keine entsprechenden Anforderungen.

Infolge der Aufwändigkeit der PCDD/F-Probenahmen erfolgten diese nur bei ausgewählten Brennstoffen. Bei den Brennstoffen Miscanthus (AWK 45) und Strohpellets (IHT GE 30) wurde nur eine Probenahme durchgeführt. Infolge der möglichen Schwankungsbreite der Messergebnisse wird durch die geringe Probenzahl die Interpretation eingeschränkt.

Die Bestimmung der Toxizitätsäquivalente für die PCDD/F erfolgte mit den Toxizitätsäquivalentfaktoren nach TA Luft und für die PCB nach WHO 2005.

Die ermittelten PCB-Konzentrationen lagen bis auf die Ausnahme Strohpellets ($0,02 \text{ ng TEQ/m}^3$) unter $0,01 \text{ ng TEQ/m}^3$.

Der PCDD/F-Grenzwert der 1. BImSchV von $0,1 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ für die Typprüfung wird nur bei Strohpellets überschritten. Die bei den anderen Brennstoffen ermittelten PCDD/F-Konzentrationen lagen unter $0,08 \text{ ng I-TEQ/m}^3$. Der in der Literatur beschriebene Zusammenhang zwischen der Höhe der Chlorgehalte im Brennstoff bzw. der Chlorwasserstoffkonzentration im Abgas und der Höhe der PCDD/F-Konzentration im Abgas lässt sich grundsätzlich bestätigen. Bei Strohpellets wurde bei einem Chlorgehalt von $2,42 \text{ g/kg}$ und einer mittleren Chlorwasserstoffkonzentration von 105 mg/m^3 eine PCDD/F-Konzentration von $0,713 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ bestimmt. Infolge der bei einer Einzelmessung festgestellten hohen PCDD/F-Konzentrationen bei Strohpellets besteht weiterer Untersuchungsbedarf. Neben der Chlorwasserstoffkonzentration haben auch die Verbrennungsbedingungen einen Einfluss auf die PCDD/F-Bildung. Deutlich wird dies im Vergleich der Konzentrationen bei den Brennstoffen Wintergerste I

(schlechte Verbrennungsbedingungen) und Wintergerste II (gute Verbrennungsbedingungen). Bei mittleren Chlorwasserstoffkonzentrationen von 17 mg/m^3 (WG I) und 36 mg/m^3 (WG II) lagen die mittleren PCDD/F-Konzentrationen bei $0,055 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ (WG I) und bei $0,0077 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ (WG II). Bei Wintergerste I traten während aller PCDD/F-Probenahmen vielfach höhere CO-Minutenwerte (CO-Spitzen) über 1000 mg/m^3 auf. Bei Wintergerste II traten nur 1 bis 2 CO-Spitzen je Probenahme in einer Höhe unter 1000 mg/m^3 auf. Alle anderen CO-Messwerte bei Wintergerste II lagen unter 100 mg/m^3 . Die Auswertung der anderen PCDD/F-Messungen bestätigte den Einfluss der Verbrennungsbedingungen auf die PCDD/F-Bildung. Entscheidend scheint auch hier nicht die mittlere CO-Konzentration zu sein, sondern die Anzahl von höheren CO-Spitzen. Die Kesselparameter sollten deshalb so eingestellt werden, dass möglichst ein gleichmäßiger Ausbrand ohne CO-Spitzen stattfindet. Beispielhaft hierfür sind die beiden Messungen mit Wintergerste. Bei der Messung Wintergerste I traten die CO-Spitzen immer während der Entschungszeiten (wurden während der 3 Probenahmen von 44,5 min auf 26,3 min verändert) auf. Bei der Messung Wintergerste II wurden die Entschungszeiten auf 20 s verkürzt und regelmäßige CO-Spitzen traten nicht mehr auf.

Infolge der weiter oben erwähnten nicht optimalen Kesselfahrweise des AWK 45 bei Verbrennung von Holzpellets wurden relativ hohe PCDD/F-Konzentrationen in der gleichen Größenordnung wie bei den anderen in diesem Kessel verbrannten Brennstoffen gemessen.

Der überwiegende Anteil an den gesamten Toxizitätsäquivalenten (PCDD/F, PCB) wird durch die PCDD/F beigesteuert. Der Anteil der PCB schwankte im Bereich von 0,5 % bis 12 % an den gesamten Toxizitätsäquivalenten und lag im Mittel bei 6,6 %.

In vergleichbaren Untersuchungen kam das LfU Bayern zu ähnlichen Messergebnissen /5/. So wurde bei Verbrennungsversuchen mit Weizenstroh (Chlorgehalt im Brennstoff $1,5 - 2,0 \text{ g/kg}$) ein mittlerer PCDD/F-Gehalt von $0,7 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ ermittelt. Feuerungsversuche mit naturbelassenem Holz führten zu Ergebnissen von $0,07 \text{ ng I-TEQ/m}^3$.

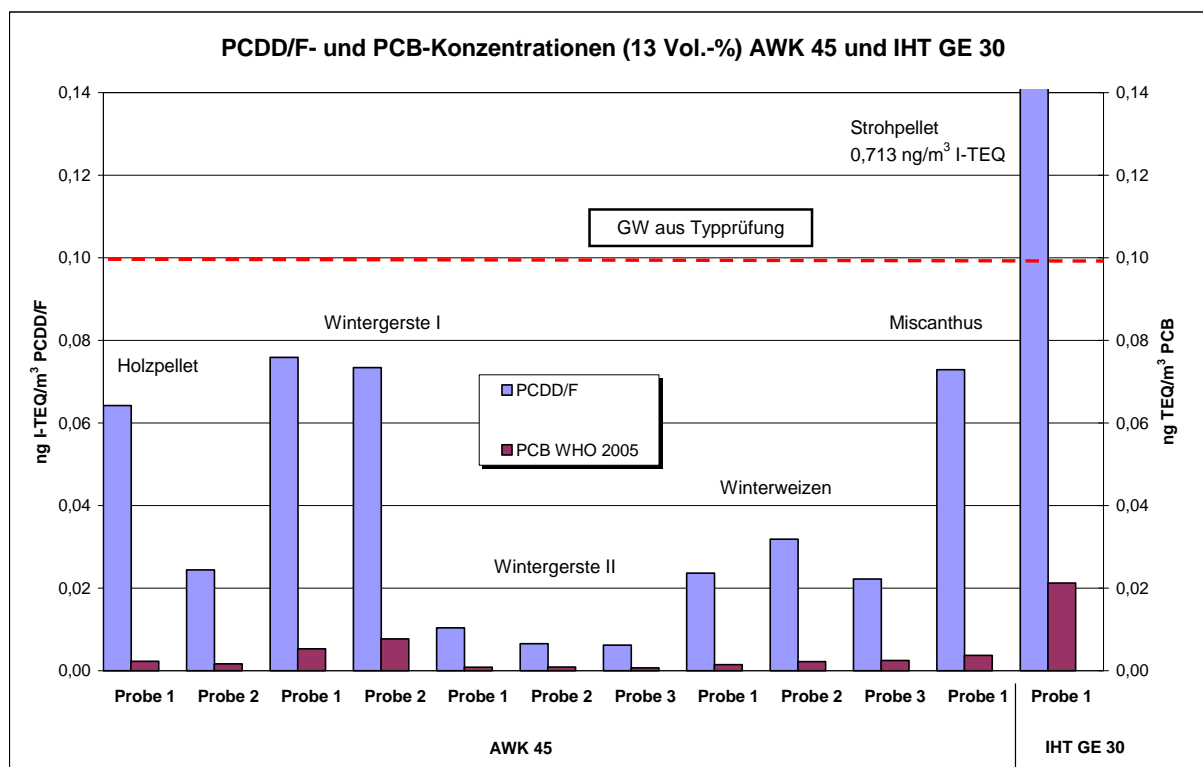


Abbildung 27: PCDD/F- und PCB-Konzentrationen (13 Vol.-%) AWK 45 und IHT GE 30

6.2.12 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)

Die 1. BImSchV stellt hinsichtlich der PAH-Emissionen keine Anforderungen. Für eine Beurteilung der ermittelten Konzentrationen wird für Benzo(a)pyren an dieser Stelle ersatzweise ein Vergleich mit dem Emissionswert nach Nr. 5.2.7.1.1 Klasse I der TA Luft (0,05mg/m³) vorgenommen. Dieser Emissionswert wird mit den auf 13 Vol.-% Sauerstoff bezogenen Messwerten verglichen. Zusätzlich wurden, wie in Tabelle 9 gezeigt, neben Benzo(a)pyren weitere PAH analysiert.

Die PAH-Konzentration stellt den Summenwert aller einzeln bestimmten PAH dar (einschließlich des Benzo(a)pyren). Das PAH Dibenz(a)anthracen wurde nur beim Brennstoff Wintergerste I untersucht. In den Jahren 2005 und 2006 erfolgte die Probenahme gleichzeitig mit der PCDD/F-Probenahme bei einer Probenahmezeit von 6 Stunden. Ab dem Jahre 2008 erfolgte die PAH-Probenahme mit einer separaten Apparatur nach VDI 3874 mit einer Probenahmezeit von 30 Minuten. Die PAH-Emission wurden nur bei ausgewählten Brennstoffen untersucht.

Die PAH- und Benzo(a)pyren-Konzentrationen korrelieren miteinander, wobei der Anteil des Benzo(a)pyren an den gesamten untersuchten PAH im Mittel 1,8 % beträgt. Die höchste Benzo(a)pyren-Konzentration wurde mit 0,0047 mg/m³ bei der Verbrennung von Holzpellets am AWK 45 ermittelt. Die Konzentration lag damit weit unterhalb des Emissionswertes der TA Luft. Hinsichtlich der Höhe der Emissionen wurde bei den einzelnen Brennstoffen tendenziell der gleiche Verlauf wie bei den PCDD/F-Probenahmen festgestellt. Auch hier traten die niedrigsten PAH-Konzentrationen bei Wintergerste II, bei deren Verbrennung die niedrigsten CO-Konzentrationen ermittelt wurden, auf. Analog zu den PCDD/F wird die Bildung von PAH bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen gefördert.

Tabelle 10: analysierte PAH-Komponenten

analysierte PAH-Verbindungen
Fluoranthren
Pyren
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen
Benzo(ghi)fluoranthren
Benzo(c)phenanthren
Cyclopenta(cd)pyren
Benzo(a)anthracen
Chrysen + Triphenylol
Benzo(b+j)fluoranthren
Benzo(k)fluoranthren
Benzo(e)pyren
Benzo(a)pyren
Perylen
Indeno(1,2,3-cd)pyren
Dibenz(ah+ac)anthracen
Benzo(b)chrysen
Picen
Benzo(ghi)perylol
Anthanthren
Coronen
Dibenz(aj)anthracen (nur WG II)

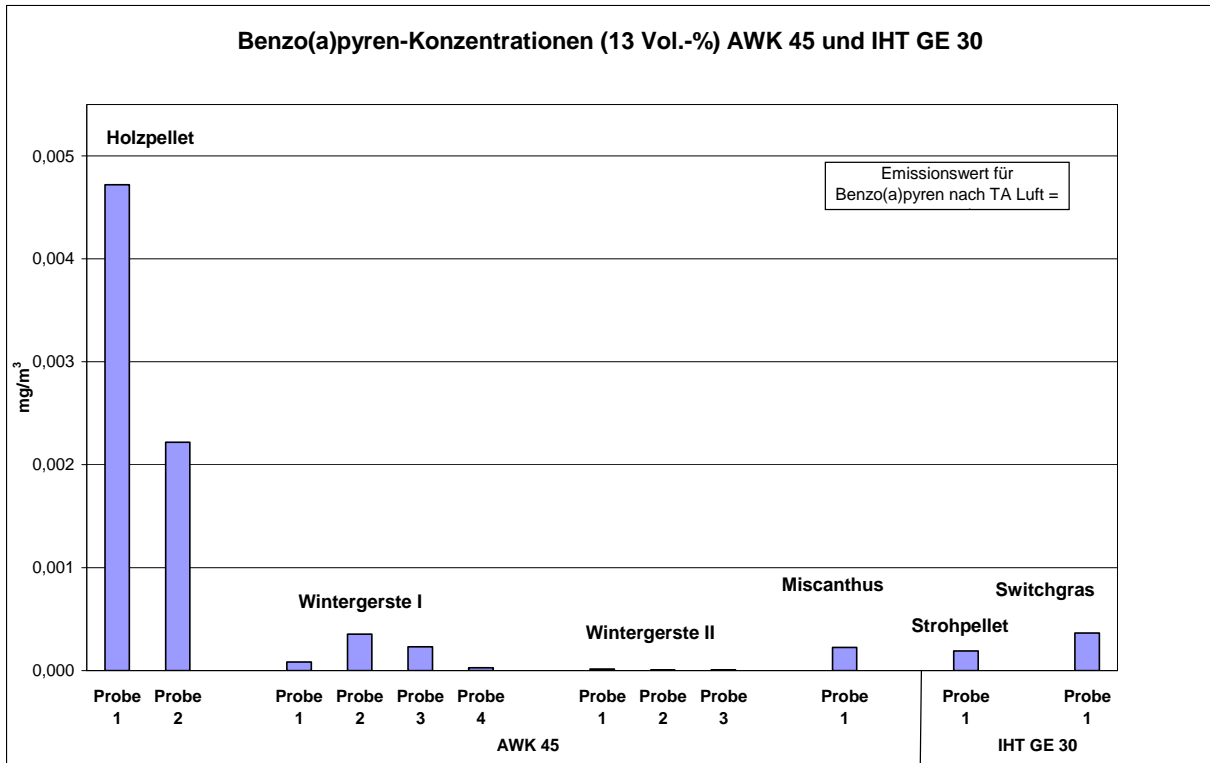


Abbildung 28: Benzo(a)pyren-Konzentrationen (13 Vol.-%) AWK 45 und IHT GE 30

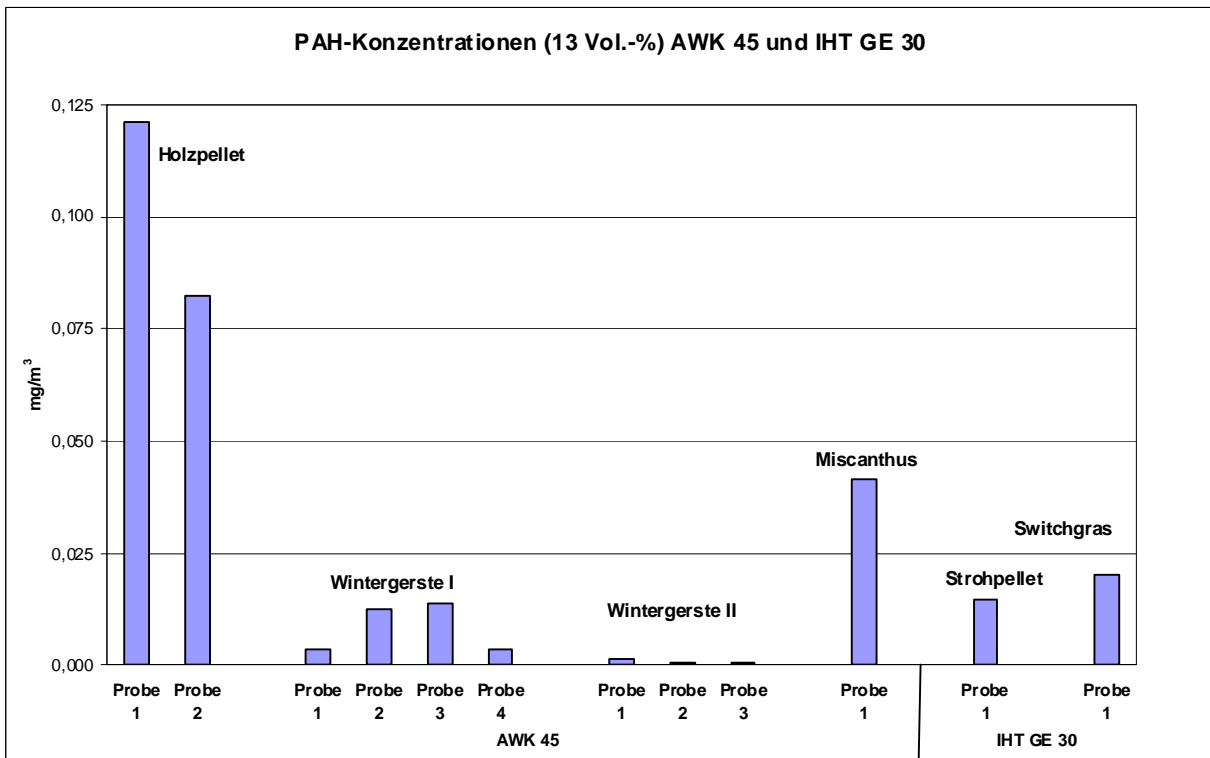


Abbildung 29: PAH-Konzentrationen (13 Vol.-%) AWK 45 und IHT GE 30

6.3 Abgasrandbedingungen, Betriebsparameter und Kesselbedienung während der Messungen

Der Abgasvolumenstrom wurde täglich vor Beginn der Messungen nach Erreichen des Volllastzustandes ermittelt. Die Abgastemperatur wurde kontinuierlich erfasst.

Die Kessel wurden während der Messungen mit der für einen geregelten Abbrand maximal möglichen Brennstoffmenge (Volllast) beschickt. Im Messzeitraum ist aufgrund dieser Bedingungen mit maximalen Emissionen zu rechnen. In den nachfolgenden Grafiken sind für jeden Kessel Mittelwerte und Schwankungsbreite der Abgastemperaturen und der täglichen Kesselleistung für jeden untersuchten Brennstoff dargestellt.

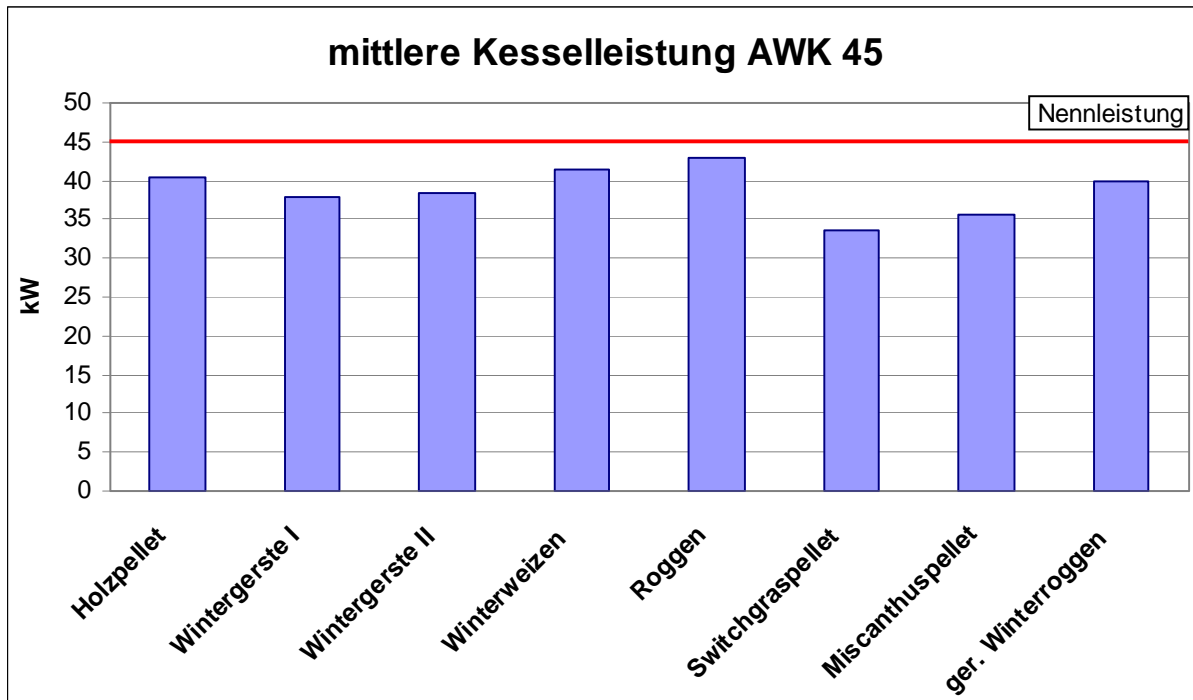


Abbildung 30: Mittlere Kesselleistung AWK 45

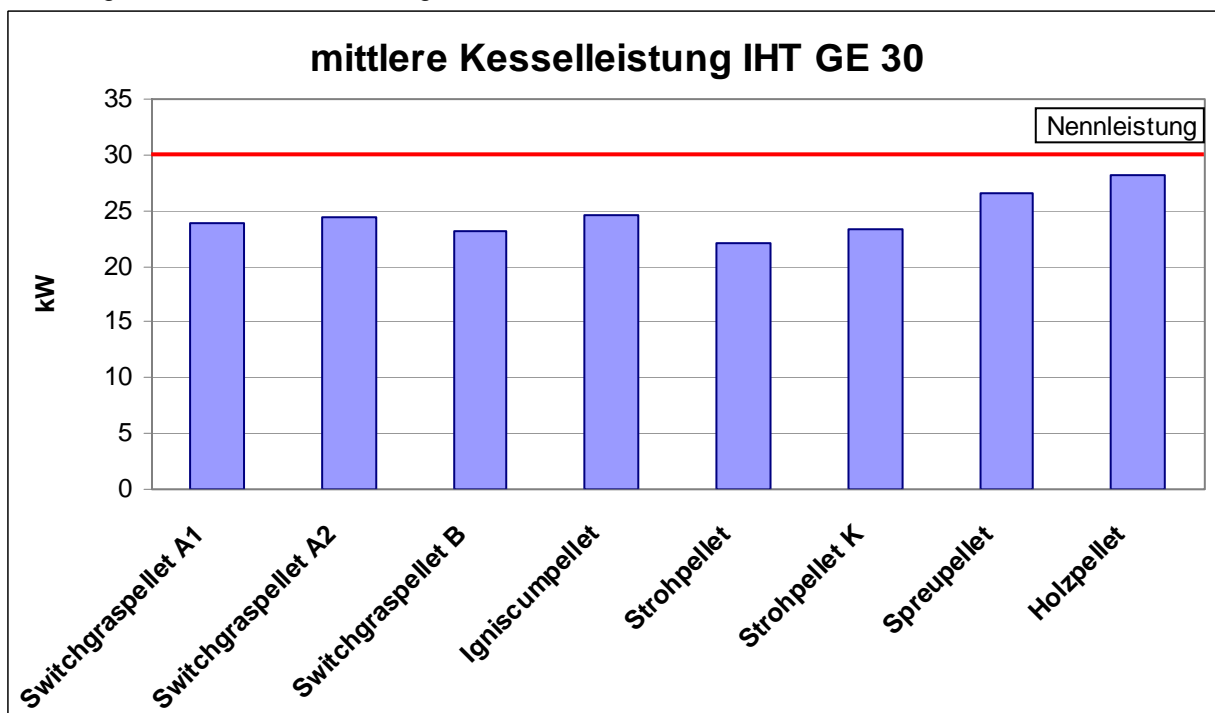


Abbildung 31: Mittlere Kesselleistung IHT GE 30

Die mittlere Kesselleistung wurde im Zeitraum der Messungen nach Erreichen der Volllast stündlich erfasst. Im Unterschied dazu beinhaltet die mittlere tägliche Kesselleistung auch die Anfahrphase mit niedriger Kesselleistung. Die mittlere Kesselleistung ist demzufolge größer als die mittlere tägliche Kesselleistung.

Bei der Verbrennung von Getreide kam es beim Kessel AWK 45 häufiger zu Verschlackungen in der Brennkammer. Diese konnten nur manuell entfernt werden. Dadurch kam es immer wieder zu Störungen des Verbrennungsregimes. Bei den anderen Brennstoffen traten diese Probleme nicht auf. Beim Kessel IHT GE 30 gab es keine Probleme mit Verschlackungen.

In den nachfolgenden Grafiken sind die mittleren Halbstundenmittelwerte der Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte einschließlich ihrer Schwankungsbreite dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der AWK 45 im Vergleich zum IHT GE 30 einen größeren Luftüberschuss benötigt.

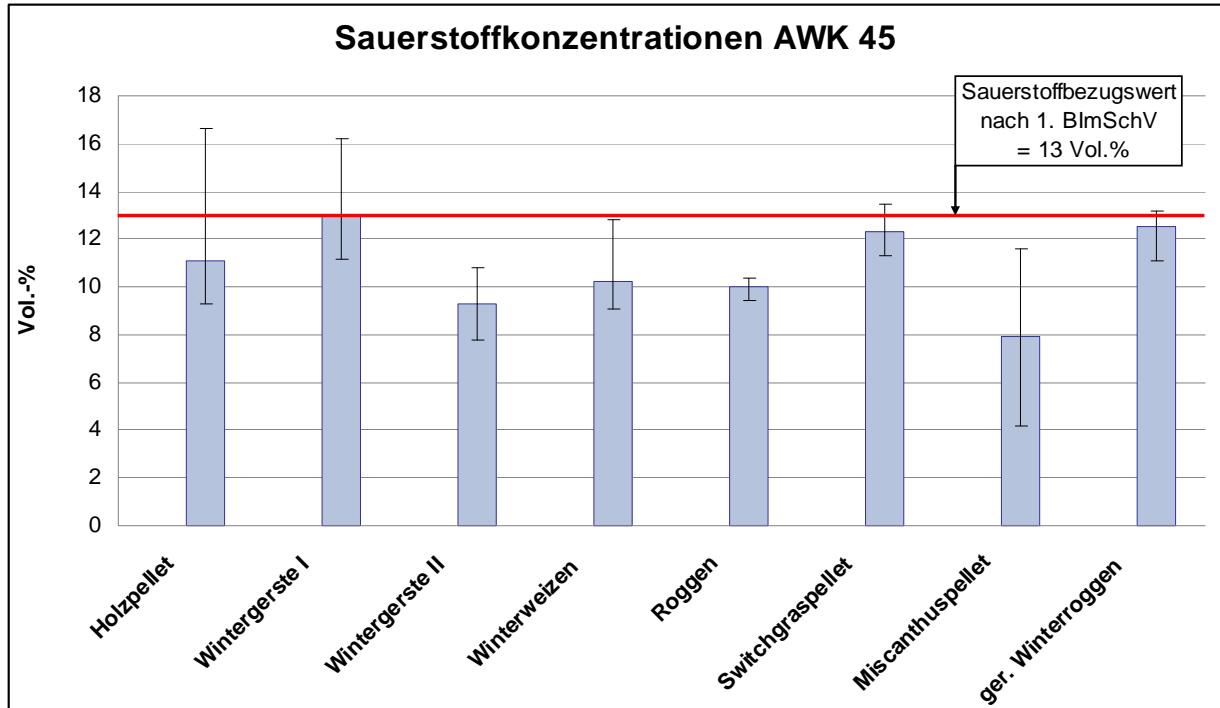


Abbildung 32: Sauerstoffgehalte AWK 45

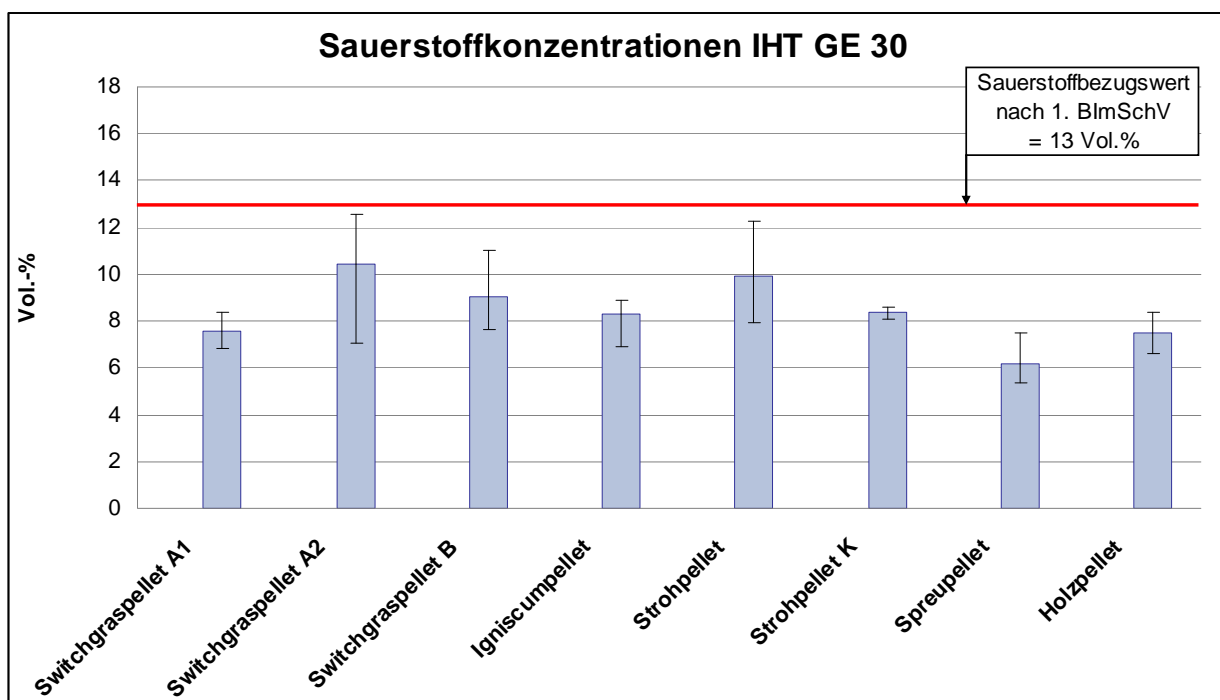


Abbildung 33: Sauerstoffgehalte IHT GE 30

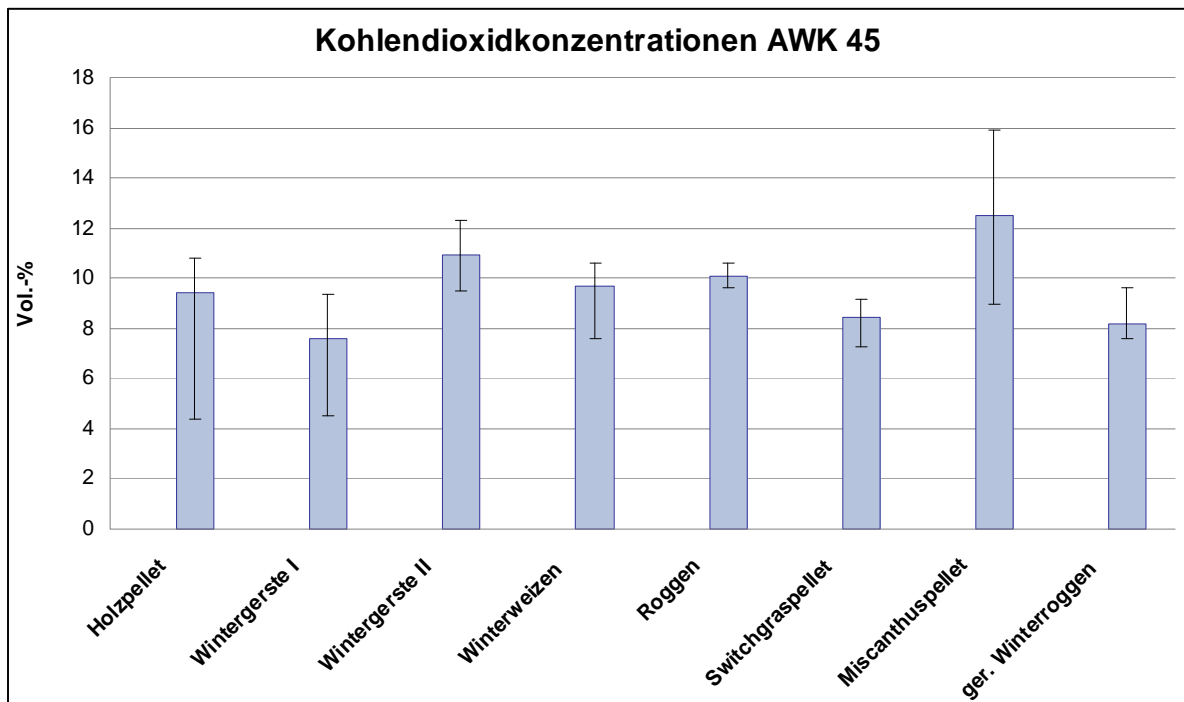


Abbildung 34: Kohlendioxidgehalte AWK 45

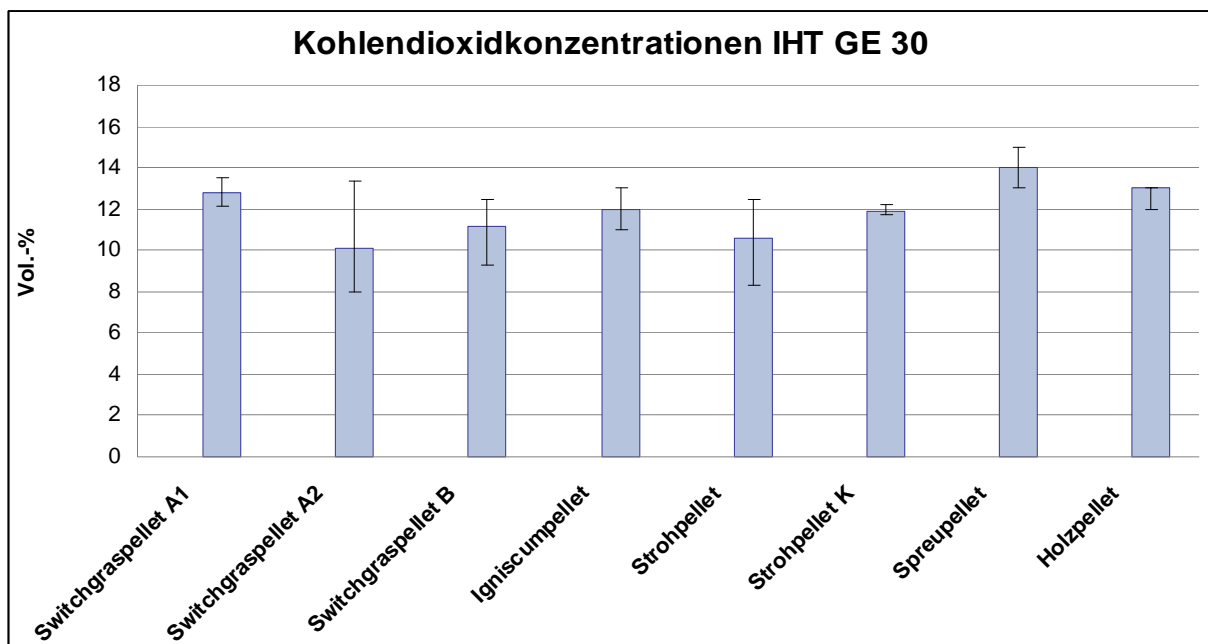


Abbildung 35: Kohlendioxidgehalte IHT GE 30

Hinsichtlich des Bedienkomforts der Kesselanlagen muss eingeschätzt werden, dass der IHT GE 30 über eine einfachere Steuerung ohne alternierenden Regelkreis verfügt. Nach steuerungstechnisch trägt abgestuftem Start arbeitet der Kessel sehr robust und störungsfrei. In Kombination mit dem großen Pufferspeicher der Heizungsanlage konnte eine Fahrweise mit sehr konstanten Betriebsbedingungen realisiert werden. Hier wirkte sich auch die absolut verschlackungsfreie Verbrennung positiv aus, so dass ein Betrieb des Kessels mit nur einer täglichen Kontrolle möglich ist. Die dem gegenüber feiner abgestufte Steuerung des AWK 45 und die damit verbundene höhere Empfindlichkeit der Kesselfahrweise bei auftretender Verschlackung erforderten eine wesentlich häufigere Kontrolle des Verbrennungsablaufes und bei Störungen einen erheblichen zusätzlichen Arbeitsaufwand.

7 Fazit

7.1 Bewertung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf Schadstoffemissionen

Die Anforderungen der 1. BImSchV an die Typprüfungen von Anlagen mit den in § 3 Abs. 1 Nummer 8 und 13 genannten Brennstoffen beinhalten Grenzwerte für CO, NO_x und PCDD/F. Bei automatisch beschickten Feuerungsanlagen fordert die EN 303-5 Mittelungszeiten über eine Versuchsdauer von mindestens sechs Stunden. Bei CO und NO_x erfolgte der Vergleich der im hier beschriebenen Versuchsprogramm als Halbstundenmittelwert (13 Vol.-% O₂-Bezug) ausgewiesenen Messwerte mit den Emissionsgrenzwerten aus der Typprüfung. Für Dioxine und Furane wurden konform zur Typprüfung 6-Stundenwerte ausgewiesen.

Einhaltung der Anforderungen aus der Typprüfung nach 1. BImSchV

Im Mittel wurde der Emissionsgrenzwert aus der Typprüfung für Kohlenmonoxid (0,25 g/m³) bei beiden Kesseln und allen Brennstoffen, außer Miscanthus am AWK 45, eingehalten. An beiden Kesseln wurden für einige der Brennstoffe zeitweise Halbstundenmittelwerte ermittelt, die oberhalb des Grenzwertes lagen. Dauerhafte Unterschreitungen des Grenzwertes für Kohlenmonoxid traten am AWK 45 bei Verbrennung der Brennstoffe Wintergerste II, Winterweizen und Switchgraspellets sowie am IHT GE 30 bei Verbrennung von Switchgraspellets A1, Switchgraspellets B, Igniscumpellets, Strohpellets K sowie Holzpellets auf.

Für die untersuchten Brennstoffe Holzpellets, Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe wurden die NO_x-Grenzwerte aus der Typprüfung (für Anlagen die ab dem 22.03.2010 errichtet wurden: 0,6 g/m³ und für Anlagen die ab dem 31.12.2014 errichtet werden: 0,5 g/m³) bei beiden Kesseln eingehalten. Eine Ausnahme stellte die Verbrennung von Switchgraspellets B am IHT GE 30 dar, hier wurde der Grenzwert von 0,5 g/m³ zeitweise überschritten.

Problematischer stellt sich die Einhaltung des NO_x-Grenzwertes bei der Verbrennung von Getreidekörnern dar. Bei der Verbrennung von Getreidekorn wurde der NO_x-Grenzwert von 0,5 g/m³ bei allen Getreidekörnern im Mittel überschritten und bei Wintergerste I und Winterweizen auch der Grenzwert von 0,6 g/m³. Vereinzelt wurden NO_x-Konzentrationen von 0,8 g/m³ gemessen.

Der Grenzwert von 0,1 ng I-TEQ/m³ für PCDD/F aus der Typprüfung wurde nur bei ausgesuchten Brennstoffen untersucht. Bei den Brennstoffen Holzpellets, Wintergerste I und II, Winterweizen und Miscanthus lagen die Messwerte zum Teil deutlich unterhalb des Grenzwertes. Bei Strohpellets wurde nur eine Probe untersucht, diese lag mit 0,713 ng I-TEQ/m³ weit über dem Grenzwert.

Die Ursache für die hohe PCDD/F-Konzentration ist neben dem hohen Chlorgehalt des Brennstoffes in ungünstigen Verbrennungsbedingungen zu suchen.

Einhaltung der Anforderungen nach § 5 Abs. 1 der 1. BImSchV

Die Kohlenmonoxidkonzentration ist nach § 5 Abs. 1 der 1. BImSchV in der Stufe 1 (1,0 g/m³ bis 31.12.2014) und in der Stufe 2 (0,4 g/m³ ab 01.01.2015) begrenzt.

Bei allen eingesetzten Brennstoffen lagen die Mittelwerte der Halbstundenmittelwerte von Kohlenmonoxid unterhalb der Emissionsgrenzwerte der Stufe 1 und 2 der 1. BImSchV. Bei Verbrennung von Holzpellets, Wintergerste I und Miscanthus (AWK 45) lagen einzelne Halbstundenmittelwerte zum Teil erheblich oberhalb der Emissionsbegrenzung nach Stufe 1. Bei der Verbrennung von Spreupellets, Strohpellets und Switchgraspellets A2 am Kessel IHT GE 30 wurde die Emissionsbegrenzung nach Stufe 2 durch einzelne Halbstundenmittelwerte geringfügig überschritten. Der Emissionsgrenzwert der Stufe 2 wurde bei Verbrennung von Wintergerste II, Winterweizen, Roggen, Switchgraspellets und gerösteter Winterroggen (AWK 45) und Switchgraspellets A1 und B, Igniscumpellets, Strohpellets K und Holzpellets (IHT GE 30) von allen Halbstundenmittelwerten unterschritten. Die Versuche haben gezeigt, dass der Emissionsgrenzwert für Kohlenmonoxid der Stufe 2 bei einer optimierten Kesselfahrweise im Mittel eingehalten werden kann.

Die Staubkonzentration ist nach § 5 Abs. 1 der 1. BImSchV in der Stufe 1 (0,10 g/m³ bis 31.12.2014) und in der Stufe 2 (0,02 g/m³ ab 01.01.2015) begrenzt. Bei Verbrennung von Holzpellets (AWK 45) und Switchgraspellets A1 (IHT GE 30) lagen alle Halbstundenmittelwerte unterhalb der Emissionsbegrenzung der Stufe 2. Nur geringfügige Überschreitungen des Emissionsgrenzwertes der Stufe 2, durch einzelne Halbstundenmittelwerte, wurden bei Verbrennung von Switchgras A2 und B, Igniscumpellets, Spreupellets und Holzpellets (IHT GE 30) festgestellt. Eine Überschreitung des Grenzwertes der Stufe 2 bei Einhaltung der Stufe 1 wurde bei Verbrennung von Strohpellets und

Strohpellets K (IHT GE 30) sowie Roggen und Switchgraspellets (AWK 45) festgestellt. Bei Verbrennung von Wintergerste I, Winterweizen, Miscanthus, und geröstetem Winterroggen (AWK 45) lagen die Mittelwerte der Halbstundenmittelwerte oberhalb des Grenzwertes der Stufe 1. Bei Wintergerste II (AWK 45) lag nur ein Halbstundenmittelwert über dem Grenzwert der Stufe 1.

Damit zeigt sich, dass der Kessel IHT GE 30 im Vergleich zum AWK 45 aufgrund einer verbesserten Konstruktion bei einer angepassten Kesselfahrweise weniger Staub emittiert. Die Staubemission kann durch eine Verbesserung der Verbrennungsbedingungen (besserer Ausbrand, weniger Rußpartikel im Abgas), die Verringerung des Mitreißens von Staub- und Aschepartikeln sowie die Abscheidung von Flugasche im Kessel verringert werden. Neben der Kesselfahrweise und den konstruktiven Merkmalen des Kessels ist die Staubemission auch von der Qualität des Brenngutes abhängig.

Kesselbauarten die dem Stand der Technik entsprechen und für den jeweiligen Brennstoff optimiert sind, sowie qualitativ hochwertige Brennstoffe sind Voraussetzungen für die Einhaltung der Staubemissionsgrenzwerte. Die Messergebnisse zeigen, dass die Einhaltung der Staubgrenzwerte nach Stufe 2 bei vielen Brennstoffen nicht mehr allein durch feuerungstechnische Primärmaßnahmen (konstruktive Änderungen) gewährleistet werden kann. Hier müssen nachgeschaltete Abgasreinigungseinrichtungen zum Einsatz kommen.

Die Verwendung des Heizkessels IHT GE 30 ist aufgrund seiner speziellen Konstruktion auch bei schlackebildenden Brennstoffen möglich. Auch bei der Verbrennung von Strohpellets, die aufgrund des höheren Kaliumgehaltes im Brennstoff besonders zur Schlackebildung neigen, wurden bei den Verbrennungsversuchen am IHT GE 30 keine Verschlackungen festgestellt. Inwieweit dies auch auf die Verwendung von Getreidekorn zutrifft, bei dessen Verbrennung es am AWK 45 zu Problemen mit Schlackebildung kam, wurde nicht untersucht.

Im Vergleich zu den übrigen Brennstoffen weisen die Strohpellets (mit und ohne Kalkzugabe) eine deutlich höhere Emission an Chlorwasserstoff, Staub und PCDD/F auf. Bei Verwendung von Stroh als Pelletbrennstoff in Kleinf Feuerungsanlagen sollte ein besonderes Augenmerk auf die Einstellung der Kesselparameter gelegt werden.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass sich der Einsatz eines vorgerösteten Getreidekorns sowohl wegen des zum Rösten erforderlichen Energiebedarfs, als auch aufgrund der höheren Emissionen nicht eignet. Weitere Untersuchungen mit vorgerösteten Getreidekorn erfolgen daher nicht.

Bei der Vielzahl der möglichen Brennstoffe muss immer auch auf die Eignung des Kessels für den entsprechenden Brennstoff geachtet werden. Die Untersuchungen zeigen, dass neben der grundsätzlichen Eignung eines Kessels die Kesselfahrweise einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Emissionen hat. Betreiber sind nicht in der Lage durch aufwändige Versuche die Kesselfahrweise für den jeweiligen Brennstoff zu optimieren. Hier müssen die seitens des Kesselherstellers ermittelten oder die bei der Typprüfung eingestellten brennstoffspezifischen Kesselparameter, die für eine optimale Fahrweise des Kessels erforderlich sind, im Computer des Kessels abgelegt werden. Die Betreiber müssen dahingehend sensibilisiert werden, dass eine schlechte Kesselfahrweise neben höheren Emissionen auch einen höheren Verschleiß des Kessels und einen schlechteren Kesselwirkungsgrad nach sich zieht.

Neben der Kesseltechnologie und -fahrweise ist die Qualität des Brenngutes von großer Bedeutung für die Einhaltung aktueller und künftiger Abgasgrenzwerte. Beim Erwerb von Brennstoffen ist deshalb neben preislichen Aspekten auch auf eine ausreichende Qualität des Brennstoffs zu achten. Besonderes Augenmerk ist auf eine ausreichende Festigkeit der Pellets, einem geringen Abriebanteil und einer geringen Restfeuchte zu richten. Falls vorhanden sollte beim Kauf der Brennstoffe auf eine Brennstoffzertifizierung geachtet werden. Die europaweite Zertifizierung von Holzpellets für die nichtindustrielle Verwendung erfolgt nach der Richtlinie DIN EN 14961-2. Über die Forderungen dieser Norm hinausgehende Anforderungen stellen das Zertifikat DINplus der Zertifizierungsgesellschaft DIN CERTCO beziehungsweise das Zertifikat ENplus der „Deutsches Pelletinstitut GmbH.“, einer Tochtergesellschaft des Deutschen Energieholz- und Pellet-Verbands e.V. (DEPV). Verbindliche Qualitätsanforderungen an Brennstoffpellets aus anderen Rohstoffen existieren noch nicht. Die Brennstoffe sind sachgerecht und trocken zu lagern, so dass sich die Qualität der Brennstoffe nicht verschlechtert.

Mit Verschärfung der Grenzwerte durch die novellierte 1. BImSchV ist die Realisierung einer benutzerfreundlichen, einfach zu bedienenden Fahrweise trotz zwischenzeitlich erheblicher Entwicklungsleistungen der Hersteller noch nicht für jeden Brennstoff gelöst. Daraus und aus den Erfahrungen des Versuchsprogramms abgeleitet, ist zu empfehlen, das für schwierige Brennstoffe wie Stroh und strohähnliche Brennstoffe den Kessel möglichst bei Volllast zu betreiben und mit einer robusten und großzügig ausgelegten Entaschung auszuführen.

Eine schlechte Brennstoffqualität (hoher Abriebanteil, hoher Feuchtegehalt) oder die Verwendung von Brennstoffen mit hohen Gehalten an Chlor bzw. Schwefel können von der Kesseltechnik und –fahrweise nur bedingt ausgeglichen werden.

Im Hinblick auf die sich ergebenden ökonomischen Vorteile beim Einsatz landwirtschaftlicher Brennstoffe dürfen sich die Betreiber derartiger Anlagen ihrer Verantwortung zum Immissionsschutz nicht entziehen.

Tabelle 11: Einhaltung der Grenzwerte

Messprogramm			Kessel AWK 45									Kessel IHT GE 30									
Brennstoff	Getreidekorn									Pellets			Pellets								
	Wintergerste I	Winterweizen	Wintergerste II	Roggen	Winterroggen, geröstet	Holz	Miscanthus	Switchgras	Igniscum	Switchgras A1	Stroh	Stroh K	Switchgras A2	Switchgras B	Spreu	Holz (DINplus)					
Typprüfung (1. BImSchV)																					
Emissionskomponente	Grenzwert	Dimension	Messwerte																		
Kohlenmonoxid	0,25	g/m ³	0,07	0,03	0,01	0,11	0,15	0,07	0,35	0,07	0,11	0,02	0,10	0,04	0,14	0,06	0,15	0,06			
Stickstoffoxid																					
Anl. erricht. ab 22.03.10	0,6	g/m ³	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	0,1			
Anl. erricht. ab 31.12.14	0,5	g/m ³																			
PCDD/F	0,1	ng I-TEC/m ³	0,08	0,03	0,01	n.g.	n.g.	0,05	0,07*	n.g.	n.g.	n.g.	0,71*	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.			
Messungen bei Betrieb der Anlagen nach §5 Abs.1 (1. BImSchV)																					
Kohlenmonoxid																					
Anl. erricht. ab 22.03.10	1,0	g/m ³	0,1	0,03	0,01	0,1	0,2	0,1	0,4	0,1	0,1	0,02	0,1	0,04	0,1	0,1	0,2	0,1			
Anl. erricht. ab 31.12.14	0,4																				
Gesamtstaub																					
Anl. erricht. ab 22.03.10	0,10	g/m ³	0,13	0,11	0,09	0,08	0,43	0,01	0,16	0,07	0,02	0,01	0,06	0,06	0,02	0,03	0,03	0,03			
Anl. erricht. ab 31.12.14	0,02																				

- Legende
- grün Grenzwert wird eingehalten
 - gelb Grenzwert der Stufe 1 eingehalten, Stufe 2 überschritten
 - rot Grenzwert (von Stufe 1 und 2) überschritten
 - n.g. nicht gemessen
 - * nur eine Emissionsmessung durchgeführt

7.2 Bewertung der Versuchsergebnisse unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten

Die hier im Rahmen eines FNR-Projektes „Energetische Nutzung von festen Bioenergieträgern, insbesondere von Getreide, Stroh und anderen nachwachsenden Rohstoffen außer Holz sowie Felduntersuchungen zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen < 1 MW_{th}“ durchgeführten Untersuchungen zum Einsatz von Getreidekorn in Kleinf Feuerungsanlagen haben dazu beigetragen, dass Getreidekorn als Regelbrennstoff in der novellierten 1. BImSchV aufgenommen wurde. Dies war aus Sicht der Landwirtschaft im Hinblick auf die thermische Nutzung von selbst erzeugtem Getreide gewünscht. Aufgrund der mittlerweile geänderten Weltmarktsituation und den damit verbundenen gestiegenen Getreidepreisen ist der Bedarf an Kleinf Feuerungsanlagen zur Getreideverbrennung in landwirtschaftlichen Unternehmen rückläufig.

In Betrieben mit entsprechendem Energiebedarf in der Tierproduktion hat eine Orientierung auf den Reststoff Stroh stattgefunden und auch der Anbau spezieller Energiepflanzen wie Miscanthus entwickelt sich stetig. Der Einsatz und die technische Bereitstellung dieser Brennstoffe haben sich aber als schwieriger gegenüber dem Getreidekorn erwiesen. Die Notwendigkeit, preiswerte Brennstoffe im landwirtschaftlichen Bereich zu erzeugen und einzusetzen, besteht unvermindert fort.

Die im Rahmen der Messungen durchgeführten Untersuchungen können aufgrund der Vielfalt der untersuchten Brennstoffe Grundlagen für weitere Entwicklungsprozesse hinsichtlich des thermischen Einsatzes von landwirtschaftlicher Biomasse liefern.

Bei der Auswahl der zur Brennstoffherzeugung infrage kommenden landwirtschaftlichen Energiepflanzen spielten folgende Kriterien eine Rolle:

- einfache und kostengünstige Etablierung,
- wenig aufwändige Bestandesführung,
- hohe Krankheits-, Schädlings- und Trockenresistenz,
- Trockenmasseerträge möglichst größer 15 t TM/ha,
- Einsatz vorhandener landtechnischer Mittel zur Ernte und Lagerung,
- gute Verbrennungseigenschaften (geringe K- und Cl – Gehalte).

Unter Beachtung dieser 6 vorgenannten Kriterien weisen nordamerikanische Präriegräser (z.B. Switchgras) das derzeit höchste Potenzial auf und kommen für einen Alternativenbau vorrangig in Betracht.

Im Folgenden werden die eingesetzten Brennstoffe unter landwirtschaftlichen und verarbeitungstechnischen Aspekten in Bezug auf ihre Eignung als Brennstoff in Kleinf Feuerungsanlagen diskutiert.

Holzpellets

Holzpellets (alternativ Hackschnitzel) sollten als Grundbrennstoff eingesetzt werden. Sie sind verfügbar und wirtschaftlich beschaffbar.

Wintergerste, Winterweizen, Roggen

Die Verbrennung von lebens- oder futtermitteltauglichem Getreidekorn wird auch perspektivisch die Ausnahme bleiben. Die thermische Nutzung von nicht als Lebensmittel bestimmtem Getreide wie Getreidekörner (Reinigungsgetreide, Mindergetreide) und Getreidebruchkörner, Getreideganzpflanzen, Getreideausputz, Getreidespelzen und Getreidehalmreste sowie Pellets aus den vorgenannten Brennstoffen ist laut 1. BImSchV möglich. Zur Verbesserung der Verbrennungseigenschaften (Ascheschmelzpunkt) sind Mischungen von nach § 3 Nr. 4, 5, 8 und 13, 1. BImSchV, zugelassenen Brennstoffen möglich. Als reiner Brennstoff sind in Bezug auf die Nutzung zur Wärmeerzeugung die Unterschiede zwischen den Getreidearten und – sorten eher marginal und werden deutlicher durch die von den Bodenverhältnissen und Düngegaben bestimmten Stoffinhalte geprägt.

Switchgraspellets, Miscanthuspellets

Diese und ähnliche Brennstoffe aus dem gezielten Energiepflanzenanbau sind bei eigenen Anbauflächen nach den oben genannten Kriterien wirtschaftlich gut einsetzbar. Die hierfür erforderliche einfache Erntetechnik ist in der Regel vorhanden. Ihr Einsatz ist in gehäckselter, pelletierter oder brikettierter Form möglich und die entsprechende Heiztechnik ist am Markt erhältlich. Sie befinden sich als Brennstoff im Normungsprozess und lassen eine Handhabung wie bei Holzbrennstoffen erwarten.

Entscheidungskriterien sind der notwendige Aufwand von der Saat bis zur Ernte und der Trockenmasseertrag, welcher möglichst nicht unter 12 – 15 t TM/ha liegen sollte. Switchgras und Miscanthus erfüllen diese Kriterien und sind nach derzeitigem Kenntnisstand die Energiepflanzen, welche sich für die thermische Nutzung in Kleinf Feuerungsanlagen am Besten eignen. Die Erzeugung von Mischpellets, unter den im vorangegangenen Abschnitt genannten Bedingungen ist ebenso denkbar.

Auffällig ist, dass der N-Anteil bei den Switchgraspellets aus 2009 (A1/A2) bei 0,41 Masse-% liegt, während er bei der Switchgras-Charge B (aus 2010) mit 1,54 Masse-% mehr als dreimal so hoch ist. Dies liegt offensichtlich am erheblich besseren und gedüngten Boden (90 Bodenpunkte) am Standort Bernburg (Switchgraspellets B) gegenüber den ungedüngten Anbauflächen in Lübbecke (30 – 40 Bodenpunkte). Die Sortenunterschiede haben hier sicher nur unwesentlichen Einfluss. Dies bedeutet, dass beim Anbau von Energiepflanzen welche für den Einsatz als Brennstoff gedacht sind, zur Absicherung einer NO_x-armen Verbrennung andere Düngestrategien als üblich realisiert werden sollten. Auf eine späte N-Gabe sollte demzufolge bei einer geplanten Verwendung als Brennstoff verzichtet werden.

gerösteter Winterroggen

Der versuchsweise thermische Einsatz von geröstetem Getreide folgte einem verbrennungstheoretischen Ansatz, der sich zwar grundsätzlich bestätigt hat, jedoch technisch im Rahmen der Untersuchungen und mit der vorhandenen Kesseltechnik nicht sinnvoll zu steuern war. So entwickelte sich die Verbrennung beispielsweise bei einem Vollastversuch im AWK 45 so heftig, dass über Stunden keine Aschereste im Kessel verblieben. Die Untersuchungen wurden einem eintägigen Verbrennungsversuch hinaus nicht fortgeführt.

Igniscumpellets

Die Eigenschaften des Igniscum sind bezüglich der Pelletierung holzähnlich und es sind hohe Schüttdichten erreichbar. Anbauseitig ist die Pflanze jedoch umstritten. Zwar kann die befürchtete hohe Invasivität über das Wurzelwachstum so nicht bestätigt werden, doch das vom Knöterich bekannte problematische Entfernen nach Aufgabe des Anbaus wurde noch nicht untersucht. Entscheidend für eine wirtschaftliche Nutzung als Biobrennstoff sind höhere Trockenmasseerträge. Diese konnten entgegen der Angaben des Züchters nicht erreicht werden. Insbesondere sind nach Überwintern (natürliche Trocknung) die Biomasseverluste gegenüber dem Grünschnitt sehr hoch. 5 bis 10 t TM/ha sind im Verhältnis zu den hohen Etablierungskosten des Bestandes inakzeptabel.

Strohpellets, Spreupellets

Als Reststoffe der Getreideproduktion fallen Stroh und Spreu auch bei nachhaltiger Bewirtschaftung (Humusbilanz) in entsprechend großen Mengen an. Bei der Erzeugung und dem Einsatz alternativer Brennstoffe sollte sich die Landwirtschaft vorrangig auf Stroh und Spreu konzentrieren, da hier keine Flächen- und Nahrungsmittelkonkurrenzen bestehen. Infolge der geringeren Chlor- und Kaliumgehalte und eines vergleichbaren Heizwertes ist Spreu für die thermische Nutzung besser geeignet als Stroh und kann dessen Brennstoffeigenschaften im Brennstoffgemisch aufwerten. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, dass die Anforderungen der 1. BImSchV hinsichtlich der Dioxingehalte im Abgas eingehalten werden.

Die Verarbeitung zu Pellets und anderen Presslingen ist unproblematisch und befindet sich im Normierungsprozess. Daher ist die technische Anpassung und Weiterentwicklung der Heiztechnik in Bezug auf diese Brennstoffe am ehesten zu erwarten. Um die Probleme einer effizienten Miternte von Spreu (hohes Volumen) und erweiterte Bergemöglichkeiten unter feuchteren Erntebedingungen (Verfügbarkeit) zu verbessern, wird in Bernburg derzeit ein neues Ernteverfahren entwickelt.

Für die perspektivische Fortführung der messtechnischen Untersuchungen wurden im Berichtszeitraum Versuchspartzellen mit folgenden Energiepflanzen etabliert:

- Rumex: Züchtungsprodukt aus der Ukraine durch Kreuzung von Ampfer und Spinat; silierbar; Nutzung als Ferment oder Festbrennstoff möglich
- SIDA: nordamerikanisches Malvengewächs, polnische Züchtung; schnellwüchsig mit vielfältigen energetischen und stofflichen Nutzungsmöglichkeiten
- Big Bluestem: Nordamerikanisches Präriegras ähnlich Switchgras; durch den Verlust der Blätter bei Überwinterung erhofft man sich eine schadstoffärmere Verbrennung
- Triarrhena: chinesisches Großgras (C4-Pflanze); miscanthusartig, soll Blattverlust über Winter durch Wuchshöhe ausgleichen; verspricht gute Verbrennungseigenschaften
- Szarvasi 1: ungarisches Steppengras; sehr anspruchslos und in Ertrag und Eigenschaften den Präriegräsern nahekommend
- Kurzumtriebsplantage (KUP) mit Weide- und Pappelklonen im bundesweiten Anbauvergleich

8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungen

Abbildung 1:	schematische Darstellung des AWK 45.....	9
Abbildung 2:	Kessel AWK 45 mit Vorrats- behälter.....	9
Abbildung 3:	Kessel IHT GE 30.....	11
Abbildung 4:	Schnittdarstellung des IHT GE 30.....	12
Abbildung 5:	Versuchsstand.....	13
Abbildung 6:	vereinfachte Darstellung des Versuchsstandes.....	13
Abbildung 7:	Schema der kontinuierlichen Gasanalyse und Messwerterfassung	20
Abbildung 8:	6-stufiger Impaktor Typ STF 1	22
Abbildung 9:	Halbstundenmittelwerte Kohlenmonoxidkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) AWK 45.....	27
Abbildung 10:	Halbstundenmittelwerte Kohlenmonoxidkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) IHT GE 30	27
Abbildung 11:	Staubkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) AWK 45.....	28
Abbildung 12:	Staubkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) IHT GE 30.....	29
Abbildung 13:	Zusammenhang zwischen dem N-Gehalt des Brennstoffes und der NO _x -Konzentrationim Abgas.....	30
Abbildung 14:	Halbstundenmittelwerte Stickstoffoxidkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) AWK 45.....	30
Abbildung 15:	Halbstundenmittelwerte Stickstoffoxidkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) IHT GE 30.....	31
Abbildung 16:	Zusammenhang zwischen dem S-Massenstrom des Brennstoffes, des Abgases und der Asche	32
Abbildung 17:	Schwefeldioxidkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) AWK 45.....	32
Abbildung 18:	Schwefeldioxidkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) IHT GE 30	33
Abbildung 19:	Gesamtkohlenstoffkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) AWK 45.....	34
Abbildung 20:	Gesamtkohlenstoffkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) IHT GE 30.....	34
Abbildung 21:	Zusammenhang zwischen dem Cl-Gehalt des Brennstoffes und der HCl-Konzentration im Abgas.....	35
Abbildung 22:	Chlorwasserstoffkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) AWK 45.....	36
Abbildung 23:	Chlorwasserstoffkonzentrationen (13 Vol.-% O ₂) IHT GE 30	36
Abbildung 24:	Feinstaubfraktionen am AWK 45.....	37
Abbildung 25:	Feinstaubfraktionen am IHT GE 30.....	37
Abbildung 26:	Benzol- und BTX-Konzentrationen (13 Vol.-%) AWK 45 und IHT GE 30	39
Abbildung 27:	PCDD/F- und PCB-Konzentrationen (13 Vol.-%) AWK 45 und IHT GE 30	40
Abbildung 28:	Benzo(a)pyren-Konzentrationen (13 Vol.-%) AWK 45 und IHT GE 30.....	42
Abbildung 29:	PAH-Konzentrationen (13 Vol.-%) AWK 45 und IHT GE 30	42
Abbildung 30:	Mittlere Kesselleistung AWK 45	43
Abbildung 31:	Mittlere Kesselleistung IHT GE 30	43
Abbildung 32:	Sauerstoffgehalte AWK 45	44
Abbildung 33:	Sauerstoffgehalte IHT GE 30	45
Abbildung 34:	Kohlendioxidgehalte AWK 45.....	45
Abbildung 35:	Kohlendioxidgehalte IHT GE 30	45
Abbildung A 1:	CO-Verlauf mit Wintergerste am AWK 45	56
Abbildung A 2:	CO-Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45.....	56
Abbildung A 3:	CO-Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30.....	57
Abbildung A 4:	CO-Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30.....	57
Abbildung A 5:	NO _x -Verlauf mit Wintergerste I am AWK 45	58
Abbildung A 6:	NO _x -Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45	58
Abbildung A 7:	NO _x -Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30.....	59
Abbildung A 8:	NO _x -Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30.....	59
Abbildung A 9:	SO ₂ -Verlauf mit Wintergerste am AWK 45.....	60
Abbildung A 10:	SO ₂ -Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45	60
Abbildung A 11:	SO ₂ -Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30	61
Abbildung A 12:	SO ₂ -Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30	61
Abbildung A 13:	C _{ges.} -Verlauf mit Wintergerste am AWK 45	62
Abbildung A 14:	C _{ges.} -Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45.....	62
Abbildung A 15:	C _{ges.} -Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30.....	63
Abbildung A 16:	C _{ges.} -Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30.....	63
Abbildung A 17:	O ₂ -Verlauf mit Wintergerste am AWK 45	64

Abbildung A 18:	O ₂ -Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45.....	64
Abbildung A 19:	O ₂ -Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30.....	65
Abbildung A 20:	O ₂ -Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30.....	65
Abbildung A 21:	CO ₂ -Verlauf mit Wintergerste am AWK 45	66
Abbildung A 22:	CO ₂ -Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45	66
Abbildung A 23:	CO ₂ -Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30.....	67
Abbildung A 24:	CO ₂ -Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30.....	67
Abbildung A 25:	Temperaturverlauf Wintergerste I am AWK 45	68
Abbildung A 26:	Temperaturverlauf Miscanthuspellets am AWK 45	68
Abbildung A 27:	Temperaturverlauf Switchgraspellets am IHT GE 30.....	69
Abbildung A 28:	Temperaturverlauf Spreupellets am IHT GE 30.....	69
Abbildung A 29:	Abgastemperaturen am AWK 45.....	70
Abbildung A 30:	Abgastemperaturen am IHT GE 30.....	70

8.2 Bildquellen

Titelfoto	Foto des LAU
Abbildung 1:	Grafik der Fa. Ernst Gerlinger Biokompakt GmbH, Betriebsanleitung Kessel AWK 45
Abbildung 2:	Foto des LAU
Abbildung 3:	Foto des LAU
Abbildung 4:	Grafik der Fa. Innovative Heiztechnik GmbH, Betriebsanleitung Kessel IHT GE 30
Abbildung 5:	Foto des LAU
Abbildung 6:	Grafik des LAU
Abbildung 7:	Grafik des LAU
Abbildung 8:	Foto des LAU
Abbildung 9 – A 30:	Grafiken des LAU

8.3 Tabellen

Tabelle 1:	Probenahmestellen bei Emissionsmessung am AWK-Kessel.....	14
Tabelle 2:	Probenahmestellen bei Emissionsmessung am IHT-Kessel	14
Tabelle 3:	Übersicht der eingesetzten Brennstoffe und ihre Herkunft	16
Tabelle 4:	Anzahl der Emissionsprobenahmen	18
Tabelle 5:	Ermittelte Abgasrandparameter sowie Parameter zur Brennstoff- undAschecharakterisierung	19
Tabelle 6:	Messgeräte zur Ermittlung der Abgasrandparameter.....	20
Tabelle 7:	Messeinrichtungen zur kontinuierlichen Gasanalyse.....	21
Tabelle 8:	Übersicht der angewendeten Verfahren der diskontinuierlichen Emissionsmessung	22
Tabelle 9:	Quecksilber- und Bleigehalte/-konzentrationen.....	38
Tabelle 10:	analysierte PAH-Komponenten.....	41
Tabelle 11:	Einhaltung der Grenzwerte	49
Tabelle B 1:	Übersicht Brennstoff- und Ascheparameter.....	71
Tabelle B 2:	Brennstoff- und Ascheparameter Holzpellets, AWK 45-Kessel	72
Tabelle B 3:	Brennstoff- und Ascheparameter Wintergerste I, AWK 45-Kessel	73
Tabelle B 4:	Brennstoff- und Ascheparameter Wintergerste II, AWK 45-Kessel	74
Tabelle B 5:	Brennstoff- und Ascheparameter Winterweizen, AWK 45-Kessel.....	75
Tabelle B 6:	Brennstoffparameter Roggen, AWK 45-Kessel	76
Tabelle B 7:	Brennstoff- und Ascheparameter Switchgraspellets, AWK 45-Kessel.....	77
Tabelle B 8:	Brennstoff- und Ascheparameter Miscanthuspellets, AWK 45-Kessel.....	78
Tabelle B 9:	Brennstoff- und Ascheparameter gerösteter Winterroggen, AWK 45-Kessel.....	79
Tabelle B 10:	Brennstoff- und Ascheparameter Switchgraspellets A1 (identisch mit A2), IHT GE 30-Kessel.....	80
Tabelle B 11:	Brennstoff- und Ascheparameter Switchgraspellets B, IHT GE 30-Kessel.....	81
Tabelle B 12:	Brennstoff- und Ascheparameter Igniscumpellets, IHT GE 30-Kessel.....	82
Tabelle B 13:	Brennstoff- und Ascheparameter Strohpellets, IHT GE 30-Kessel	83
Tabelle B 14:	Brennstoff- und Ascheparameter Strohpellets K, IHT GE 30-Kessel	84
Tabelle B 15:	Brennstoff- und Ascheparameter Spreupellets, IHT GE 30-Kessel	85
Tabelle B 16:	Brennstoff- und Ascheparameter Holzpellets, IHT GE 30-Kessel.....	86

Tabelle C 1:	Einzelmesswerte AWK 45 – Holzpellets	87
Tabelle C 2:	Einzelmesswerte AWK 45 – Wintergerste I	88
Tabelle C 3:	Einzelmesswerte AWK 45 – Wintergerste II	89
Tabelle C 4:	Einzelmesswerte AWK 45 – Winterweizen	90
Tabelle C 5:	Einzelmesswerte AWK 45 – Roggen	91
Tabelle C 6:	Einzelmesswerte AWK 45 – Switchgraspellets.....	92
Tabelle C 7:	Einzelmesswerte AWK 45 – Miscanthuspellets	93
Tabelle C 8:	Einzelmesswerte AWK 45 – gerösteter Winterroggen.....	94
Tabelle C 9:	Einzelmesswerte IHT GE 30 – Switchgraspellets A1	95
Tabelle C 10:	Einzelmesswerte IHT GE 30 – Switchgraspellets A2.....	96
Tabelle C 11:	Einzelmesswerte IHT GE 30 – Switchgraspellets B.....	97
Tabelle C 12:	Einzelmesswerte IHT GE 30 – Igniscumpellets	98
Tabelle C 13:	Einzelmesswerte IHT GE 30 – Strohpellets	99
Tabelle C 14:	Einzelmesswerte IHT GE 30 – Strohpellets K.....	100
Tabelle C 15:	Einzelmesswerte IHT GE 30 – Spreupellets	101
Tabelle C 16:	Einzelmesswerte IHT GE 30 – Holzpellets.....	102

9 Literatur

- /1/ UBA-Hintergrundpapier „Die Nebenwirkungen der Behaglichkeit – Feinstaub aus Kamin und Holzofen“; Umweltbundesamt, März 2006
- /2/ Messberichte des LAU, unveröffentlicht:
- MB 01 – 2005 (Wintergerste I)
 - MB 02 – 2005 (Holzpellets)
 - MB 02 – 2006 (Winterweizen)
 - MB 03 – 2006 (Wintergerste II)
 - MB 04 – 2006 (Roggen)
 - MB 05 – 2006 (Holzpellets II)
- /3/ Messberichte des LAU, unveröffentlicht:
- 01-2008 Miscanthuspellets
 - 02-2008 Switchgraspellets
 - 03-2008 Winterroggen geröstet
 - 01-2009 Strohpellets
 - 02-2009 Strohpellets K
 - 03-2009 Switchgraspellets A1
 - 04-2009 Igniscumpellets
 - 03-2010 Switchgraspellets B
 - 04-2010 Switchgraspellets A2
 - 05-2010 Spreupellets
 - 06-2010 Holzpellets
- /4/ Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse, FNR 2001
- /5/ LfU Bayern, G. Schmoeckel, „Zusammenfassung der Ergebnisse des Messprogramms zur Begleitung des vorübergehenden Getreideeinsatzes in Feuerungsanlagen“ 2003
- /6/ Launhardt, T; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V. (2000): Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Materialien Nr. 156, München
- /7/ VDI/DIN-Handbuch „Reinhaltung der Luft“
- /8/ AG Waldernährung der Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft Bayern

C. Ehrlich, G. Noll, W.-D. Kalkoff, G. Baumbach, A. Dreiseidler: PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} - Emissions from Industrial Plants, Results from Measurement Programmes in Germany, Atmospheric Environment 41 (2007) 6236–6254

Hering, Th.; Peisker, D.: Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Getreide und halmgutartigen Brennstoffen in Feuerungsanlagen in der Praxis, Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Abschlussbericht, Jena 2009.

Ehrlich, Chr., Noll, G., Kalkoff, W.-D.: Determining PM-emission fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0}) from small-scale combustion units and domestic stoves using different types of fuels including bio fuels like wood pellets and energy grain, DustConf 2007, Maastricht

10 Abkürzungen

Masse-%	Masseprozent
Vol.-%	Volumenprozent
kt	Kilotonne
MWth	Megawatt thermisch
WW	Winterweizen
WG	Wintergerste

11 Anhang A

11.1 Schadstoffkonzentrationen und -gehalte, Betriebsparameter, Abgasrandbedingungen

Die folgenden Diagramme zeigen typische Verläufe der Temperatur sowie der Konzentrationen an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Schwefeldioxid und Gesamtkohlenstoff ausgewählter Brennstoffe der beiden untersuchten Kessel.

11.1.1 Kohlenmonoxid

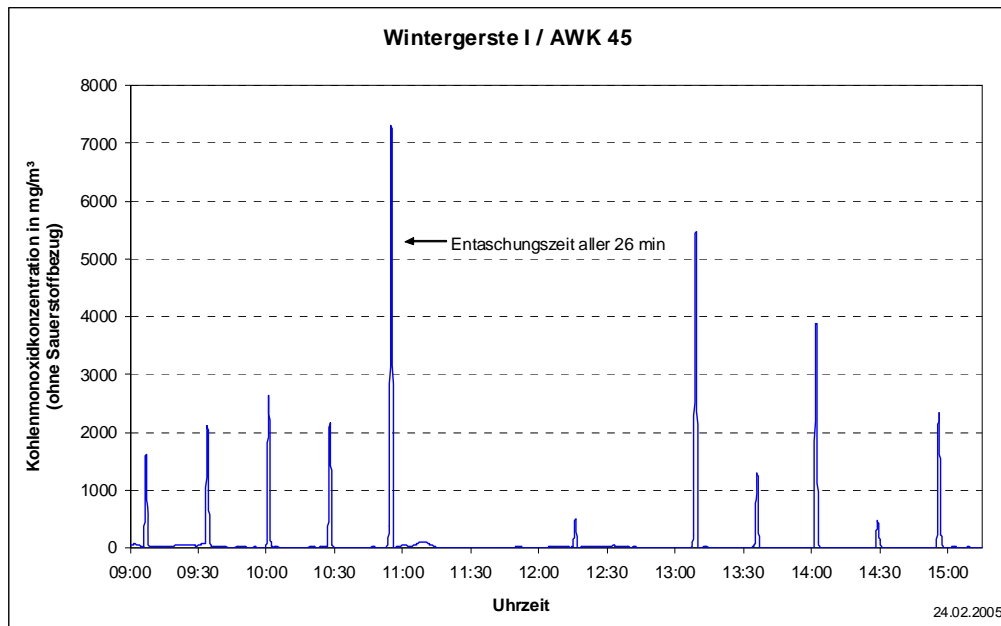


Abbildung A 1: CO-Verlauf mit Wintergerste am AWK 45

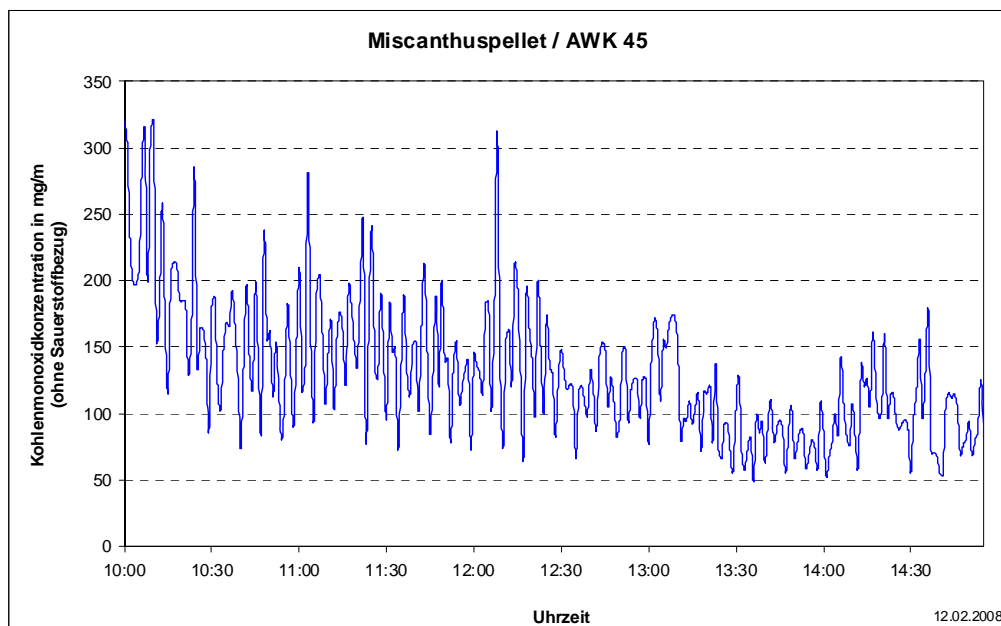


Abbildung A 2: CO-Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45

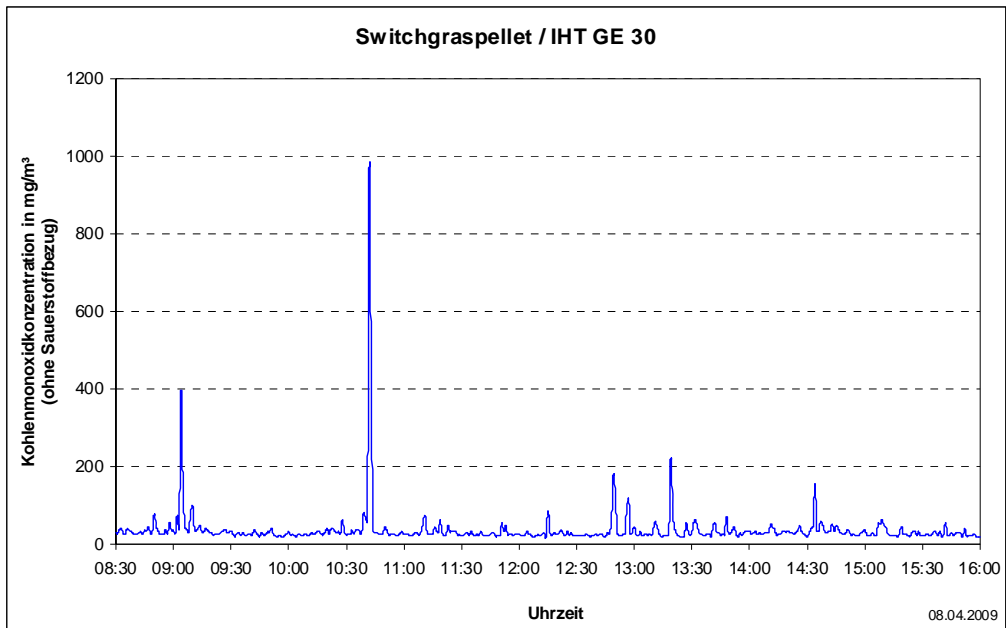


Abbildung A 3: CO-Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30

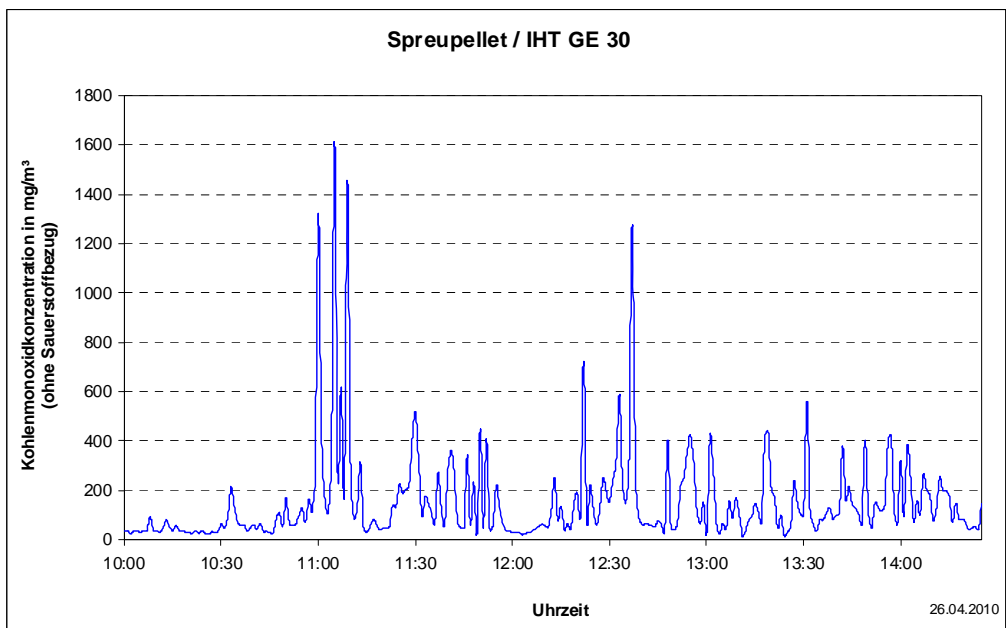


Abbildung A 4: CO-Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30

11.1.2 Stickstoffoxide

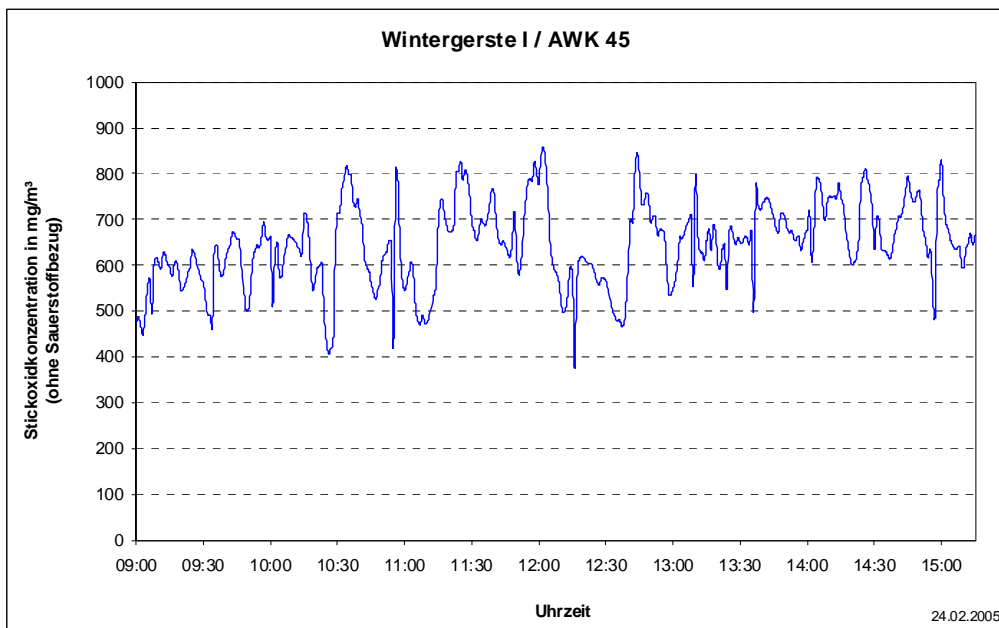


Abbildung A 5: NOx-Verlauf mit Wintergerste I am AWK 45

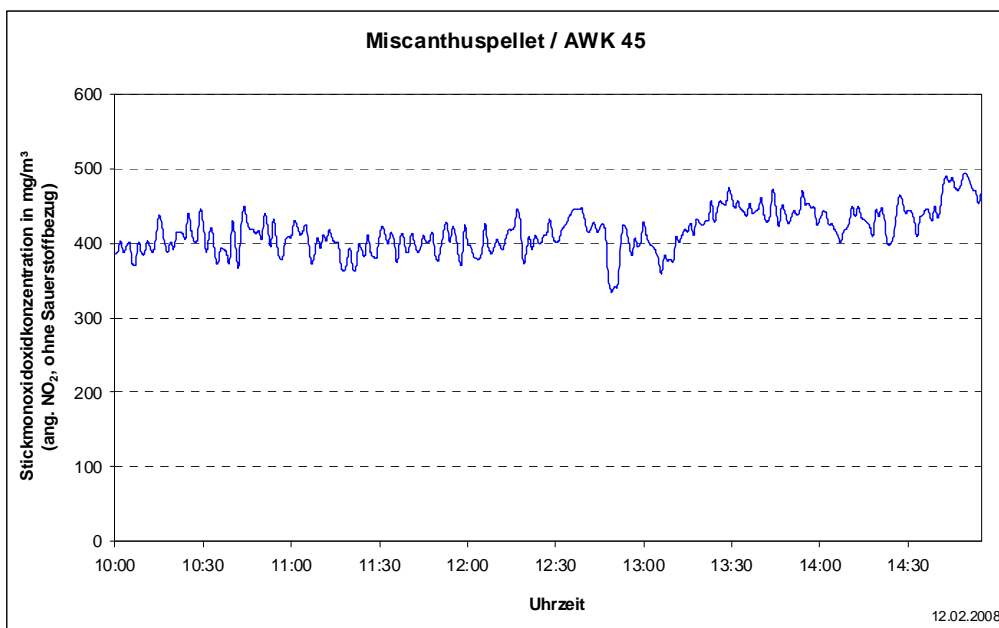


Abbildung A 6: NOx-Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45

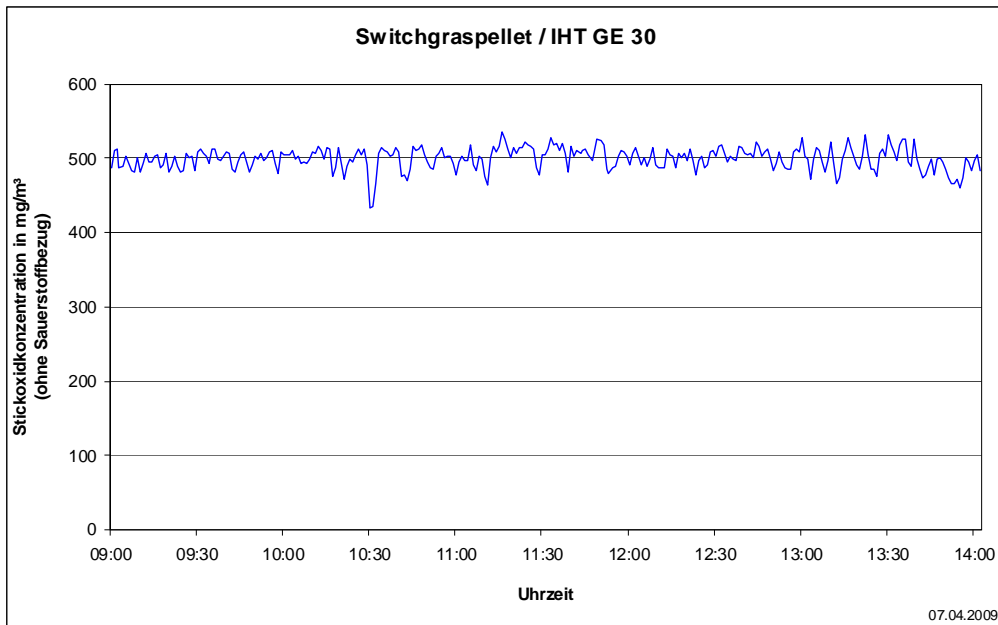


Abbildung A 7: NO_x-Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30

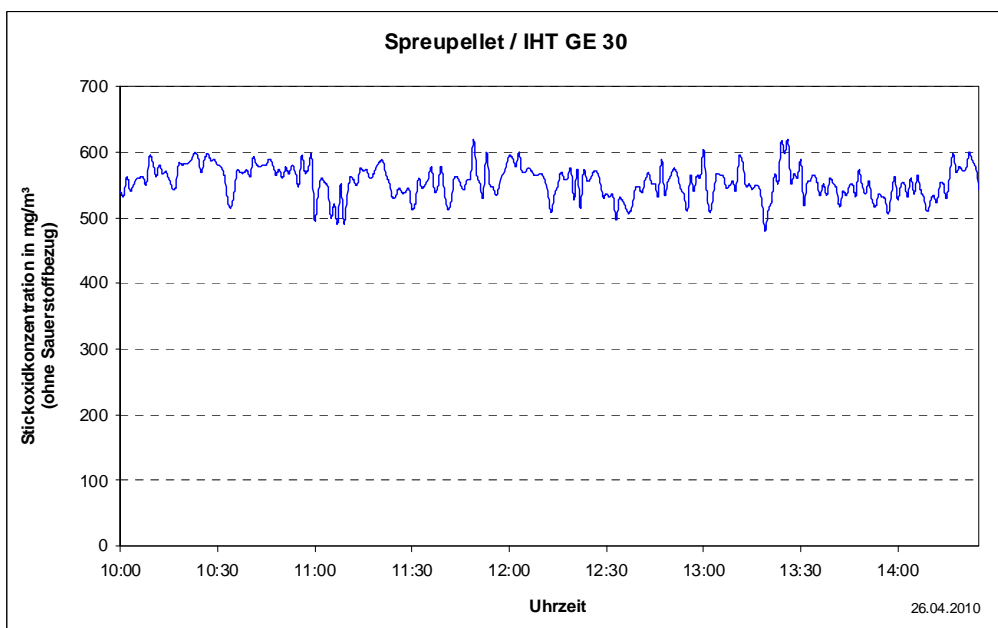


Abbildung A 8: NO_x-Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30

11.1.3 Schwefeldioxid

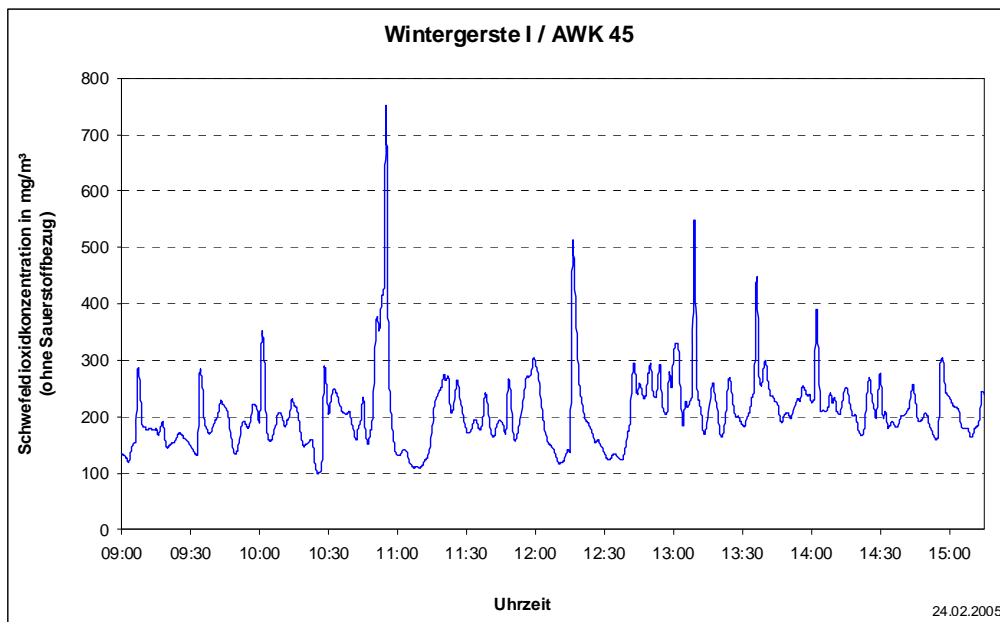


Abbildung A 9: SO₂-Verlauf mit Wintergerste am AWK 45

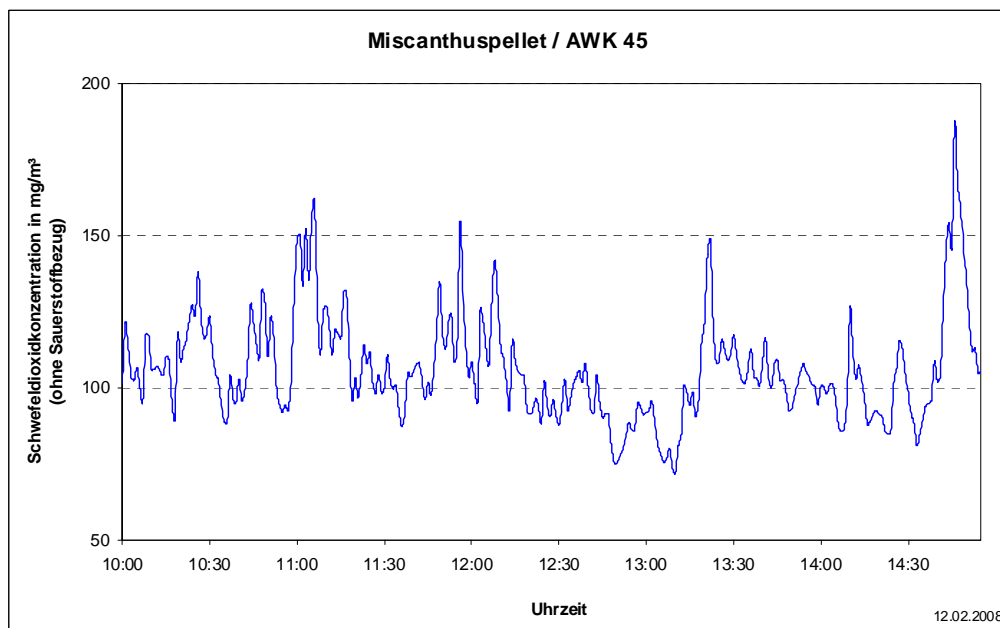


Abbildung A 10: SO₂-Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45

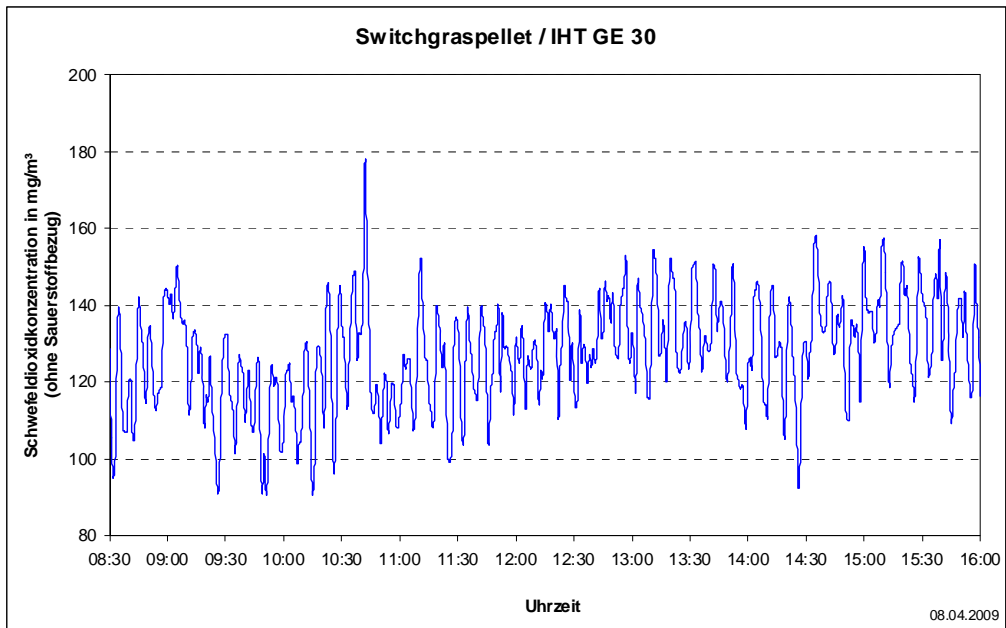


Abbildung A 11: SO₂-Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30

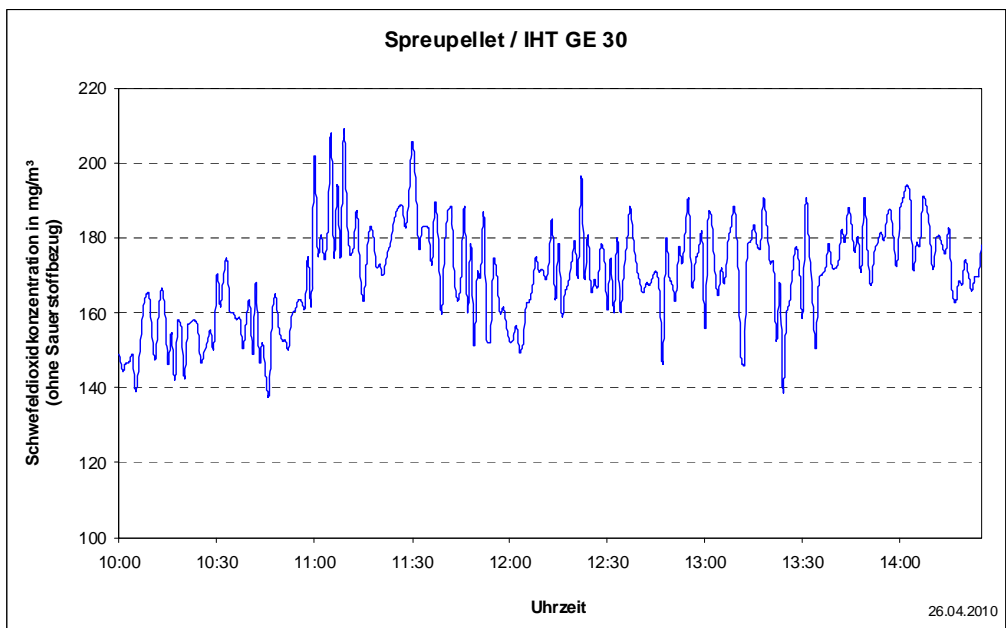


Abbildung A 12: SO₂-Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30

11.1.4 Gesamtkohlenstoff

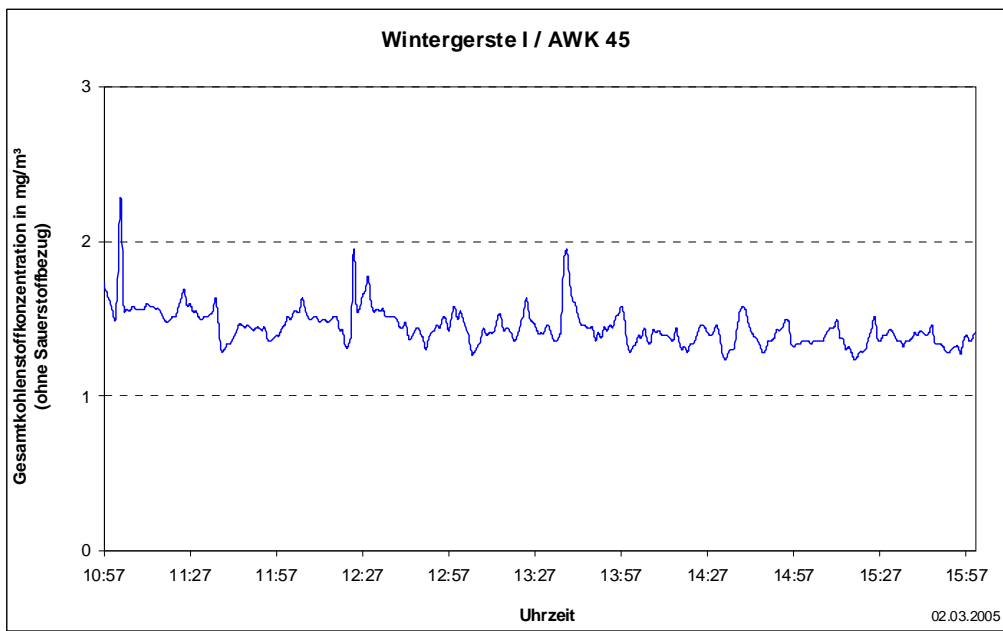


Abbildung A 13: C_{ges.}-Verlauf mit Wintergerste am AWK 45

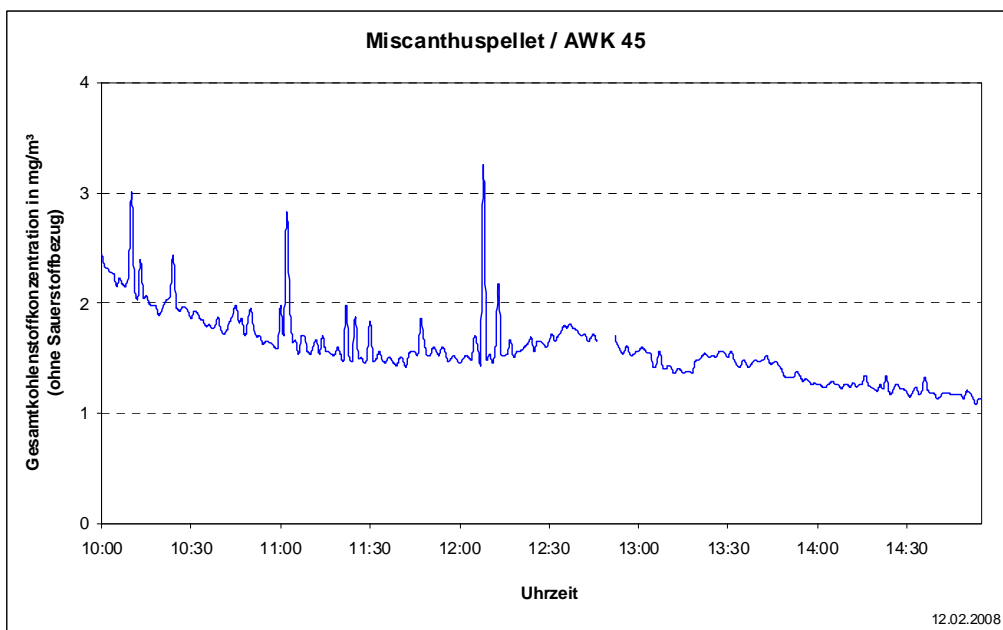


Abbildung A 14: C_{ges.}-Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45

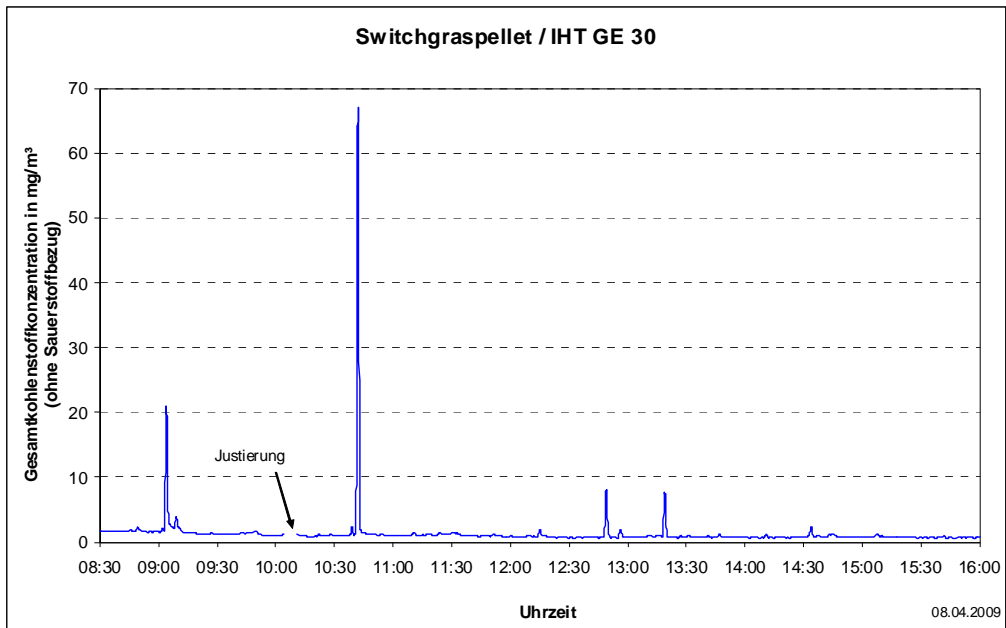


Abbildung A 15: $C_{ges.}$ -Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30

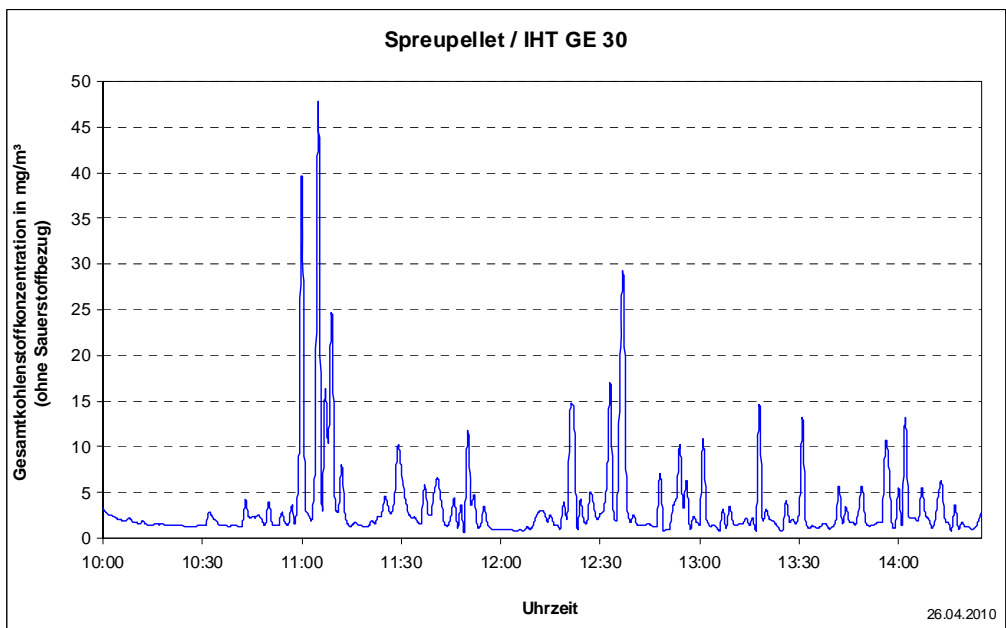


Abbildung A 16: $C_{ges.}$ -Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30

11.1.5 Sauerstoff

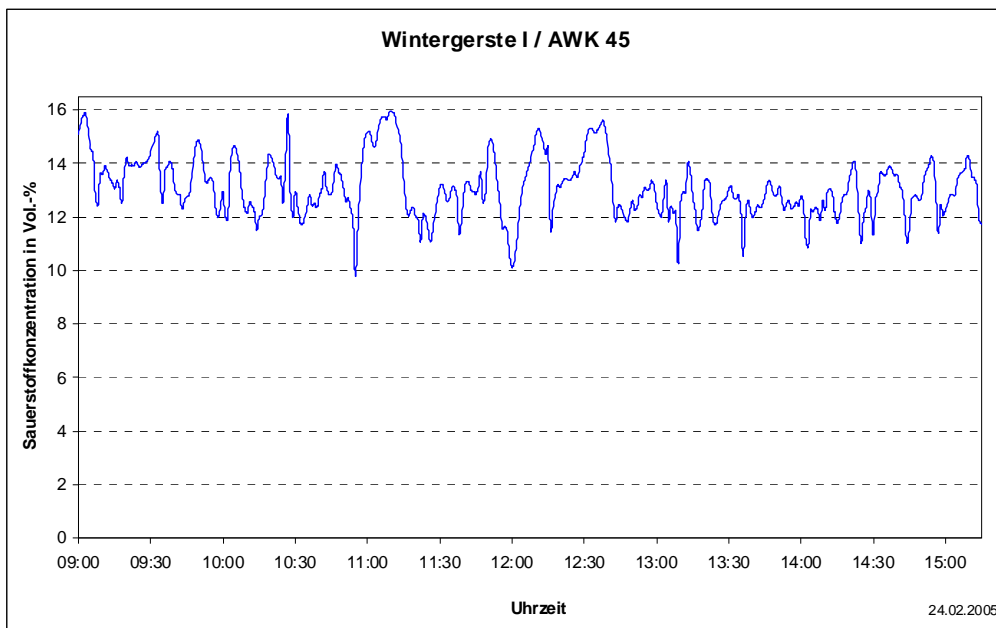


Abbildung A 17: O₂-Verlauf mit Wintergerste am AWK 45

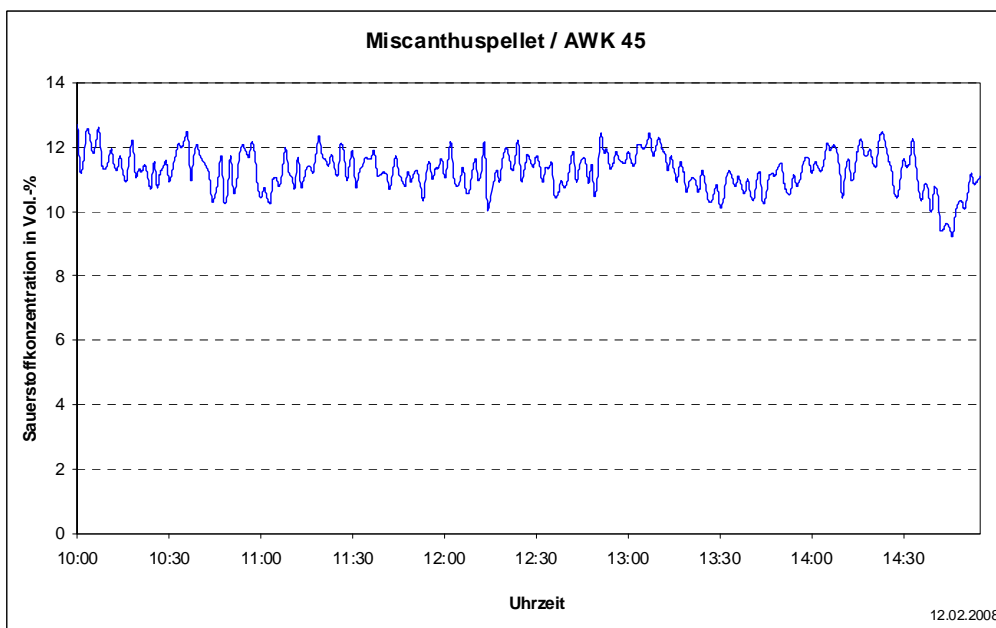


Abbildung A 18: O₂-Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45

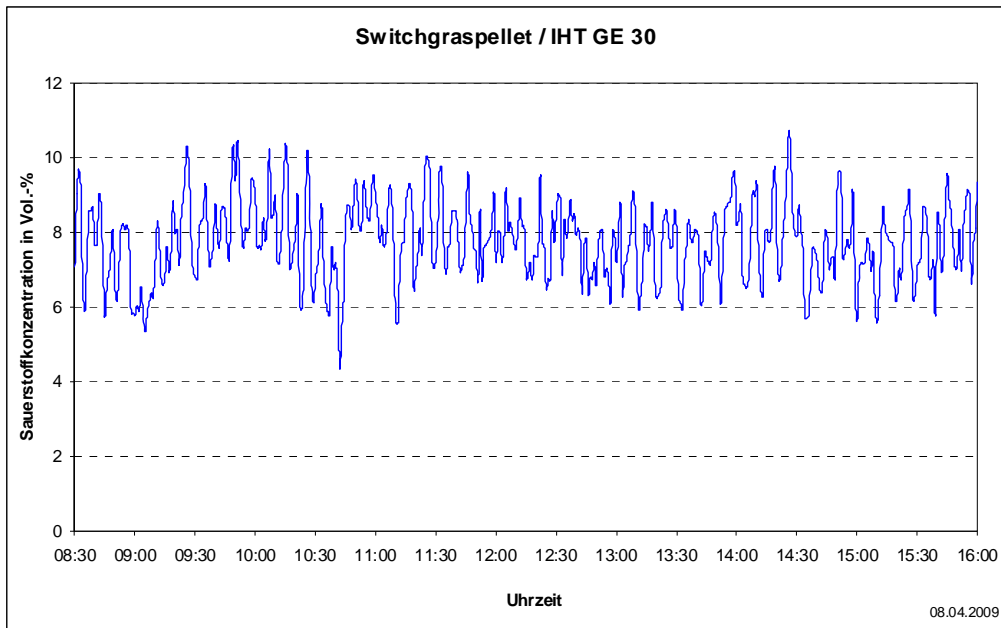


Abbildung A 19: O₂-Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30

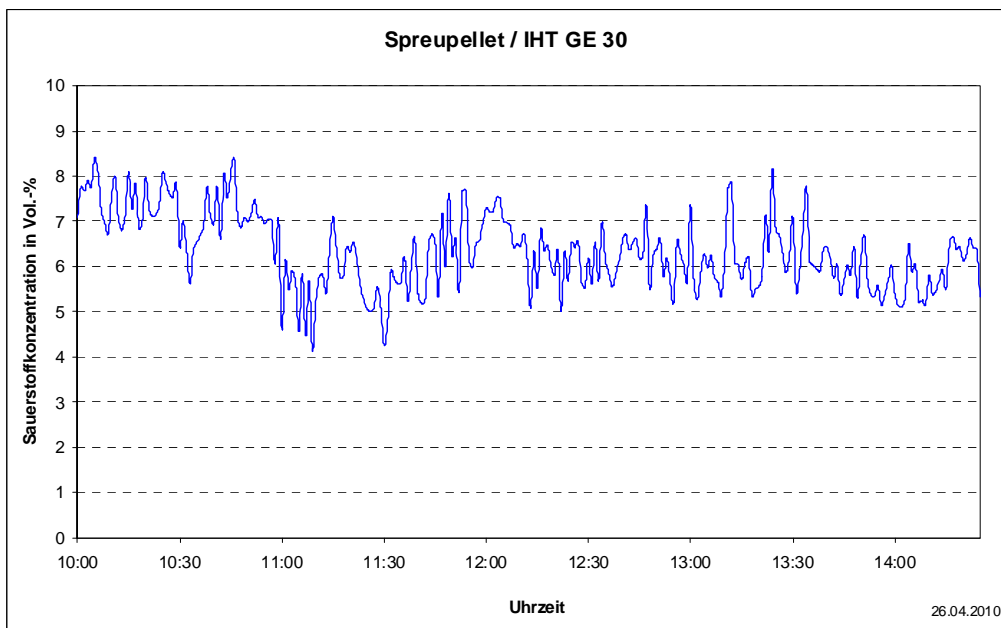


Abbildung A 20: O₂-Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30

11.1.6 Kohlendioxid

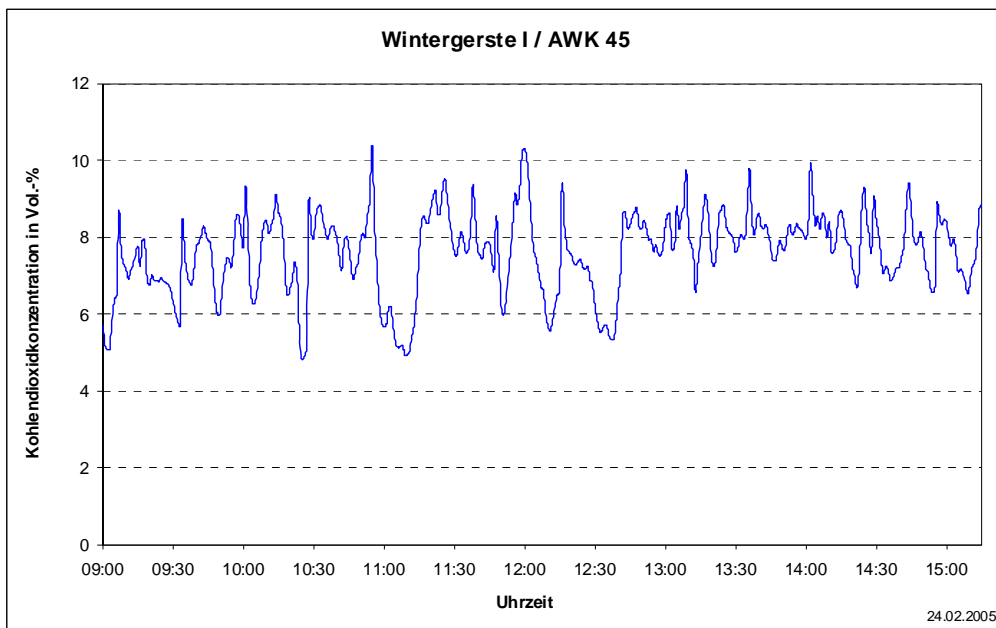


Abbildung A 21: CO₂-Verlauf mit Wintergerste am AWK 45

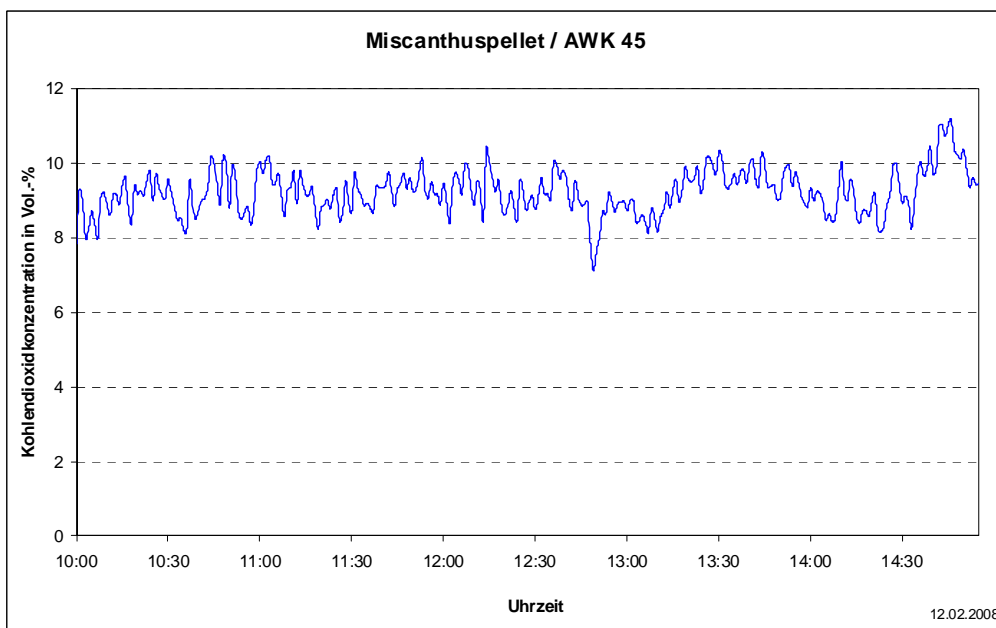


Abbildung A 22: CO₂-Verlauf mit Miscanthuspellets am AWK 45

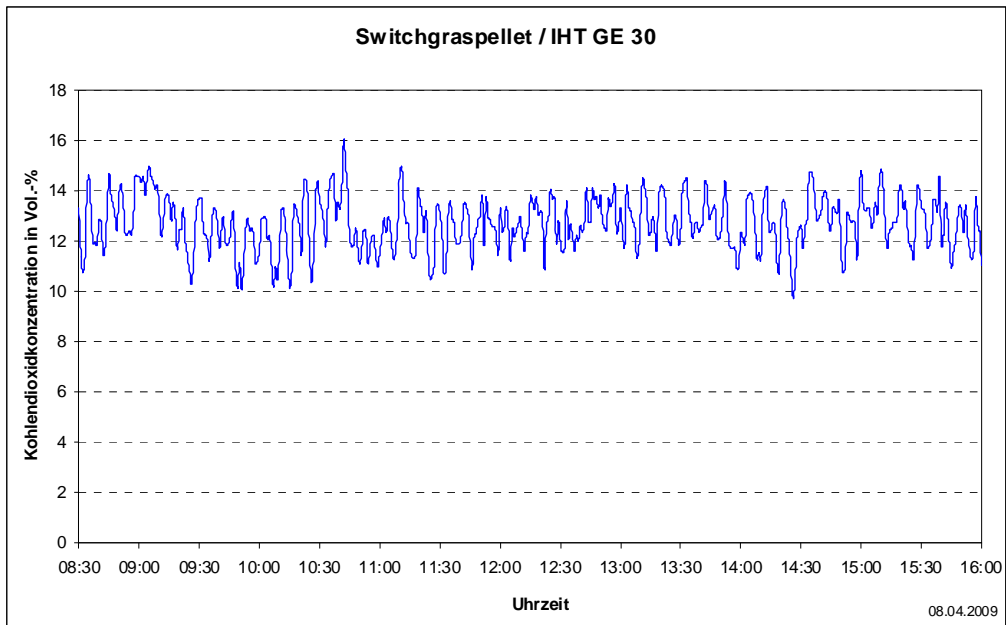


Abbildung A 23: CO₂-Verlauf mit Switchgraspellets am IHT GE 30

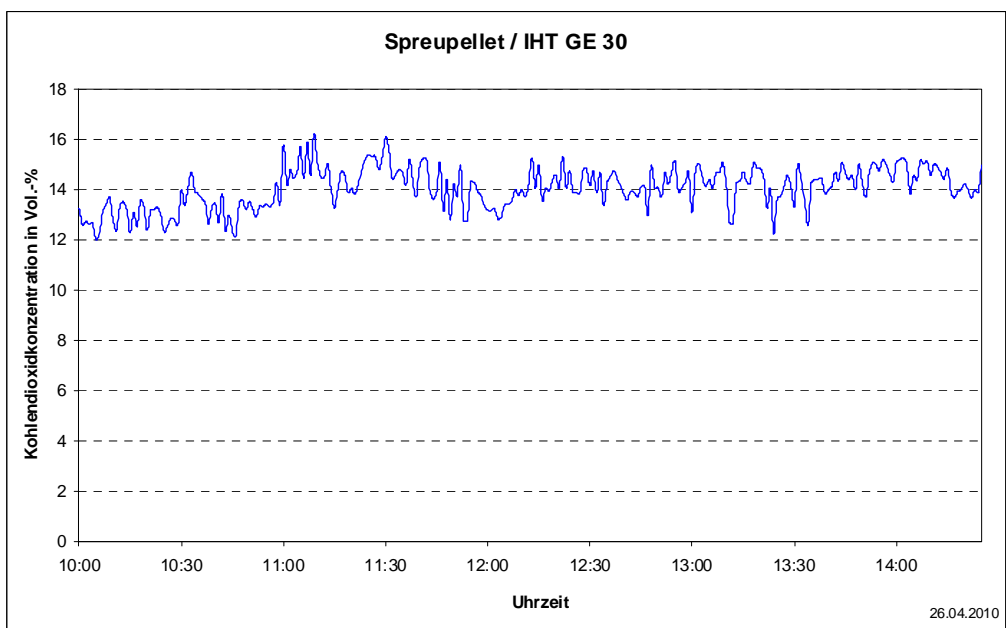


Abbildung A 24: CO₂-Verlauf mit Spreupellets am IHT GE 30

11.1.7 Temperatur

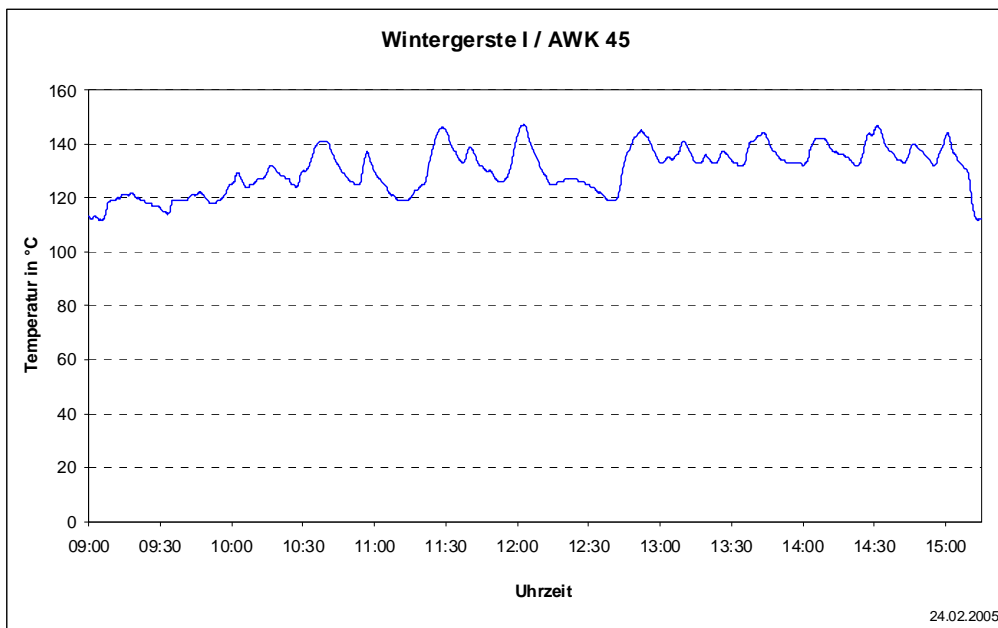


Abbildung A 25: Temperaturverlauf Wintergerste I am AWK 45

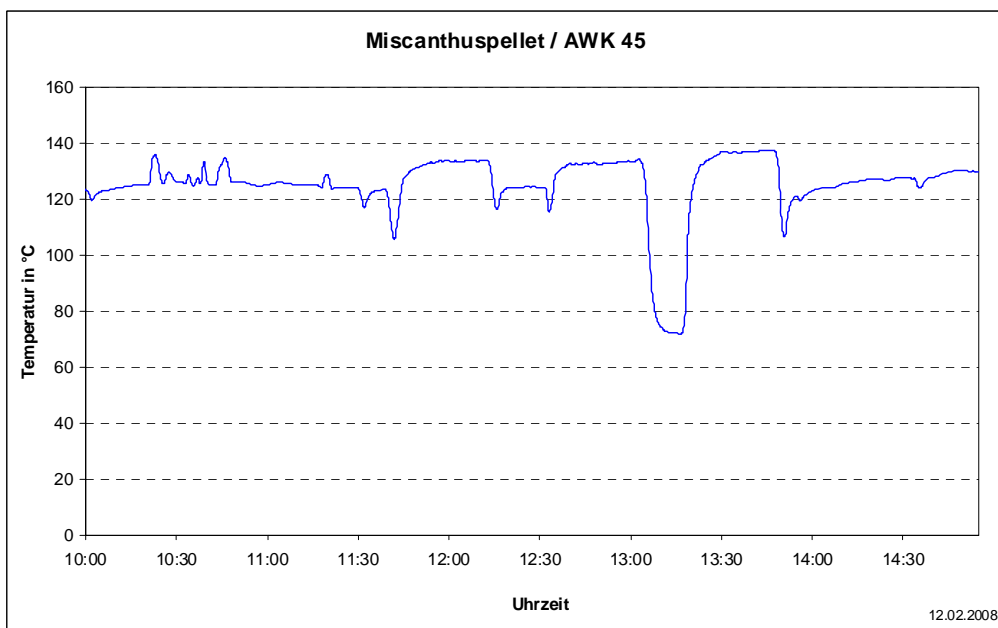


Abbildung A 26: Temperaturverlauf Miscanthuspellets am AWK 45

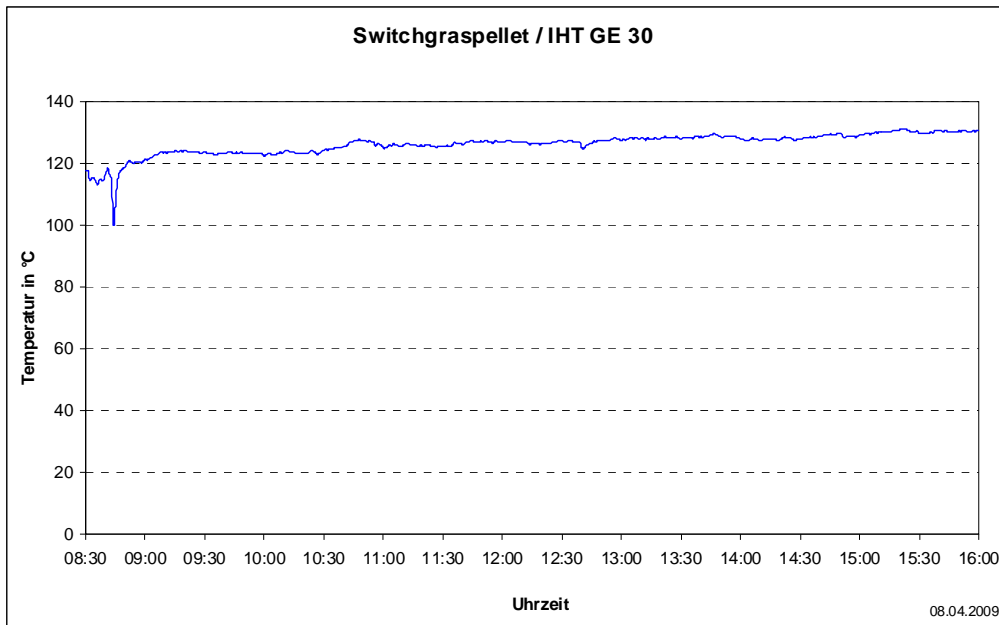


Abbildung A 27: Temperaturverlauf Switchgraspellets am IHT GE 30

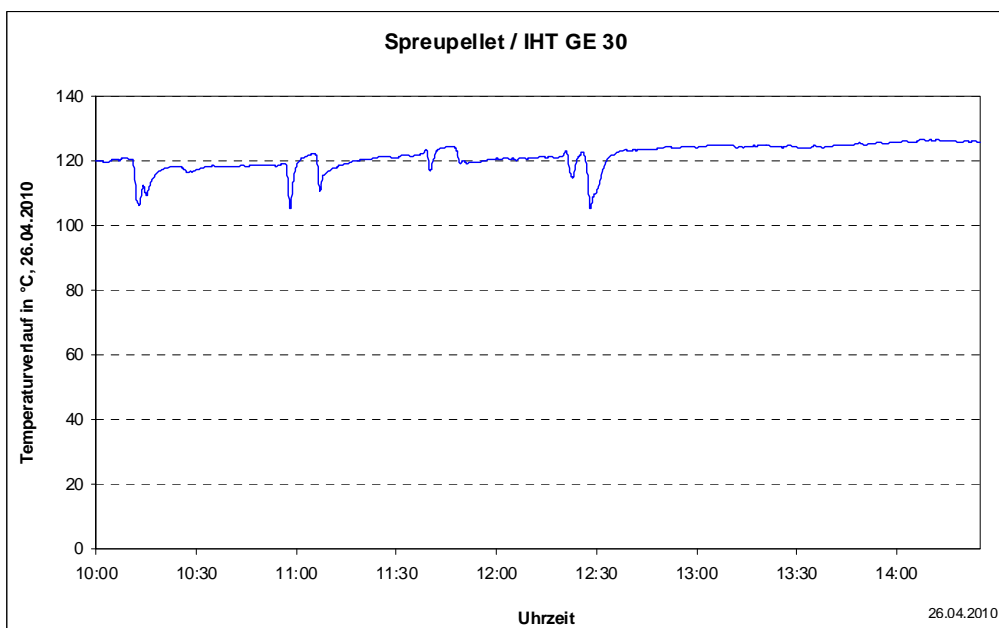


Abbildung A 28: Temperaturverlauf Spreupellets am IHT GE 30

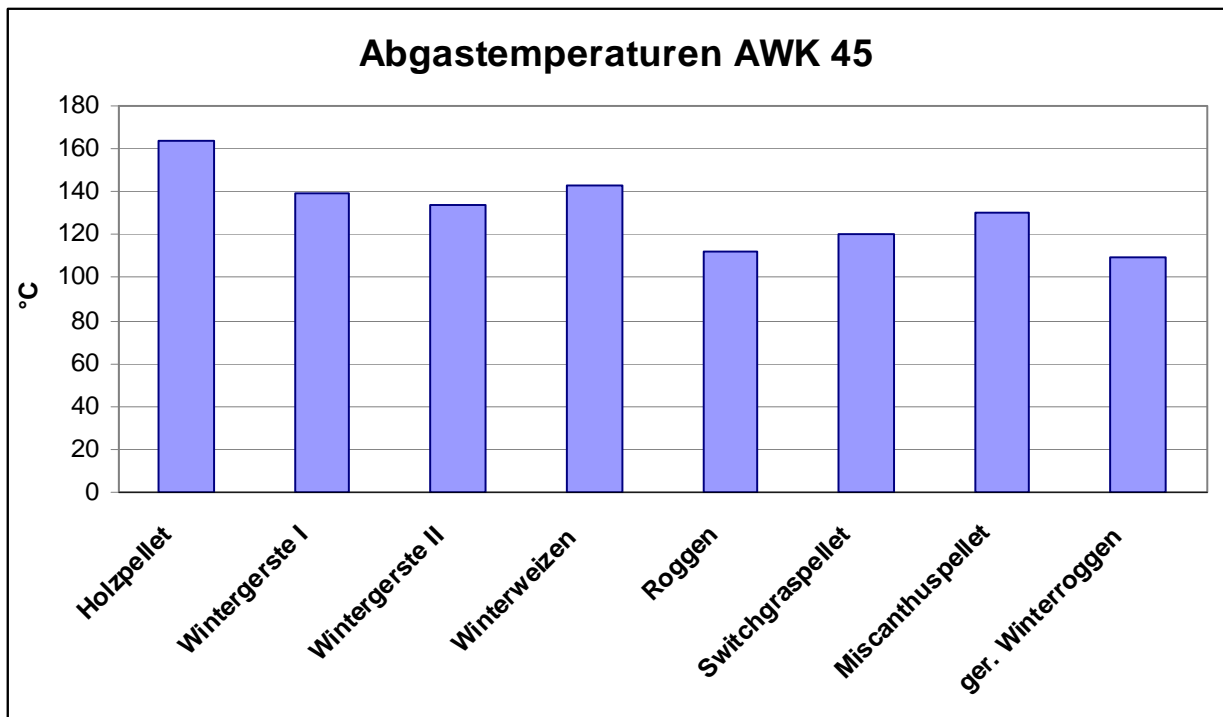


Abbildung A 29: Abgastemperaturen am AWK 45

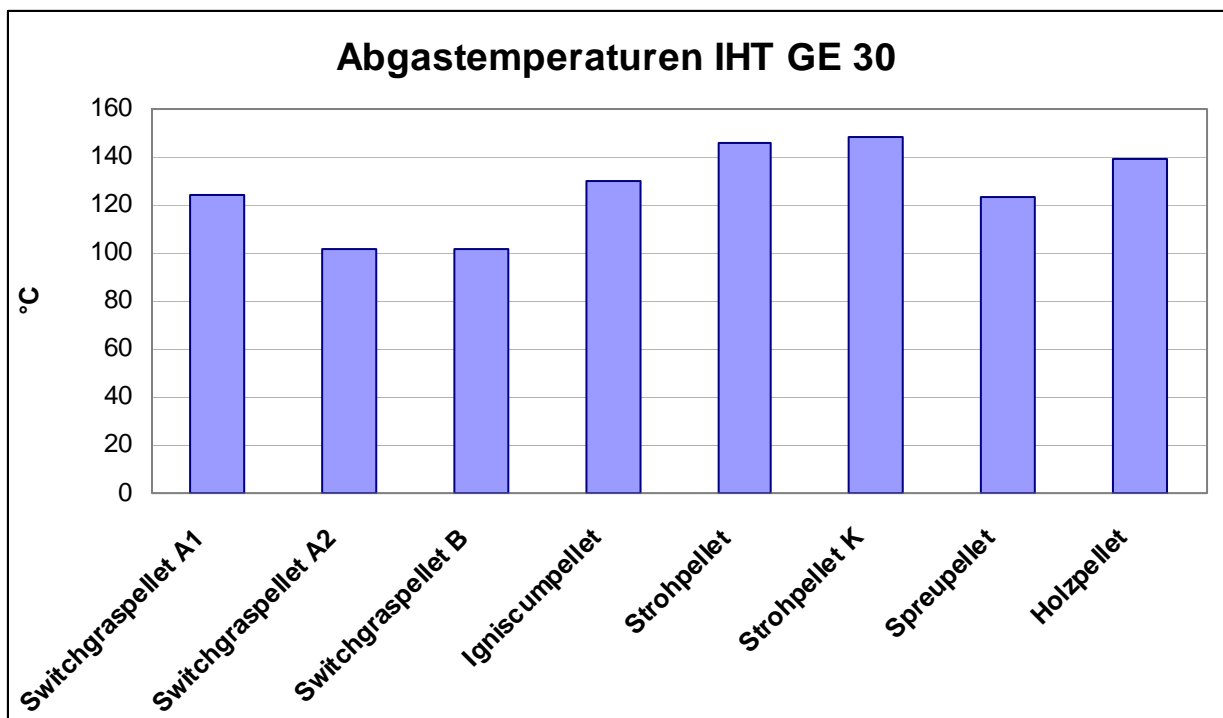


Abbildung A 30: Abgastemperaturen am IHT GE 30

12 Anhang B

12.1 Brennstoff- und Ascheparameter

Tabelle B 1: Übersicht Brennstoff- und Ascheparameter

Kessel	Brennstoff	Brennstoffparameter											Ascheparameter								
		Feuchte	Asche- gehalt	Ho	C	S	H	Cl	Na	Ca	K	Mg	Feuchte	C	S	Cl	Na	Ca	K	Mg	
		[Mass.- %]	[Mass.- %]	[MJ/kg]	[Mass.- %]	[Mass.- %]	[Mass.- %]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[Mass.- %]	[Mass.- %]	[Mass.- %]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
AWK 45	Holzpellets	6,7	0,4	-	47,9	<0,05	5,8	<0,020	0,038	0,89	0,47	0,20	0,8	30,1	0,09	<0,020	2,301	147,0	81,3	33,6	
	Wintergerste I	11,9	2,0	14,29	39,5	0,23	5,7	0,037	0,125	0,57	4,14	1,198	0,1	3,4	0,05	<0,020	2,437	245,9	76,3	32,9	
	Wintergerste II	11,9	2,1	13,93	42,8	0,14	5,8	0,797	0,049	0,54	4,08	1,180	0,5	9,9	0,14	0,461	1,263	284,6	76,0	26,1	
	Winterweizen	12,6	1,3	15,99	42,9	0,23	5,8	0,397	0,012	0,33	3,09	1,136	0,5	12,1	0,41	3,980	0,787	293,5	84,9	34,0	
	Roggen	11,7	1,5	13,64	-	-	4,6*	-	0,013	0,48	4,42	0,955	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Switchgraspellets	6,9	4,3	16,93	45,7	0,07	-	1,090	0,07	2,77	4,4	0,95	1,2	7,3	0,49	2,950	1,28	43,08	73,1	12,16	
	Miscanthuspellets	6,3	3,0	17,12	45,5	0,09	-	1,660	0,28	2,84	6,9	1,01	1,6	5,6	0,66	5,920	7,83	73,23	191,8	26,77	
	Winterroggen geröstet	4,9	1,9	-	47,3	0,12	-	0,60	-	0,49	6,4	1,29	4,1	12,25	0,16	0,580	0,54	39,5	212,8	64,31	
IHT GE 30	Switchgraspellets A1	8,9	2,8	16,75	44,02	0,05	-	0,290	0,08	2,19	1,5	0,59	2,2	4,22	0,27	0,880	2,13	61,78	40,7	15,34	
	Switchgraspellets A2	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
	Switchgraspellets B	8,2	4,5	17,01	47,7	0,05	-	<BG	0,10	3,82	1,75	0,85	0,7	1,35	0,33	1,0	2,15	76,79	41,26	16,86	
	Igniscumpellets	8,4	0,2	18,95	45,7	0,05	-	0,130	0,20	6,07	2,90	0,57	1,8	7,96	0,40	1,070	6,27	221,4	102,0	19,71	
	Strohpellets	8,8	5,8	16,50	41,8	0,09	-	2,420	0,12	3,25	8,50	1,01	2,8	47,05	0,43	8,220	1,72	38,48	106,7	11,65	
	Strohpellets K	9,1	8,3	15,95	40,5	0,1	-	3,890	0,12	4,96	12,5	0,95	2,3	47,98	0,35	9,05	1,35	40,13	109,2	8,21	
	Spreupellets	8,5	5,5	16,76	41,8	0,07	-	0,8	0,067	2,72	5,66	0,543	3,4	12,84	0,24	2,34	0,84	33,61	70,23	6,88	
	Holzpellets	7,1	0,3	18,40	46,8	0,001	-	<BG	<BG	0,75	0,41	0,113	5,6	42,6	0,165	1,33	0,55	42,35	46,59	7,04	

* Literaturwert
 ** siehe Werte A1, da identischer Brennstoff

- nicht Bestandteil der Analyse
 < BG Bestimmungsgrenze

Tabelle B 2: Brennstoff- und Ascheparameter Holzpellets, AWK 45-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Holzpellets	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser gesamt	Masse-%	6,7	0,8
Asche 815 °C	Masse-%	0,4	-
Ascheschwefel	Masse-%	-	-
Brennwert (Ho)	kJ/kg	-	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	47,9	30,1
Wasserstoff	Masse-%	5,8	-
Schwefel	Masse-%	< 0,05	0,09
Stickstoff	Masse-%	0,26	0,3
Phosphor	g/kg	0,046	11,50
Silizium	g/kg	0,078	46,42
Halogene			
Brom gesamt	mg/kg	< 40	-
Chlor gesamt	mg/kg	< 20	< 20
Metalle/Halbmatalle			
Aluminium	mg/kg	79,30	7.697
Arsen	mg/kg	< 1	< 1
Blei	mg/kg	< 1	0,99
Cadmium	mg/kg	< 0,6	< 0,6
Chrom	mg/kg	1,87	2.043
Eisen	mg/kg	50,38	11.110
Kupfer	mg/kg	1,87	144,8
Nickel	mg/kg	0,93	2.698
Quecksilber	mg/kg	0,17	0,37
Strontium	mg/kg	2,79	597,2
Thallium	mg/kg	< 1	< 1
Mangan	mg/kg	108,2	13.790
Vanadium	mg/kg	< 1	7,94
Zink	mg/kg	11,19	101,2
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,038	2,30
Kalium	g/kg	0,470	81,34
Kalzium	g/kg	0,899	147,0
Magnesium	g/kg	0,200	33,63

Tabelle B 3: Brennstoff- und Ascheparameter Wintergerste I, AWK 45-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Wintergerste I	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser gesamt	Masse-%	11,9	0,1
Asche 815 °C	Masse-%	2,1	-
Ascheschwefel	Masse-%	0,01	-
Brennwert (Ho)	kJ/kg	14.290	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	39,5	3,4
Wasserstoff	Masse-%	5,7	-
Schwefel	Masse-%	0,23	0,05
Stickstoff	Masse-%	1,8	0,3
Phosphor	g/kg	2,94	86,31
Silizium	g/kg	1,41	54,44
Halogene			
Brom gesamt	mg/kg	< 70	-
Chlor gesamt	mg/kg	37	< 20
Metalle/Halbmatalle			
Aluminium	mg/kg	29,95	6.763
Arsen	mg/kg	< 0,2	< 1,0
Blei	mg/kg	0,264	< 1,0
Cadmium	mg/kg	< 0,04	< 0,6
Chrom	mg/kg	0,705	28,97
Eisen	mg/kg	72,24	4.845
Kupfer	mg/kg	5,286	112,89
Nickel	mg/kg	0,529	18,98
Quecksilber	mg/kg	< 0,05	< 0,07
Strontium	mg/kg	4,405	733,3
Thallium	mg/kg	< 0,2	< 1
Mangan	mg/kg	22,91	470,5
Vanadium	mg/kg	0,529	9,99
Zink	mg/kg	34,36	185,8
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,125	2,437
Kalium	g/kg	4,140	76,32
Kalzium	g/kg	0,573	245,9
Magnesium	g/kg	1,198	32,96

Tabelle B 4: Brennstoff- und Ascheparameter Wintergerste II, AWK 45-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Wintergerste II	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser gesamt	Masse-%	11,9	0,5
Asche 815 °C	Masse-%	2,1	-
Ascheschwefel	Masse-%	< 0,01	-
Brennwert (Ho)	kJ/kg	13.930	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	42,8	9,9
Wasserstoff	Masse-%	5,8	-
Schwefel	Masse-%	0,14	0,14
Stickstoff	Masse-%	1,5	0,4
Phosphor	g/kg	3,832	64,08
Silizium	g/kg	1,066	101,5
Halogene			
Brom gesamt	mg/kg	42	-
Chlor gesamt	mg/kg	797	461
Metalle/Halbmatalle			
Aluminium	mg/kg	36,12	11.800
Arsen	mg/kg	< 0,5	7,96
Blei	mg/kg	< 1,0	< 1,0
Cadmium	mg/kg	< 0,6	1,791
Chrom	mg/kg	0,881	30,85
Eisen	mg/kg	34,36	6.238
Kupfer	mg/kg	4,405	64,68
Nickel	mg/kg	< 1,0	10,95
Quecksilber	mg/kg	< 0,07	< 0,07
Strontium	mg/kg	4,405	879,6
Thallium	mg/kg	< 0,5	< 0,5
Mangan	mg/kg	12,33	308,5
Vanadium	mg/kg	< 1,0	22,89
Zink	mg/kg	35,24	140,3
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,049	1,263
Kalium	g/kg	4,078	76,02
Kalzium	g/kg	0,543	284,6
Magnesium	g/kg	1,180	26,07

Tabelle B 5: Brennstoff- und Ascheparameter Winterweizen, AWK 45-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Winterweizen	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser gesamt	Masse-%	12,6	0,5
Asche 815 °C	Masse-%	1,3	-
Ascheschwefel	Masse-%	-	-
Brennwert (Ho)	kJ/kg	15.990	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	42,9	12,1
Wasserstoff	Masse-%	5,8	-
Schwefel	Masse-%	0,23	0,41
Stickstoff	Masse-%	2,2	0,6
Phosphor	g/kg	2,936	71,94
Silizium	g/kg	0,106	29,45
Halogene			
Brom gesamt	mg/kg	100	-
Chlor gesamt	mg/kg	397	3.980
Metalle/Halbmatalle			
Aluminium	mg/kg	20,97	8.994
Arsen	mg/kg	< 0,5	3,98
Blei	mg/kg	< 1,0	2,0
Cadmium	mg/kg	< 0,6	2,0
Chrom	mg/kg	0,874	69,65
Eisen	mg/kg	43,70	6.358
Kupfer	mg/kg	2,622	78,61
Nickel	mg/kg	< 1,0	33,83
Quecksilber	mg/kg	< 0,07	< 0,07
Strontium	mg/kg	0,874	849,7
Thallium	mg/kg	< 0,5	< 0,5
Mangan	mg/kg	18,35	538,3
Vanadium	mg/kg	< 1,0	21,89
Zink	mg/kg	20,10	360,2
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,012	0,787
Kalium	g/kg	3,093	84,97
Kalzium	g/kg	0,331	293,5
Magnesium	g/kg	1,14	34,03

Tabelle B 6: Brennstoffparameter Roggen, AWK 45-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Roggen
Wasser gesamt	Masse-%	11,7
Asche	Masse-%	1,54
Brennwert (Ho)	kJ/kg	13.640
Protein	Masse-%	9,0
Elementaranalyse		
Wasserstoff (Literatur)	Masse-%	4,6
Stickstoff	Masse-%	1,44
Phosphor	g/kg	3,123
Silizium	g/kg	0,095
Metalle/Schwermetalle		
Aluminium	mg/kg	3,8
Blei	mg/kg	< 0,1
Cadmium	mg/kg	< 0,05
Chrom	mg/kg	0,15
Eisen	mg/kg	26,1
Kupfer	mg/kg	4,2
Nickel	mg/kg	0,63
Strontium	mg/kg	2,2
Thallium	mg/kg	< 0,05
Mangan	mg/kg	39
Vanadium	mg/kg	< 0,05
Zink	mg/kg	31,8
Alkali/Erdalkalimetalle		
Natrium	g/kg	0,013
Kalium	g/kg	4,422
Kalzium	g/kg	0,480
Magnesium	g/kg	0,955

Tabelle B 7: Brennstoff- und Ascheparameter Switchgraspellets, AWK 45-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Switchgraspellets	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	6,9	1,2
Asche	Masse-%	4,3	87,7
Brennwert (Ho)	kJ/kg	16.930	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	45,7	7,3
Schwefel	Masse-%	0,07	0,49
Stickstoff	Masse-%	0,47	0,25
Phosphor	g/kg	0,57	12,06
Chlor	g/kg	1,09	2,95
Lignin	g/kg	80	-
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	192	1716
Arsen	mg/kg	-	4,78
Blei	mg/kg	1,17	4,23
Cadmium	mg/kg	-	0,3
Chrom	mg/kg	1,59	13,3
Eisen	mg/kg	432	1.103
Kupfer	mg/kg	2,76	55,3
Nickel	mg/kg	-	13,4
Quecksilber	mg/kg	-	-
Thallium	mg/kg	-	0,02
Mangan	mg/kg	37,5	408
Vanadium	mg/kg	-	3,95
Zink	mg/kg	19,4	173
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,07	1,28
Kalium	g/kg	4,4	73,1
Kalzium	g/kg	2,77	43,08
Magnesium	g/kg	0,95	12,16

Tabelle B 8: Brennstoff- und Ascheparameter Miscanthuspellets, AWK 45-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Miscanthuspellets	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	6,3	1,6
Asche	Masse-%	3,0	91,2
Brennwert (Ho)	kJ/kg	17.120	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	45,53	5,6
Schwefel	Masse-%	0,09	0,66
Stickstoff	Masse-%	0,64	0,16
Phosphor	g/kg	0,62	7,47
Chlor	g/kg	1,66	5,92
Lignin	g/kg	102	-
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	105	2.489
Arsen	mg/kg	-	1,82
Blei	mg/kg	0,44	3,27
Cadmium	mg/kg	-	-
Chrom	mg/kg	2,11	24,7
Eisen	mg/kg	600	2151
Kupfer	mg/kg	2,85	101
Nickel	mg/kg	-	50,2
Quecksilber	mg/kg	-	-
Thallium	mg/kg	-	-
Mangan	mg/kg	31,4	838
Vanadium	mg/kg	-	4,21
Zink	mg/kg	12,8	218
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,28	7,83
Kalium	g/kg	6,9	191,8
Kalzium	g/kg	2,84	73,23
Magnesium	g/kg	1,01	26,77

Tabelle B 9: Brennstoff- und Ascheparameter gerösteter Winterroggen, AWK 45-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Winterroggen (geröstet)	Inhaltsstoff Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	4,9%	4,1%
Asche	Masse-%	1,8%	79,3%
Brennwert (Ho)	kJ/kg	-	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	47,27	12,25
Schwefel	Masse-%	0,12	0,16
Stickstoff	Masse-%	1,63	0,74
Phosphor	g/kg	3,73	139,6
Chlor	g/kg	0,60	0,58
Lignin	g/kg	-	-
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	3,3	939
Arsen	mg/kg	-	0,87
Blei	mg/kg	-	1,05
Cadmium	mg/kg	-	-
Chrom	mg/kg	-	196
Eisen	mg/kg	28,8	7.569
Kupfer	mg/kg	4,18	193
Nickel	mg/kg	-	125
Quecksilber	mg/kg	-	-
Thallium	mg/kg	-	-
Mangan	mg/kg	29,2	1.437
Vanadium	mg/kg	-	-
Zink	mg/kg	29,5	395
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	-	0,54
Kalium	g/kg	6,4	212,8
Kalzium	g/kg	0,49	39,5
Magnesium	g/kg	1,29	64,31

Tabelle B 10: Brennstoff- und Ascheparameter Switchgraspellets A1 (identisch mit A2),
IHT GE 30-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Switchgraspellets A1/A2	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	8,9	2,2
Asche	Masse-%	2,8	-
Brennwert (Ho)	kJ/kg	16.750	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	44,02	4,22
Schwefel	Masse-%	0,05	0,27
Stickstoff	Masse-%	0,41	0,16
Phosphor	g/kg	0,50	13,01
Chlor	g/kg	0,29	0,88
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	63	971
Arsen	mg/kg	-	0,64
Blei	mg/kg	0,47	4,80
Cadmium	mg/kg	-	-
Chrom	mg/kg	1,00	20,90
Eisen	mg/kg	291	2.084
Kupfer	mg/kg	5,1	80,5
Nickel	mg/kg	1,00	14,40
Quecksilber	mg/kg	-	-
Thallium	mg/kg	-	-
Mangan	mg/kg	60,8	1.119
Vanadium	mg/kg	-	3,17
Zink	mg/kg	42,9	410,0
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,08	2,13
Kalium	g/kg	1,5	40,7
Kalzium	g/kg	2,19	61,78
Magnesium	g/kg	0,59	15,34

Tabelle B 11: Brennstoff- und Ascheparameter Switchgraspellets B, IHT GE 30-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Switchgraspellets B	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	8,20	0,7
Asche	Masse-%	4,45	97,4
Brennwert (Ho)	kJ/kg	17.010	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	47,72	1,35
Schwefel	Masse-%	0,05	0,33
Stickstoff	Masse-%	1,54	0,02
Phosphor	g/kg	0,42	8,35
Chlor	g/kg	<BG	1
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	585	9.614
Eisen	mg/kg	519	7.370
Kupfer	mg/kg	3,20	1.841
Nickel	mg/kg	<BG	17,60
Mangan	mg/kg	66	1.876
Zink	mg/kg	23,50	859,0
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,0001	0,002
Kalium	g/kg	1,75	41,26
Kalzium	g/kg	3,82	76,79
Magnesium	g/kg	0,85	16,86

Tabelle B 12: Brennstoff- und Ascheparameter Igniscumpellets, IHT GE 30-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Igniscumpellets	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	8,4	1,8
Asche	Masse-%	0,20	-
Brennwert (Ho)	kJ/kg	18.950	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	45,65	7,96
Schwefel	Masse-%	0,05	0,40
Stickstoff	Masse-%	0,43	0,12
Phosphor	g/kg	0,48	12,99
Chlor	g/kg	0,13	1,07
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	106	2.618
Arsen	mg/kg	-	1,21
Blei	mg/kg	0,97	7,85
Cadmium	mg/kg	0,43	0,26
Chrom	mg/kg	1,60	24,20
Eisen	mg/kg	324	918
Kupfer	mg/kg	6,80	200
Nickel	mg/kg	1,60	29,30
Quecksilber	mg/kg	-	-
Thallium	mg/kg	-	-
Mangan	mg/kg	101,0	2.430
Vanadium	mg/kg	-	6,43
Zink	mg/kg	35,00	478,0
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,20	6,27
Kalium	g/kg	2,90	102,0
Kalzium	g/kg	6,07	221,4
Magnesium	g/kg	0,57	19,71

Tabelle B 13: Brennstoff- und Ascheparameter Strohpellets, IHT GE 30-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Strohpellets	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	8,8	2,8
Asche	Masse-%	5,8	-
Brennwert (Ho)	kJ/kg	16.500	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	41,83	47,05
Schwefel	Masse-%	0,09	0,43
Stickstoff	Masse-%	0,84	0,15
Phosphor	g/kg	0,43	5,24
Chlor	g/kg	2,42	8,22
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	259	2.298
Arsen	mg/kg	-	0,84
Blei	mg/kg	0,35	2,07
Cadmium	mg/kg	-	-
Chrom	mg/kg	1,10	9,90
Eisen	mg/kg	255	1.860
Kupfer	mg/kg	4,2	41,1
Nickel	mg/kg	-	4,90
Quecksilber	mg/kg	-	-
Thallium	mg/kg	-	-
Mangan	mg/kg	54,4	453,0
Vanadium	mg/kg	-	2,53
Zink	mg/kg	10,9	93,0
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,12	1,72
Kalium	g/kg	8,50	106,7
Kalzium	g/kg	3,25	38,48
Magnesium	g/kg	1,01	11,65

Tabelle B 14: Brennstoff- und Ascheparameter Strohpellets K, IHT GE 30-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Strohpellets K	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	9,1	2,3
Asche	Masse-%	8,3	-
Brennwert (Ho)	kJ/kg	15.950	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	40,49	47,98
Schwefel	Masse-%	0,10	0,35
Stickstoff	Masse-%	0,74	0,12
Phosphor	g/kg	1,11	9,26
Chlor	g/kg	3,89	9,05
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	264	1.679
Arsen	mg/kg	-	0,64
Blei	mg/kg	0,28	1,17
Cadmium	mg/kg	-	-
Chrom	mg/kg	1,00	7,10
Eisen	mg/kg	220	1.108
Kupfer	mg/kg	2,3	4.171
Nickel	mg/kg	-	4,10
Quecksilber	mg/kg	-	-
Thallium	mg/kg	-	-
Mangan	mg/kg	54,6	395,0
Vanadium	mg/kg	-	2,17
Zink	mg/kg	11,7	75,9
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,12	1,35
Kalium	g/kg	12,5	109,2
Kalzium	g/kg	4,96	40,13
Magnesium	g/kg	0,95	8,21

Tabelle B 15: Brennstoff- und Ascheparameter Spreupellets, IHT GE 30-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Spreupellets	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	8,50	3,40
Asche	Masse-%	5,54	80,6
Brennwert (Ho)	kJ/kg	16.760	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	41,84	12,84
Schwefel	Masse-%	0,068	0,244
Stickstoff	Masse-%	1,38	0,34
Phosphor	g/kg	0,372	4,61
Chlor	g/kg	0,80	2,34
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	86,40	964,9
Eisen	mg/kg	144,9	709,2
Kupfer	mg/kg	4,1	31,3
Nickel	mg/kg	<BG	3,67
Mangan	mg/kg	50,5	995,0
Zink	mg/kg	15,2	106,0
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	0,067	0,841
Kalium	g/kg	5,660	70,23
Kalzium	g/kg	2,72	33,61
Magnesium	g/kg	0,543	6,88

Tabelle B 16: Brennstoff- und Ascheparameter Holzpellets, IHT GE 30-Kessel

Komponente	Einheit	Inhaltsstoffe Mischprobe Holzpellets	Inhaltsstoffe Mischprobe Asche
Wasser	Masse-%	7,10	5,60
Asche	Masse-%	0,33	45,1
Brennwert (Ho)	kJ/kg	18.400	-
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Masse-%	46,80	42,60
Schwefel	Masse-%	0,008	0,165
Stickstoff	Masse-%	0,05	0,31
Phosphor	g/kg	0,051	3,08
Chlor	g/kg	<BG	1,33
Metalle/Schwermetalle			
Aluminium	mg/kg	22,40	1032
Eisen	mg/kg	33,40	523
Kupfer	mg/kg	1,5	68,9
Nickel	mg/kg	<BG	6,00
Mangan	mg/kg	120,0	4.263
Zink	mg/kg	10,4	131,0
Alkali/Erdalkalimetalle			
Natrium	g/kg	<BG	0,552
Kalium	g/kg	0,413	46,59
Kalzium	g/kg	0,751	42,35
Magnesium	g/kg	0,113	7,042

13 Anhang C

13.1 Einzelmesswerte von Schadstoffkonzentrationen und Abgasrandparametern

Tabelle C 1: Einzelmesswerte AWK 45 – Holzpellets

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 2
Zeitraum der Messungen:					21.03.2005 – 13.04.2005 und 20.-22.03.2006
Feuerstätte:					Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45
Brennstoff:					Holzpellets
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					40,3
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					10,3
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	33,3	0,2	7,2	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	209	143	177	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	1.780	0	30,6	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	2.621	2,8	72,7	
Sauerstoff	Vol.-%	16,6	9,3	11,1	
Temperatur	°C	179	122	164	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	7,1
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	97
Geschwindigkeit	m/s	2,3
statischer Druck	mbar	-0,13

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	5,3	8,9	13,3					9,2
Anteil PM ₁₀	%	89,0	96,8	95,4					93,7
Anteil PM _{2,5}	%	78,0	90,9	87,9					85,6
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	1,6	0,3	0,1					0,7
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	1,2	121	82,2					102
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,016	4,72	2,22					3,44
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	7.080	6.950	3.670	1.320				4.750
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	6.650	6.660	3.510	1.260				4.520
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,064	0,025						0,045
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,0024	0,0016						0,0021

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 2: Einzelmesswerte AWK 45 – Wintergerste I

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 2
Zeitraum der Messungen:					21.02.2005 – 07.03.2005
Feuerstätte:					Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45
Brennstoff:					Wintergerste I
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					38,0
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					11,2
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	241	166	204	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	757	453	661	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	46,4	1,6	7,2	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	1.140	0,8	74,4	
Sauerstoff	Vol.-%	16,2	11,2	13,0	
Temperatur	°C	177	103	139	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	6,8
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	105
Geschwindigkeit	m/s	2,3
statischer Druck	mbar	-0,13

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	112	120	106	114	165	138		126
Anteil PM ₁₀	%	98,9	98,0	96,9					97,9
Anteil PM _{2,5}	%	94,8	92,3	90,5					92,5
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	18,9	16,1	16,4					17,1
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	3,56	12,32	13,76	3,51				9,84
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,083	0,354	0,231	0,029				0,205
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	84,8	579	4.120					1.590
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	62,1	552	3.960					1.530
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,076	0,074						0,075
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,0047	0,0073						0,006

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 3: Einzelmesswerte AWK 45 – Wintergerste II

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 3
Zeitraum der Messungen:					23.01.2006 – 07.02.2006
Feuerstätte:					Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45
Brennstoff:					Wintergerste II
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					38,5
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					11,3
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	246	160	203	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	670	496	598	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	11,0	<0,2	3,1	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	37	2	5	
Sauerstoff	Vol.-%	10,8	7,8	9,3	
Temperatur	°C	160	107	134	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	10,6
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	84
Geschwindigkeit	m/s	1,9
statischer Druck	mbar	-0,14

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	74	104	94	84	72	81		85
Anteil PM ₁₀	%	98,1	98,2	98,0					98,1
Anteil PM _{2,5}	%	91,6	92,3	91,8					91,9
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	18,3	32,1	27,8	32,1	33,9	46,4	44,5	36,0**
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	1,24	0,68	0,57					0,83
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,0167	0,0056	0,0071					0,0098
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	2,9	13,4	6,2					7,5
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	<1,4	<1,4	<1,4					<1,4
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,010	0,0066	0,0062					0,0078
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,00074	0,0008	0,00057					0,0007

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 4: Einzelmesswerte AWK 45 – Winterweizen

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 4
Zeitraum der Messungen:					23.02.2006 – 07.03.2006
Feuerstätte:					Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45
Brennstoff:					Winterweizen
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					41,4
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					12,5
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	258	86	219	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	792	211	656	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	68,8	0	3,2	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	106	5,3	34,6	
Sauerstoff	Vol.-%	12,8	9,1	10,2	
Temperatur	°C	174	88	143	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	8,8
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	93
Geschwindigkeit	m/s	2,0
statischer Druck	mbar	-0,14

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	110	102	131					115
Anteil PM ₁₀	%	97,3	98,4	97,6					97,8
Anteil PM _{2,5}	%	89,4	91,4	89,9					90,2
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	29,3	34,3	46,4					36,6
Summe PAH	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,29							
Benzo(a)pyren	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,0088							
Summe BTX	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	9,6	1,2						10,2
Benzol	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	2,4	6,4						4,4
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,024	0,032	0,022	0,025				0,026
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,0016	0,0024	0,0024	0,0016				0,002

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 5: Einzelmesswerte AWK 45 – Roggen

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 5
Zeitraum der Messungen:					09.02.2006
Feuerstätte:					Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45
Brennstoff:					Roggen
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					43,0
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					13,5
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	198	178	186	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	582	411	514	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	5,0	0,8	2,7	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	321	25	114	
Sauerstoff	Vol.-%	10,4	9,4	10,0	
Temperatur	°C	117	107	112	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	9,8
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	107
Geschwindigkeit	m/s	2,4
statischer Druck	mbar	-0,16

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	89	84	80					84
Anteil PM ₁₀	%								
Anteil PM _{2,5}	%								
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 6: Einzelmesswerte AWK 45 – Switchgraspellets

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 6
Zeitraum der Messungen:		27.02.2008 – 28.02.2008			
Feuerstätte:		Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45			
Brennstoff:		Switchgraspellets			
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW		33,7			
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h		9,8			
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	114	97,6	104	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	326	292	306	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	2,6	1,1	1,6	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	174	34	74	
Sauerstoff	Vol.-%	13,4	11,3	12,3	
Temperatur	°C	131	97	120	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	7,5
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	90
Geschwindigkeit	m/s	1,9
statischer Druck	mbar	-0,01

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	66	89	67					74
Anteil PM ₁₀	%	98,3	97,6	97,6					97,8
Anteil PM _{2,5}	%	92,6	90,3	90,3					91,1
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 7: Einzelmesswerte AWK 45 – Miscanthuspellets

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 7
Zeitraum der Messungen:					11.02.2008 – 14.02.2008
Feuerstätte:					Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45
Brennstoff:					Miscanthuspellets
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					35,5
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					10,3
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	200	77	106	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	364	148	269	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	19,2	0,8	3,7	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	1.860	65	353	
Sauerstoff	Vol.-%	11,6	4,2	7,9	
Temperatur	°C	143	108	130	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	10,1
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	74
Geschwindigkeit	m/s	1,6
statischer Druck	mbar	-0,09

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	157	166	151					158
Anteil PM ₁₀	%	94,8	96,8	98,4					96,7
Anteil PM _{2,5}	%	86,0	89,0	89,9					88,3
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	47,5	46,4	36,9					43,6
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	41,4							
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,224							
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	275	69,8	39,1					128
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	250	58,9	30,6					114
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,073							
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,0037							

*nach NATO/CCMS

Tabelle C 8: Einzelmesswerte AWK 45 – gerösteter Winterroggen

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 8
Zeitraum der Messungen:				05.03.2008	
Feuerstätte:				Biomassekessel des Typs Biokompakt – AWK 45	
Brennstoff:				gerösteter Winterroggen	
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW				39,9	
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h				10,7	
Halbstundenmittelwerte HMW					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	213	195	203	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	476	415	451	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	10,4	1,7	5,0	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	322	44	148	
Sauerstoff	Vol.-%	13,2	11,1	12,5	
Temperatur	°C	114	104	109	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	7,6
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	115
Geschwindigkeit	m/s	2,4
statischer Druck	mbar	-0,12

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	456	387	481	384				427
Anteil PM ₁₀	%								
Anteil PM _{2,5}	%								
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach Nato/CCMS

Tabelle C 9: Einzelmesswerte IHT GE 30 – Switchgraspellets A1

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 9
Zeitraum der Messungen:					06.04.2009 – 08.04.2009
Feuerstätte:					Biomassekessel IHT GE 30
Brennstoff:					Switchgraspellets A1
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					23,9
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					7,2
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	82	72	78	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	301	285	293	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	2,1	0,4	0,8	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	46	15	24	
Sauerstoff	Vol.-%	8,4	6,8	7,6	
Temperatur	°C	130	117	124	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	9,6
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	58
Geschwindigkeit	m/s	1,3
statischer Druck	mbar	-0,11

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	4	12	11					9
Anteil PM ₁₀	%	92,1							
Anteil PM _{2,5}	%	68,8							
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	35,9	34,4	36,0					35,4
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	20,2							
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,36							
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	31,7	26,2						29,0
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	3,20	4,48						3,84
PCDD/F	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 10: Einzelmesswerte IHT GE 30 – Switchgraspellets A2

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 10
Zeitraum der Messungen:					20.04.2010 – 21.04.2010
Feuerstätte:					Biomassekessel IHT GE 30
Brennstoff:					Switchgraspellets A2
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					24,4
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					8,1
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	81	67	74	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	365	259	324	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	7,1	0,7	2,3	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	469	25	136	
Sauerstoff	Vol.-%	12,6	7,0	10,4	
Temperatur	°C	108	96	102	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	%	8,1
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	68
Geschwindigkeit	m/s	1,5
statischer Druck	mbar	-0,15

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	20	23	23					22
Anteil PM ₁₀	%								
Anteil PM _{2,5}	%								
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	6,2	15,4	28,7					16,8
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 11: Einzelmesswerte IHT GE 30 – Switchgraspellets B

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 11
Zeitraum der Messungen:					22.04.2010
Feuerstätte:					Biomassekessel IHT GE 30
Brennstoff:					Switchgraspellets B
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					23,2
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					6,9
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	67	57	61	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	520	405	453	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	3,0	0,8	1,4	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	169	22	56	
Sauerstoff	Vol.-%	11,0	7,7	9,1	
Temperatur	°C	109	79	102	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	%	9,1
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	67
Geschwindigkeit	m/s	1,5
statischer Druck	mbar	-0,12

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	29	22	28					26
Anteil PM ₁₀	%								
Anteil PM _{2,5}	%								
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	60,0	24,3	20,1					34,8
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 12: Einzelmesswerte IHT GE 30 – Igniscumpellets

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 12
Zeitraum der Messungen:					14.-15.04.2009
Feuerstätte:					Biomassekessel IHT GE 30
Brennstoff:					Igniscumpellets
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					24,6
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					7,0
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	46	40	44	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	455	409	435	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	1,0	0,5	0,7	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	140	75	111	
Sauerstoff	Vol.-%	8,9	6,9	8,3	
Temperatur	°C	134	123	130	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	8,7
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	66
Geschwindigkeit	m/s	1,5
statischer Druck	mbar	-0,11

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	24	23	26					24
Anteil PM ₁₀	%	96,9							
Anteil PM _{2,5}	%	86,1							
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	7,4	9,5	8,2					8,4
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 13: Einzelmesswerte IHT GE 30 – Strohpellets

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 13
Zeitraum der Messungen:					26.03.2009 – 01.04.2009
Feuerstätte:					Biomassekessel IHT GE 30
Brennstoff:					Strohpellets
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					22,0
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					6,9
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	102	81	92	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	348	326	336	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	2,5	0,5	1,0	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	412	32	101	
Sauerstoff	Vol.-%	12,3	7,9	9,9	
Temperatur	°C	154	134	146	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	8,2
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	72
Geschwindigkeit	m/s	1,6
statischer Druck	mbar	-0,16

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	65	69	59					64
Anteil PM ₁₀	%	96,5	97,0	97,4					96,9
Anteil PM _{2,5}	%	87,6	88,1	90,1					88,6
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	107	106	104					105
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	14,7							
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,189							
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	70,9	70,1	60,3					67,1
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	4,80	9,12	6,72					6,88
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,713							
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	0,021							

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 14: Einzelmesswerte IHT GE 30 – Strohpellets K

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 14
Zeitraum der Messungen:					02.04.2009
Feuerstätte:					Biomassekessel IHT GE 30
Brennstoff:					Strohpellets K
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					23,3
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					8,8
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	138	130	134	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	330	306	322	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	1,9	1,0	1,5	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	55	35	44	
Sauerstoff	Vol.-%	8,6	8,1	8,4	
Temperatur	°C	151	145	148	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	9,3
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	65
Geschwindigkeit	m/s	1,5
statischer Druck	mbar	-0,14

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	72	65	49					62
Anteil PM ₁₀	%								
Anteil PM _{2,5}	%								
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 15: Einzelmesswerte IHT GE 30 – Spreupellets

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 15
Zeitraum der Messungen:					26.04.2010 – 27.04.2010
Feuerstätte:					Biomassekessel IHT GE 30
Brennstoff:					Spreupellets
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					26,5
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					9,1
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	95	80	89	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	338	284	303	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	16,0	1,0	4,8	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	469	23	153	
Sauerstoff	Vol.-%	7,5	5,4	6,2	
Temperatur	°C	129	116	123	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	10,1
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	59
Geschwindigkeit	m/s	1,3
statischer Druck	mbar	-0,12

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	29	36	32					32
Anteil PM ₁₀	%	96,1	97,7	96,7					96,8
Anteil PM _{2,5}	%	86,5	89,1	89,1					88,2
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	36,9	37,5	37,3					37,2
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

Tabelle C 16: Einzelmesswerte IHT GE 30 – Holzpellets

Konzentrationen von Abgasinhaltsstoffen					Blatt 16
Zeitraum der Messungen:					29.04.2010
Feuerstätte:					Biomassekessel IHT GE 30
Brennstoff:					Holzpellets
Mittelwert Kesselleistung im Versuchszeitraum in KW					28,1
Mittelwert Brennstoffverbrauch im Versuchszeitraum in kg/h					7,9
Halbstundenmittelwerte (HMW)					
Komponente	Dimension	Maximal	Minimal	Mittelwert	
Schwefeldioxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	3,6	1,8	2,5	
Stickstoffoxide	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	95	90	93	
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	2,5	0,5	1,1	
Kohlenmonoxid	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	100	42	62	
Sauerstoff	Vol.-%	8,4	6,6	7,5	
Temperatur	°C	143	136	139	

Abgasrandbedingungen		
Komponente	Dimension	Mittelwerte MW
Feuchte	Vol.-%	9,1
Volumenstrom (i.N.)	m ³ /h	67
Geschwindigkeit	m/s	1,6
statischer Druck	mbar	-0,11

Komponente	Dimension	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Mittelwert
Gesamtstaub	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	40	27	20					29
Anteil PM ₁₀	%								
Anteil PM _{2,5}	%								
Chlorwasserstoff	mg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)	18,9	14,6	12,2					15,2
Summe PAH	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzo(a)pyren	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Summe BTX	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
Benzol	µg/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCDD/F *	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								
PCB	ng/m ³ (13 Vol.-% O ₂)								

* nach NATO/CCMS

**Herausgegeben
durch das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Immissionsschutz**

Impressum

ISSN 0941-7281

Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt - Halle (2013) Heft 11:

Autoren / Redaktion:

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
DI Wolf-Dieter Kalkoff
DC Birk Maiwald
DI (FH) Stephan Wolf

Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau
Dr. Johann Rumpler

Untersuchungszeitraum: 2005-2010

Herausgeber und Bezug:

PSF 200 841, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt,
06009 Halle, Sitz: Reideburger Str. 47, 06116 Halle, Telefon (0345) 5704 0
E-mail: poststelle@lau.mlu.sachsen-anhalt.de

Diese Schriftenreihe wird kostenlos abgegeben und darf nicht verkauft werden. Der Nachdruck bedarf der Genehmigung.

Die Autoren sind für den fachlichen Inhalt ihrer Beiträge selbst verantwortlich. Die von ihnen vertretenen Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Mai 2013

Diese Schrift darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben politischer Informationen oder Werbemittel. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Schrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner Gruppen verstanden werden könnte.

ISSN 0941-7281

